UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL QUÍMICA Y AMBIENTAL

VALPARAÍSO-CHILE

"APLICACIÓN DE CAMPOS ELECTRICOS MODERADOS Y MICROPERFORACION LÁSER-CO_2 PARA LA ACELERACIÓN DEL PROCESO DE SALADO DE SALMON ATLANTICO (*SALMO SALAR)*"

JAVIER IGNACIO OLIVARES REBOLLEDO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL QUÍMICO

PROFESOR GUÍA: Dr. Ricardo Simpson Rivera.

PROFESOR CORREFERENTE: Dra. Aldonza Jaques Solís.

PROFESOR CORREFERENTE: MCs. Helena Núñez Andrade

Noviembre 2018

"Quisiera dedicar este trabajo a Dios, no porque profese una religión, sino porque de pequeño mi padre me consagro ante El. Esto es un pequeño acto para poder corresponder a su gran fe y su amor incondicional a mí.

También a Teresa, quien representa para mí la amabilidad, fortaleza, fuerza ante la adversidad, generosidad, preocupación, la fe, las enseñanzas secretas de la vida y los sueños.

Resumen.

El salmón salar o salmón atlántico de la familia de los salmónidos, distribuido por el norte del océano Atlántico, tanto en la costa este de Norteamérica como en la costa de Europa. Apetecido por su sabor representa una industria fuerte a nivel nacional.

Las distintas técnicas de conservación de alimentos han permitido la distribución de este producto a escala mundial. El salado manual, salado por inyección o por inmersión son técnicas de conservación que han sido estudiados por muchos años logrando procesos seguros y confiables en cuanto a calidad e inocuidad de los alimentos. El problema que presentan estas tecnologías son los altos tiempos de tratamiento cercanos a las 48 h.

Recientes investigaciones han demostrado que los campos eléctricos moderados han aumentado el coeficiente de difusión y por ende mejorados los tiempos de proceso. Las microperforaciones también han sido estudiadas, aunque en menor medida y no han sido ampliamente aplicadas en la industria alimentaria.

El objetivo de esta investigación es estudiar el efecto combinado que producen las microperforaciones producida por el láser de CO2 y la aplicación de campos eléctricos moderados en el salado de salmón atlántico.

La metodología del trabajo considero muestras de 40 mm de diámetro y 7 mm de espesor a fin de modelar los procesos de difusión como una placa finita. Estas muestras fueron microperforadas en un arreglo de puntos de 8x8 con una separación de 5mm entre cada perforación. El diámetro promedio de poros fue de $233{,}5\ \mu m \pm 17{,}5\ \mu m$. El proceso de salado se llevó a cabo a una concentración de salmuera al 6% con una temperatura de 6°C. Se realizaron mediciones de porcentaje de sal y humedad a diferentes grados de microperforación de las muestras (50 % y 100% del espesor) las mediciones fueron realizadas en los tiempos 0, 0,5; 1; 1,5; 2; 4; 8; 12 y 24. Se determinó el coeficiente de difusión efectivo utilizando la segunda ley de Fick y el caso anómalo.

Los principales resultados fueron una reducción en un 66% del tiempo de salado cuando se aplican en conjunto las microperforaciones al 100% de profundidad y campo eléctrico. Se obtuvieron valores de coeficiente de difusión efectivo en el rango de $4{,}07 * 10^{-8}$ a $1{,}05 * 10^{-7}\ m^2/s$ lo que concuerda con los valores reportados por la literatura. No se reportaron cambios atribuibles a los campos eléctricos o a las microperforaciones en la humedad de las muestras. Se determinó que los procesos de difusión en el salmón son del tipo subdifusivo al tener coeficientes de cinética fraccional menores a uno.

El uso de microperforaciones y campos eléctricos moderados en conjunto producen una significativa aceleración en el proceso de salado de salmón atlántico, disminuyendo los tiempos de salado y aumentando la concentración máxima de sal en el producto.

Tabla de contenido

Resumen. 3
Agradecimientos. 5
Introducción 6
Objetivos. 8
Objetivo General 8
Objetivos Específicos 8
Antecedentes. 9
Materia Prima. 9
Mercado del Salmon. 12
Técnicas de salado y Conservación de Alimentos.....13
Materiales y Métodos. 26
Resultados y Discusión. 33
Análisis. 49
Conclusiones y Recomendaciones.....54
Bibliografía. 55
Anexos.....55

Agradecimientos.

Los primeros agradecimientos se los doy a mis padres, Patricio Emilio Olivares Medel y Claudia Andrea Rebolledo Figueroa, quienes sin su determinación, cuidados e infinito amor por su familia me han permitido estar donde estoy, finalizando mi etapa en la vida universitaria.

A mi hermano a quien amo, que muchas veces me saco fuerzas para continuar con un camino que el muy pronto emprenderá.

A mis abuelos, Javier y Teresa quienes me cuidaron, me amaron y me sobrealimentaron cuando pequeño.

A mis otros abuelos (porque tengo la suerte de contar con todo ellos), Daniel y Eliana, cuya preocupación, amor y educación en valores cristianos formaron una personalidad amable y compasiva por la cual estoy sumamente agradecido.

A mis tíos y primos y primas, en particular a mi tía Marcela quien siempre se ha preocupado por mí, a mi tío Cristian porque me enseño el don de la paciencia y a mi tío Mauricio quien tiene la inigualable y subestimada habilidad de hacer reír a la gente.

A mi tío Marcelo y tía Cristina por todos los veranos en la playa, comiendo y jugando cartas, son momentos muy felices que tendré por siempre.

A mi tío Rodrigo por el valor del orden y la perseverancia, a mi tía Maritza por la paciencia con mi tío y gran sentido de hacer lo correcto.

Agradecer a mis compañeros y amigos que siempre tuvieron un palabra de aliento o sonrisa para los momentos difíciles, en particular a Nicolas, Francisca, Francisco, Katherine, Diego, Katherina, Katherine, Reiner, Maximiliano, Angela, Manuel Danae, Constanza, Pedro, Gonzalo, Robinson con quienes me alegra pensar que forme lazos fuertes y duraderos,

A dos mujeres fantásticas, en primer lugar, a la profesora Aldonza Jaques a quien, a pesar de todo, le tengo mucho cariño y admiración, a quien agradezco sinceramente el consejo justo en el momento justo para que este momento se concrete.

En segundo lugar, a la profesora Helena Nuñez, con quien trabajar no parecía trabajo, por todas veces que interrumpí en su oficina por ayuda, quien nunca se complico con un error de mi parte, quien siempre me ayudo independiente de que tuviera miles de cosas que hacer.

Al profesor Cristian Ramírez y la profesora Marlene Pinto, dos ejemplos muy claros que los protones andan dando vuelta por el mundo y que es importante mantenerlos cerca.

A todo el laboratorio de alimentos y procesos bioquímicos por la buena onda y ambiente de camaradería que se formó.

Al proyecto fondecyt 1181270 por el financiamiento y la oportunidad de aportar mi grano de arena al desarrollo tecnológico del país.

Finalmente quisiera agradecerme a mí mismo, por el esfuerzo, la perseverancia, las risas, las lágrimas y la valentía de concluir una carrera universitaria en una de las mas prestigiosas universidad de ingeniera de Sudamérica.

Introducción

El salmón salar o salmón atlántico es una especie de pez eurihalino (marino y de agua dulce) de la familia de los salmónidos, distribuido por el norte del océano Atlántico, tanto en la costa este de Norteamérica como en la costa de Europa, así como por el océano Ártico, el mar Báltico, el mar Mediterráneo y el mar Negro (Page, L. M. y B. M. Burr, 1991.). Los ejemplares de estos peces pueden llegar a medir hasta 150 cm de longitud máxima (Robins, C. R. y G. C. Ray, 1986.).

El salado, a un método destinado a preservar los alimentos, de forma que se encuentren disponibles para el consumo durante un mayor tiempo. El efecto de la salazón es la deshidratación parcial de los alimentos, el refuerzo del sabor y la inhibición de determinadas bacterias. El salado se aplica a frutas y vegetales, sin embargo, lo frecuente es aplicar el método en alimentos tales como carnes o pescados.

Existen diferentes técnicas de salado, tales como el salado por inyección y el salado por inmersión. El primero consiste en una inyección de la solución salina por medio de aguas directamente en la matriz del alimento y un masajeo de la zona para su mejor difusión. El segundo consiste en sumergir los alimentos en una solución salina por un tiempo determinado, la diferencia de concentraciones de sal dentro y fuera del alimento actúan como fuerza impulsora para que ocurra la difusión. Un inconveniente de este proceso, corresponde a los extensos tiempos de tratamiento, en general los tiempos de salado de alimentos tienen una duración entre las 20 y 24 horas, por lo tanto, la mejora de los procesos de salado se centra principalmente en la reducción de los tiempos de procesado, aplicando técnicas alternativas como la inyección directa de salmuera (Thorarinsdottir et al., 2010), la combinación del salado y descongelación simultanea (Barat et al., 2004), la utilización de la impregnación a vacío (Chiralt et al., 2001) y la aplicación de campos eléctricos moderados (Quiroz; 2015; Simpson et al; 2018)

Actualmente en la industria se ha comenzado a discutir la aplicación de tratamiento con campos eléctrico. Sensoy y Sastry (2004) definieron los campos eléctricos moderados como un proceso de permeabilización controlada, posiblemente reversible, caracterizada por el uso de campos eléctricos (típicamente de 1 a 100 V/cm). Muchos autores han estudiado el uso de campos eléctricos moderados para aumentar la transferencia de masa en matrices alimentarias (Simpson et al.,2015; Moreno et al., 2011; 2012). Las aplicaciones potenciales de esta técnica son numerosas, e incluyen evaporación, deshidratación, pasteurización y esterilización debido a un efecto no térmico denominado electroporación. El efecto llamado electroporación consiste en un aumento significativo de la conductividad eléctrica y la permeabilidad de la membrana plasmática celular mediante un campo eléctrico aplicado externamente (Sensoy & Sastry, 2004; Simpson et al ,2015).

Láser (acrónimo de amplificación de luz por emisión de radiación estimulada) genera haces de luz monocromática, coherente y direccional que puede unificarse sobre pequeños puntos lo que produce una destrucción en el punto sin daños circundantes (Tanzi and others 2003; Ferraz and others 2007).

Dentro de los equipos laser, el láser de dióxido de carbono es uno de los más utilizados, ya que los haces emitidos por el láser son fuertemente absorbidos por el agua (Bilanski y Ferraz 1991; Ferraz y otros 2007). Esto lo hace idóneo para trabajar con material con alto contenido de agua como son los alimentos.

Las aplicaciones del láser de CO2 no han sido ampliamente estudiadas, y se tiene pocos antecedentes de su aplicación en alimentos. Su uso en el pelado de papas fue reportado por primera vez por *Bilanski y Ferraz* (1991). Más recientemente se ha utilizado para grabar identificaciones de productos en la superficie de paltas y pomelos (Sood y otros 2009), y cáscaras de huevo (Chen y otros 2009a, 2009b), para crear canales para una penetración más rápida del agua de forma de acelerar el templado en el trigo (Hou y otros 2009), y para acelerar la difusión en el proceso de impregnación en arándanos (Fujimaru et a., 2012). Aunque estos estudios destacan el uso potencial de los láseres de CO2, se han reportado pocas aplicaciones en la industria alimentaria.

La aplicación de campo eléctrico moderado acoplado al proceso de salado de salmón salar ha demostrado ser efectivos en la reducción del tiempo de salado (Simpson, et al., 2018; Quiroz, 2016; Cavada 2017) sin embargo, el uso de láser de CO2, ya sea en conjunto o separado de los campos eléctricos, aún no ha sido investigado.

Objetivos.

Objetivo General

- Estudiar y determinar el efecto de la aplicación de campos eléctricos moderados y microperforaciones laser en el proceso de salado por inmersión de Salmon atlántico.

Objetivos Específicos

- Diseño de experimento de salado por inmersión con distintos porcentajes de perforación en los filetes de salmón atlántico.
- Evaluar la reducción de tiempo en el proceso de salado producto de los efectos combinados de la aplicación de campos eléctricos moderados y microperforaciones laser.
- Determinar el coeficiente de difusión efectivo durante el salado del salmón a través de modelos matemáticos derivados de la segunda ley de Fick.

Antecedentes.

Materia Prima.

Salmon Atlántico.

Dentro de la familia salmónida, el salmón atlántico se presenta en forma natural por todos los océanos del norte exceptuando el pacífico; son nativos de aguas dulces y océanos fríos, no obstante, ha desarrollado una gran adaptabilidad a escenarios distinto, siendo esta una de las razones por la cual sea un producto tan comercializado a nivel mundial.

En cuanto a su disposición morfológica, en ejemplares adultos miden entre 60 cm de longitud hasta 150 cm, y pesan en promedio 4,7 kilogramos para cuando están en condiciones de proceso, su forma de crianza en las acuiculturas es una etapa inicial de crecimiento en agua dulce y posteriormente una etapa de engorde en agua salada en granjas de cultivo (Figura 1).

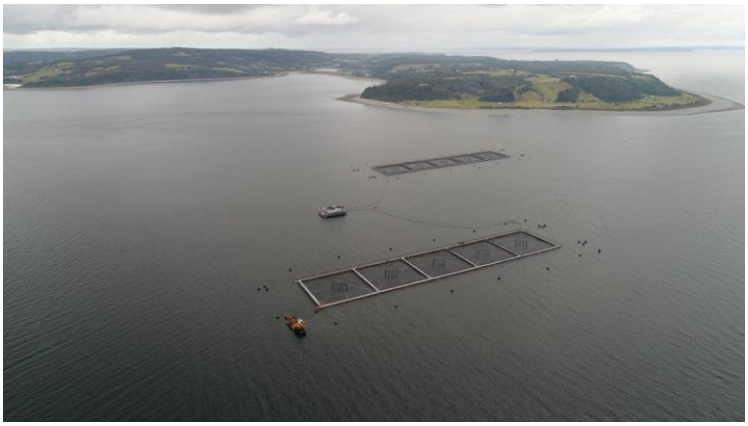


Figura 1 Granjas de Cultivo en Remansos de Rio
Fuente: Asociación de la industria de Salmón de Chile, SalmonChile

En la figura 2 es posible observar los países que actualmente se dedican a la crianza y exportación de salmón en todas sus variedades.

Figura 2 Países productores de Salmón.
Fuente: Asociación de la industria de Salmón de Chile, SalmonChile

Aunque varios de los especímenes de la familia de los salmónido fueron utilizadas para el acuicultivo a través del tiempo, fue el salmón atlántico el más idóneo pues posee una resistencia elevada a los cambios de temperatura y salinidad.

Además de lo señalado el salmón atlántico cuenta con una ventaja superior a sus pares y es que puede ser cultivado en cualquier época del año (Figura 3), de esta forma se produce un proceso continuo donde la estacionalidad no es un factor por determinar en la estimación de la oferta, lo cual esta normado y permitido por la legislación actual chilena.

	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
Salmón Atlántico	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
Salmón Coho			x	x	xxx	xxx	xxx	x				
Salmón Rey	x	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	x					
Trucha	x	x	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	x	x

x = Período Bajo
xxx = Período Alto

Figura 3 Periodo de Cosecha de salmónidos.
Fuente: Asociación de la industria de Salmón de Chile, SalmonChile.

También se destaca la información nutricional del salmón salar (Tabla 1), la cual contiene aceites esenciales como omega-3 y omega-6 que han demostrado beneficiosos para una buena salud.

Tabla 1 Información nutricional del Salmon Salar.

Valor Nutricional por cada 100g de salmón sin espinas (*)	
Energía	167 kcal
Proteínas (g)	18,4
Grasas (g)	12
* G. saturadas (g)	2,6
* G. monoinsaturadas (g)	5
* G. poliinsaturadas (g)	3,28
Omega 3 (n-3)	2,25
Omega 6 (n-6)	0,52
Colesterol (mg)	70
Carbohidratos	0
Vitaminas	
B1 o tiamina (mg)	0,23
B2 o riboflavina (mg)	0,1
B3 o niacina	9,2
B6 o piridoxina (mg)	1
B9 o ácido fólico (µg)	26
B12 o cianocobalamina (µg)	6,2
Vitamina A (µg)	30
Vitamina D (µg)	12,5
Vitamina E (mg)	1,3
Minerales	
Calcio (mg)	20
Fósforo (mg)	200
Hierro (mg)	0,8
Magnesio (mg)	24
Potasio (mg)	330
Zinc (mg)	45
Selenio (µg)	26

Fuente: Asociación de la industria de Salmón de Chile, SalmonChile.

Cloruro de sodio.

Conocido como sal de mesa o sal común es un compuesto iónico de estructura cristalina cubica, reconocido por sus propiedades coligativas, su uso es bastante extendido en la industria química y de alimento.

En particular por sus beneficios en los descensos crioscópicos de soluciones, obtención del cloro para el PVC y preservación de alimentos dado su poder osmótico. Una de las fuentes más extensas de Cloruro de Sodio es el mar y de las minas ubicadas en diferentes partes del planeta, u ingesta es esencial en la mayor parte de las especies del planeta.

Este insumo es extraído regularmente de dos formas, una es a través de la evaporación de salmueras del océano, mares, lagos, salares o cualquier depósito de agua salada, y en segundo lugar de la explotación de yacimientos de halita. En el año 2017 la demanda mundial de cloruro de sodio fue aproximadamente de 68 millones de toneladas, siendo EE. UU. responsable de 12 millones seguido de China y Japón. (trademap, 2018)

Mercado del Salmon.

El salmón salar es un producto que tuvo un aumento explosivo en la demanda mundial en los últimos años (Trademap ,2018) y tiene como principales importadores Suecia, Estados unidos, Polonia y Brasil. En 2017 se importaron más de 1.400.00 toneladas de Salmón atlántico y Pacifico los cuales fueron transados en precios promedios de 7000 dólares por tonelada (Trademap, 2018). Además, el ritmo sostenido del crecimiento de la demanda asegura un futuro económico de este producto, ya en el año 2016 el crecimiento en las importaciones de productos salmónidos fue de en promedio de un 12% (Trademap, 2018).

Actualmente Chile se encuentra entre los principales 5 exportadores da salmón, quedando en el 2017 en el puesto número 3. Solo el año pasado se exporto un total de 94.200 toneladas a mercados latinos como Brasil y cerca de 71.000 toneladas a China siendo superado en volúmenes de exportación por Noruega, primer país productor de Salmones a nivel mundial. (trademap, 2018)

Actualmente en chile se producen cerca de un millón de toneladas de salmón atlántico al año como se puede ver en la tabla 2.

Tabla 2 Producción anual de salmón atlántico.

ESPECIE	2013	2014	2015	2016	2017	Total.
Salmón Atlántico (toneladas)	673.908	878.140	934.377	841.764	966.305	4.294.494

Fuente: Direcom,2018

En cuanto a las exportaciones, estas representan casi un total, solo en 2017, de 1.063, 4 millones de dólares FOB representando un 3% de las exportaciones totales de chile y quinto como producto de exportación detrás de la exportación de cobre y producto relacionados y la industria de la celulosa.

Mercado de productos ahumados.

Es importante destacar el mercado de los productos ahumado, debido a que el salado es un pretramiento para el ahumado. El ahumado consiste en exponer alimentos a una fuente de humo proveniente de fuegos realizados de maderas de poco nivel de resina. Este proceso, además de dar sabores ahumados sirve como conservador alargando el tiempo de conservación de los alimentos.

En particular, el ahumado confiere características a los filetes de salmón que lo hace mas atractivo a los consumidores por su sabor diferenciador.

En la tabla 3 podemos observar como los productos ahumados importados principalmente por Europa y seguido de EE. UU.

Tabla 3 Importaciones totales de Salmon Ahumado.

Importadores	2013	2014	2015	2016	2017
	cantidad importada, Toneladas	cantidad importada, Toneladas	cantidad importada, Toneladas	cantidad importada, Toneladas	cantidad importada, Toneladas
Mundo	101.237	103.881	111.029	120.184	115.892
Alemania	39.112	38.560	42.406	46.635	41.079
Italia	12.418	16.464	16.629	17.029	15.448
Francia	8.696	7.824	8.479	8.028	8.228
Bélgica	6.475	6.045	6.289	6.971	6.969
EE. UU	5.279	5.324	5.695	5.279	5.312

Fuente: Trademap, 2018

Técnicas de salado y Conservación de Alimentos.

. El salado o salazón paso a ser una de las técnicas más utilizadas y cuyo uso sigue vigente en la actualidad, está más enfocado a la conservación de productos cárnicos y pescados, siendo menos utilizado en vegetales y frutas (Panagou,2006). Los productos obtenidos de este proceso son altos en calidad, cuando se trata de productos cárnicos y pescado. Actualmente estas tecnologías siguen en investigación buscando cada vez resultados con un menor uso de energía. Se ha logrado la reducción de los tiempos del proceso, sin embargo, no se han alcanzado los estándares de calidad necesarios en vegetales y frutas puesto que en la salazón influye en las propiedades organolépticas de los productos.

Las principales desventajas de los procesos de salazon son la dificultad de controlar los flujos de sal y agua en el proceso, además de requerir altos tiempos de operación dado que es un proceso lento. Su uso radica en el potencial osmótico que posee la sal en los productos, permitiendo una deshidratación parcial de los alimentos, lo que implica una menor disponibilidad de agua para el desarrollo microbiano y que trae como consecuencia prolongar la vida útil de los alimentos a través del retraso de las reacciones bioquímicas que producen la descomposición.

Aun así, no todos los microorganismos reaccionan de la misma forma a la presencia del cloruro de sodio (ver tabla 4) se detalla la inhibición a distintas concentraciones de sal:

Tabla 4 Nivel de Sal al cual se inhibe los microorganismos.

NaCl [%]	Microorganismos
5	Clostidium butilinum tipo E; pseudomos flurescens
6	Shigella; klebsiella.
8	E. coli; bacilus cereus; clostidium botulinum Tipo A; parahaemolyticus.
10	clostidium botulinum Tipo B; Vibrio parahaemolyticus
15	Bacilus Subtilis; streptococci
18	Staphylocous Aureus.
25	Algunas especies de penicillium y Asperfillus.

Fuente: Cavada, 2017.

Aunque el principal motivo porque se elige la sal como agente conservante es su capacidad de reducción de actividad microbiana, también se elige por sus capacidades de realce de sabores. Esto se adecua al aumento en la demanda de productos conservados con una mayor calidad y por ende es necesario que, luego de exponerse a un proceso de conservación, el sabor, olor, color sea lo más parecido al natural o apetecible para el consumidor.

Los productos como el salmón atlántico mantienen un nivel de NaCl alto. Descartando la opción de filetes frescos de salmón, el salmón salado por estos procesos es uno de los más apetecidos a nivel mundial, al igual que el salmón ahumado y su contenido de sal como máximo puede ser 3,9%, pero en promedio el contenido bordea los 3,5 gr de sal por cada 100 gr de salmón.

Actualmente el procesamiento del salmón no dista mucho de sus orígenes, esto es aplicar una capa de sal manualmente a los filetes para luego pasar a una etapa de maduración donde la actividad de agua se reduce considerablemente, sin embargo, el proceso de esta manera puede tardar entre 2 a 3 días. La forma por la cual funciona esta técnica tiene que ver con la disolución parcial de la sal depositada en la superficie del producto, lo que de forma progresiva activa los mecanismos de osmosis y difusión permitiendo penetrar a la matriz alimenticia.

Figura 4 Salado manual de Salmon
Fuente: SalmonChile S.A.

Además del salado manual, existe otras técnicas de salado como por ejemplo el salado por inmersión, el cual consiste básicamente en sumergir los filetes de salmón en una disolución de sal, para que de esta forma la sal difunda naturalmente en la materia prima. Esta técnica, al igual que el salado manual o por capas, tiene largos periodos de procesos, no obstante, se han demostrado mejoras en cuanto a la uniformidad del salado en bacalao, esto puede deberse a una mayor área de contacto que no se produce en el salado manual producto de estar toda la sal concentrada en una sección del producto y no rodeada como es el caso del salado por inmersión.

Como se puede apreciar, el factor limitante para estos procesos es el tiempo que se utiliza para llegar a los resultados deseados, es por esto por lo que en la actualidad el foco de las investigaciones e innovaciones viene a optimizar el factor tiempo en los procesos. Además, estas nuevas técnicas

de salado buscan obtener un producto con una homogeneidad en cuanto al salado con el objetivo final de que sea adecuado a las exigencias del consumidor. Estas nuevas tecnologías están en proceso de estudio y a continuación se describen sus principales características, ventajas y desventajas.

Salado por inyección.

En esta técnica de salado se utiliza múltiples agujas para inyectar una solución de agua, sal y en algunos casos fosfatos, de forma continua y a presión a través de la matriz cárnica del producto. En general los inyectores de salmuera a baja presión trabajan con bombas inyectoras, esto permite una inyección continua y una presión constante, la solución es impulsada como un chorro continuo en el tejido muscular a través de los agujeros que posee las agujas. Luego de esto la sal migra por diferencias osmóticas y de concentración desde el punto donde se inyecta la salmuera al resto del tejido. Se acostumbra en conjunto con la inyección de salmuera un tratamiento físico de la carne (masajeo) el cual consiste en golpear la carne para que de esta forma exista una mayor difusión de la salmuera inyectada en todo el tejido. Algunas ventajas de este método tienen que con una mayor distribución de la sal en la matriz alimenticia lo cual es una característica deseada en el producto final, no obstante, parte de sus desventajas son las marcas y el aspecto visual que dejan las agujas y el posterior tratamiento físico lo que puede ocasionar pérdidas de textura y color en el producto , lo que presenta un inconveniente a la hora de ser ofrecido al consumidor quien busca un producto muy parecido al que obtendría fresco.

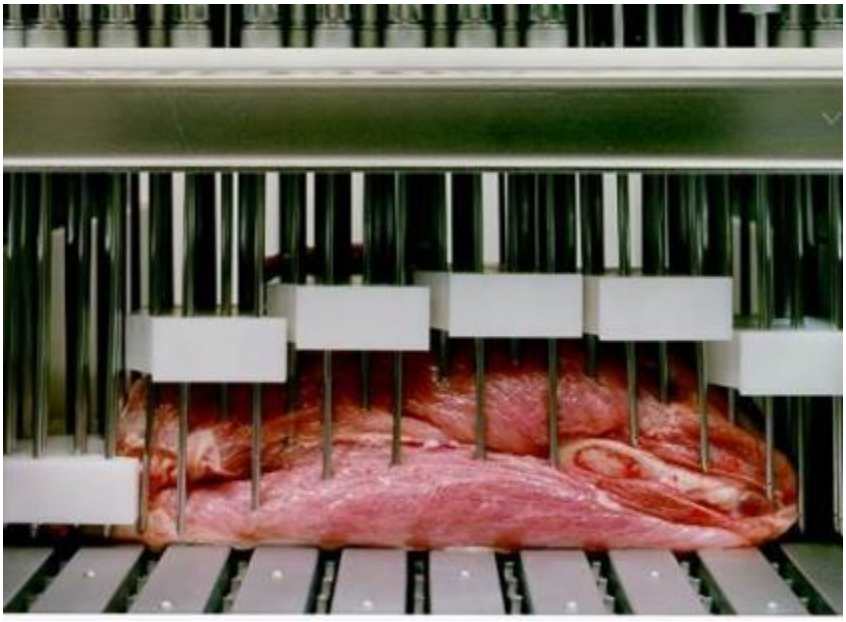


Figura 5 Proceso de salado por inyección en Cerdo.

Se tiene que el salado por inyección es un proceso ya estudiado y probado por la industria del salmón, no obstante, se considera una técnica que requiere investigación y desarrollo para superar las desventajas mencionadas. Entre las innovaciones y estudios que se están haciendo de esta tecnología se destacan la variación de parámetros técnicos como son la presión de entrada, los porcentajes de sal, el flujo, etc.

Campos eléctricos moderados (MEF)

Cuando una fuerza eléctrica interactúa en un sistema determinado se considera que genera un campo físico al cual se denomina campo eléctrico. Dicho de otra manera, cuando una carga puntual (dinámica o en reposo) llamada "q" , la cual también puede ser llamada carga de prueba o carga testigo, es introducida a una región del espacio definida y delimitada, existe un campo eléctrico si es afectada por la acción de una fuerza eléctrica.

Este campo estará representado por modelos matemáticos que describen la interacción de cuerpos y sistemas de naturaleza eléctrica. Cuando la determinada carga eléctrica de valor "q" sufre los efectos de la fuerza eléctrica denominada F se genera un campo vectorial representado por la siguiente ecuación:

$$F = q * E \qquad [1]$$

El campo eléctrico generado puede ser representado visual y geométricamente como líneas de campos con la particularidad que en cualquier punto del campo vectorial es tangente a dichas líneas, si esto se cumple se denominan “líneas de campo”. La interpretación matemática de “líneas de campo “son las curvas de las integrales de superficie del campo vectorial. Las líneas de campo son útiles para poder visualizar de mejor manera los efectos del campo eléctrico y pueden ser tantas como sea necesario para obtener una mejor visualización de los efectos.

Entonces si tenemos cargas en movimiento en la misma dirección tendremos un campo continúo puesto que las líneas de campo se acoplarán. Una de las propiedades de las líneas de campo es que no pueden cortarse, es decir, que en un mismo punto del espacio se tiene un único valor de intensidad de campo eléctrico E. Uno de los efectos de los campos eléctricos más útiles es cuando existen dos cargas en placas metálicas y paralelas las cuales se encuentran conectadas a un generador; de esta forma, por cada placa circulara una carga eléctrica de igual magnitud, pero diferente sentido, es decir, de signos contrarios y en el espacio que existe entre ambas placas se genera un campo eléctrico uniforme para el caso de un generador eléctrico continuo. Si el generador es de corriente alterna, el campo cambiara de sentido según lo haga la fuente. (ver fig. 6)

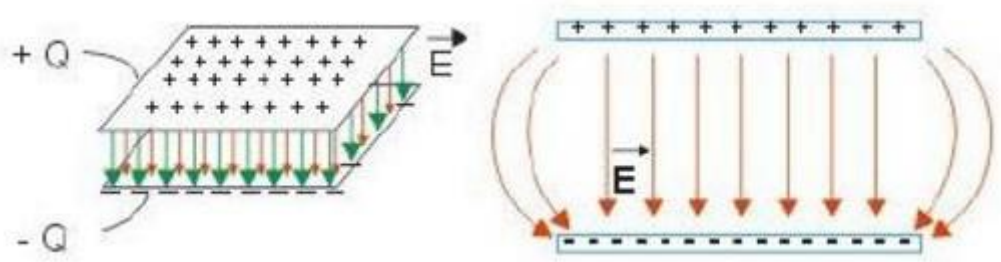


Figura 6 Diagrama de un campo uniforme entre placas paralelas.

Al tener esta disposición es posible evaluar los efectos del campo eléctrico en una sola dirección lo que facilita el análisis fenomenológico ya que es solo unidireccional. Entonces y según la ecuación 2 se tiene que las unidades del campo eléctrico en el sistema internacional serian Newton por columbio (N/C) lo cual mediante simplificaciones queda en Voltios por metro, dado que para un diferencial de potencial fijo el campo eléctrico se cuantifica como la diferencia de potencial eléctrico, es decir, el voltaje sobre la distancia que existe entre ambas placas como se aprecia en la ecuación 2.

$$\vec{E} = \frac{F}{\dot{q}} = \frac{V}{d} \qquad [2]$$

La industria de los alimentos ha implementado la utilización de los campos eléctricos en la innovación de procesos o como pretratamiento, algunos ejemplos donde puede ser de utilidad esta tecnología son la inactivación de microorganismos, procesos de deshidratación, tratamientos térmicos, etc. Entra las técnicas que más destacan para este fin son los PEF (*Pulse Electric Field)*, MEF (*Moderate Electric Fields*) y HEVD (*High Voltaje Electric Discharges).* (ver fig. 7)

Los campos eléctricos moderados han sido generalmente utilizados en la deshidratación osmótica, a través de un proceso simple, el cual consiste en hacer pasar una corriente eléctrica través del alimento, lo que genera una permeabilidad constante en las paredes celulares del producto y en consecuencia facilitar la migración del agua hacia la solución hipertónica en la que se encuentra sumergid0 el producto. Esta técnica ha presentado una versatilidad bastante útil, dado que, al hacer transitar una corriente por un alimento, existe un aumento de temperatura al interior de este producto de la resistencia propia que genera el paso de la corriente. Este efecto es llamado calentamiento óhmico o calefacción joule.

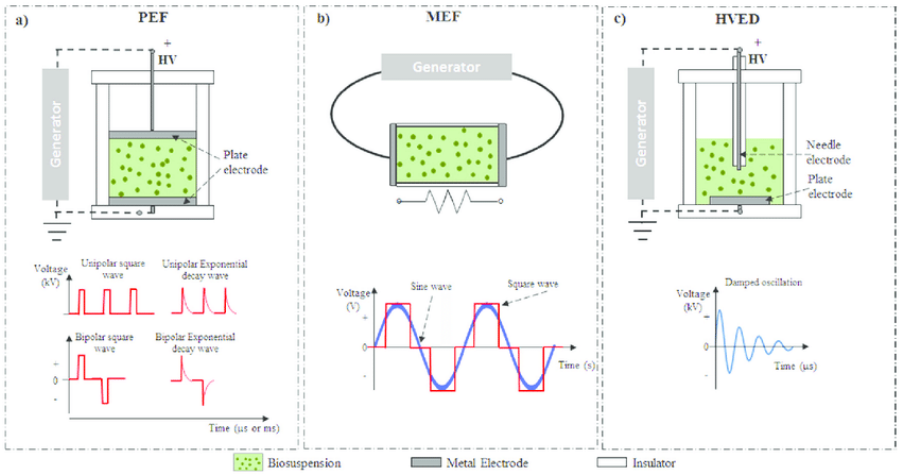


Figura 7 Distintas técnicas que involucran corriente eléctrica.
Fuente: Cavada,2017

El calentamiento óhmico tiene aplicaciones potenciales, pero aún no ha logrado un interés para aplicarlo de manera industrial. Las distintas aplicaciones que el calentamiento óhmico puede tener son el escaldado, esterilización, procesamiento de materiales sensibles al calor directo,

blanqueo, descongelación y como pretratamiento para secado o extracción de solventes. También se ha demostrado el efecto del campo electico en distintas células bacterianas.

Adicionalmente al efecto del calentamiento óhmico, la literatura reporta otro efecto del tránsito de la corriente eléctrica a través de la matriz del alimento: la electroporación.

La electroporación se describe como la formación de poros en la membrana celular, este es un efecto continuo y reversible, lo cual no supone un cambio en las propiedades física del alimento y deja de generarse cuando se corta el paso de la corriente (ver fig. 8). Este efecto permite una mayor velocidad en la transferencia de masa en el producto dada una mayor permeabilidad en la membrana celular.

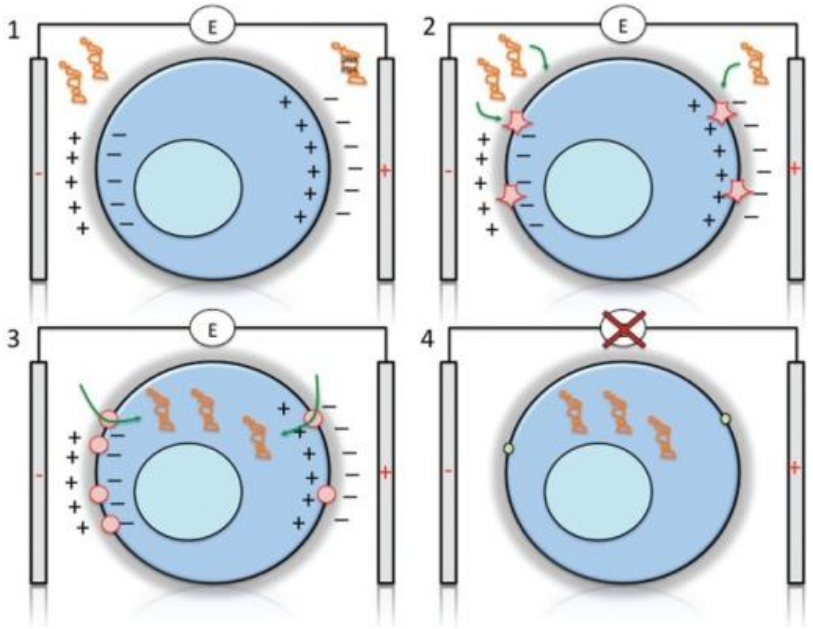


Figura 8 Efecto del campo eléctrico en las células.
Fuente: Luft C, Ketteler R - J Biomol Screen (2015)

El proceso de electroporación puede ser dividido en tres etapas, la primera consiste en la inmersión del producto en la solución hipertónica o de interés en el cual los iones dentro de la célula se encuentran en reposo, en segundo lugar, se aplica el campo eléctrico moderado lo que provoca la polarización de estos iones lo cual desestabiliza la bicapa fosfolipídica y produce los denominados poros, permitiendo así el paso de solutos del exterior o la salida de agua desde el interior; la tercera etapa y final es cuando cesa el tránsito de la corriente, los iones vuelven a su estado natural revirtiendo el efecto de electroporación pero con la diferencia que el soluto ya ingreso.

Esta tecnología ha mostrado resultados prometedores como por ejemplo en el caso de la deshidratación osmótica de fresas y manzanas (Moreno et al, 2011; Moreno et al. 2012).

Adicionalmente se ha investigado los mecanismos de difusión en manzanas *Granny Smith* (Simpson et al,2015) las cuales fueron expuestas a campos eléctricos variables. Se obtuvo que, el modelo basado en la segunda ley de Fick, valores de coeficientes de difusión efectivas dentro de los rangos que informa la literatura, además, los resultados experimentales evidenciaron un aumento

en el coeficiente de difusión efectivo conforme se aumentaba la intensidad del campo eléctrico aplicado.

Las investigaciones más recientes (Núñez 2013, Quiroz. 2016) sugieren la opción de acelerar el proceso de salado, a través de los campos eléctricos moderado. Los resultados de las investigaciones demostraron que al aplicar el campo eléctrico se reduce en un 50% aproximadamente el tiempo de salado por inmersión en comparación con una muestra control, además de un aumento en 20% de la concentración de sal de las muestras.

Estos resultados en conjunto perfilan el acoplamiento de campos eléctricos moderados como una forma de reducción de tiempo lo que podría considerarse una optimización del proceso de salado o una forma de pretratamiento para una mayor calidad de producto en menor tiempo.

Microperforaciones y Laser de Co2.

El láser es un acrónimo de "*light amplification by stimulated emission of radiation"* que en español se traduce como luz amplificada estimulada por emisión de radiación, es decir, es un haz de luz concentrada. Las fuentes de láser de CO2 se utilizan ampliamente para aplicaciones de microperforación dado su poder de generar una destrucción de la materia orgánica con gran precisión y un daño poco significativo al área circundante del punto de impacto, lo cual se traduce a una pérdida de peso menor al 0,4% (Tanzi, Lupton, & Alster, 2003) (Ferraz, Carlos, Mittal, Bilanski, & Abdullah, 2007).

Cuando se opera en modo pulsado, el láser de CO2 puede perforar agujeros precisos y de forma configurable según los requerimientos del proceso o las condiciones diseñadas para el experimento, en películas de plástico, papel y tejidos. Comparado con la micro perforación mecánica, el láser ofrece velocidad, flexibilidad, resolución y precisión. Usa como fuente de calor el dióxido de carbono para generar el haz de luz amplificado, es decir, que es un método gaseoso de generación de láser. La óptica láser y el software asociado al funcionamiento del equipo se encargan de dirigir el material o el rayo láser generado hacia donde hay que hacer el corte.

En algunas aplicaciones compite con el láser de fibra, aunque el láser de CO2 ha demostrado ser más eficiente energéticamente, con menor costo por pieza en grosores de material finos además de ser el más apto que los otros ofrecidos en el comercio dado que su longitud de onda (10.6 μm ., SYNRAD,2017) es fuertemente absorbido por agua de las matrices alimentarias.

El funcionamiento de este laser consiste en bombear eléctricamente una descarga de gas, la fuente eléctrica puede funcionar con corriente continua o con corriente alterna. Esta descarga estimula una mezcla de gases (el medio activo) que incluye moléculas de dióxido de carbono (alrededor del 10-20%), nitrógeno (alrededor de 10-20%), un pequeño porcentaje de hidrógeno y/o xenón y una mezcla de gases de helio. Las proporciones específicas de cada gas varían de acuerdo con el láser particular.

Concretamente, las moléculas de nitrógeno son excitadas por la descarga a un nivel vibratorio metaestable y transfieren su energía de excitación a las moléculas de CO2 al colisionar con ellas. El helio sirve para despoblar el nivel inferior del láser y eliminar el calor. Otros componentes como el hidrógeno o el vapor de agua pueden ayudar (especialmente en los láseres

de tubo sellado) a reoxidar el monóxido de carbono que se forma en la descarga y convertirlo en dióxido de carbono.

El medio activo en un láser es un conjunto de átomos o moléculas que pueden excitarse de manera que se crea una situación de inversión poblacional, es decir, la existencia en un sistema de más átomos o moléculas en un estado excitado que en estados de menor energía, y puede obtenerse radiación electromagnética mediante emisión estimulada.
Los láseres de CO2 suelen emitir a una longitud de onda de 10,6 µm, pero hay otras líneas en la región de 9-11 µm (particularmente a 9,6 µm). En la mayoría de los casos, las potencias promedio oscilan entre algunas decenas de vatios y decenas de kilovatios.

La eficiencia de conversión de potencia (ratio entre la potencia de bombeo -el poder de excitación del haz de luz- y la potencia de salida) puede ser muy superior al 10%, es decir, es más alta que la mayoría de los láseres de gas (debido a una vía de excitación particularmente favorable), también más alta que para los láseres de estado sólido bombeados con lámpara, pero inferior a muchos láseres de diodo bombeado como el de fibra o el de Nd-YAG y Nd-YVO.

Si bien todo esto resulta prometedor, son pocos los estudios que pueden afirmar de forma categórica la relación que existe entre la aplicación de microperforaciones y un aumento en la difusividad de la solución de interés a la matriz alimentaria. No obstante, se ha perfilado su utilidad en el pelado de patatas por medio de pulsos coordinados del láser (Bilanski & Ferraz, 1991) y el marcado de productos o empaques (Sood, Ference, Narciso, & Etxeberria, 2009). En los últimos años se ha utilizado la microperforación en pruebas de secado osmótico, contrastando diferentes condiciones experimentales y los resultados que arroja la muestra de control sin microperforaciones.

Si bien estos estudios han logrado demostrar la capacidad potencial de las microperforaciones de optimizar o mejorar los procesos ya existentes, su industrialización y comercialización tiene un camino más largo. No obstante, todo indica que la generación de microperforaciones podría tener un efecto favorable en el coeficiente de difusión efectivo y por ende en los tiempos de procesamiento de los productos de interés.

Difusión.

El fenómeno que se produce cuando la materia es transportada de un lugar donde existe una mayor concentración a una región donde la concentración sea menor es denominado difusión. Es, generalmente, un proceso irreversible, en el cual las partículas se introducen en un medio en que originalmente no estaban, aumentando la entropía del sistema formado por las partículas difundidas o soluto y el medio donde difunden o disuelven (Crank, 1975).

La difusión puede ser natural o forzada, y puede verse reducida o aumentada por diferentes factores como concentración, presión, temperatura, acción de agentes externos, los cuales puede aumentar o disminuir el potencial de las moléculas a difundir. Un caso claro de difusión es el que ocurre en nuestras células en donde los nutrientes deben "difundir" a través de la membrana celular para ingresar y ser utilizados en las diferentes funciones celulares, de esta forma la membrana permite el paso, siempre de mayor a menor concentración de estas moléculas. Este proceso no requiere energía adicional para funcionar, es por ello por lo que se denominara una difusión natural, y dada esta particularidad es ampliamente usado en el intercambio intercelular.

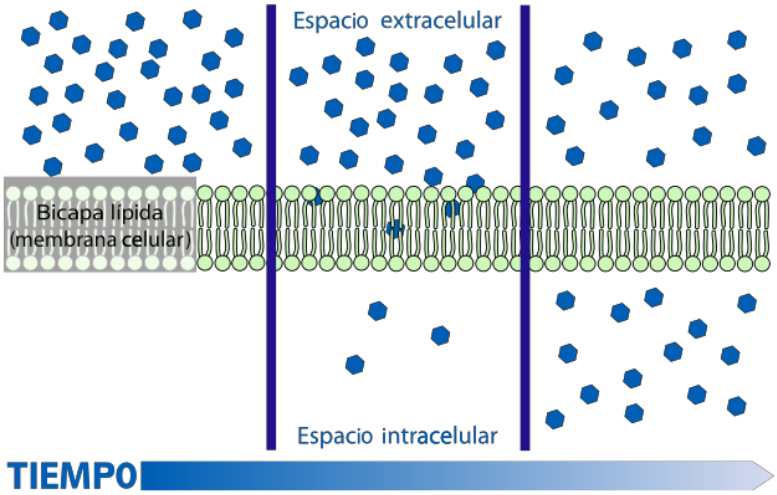


Figura 10 Proceso de difusión a través de la capa lipídica.
Fuente: Cavada, 2017

Al igual que el fenómeno de la transferencia de masa, la transferencia de calor sigue los mismos principios de movimientos moleculares aleatorio, es por esto por lo que es posible establecer una similitud evidente en ambos procesos. De esta forma, la teoría de difusión en sustancias isotrópicas se basa en la hipótesis de que la velocidad de transferencia de materia que difunde a través de una sección de área unitaria es directamente proporcional al gradiente de concentración medido normal a dicha superficie, en otras palabras, la derivada de la concentración respecto a la posición de la molécula. Conocida también como la primera ley de transferencia de masa de Fick. (ec. 3)

$$F = -D_x * \frac{\partial C}{\partial x} \qquad [3]$$

Donde F es la tasa de transferencia de las moléculas por unidad de sección de área, C es la concentración de la sustancia que difunde, x es la coordenada espacial normal a la sección de área y D_x es el coeficiente de difusión en la coordenada x.

A partir de la primera ley de Fick es posible determinar una ecuación que modela fundamentalmente el proceso difusivo en estado transiente, comúnmente conocida como la segunda ley de Fick (ec.4), a través de la cual es posible caracterizar de manera diferencial la relación entre la concentración y el tiempo en una zona determinada del espacio en el cual tanto el gradiente de concentración y el flujo de difusión varían según el tiempo.

$$\frac{\partial \mathrm{C}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_x * \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_y * \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_z * \frac{\partial C}{\partial z}\right) \qquad [4]$$

Donde C es la concentración de soluto, $d_{x,y,z}$ el coeficiente de difusión, t el tiempo y x, y, z las respectivas distancias en coordenada cartesianas. Su expresión es más comúnmente presentada en términos de su operador Laplaciano, para poder ser aplicable a otros sistemas coordenados comunes.

En algunos casos el valor de D_x puede ser considerado como constante, caso como cuando el compuesto a difundir está en menor medida, en ese caso se habla de que el soluto esta diluido en el solvente como en procesos de difusión, dejando la ecuación 4 de la siguiente forma:

$$\frac{\partial \mathrm{C}}{\partial t} = D_x\left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}\right) + D_y\left(\frac{\partial^2 C}{\partial y^2}\right) + D_z\left(\frac{\partial^2 C}{\partial z^2}\right) \qquad [5]$$

En el caso de los procesos de transferencia de materia en alimentos, la mayoría son definidos por el fenómeno difusivo descrito en la segunda ley de Fick y otros modelos específicos para las condiciones del sistema. En particular, los procesos de salado en matrices alimenticios son explicado a través de mecanismos difusivos (Fito et al., 2003). Por otro lado, los fundamentos de los procesos a través de deshidratación osmótica pueden modelar la transferencia de masa que describe los orígenes de las fuerzas difusoras que interviene y controlan el proceso (Spiazzi y mascheroni, 1997).

En la actualidad, se han realizado un sin número de estudios para ampliar el conocimiento que se tiene sobre la transferencia de materia interna que ocurre durante la deshidratación osmótica y para intentar modelar el mecanismo del proceso más relevante (Kaymak-ertekin y sultanoglu, 2000).

Los valores de los coeficientes de difusión para este tipo de procesos no están estandarizados y varían según los métodos o técnicas experimentales de determinación de estos.

Es por esto por lo que la comunidad científica esta enfocada en el desarrollo de nuevas técnicas o enfoques que permitan unificar el conocimiento que se tiene de cómo actúan los mecanismos de transferencia en el salado de alimentos ya sea a través de deshidratación osmótica u otras técnicas de salado previamente mencionadas.

Específicamente, los procesos de difusión que involucran sal en matrices alimentarias han sido investigada por varios autores, los cuales concuerdan que los factores que afectan la velocidad de transferencia de materia son la temperatura, la concentración de la salmuera y la estructura interna del producto. El salmón es un pescado que posee un alto contenido de grasa, además de presentar una estructura interna muy particular ya que sus tejidos están dispuestos en forma de capas, compuestas de grasa y musculo alternadamente, llamadas miseptos y mionomero, en particular en el salmón atlántico son llamadas miotomas y miocomatas. (ver fig.11)

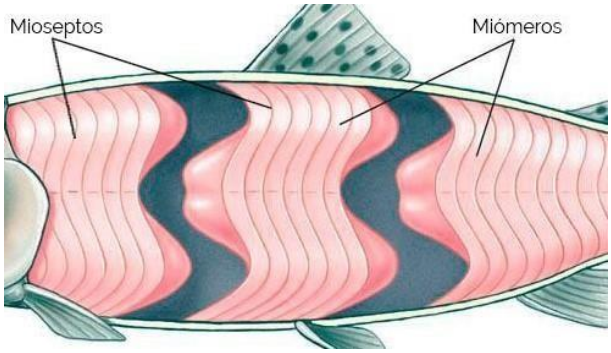


Figura 11 Estructura interna del salmón atlántico.

El coeficiente de difusión efectivo (D_{eff}) se define como el valor que representa la facilidad con la que las moléculas del soluto difunden en el medio por lo que es de vital importancia para el análisis cuantitativo de operaciones mantenimiento o transporte y análisis de calidad de ciertos alimentos. Sin embargo, como se mencionaba previamente los valores de coeficientes de difusión efectivos son escasos y generalmente presentan discrepancias en los valores reportados por distintos investigadores. Esto se explica debido a la compleja estructura que poseen los alimentos y esto es un factor que influye en la determinación de este.

Las condiciones experimentales que sustenta este estudio es la de una geometría de placa infinita lo que simplifica la modelación al ser un caso de difusión unidireccional, considerando lo anterior, el modelo fenomenológico que describe a difusión viene dado por la aplicación de la segunda ley de Fick a una placa infinita con difusión unidireccional y queda expresado de la siguiente forma:

$$\frac{\partial \mathrm{C}}{\partial t} = \left(D_{eff} * \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \qquad [6]$$

La cual tiene como condiciones de borde los siguientes valores:

$t = 0$	$C = 0$	$X > L/2$
$t > 0$	$C = C_0$	$X = L/2$

Donde C es la concentración de soluto presente en la fase liquida del producto, x es la dimensión en la que se produce la difusión, t el tiempo y D_e el coeficiente de difusión efectivo. Luego la solución analítica de la ecuación está dada por la ecuación 7 que representa la difusión según la segunda ley de Fick para una placa plana de longitud infinita y difusión unidireccional. (Simpson et. Al.,2015)

$$C^{Placa}(t)^* = \frac{C(t) - C_e}{C_0 - C_e} = \frac{8}{\pi^2} * \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1}{(2n+1)^2} * \exp(-D_{eff} * \frac{((2n+1) * \pi)^2}{L} * t) \right) \quad [7]$$

Además se procede a una normalización de los datos experiméntale donde C(t) es la concentración en el tiempo t , C_e es la concentración en el equilibrio y C_0 es la concentración inicial.

Para el caso de análisis a tiempos muy largos la ec 7 puede ser simplificada utilizando solo los primeros términos de la serie, para un cálculo aproximado es una buena aproximación cuando $n = 0$ (Giraldo et al., 2010) quedando como se muestra a continuación.

$$C^{Placa}(t)^* = \frac{C(t) - C_e}{C_0 - C_e} = \frac{8}{\pi^2} * \exp(-D_{eff} * \frac{\pi^2}{L} * t) \quad [8]$$

Sin embargo, no todos los procesos difusivos obedecen la segunda ley de Fick, por lo que se produce un fenómeno llamado difusión anómala (Simpson et al, 2015), cuya función esta modelada por la ecuación 9:

$$\frac{\partial^\alpha \mathrm{C}}{\partial t^\alpha} = D \frac{\partial^\beta C}{\partial x^\beta} \quad [9]$$

Donde se considera el orden fraccional de la derivada solo para el tiempo mientras que la componente espacial, β tiene el valor de 2 como se enuncia en la segunda ley de Fick por ende la ecuación de difusión anómala queda expresada de la siguiente forma:

$$\frac{\partial^\alpha \mathrm{C}}{\partial t^\alpha} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad [10]$$

El uso de derivadas fraccionales en el tipo ha demostrado ser una buena aproximación para materiales porosos como son los filetes de salmón y la aplicación de microperforaciones, además de caracterizar fielmente procesos de sub-difusión o superdifusion. Por otro lado*, Simpson et al ,2015* sugiere que la aplicación de derivadas fraccionales para la variable espacial no estaría bien relacionada con los resultados experimentales y es por esto por lo que se asemeja más al proceso descrito por la segunda ley (Simpson Et al ,2015) de esta forma la ecuación 8, expresada en términos de derivadas fraccionales queda de la siguiente forma:

$$C^{Placa}(t)^{*} = \frac{C(t) - C_e}{C_0 - C_e} = \frac{8}{\pi^2} * \exp(-D_{eff} * \frac{\pi^2}{L} * t^{\alpha}) \qquad [11]$$

Donde alfa representa la cinética fraccional, la cual puede ser de tres tipo: normal, que ocurre cuando el alfa es igual a 1, subdifusivo que corresponde a un valor de alfa menor a uno y superdifusivo con alfa mayor a uno.

Materiales y Métodos.

Materia prima.

En el desarrollo experimental se utilizo dos materias primas importantes: files de salmón atlántico y Cloruro de sodio técnico. Los filetes de salmón fueron adquiridos en un supermercado local, con un largo aproximado de 35 cm y un peso promedio de 800 gr. Por otro lado, el cloruro de sodio fue utilizada para realizar la salmuera al 6% de peso/ peso la cual fue comprada en viña del mar por la empresa G.A. Ventas.

Preparación de la muestra.

Para la preparación de la muestra se cortaron circunferencias con la ayuda de un sacabocado de 4 cm de diámetro, las cuales se ajustaron a una altura de 7 mm de forma que sea posible modelar la geometría de una placa plana finita. Para cada experimento se utilizaron 24 muestras de estas características las cuales pesaban en promedio 8 gramos $\pm$ 0,5 gr. Estas muestras fueron almacenadas en un refrigerado, hasta que comienza la microperforación.

El arreglo de las microperforaciones fue de 8x8, donde el espacio de separación entre cada punto fue de 5 mm con tuvieron un tiempo estimado de 15 minutos por muestras. A

Para el caso del 100% de microperforación se usaron 400 pulsos con un tiempo de duración de 3 microsegundos y un tiempo de 4 microsegundos entre cada pulso, la potencia fue ajustada a 10%. Esta configuración fue encontrada por inspección de forma que se perforara el 100% del espesor de la muestra y no quemara los bordes del punto de la microperforación. Luego de 30 configuraciones distintas se llego a la que se utilizó.

Para el caso del 50% de perforación fue necesario probar distintas configuraciones y liofilizar las muestras. De esta forma se aprecia de mejor forma la estructura y es posible determinar si la microperforación penetro hasta el 50% del diámetro (3,5 mm) mediante la inspección microscópica y la utilización del software de medición. De esta forma se encontró una configuración de 400 pulsos con un tiempo entre pulsos de 4 milisegundos, una potencia de 10% y una duración de 3 milisegundos.

Preparación de la salmuera.

Para todo el experimento se preparó una mezcla de agua destilada y cloruro de sodio al 98% en contenedores de 1,5 litros cada uno, las cuales fueron refrigeradas a 5°C hasta su utilización. El volumen de salmuera a utilizar se calculó en base al peso total de las muestras por experimento, considerando una relación de 11:1 en relación volumen de salmuera/ muestra de salmón. Una vez calculada la cantidad necesaria de salmuera se procedió a pesar el cloruro de sodio necesario para

preparar la salmuera al 6 % a fin de que la difusión que se genere a los filetes de salmón no afecte la concentración total de la salmuera.

Equipo experimental.

Para el desarrollo de los experimentos se diseñó un arreglo experimental que consistente en 4 unidades independientes. En primer lugar, se consideró una celda de acero inoxidable con una base acrílica la cual fue recubierta por grafito en espray afín de aumentar la conducción del campo eléctrico. La celda consiste en dos cilindros concéntricos separados por 17 cm, los cuales actúan como placas paralelas por las cuales al transitar una corriente se genera un campo eléctrico radial en el espacio inter cilíndrico (figura 12a), al interior de este espacio es donde van la salmuera y las muestras.

Figura 12 a) Celda de acero con salmuera; b) electrodos conectados a la celda.

La segunda unidad consiste un una caja de plumavit de 70x40x40 (figura 13) en donde se encuentra la celda conectada rodeada de una mezcla de agua y hielo para mantener la temperatura bajo los 6°C, a temperaturas mayores existe una degradación del salmón y no es útil para el experimento; durante el experimentos se mantuvo manualmente la temperatura adicionado hielo alrededor de la celda, dado que la utilización de campo eléctrico aumenta la temperatura.

Figura 13 Caja de poliestireno expandido como aislante para el experimento.

Los electrodos y el equipo que genera el campo eléctrico son la tercera unidad, y es conectado en dos secciones de la celda mediante puentes de cobre (variac slideup, modelo SB-10, EE. UU.) como se ve en la figura 12b.

Además se usó un data logger (Data omega 220 omega engineering, Stanford, EEUU) que registro la temperatura, voltaje y corriente, a través de 4 termocuplas (termopares tipo T, cobre-constatan) cada 5 segundos, adicionalmente a esto se instalo un programa que permite monitorear las temperaturas vía streaming a fin de tener un registro del experimento en caso de que la temperatura aumentara de esta forma poder tomar las acciones correspondientes para mantener la temperatura de operación.

El registrador de datos posee una conexión vía modem y puerto de conexión COM1 e incluye el software hiperWareTM versión 4.77, el cual se comunica y recoge los datos del programa en línea.

Una distribución de arreglo experimental se muestra a continuación (fig. 14):

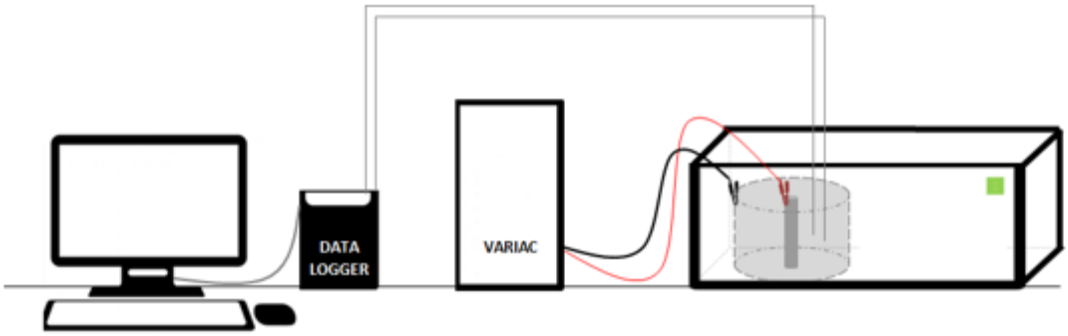


Figura 14 Configuración experimental
Fuente: Cavada,2017.

Para la realización de las microperforaciones en la muestra se utilizo un equipo laser de CO2 de 100 W (Firestar t100, Synrad Inc., Mukilteo, Wash., U.S.A.) equipado con un enfoque de 1500 mm lente (FH series Flyer, Synrad Inc.) y una interfaz de computadora con software de marcado láser (WinMark Pro, Synrad Inc.) similar al que se presenta en la figura 15.

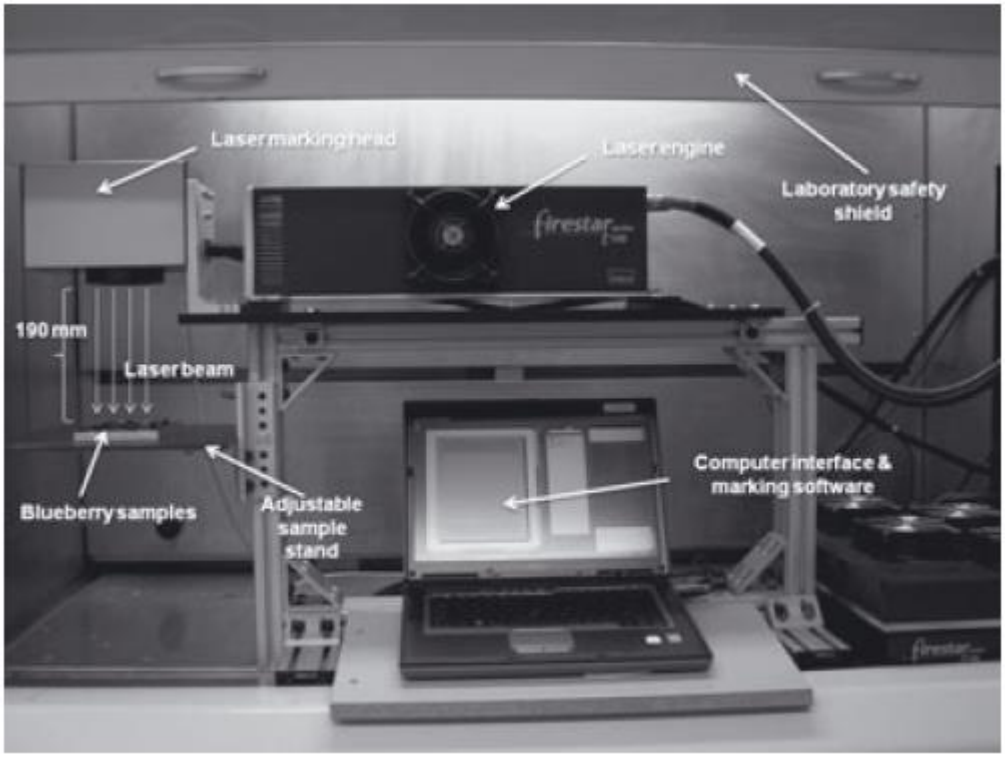


Figura 15 Laser de CO2 utilizado en investigación de microperforaciones en arándanos.
Fuente: Fujimaru, 2015

Metodología de trabajo.

El diseño experimental se basó en la comparación de una muestra base con diferentes configuraciones de factores (microperforaciones y campos eléctricos moderados) para determinar en que medida afecta el proceso de difusión.

Los experimentos consisten en la inmersión de las muestras por 24 horas a 6°C. Las mediciones de humedad y de porcentaje de sal se realizaron a intervalos de 0,5; 1 ;1,5 ;2 ;4 ;8 ;12 y 24 horas desde el inicio del experimento. La tabla 5 muestra la diferentes combinatorias con las que se realizaron los experimentos.

Tabla 5 Combinatoria de efectos aplicados en las muestras.

Factor	Sin Aplicación de campo eléctrico	Con aplicación de campo eléctrico
0% de perforación	X	X
50% de perforación	X	x
100% de perforación	x	x

De esta forma se abordaron todas las posibles combinaciones para estudiar los efectos de los dos factores acoplados y por si solos. La concentración de la salmuera y la intensidad del campo eléctrico se mantuvieron constante a 6% de concentración y 0,353 V/cm respectivamente, además los experimentos fueron realizados en duplicado.

Determinación del porcentaje de sal.

El porcentaje de sal de todas las muestras fue determinado a través del equipo Dicromat II Salt Analyser (PLC Control instrument, Leicester, UK) que se muestra en la figura 16. La metodología de medición fue tomar 20 gramos de la muestra a los tiempos determinados, los cuales fueron mezclados con 200 ml de agua destilados para luego ser procesados (triturados) por una minipimer (Batidora Stick Mixer 2616). Una vez realizado el procedimiento la mezcla resultante fue pasada a un vaso precipitado de 250 ml y se introduce el electrodo del equipo al interior del vaso, el cual mediante la correlación de la conductividad eléctrica de la muestra determina el contenido de sal en porcentaje.

Figura 16 Dicromat II Salt Analyser

Determinación de la humedad.

Para el cálculo de la humedad se identifico las muestras del 1 al 8 en capsulas Petri donde además se anoto la tara de estas, luego fueron puesta en un desecador dentro de una estufa a una temperatura constate de 105 °C para ir midiendo en una balanza analítica modelo JD400-3 con una precisión de 0,001 [g] a intervalos de 3 horas hasta que el peso se mantuviera constante. Luego se comparo el peso inicial y el peso final para determinar la humedad se utilizó la ecuación 12.

$$\%Humedad = \frac{M_0 - M_f}{M_0 - T} * 100 \qquad [12]$$

Donde M_0es la masa inicial de la muestra, M_f es la masa final de la muestra y T es igual a la tara de la capsula de Petri de la muestra analizada.

Determinación de la reducción en el tiempo de salado.

Para la determinación del tiempo de salado se considerará el tiempo en el cual alcanza un 3,5% de concentración de sal, debido a que este es el valor mínimo que debe tener los productos

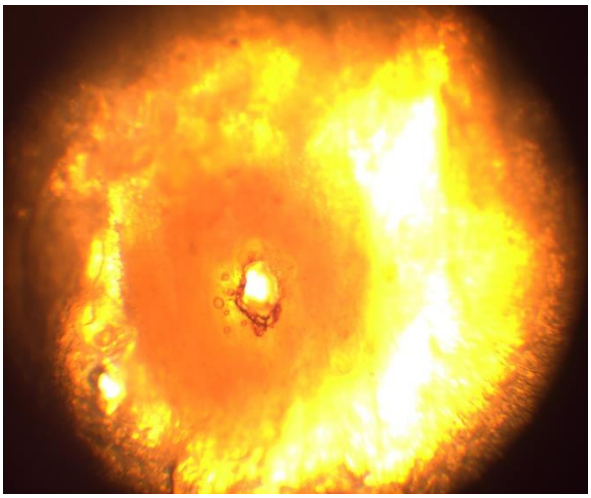
ahumados (cita). Para ello se interpolará los resultados experimentales para determinar de forma teórica el tiempo en que se alcanza dicha concentración a través de una interpolación lineal

$$t_{3,5\%} = t_b + (3,5 - X_{n-1}) * \frac{(t_b - t_a)}{(x_b - x_{a)}} \qquad [13]$$

Donde a y b representan las extremos superior e inferior del intervalo donde se ubica el valor de 3,5%.

Determinación del diámetro de poro.

Para la determinación del diámetro del poro se microperforaron 11 muestras, y por medio de un microscopio electrónico (Hund typ: 600/12 230V-50-60 Hz) se tomó imágenes para su posterior análisis (figura 16a). Luego se utilizó el software *Imagen-pro plus* para poder determinar el diámetro de las perforaciones (figura 16b). Luego mediante un análisis estadístico se determino el tamaño de poro promedio y la desviación estándar.



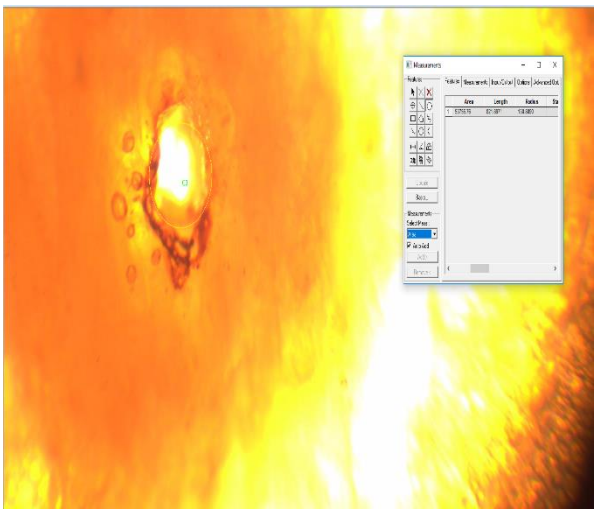


Figura 17 a) imagen microscópica de un microporo b) Medición de diámetro de poro

Determinación del 50% de profundidad de microperforación.

Como se mencionó en la preparación de la muestras, para determinar el 50% de perforación del espesor se probaron distintas configuraciones de los parámetros del láser (número de pulsos, tiempo entre pulso, duración del pulso y potencia) en diferentes muestras, las cuales pasaron por un proceso de liofilización, a fin de mantener la estructura interna del producto y las microperforaciones. Luego de esto se realizaron cortes transversales a la microperforación para poder tomar imágenes a través del microscopio (figura 18a) y de igual forma que con la determinación del diámetro de poro, medir el avance del láser en la muestra (figura 18b).

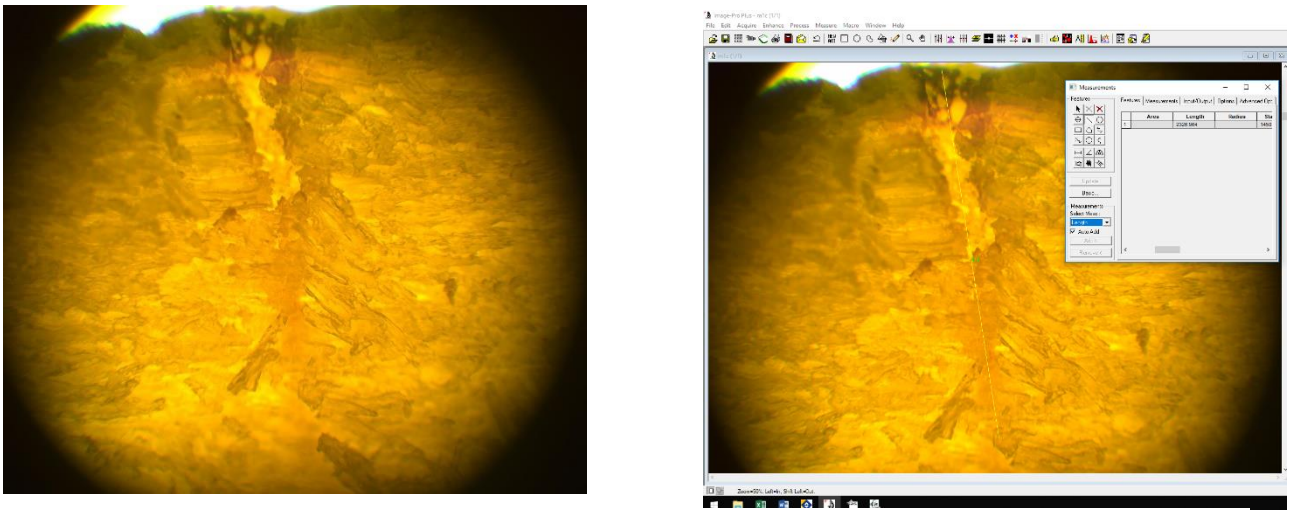


Figura 18 a) Registro de microperforación a través del microscopio b) medición de largo de poro por software

Determinación del coeficiente de difusión efectivo y alfa.

Para la determinación del coeficiente efectivo de difusión y el alfa se utilizara el software *solve* de Microsoft Excel en el cual se redujo el error cuadrático medio entre las muestras y el valor que se obtiene de la ecuación 11.

Para poder utilizar esta formula es necesario normalizar los datos experimentales de la siguiente forma:

$$C^{Placa}(t)^{*} = \frac{C(t) - C_e}{C_0 - C_e} \qquad [14]$$

De esta forma es comparable con los valores obtenidos en la ec 11, la cual para el caculo de los parámetros por el software es reescrita de la siguiente forma:

$$C^{Placa}(t)^{*} = \frac{C(t) - C_e}{C_0 - C_e} = A * \exp(-K1 * t^{\alpha}) \qquad [15]$$

Por ende, los parámetros a determinar por el software serán A, K1 y Alfa, que variarán de forma de reducir al mínimo los errores al cuadrado entre el modelo y los datos experimentales.

Para la determinación del coeficiente de difusión efectivo se despejo el valor de K1 entregado por el software según la ecuación 15:

$$Deff = -K1 * \left(\frac{L}{\pi}\right)^2 \qquad [16]$$

Resultados y Discusión.

Resultados.

A continuación, se presentarán los resultados de las diferentes combinaciones de efecto tanto de las microperforaciones como la aplicación de campos eléctricos moderado, para su posterior análisis y discusión.

Concentración de sal.

a) Muestra control: Sin aplicación de campo eléctrico ni microperforaciones.

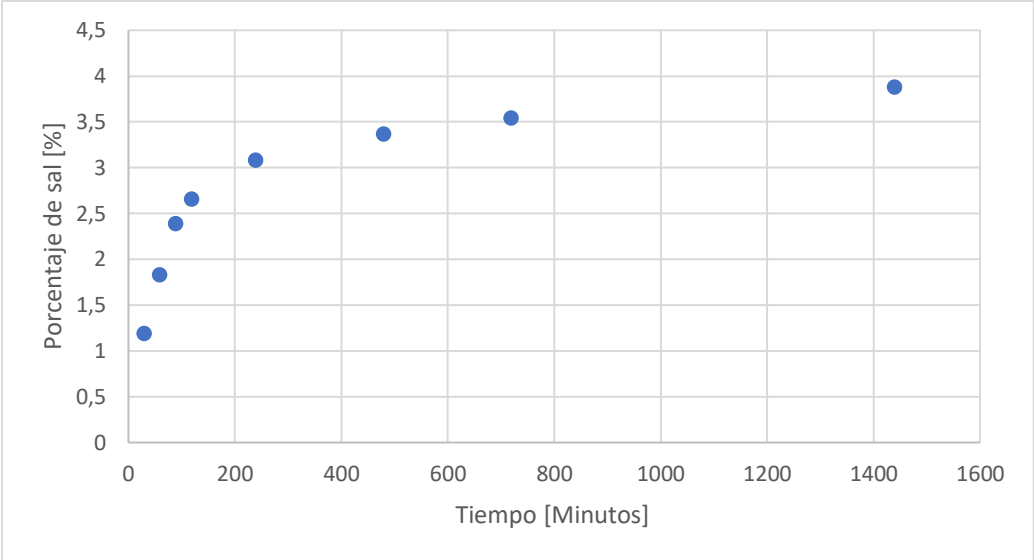


Figura 19 Concentración de sal en el tiempo sin la aplicación de campos eléctricos moderados ni microperforación.

b) Muestra 1: Aplicación de campo eléctrico moderado sin microperforaciones.

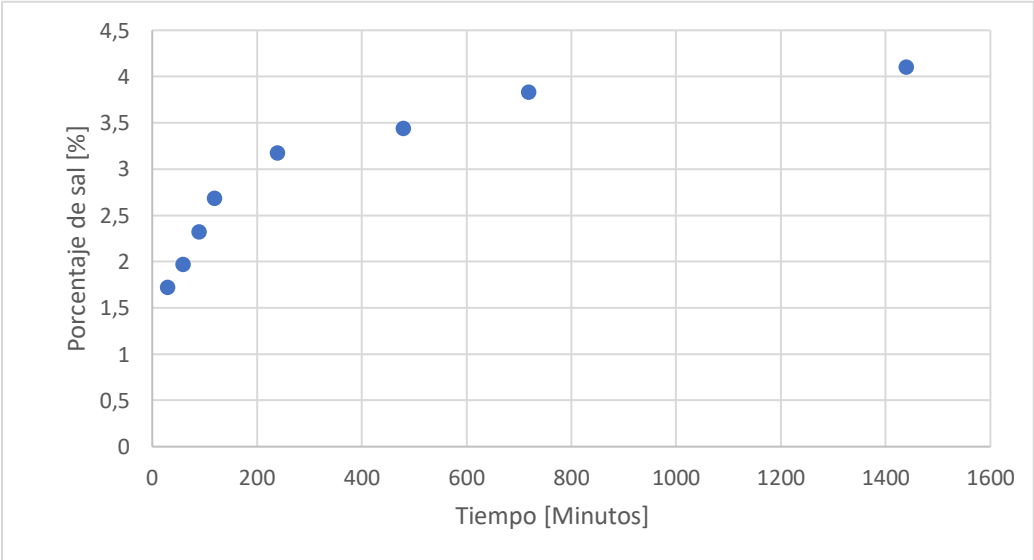


Figura 20 Concentración de sal en el tiempo con aplicación de campos eléctricos moderados ni microperforación.

c) Muestra 2: Aplicación de campo eléctrico moderado y 100% de profundidad de microperforaciones

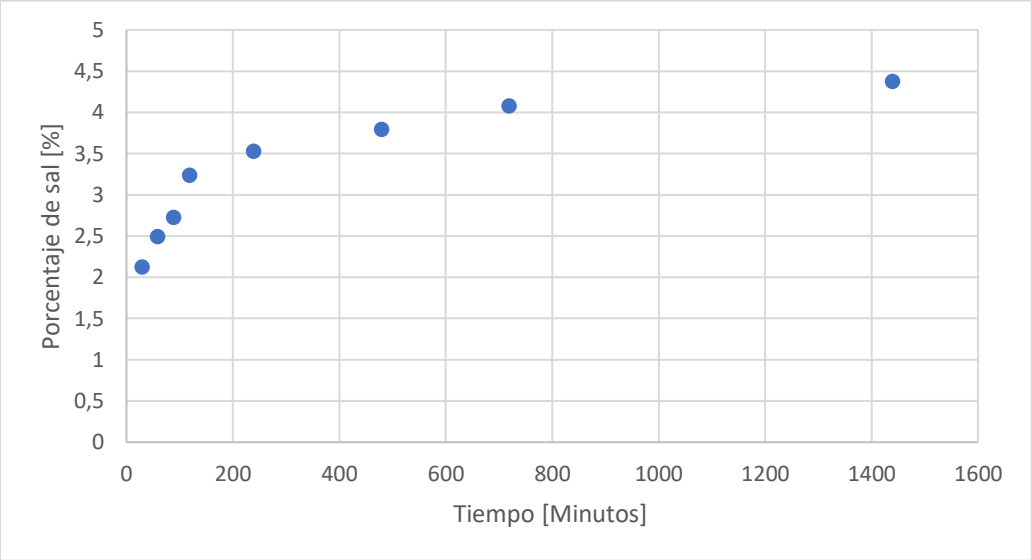


Figura 21 Concentración de sal en el tiempo con aplicación de campos eléctricos moderados y 100% de profundidad en microperforación

d) Muestra 3: Aplicación de campo eléctrico moderado y 50 % de profundidad de microperforaciones

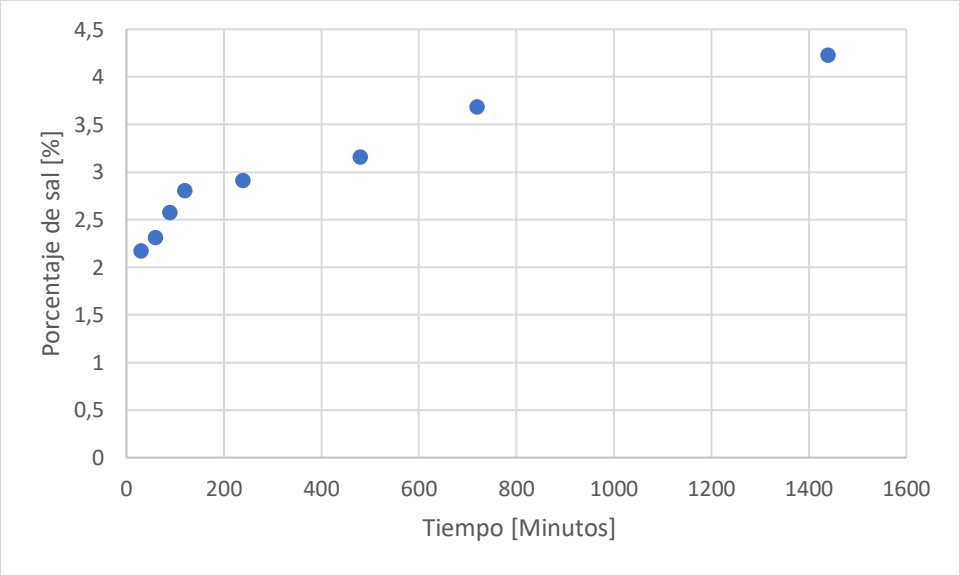


Figura 22 Concentración de sal en el tiempo con aplicación de campos eléctricos moderados y 50% de profundidad en microperforación

e) Muestra 4: sin aplicación de campo eléctrico moderado y 100 % de profundidad de microperforaciones

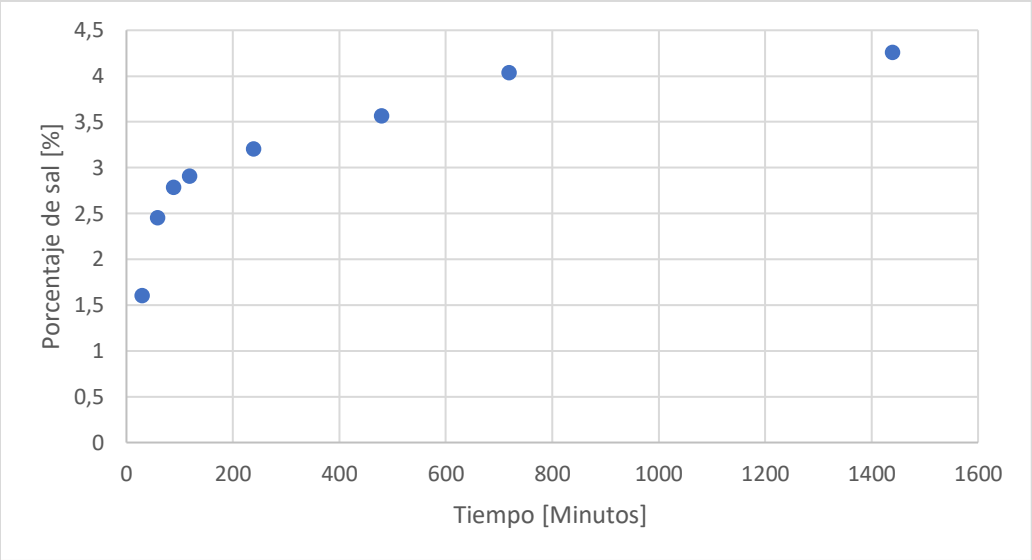


Figura 23 Concentración de sal en el tiempo sin aplicación de campos eléctricos moderados y 100% de profundidad en microperforación

f) Muestra 5: Sin aplicación de campo eléctrico moderado y 50 % de profundidad de microperforaciones

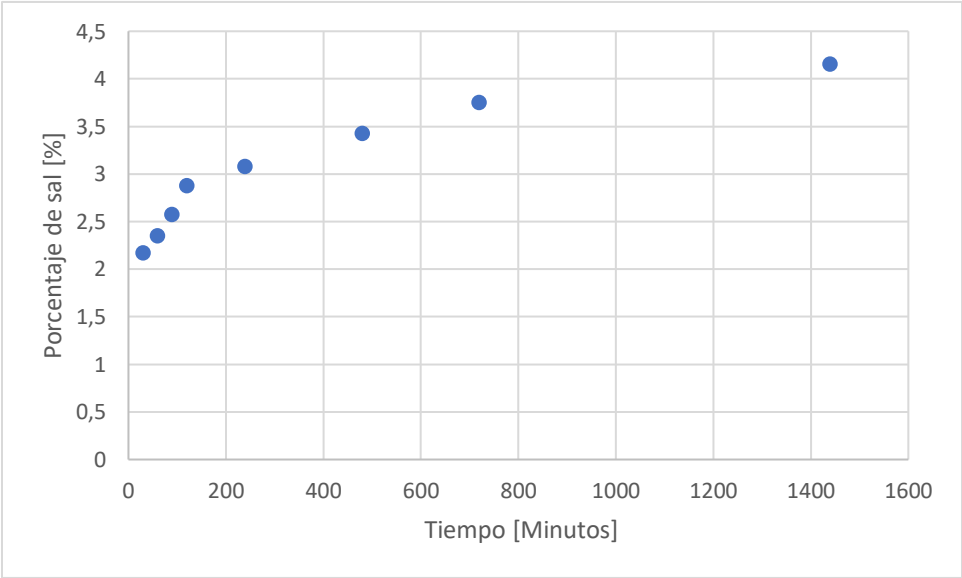


Figura 24 Concentración de sal en el tiempo sin aplicación de campos eléctricos moderados y 50% de profundidad en microperforación

Comparación de efectos combinados

Así mismo se presentan a continuación en un gráfico los efectos con campo eléctrico, sin campo eléctrico, también los efectos de 50% de profundidad en las microperforaciones y 100%, afín de representar gráficamente las diferencias que ocurren.

a) Comparación entre la aplicación de campo eléctrico sin microperforaciones y muestra de control.

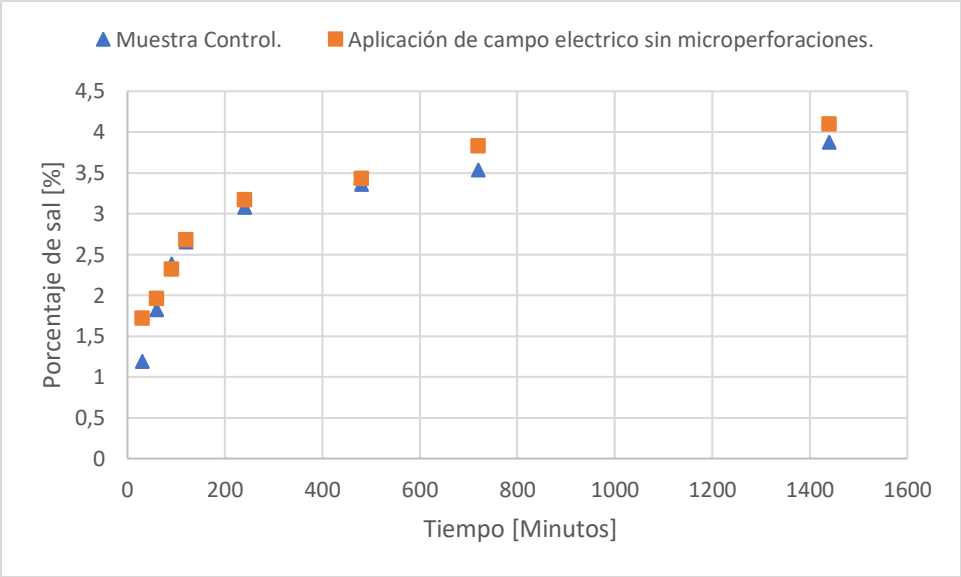


Figura 25 Comparación entre la aplicación de campo eléctrico sin microperforaciones y muestra de control

b) Comparación de distintos grados de microperforación sin utilización de campo eléctrico.

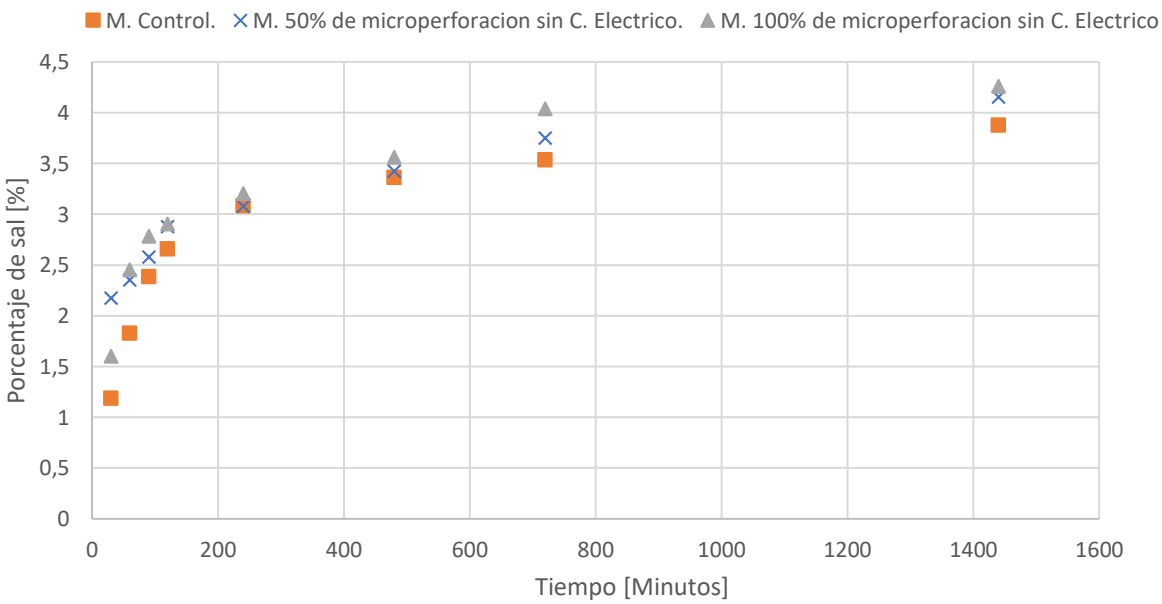


Figura 26 Comparación de distintos grados de microperforación sin utilización de campo eléctrico.

c) Comparación de distintos grados de microperforación con la utilización de campo eléctrico

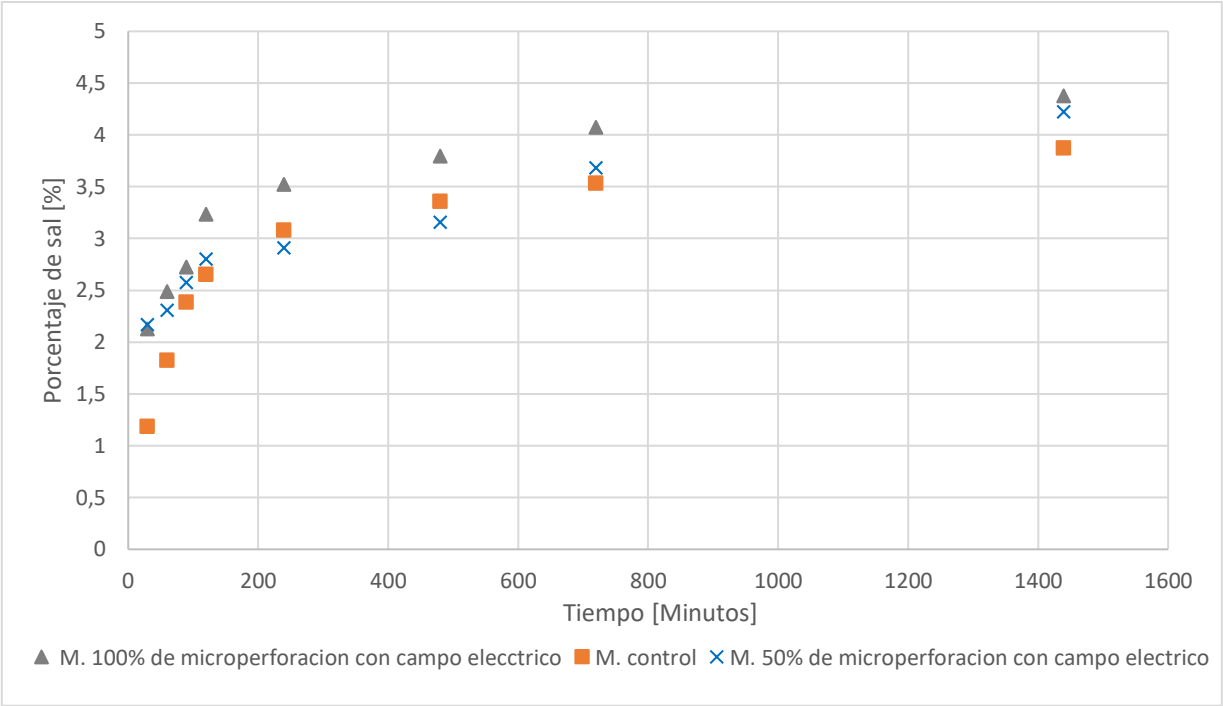


Figura 27 Comparación de distintos grados de microperforación con utilización de campo eléctrico

d) Comparación con o sin campo eléctrico con 50% de microperforación.

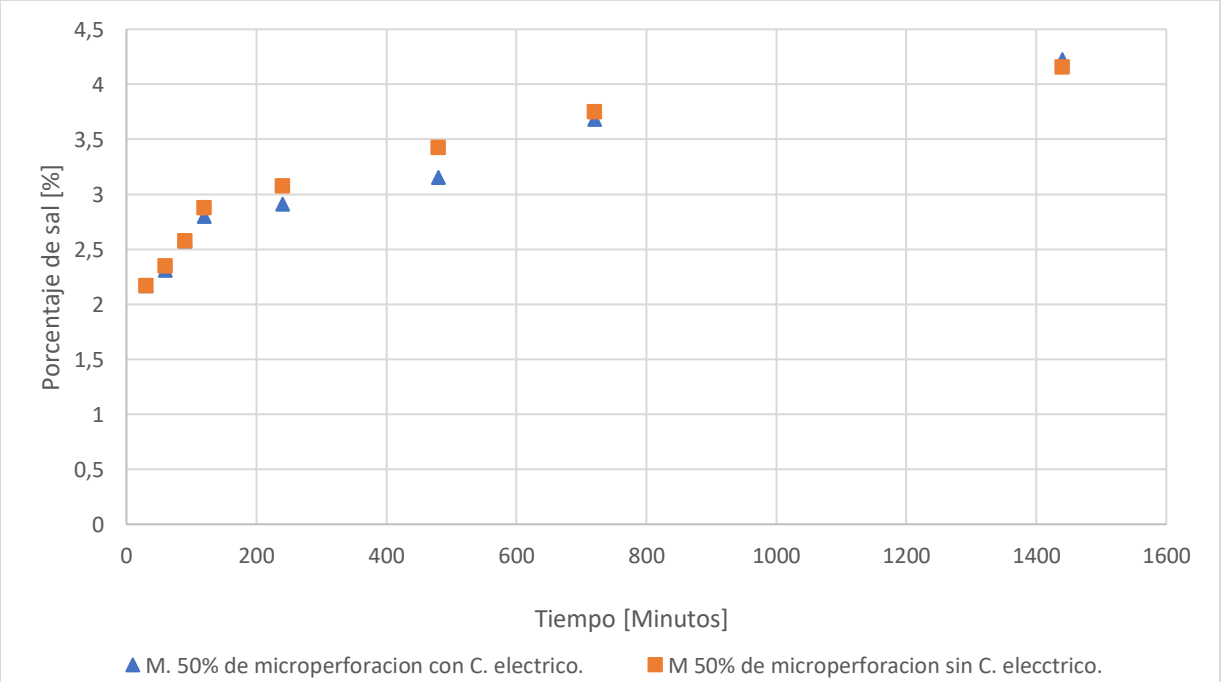
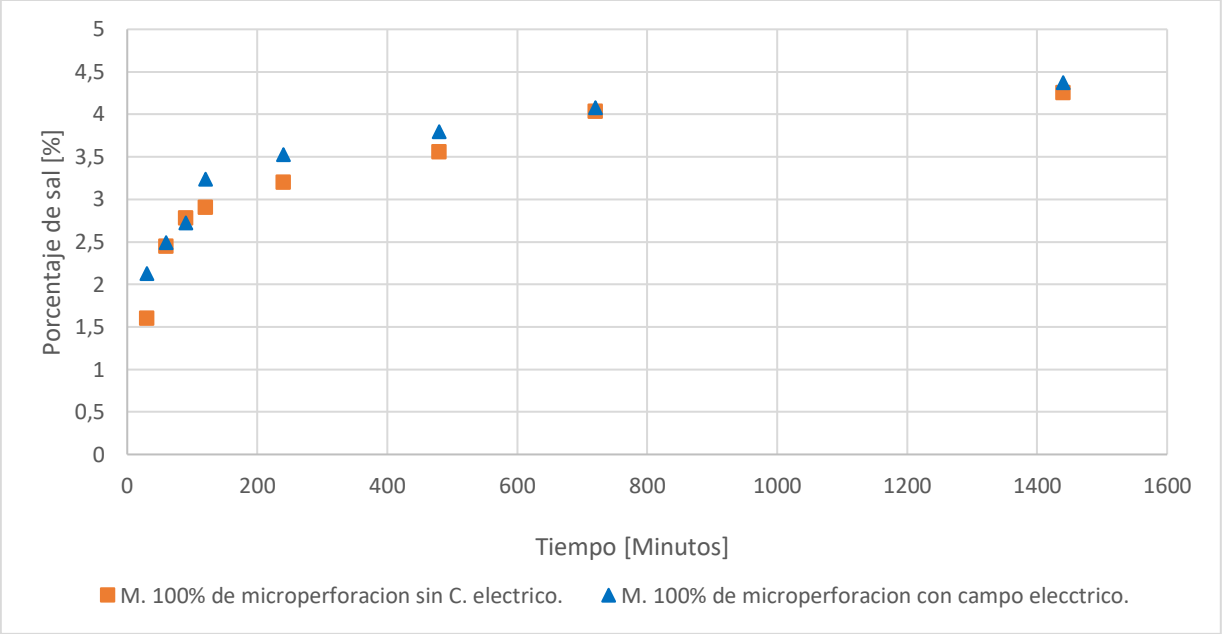


Figura 28 Comparación con o sin campo eléctrico con 50% de microperforación

e) Comparación con o sin campo eléctrico con 100% de microperforación



Cambios de humedad para distintos efectos.

Para efectos de humedad se muestra en la tabla 6 los valores promedios de humedad para diferentes efectos.

Tabla 6 Resultados de Humedad para distintos efectos.

Efecto/tiempo	30	60	90	120	240	480	720	1440
M. Control	59%	63%	69%	68%	67%	72%	75%	79%
M. 0% microperforación con campo eléctrico.	61%	64%	76%	75%	73%	77%	79%	80%
M. 100% microperforación sin campo eléctrico.	57%	68%	71%	70%	75%	76%	77%	82%
M. 50% microperforación sin campo eléctrico.	56%	57%	63%	67%	68%	72%	77%	80%
M. 100% microperforación con campo eléctrico.	53%	58%	63%	66%	66%	61%	76%	84%
M. 50% microperforación con campo eléctrico.	61%	63%	64%	66%	68%	70%	74%	82%

Reducción en el tiempo de salado.

Para el cálculo de la reducción del tiempo de salado, se determinó por la ecuación 13 el tiempo en que alcanza el 3,5% de concentración de sal y adicionalmente se determino el porcentaje de reducción de tiempo con respecto a la muestra control.

Tabla 7 Reducción del tiempo de salado para distintos efectos.

Ítem	Tiempo	Reducción del tiempo
Con Campo eléctrico y 100% de profundidad de las Microperforaciones.	230	66%
Sin Campo eléctrico y 100% de profundidad de las Microperforaciones.	440	35%
Sin Campo eléctrico y 50% de profundidad de las Microperforaciones.	535	20%
Con Campo eléctrico y sin Microperforaciones.	539	20%
Con Campo eléctrico y 50% de profundidad de las Microperforaciones.	638	5%
Sin Campo eléctrico y sin Microperforaciones.	672	0%

Ajuste de parámetros del modelo.

A continuación, se muestra los modelos obtenidos a través del software *solve* para las distintas aplicaciones de campo eléctrico y grados de microperforado.

a) Muestra control: Sin aplicación de campo eléctrico ni microperforaciones.

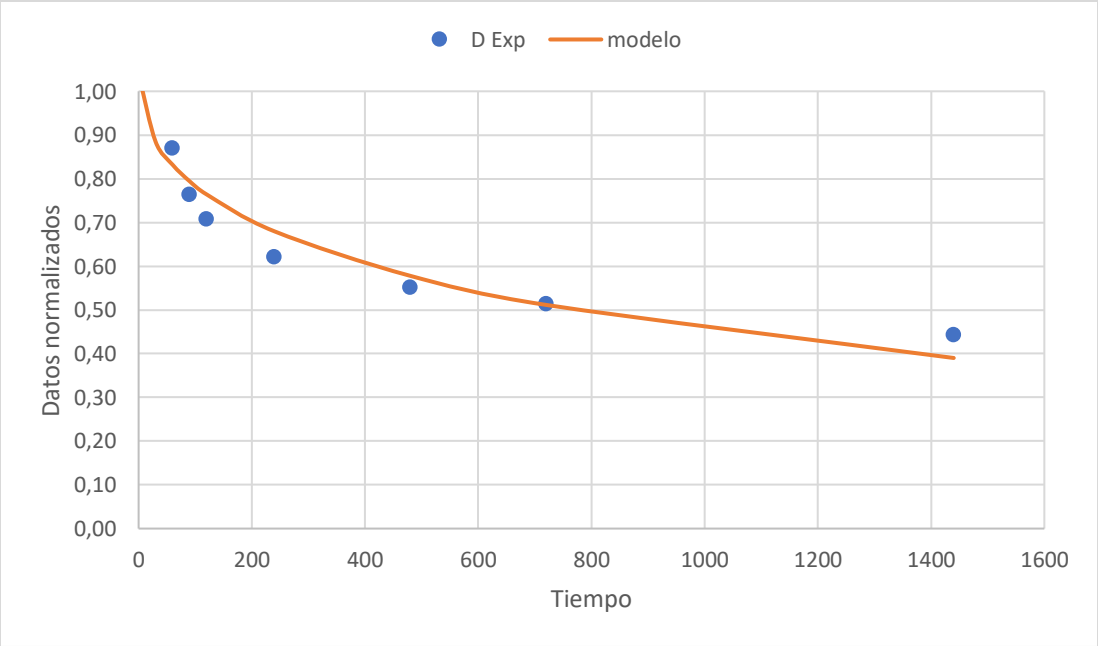


Figura 29 Modelo y datos Experimentales sin aplicación de campo eléctrico ni microperforaciones.

b) Muestra 1: Aplicación de campo eléctrico sin microperforaciones.

Figura 30 Modelo y datos Experimentales con aplicación de campo eléctrico y sin microperforaciones

c) Muestra 2: Aplicación de campo eléctrico moderado y 100% de profundidad de microperforaciones.

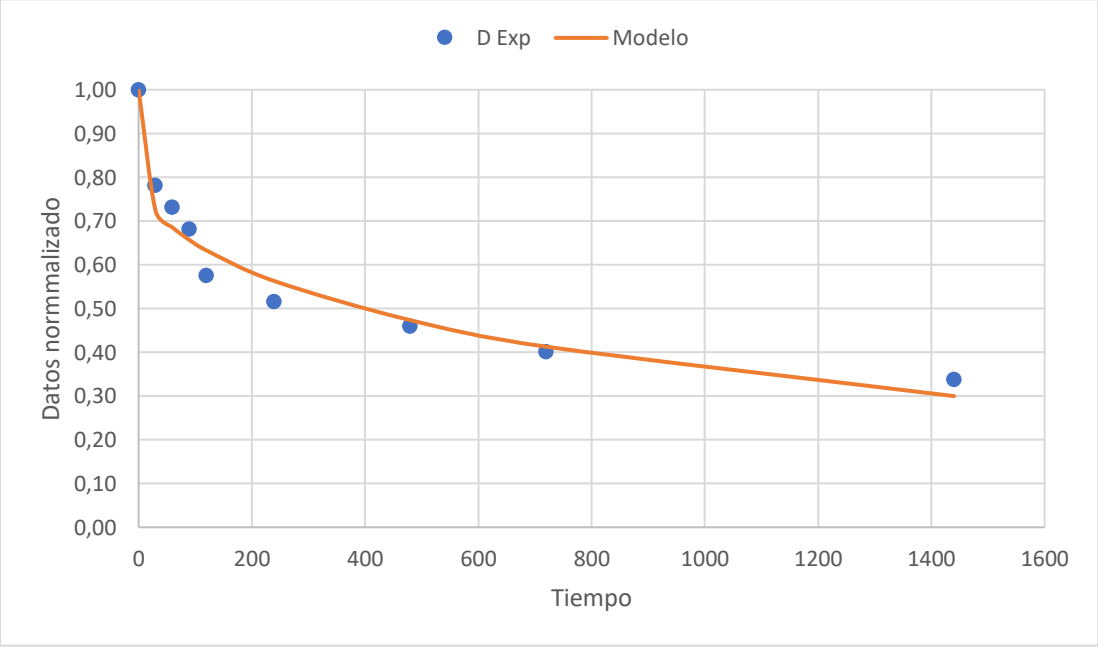


Figura 31 Modelo y datos Experimentales con aplicación de campo eléctrico y 100% de profundidad de las microperforaciones

d) Muestra 3: Aplicación de campo eléctrico moderado y 50% de profundidad de microperforaciones.

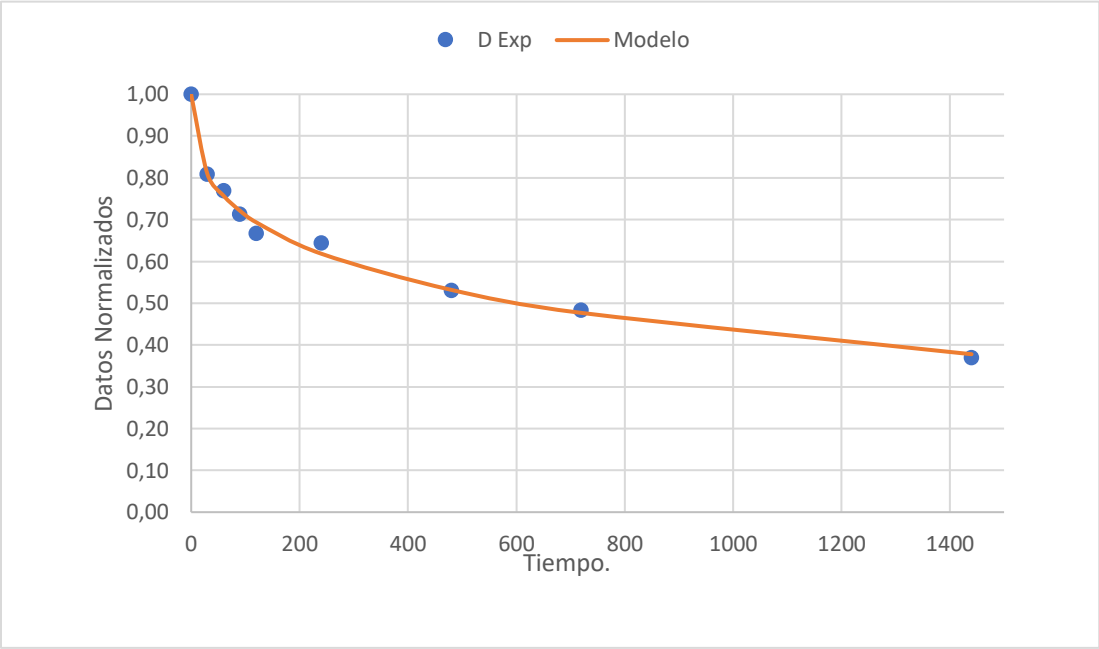


Figura 32 Modelo y datos Experimentales con aplicación de campo eléctrico y 50% de profundidad de las microperforaciones

e) Muestra 4: Sin aplicación de campo eléctrico moderado y 100% de profundidad de microperforaciones.

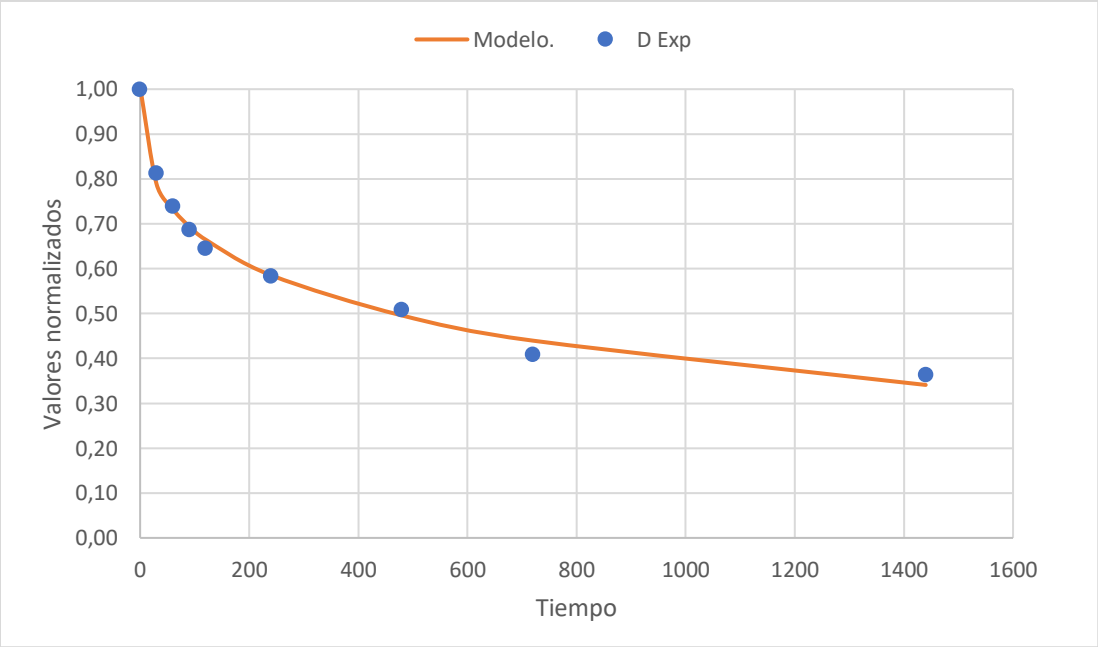


Figura 33 Modelo y datos Experimentales sin aplicación de campo eléctrico y 100% de profundidad de las microperforaciones

f) Muestra 5: Sin aplicación de campo eléctrico moderado y 50% de profundidad de microperforaciones.

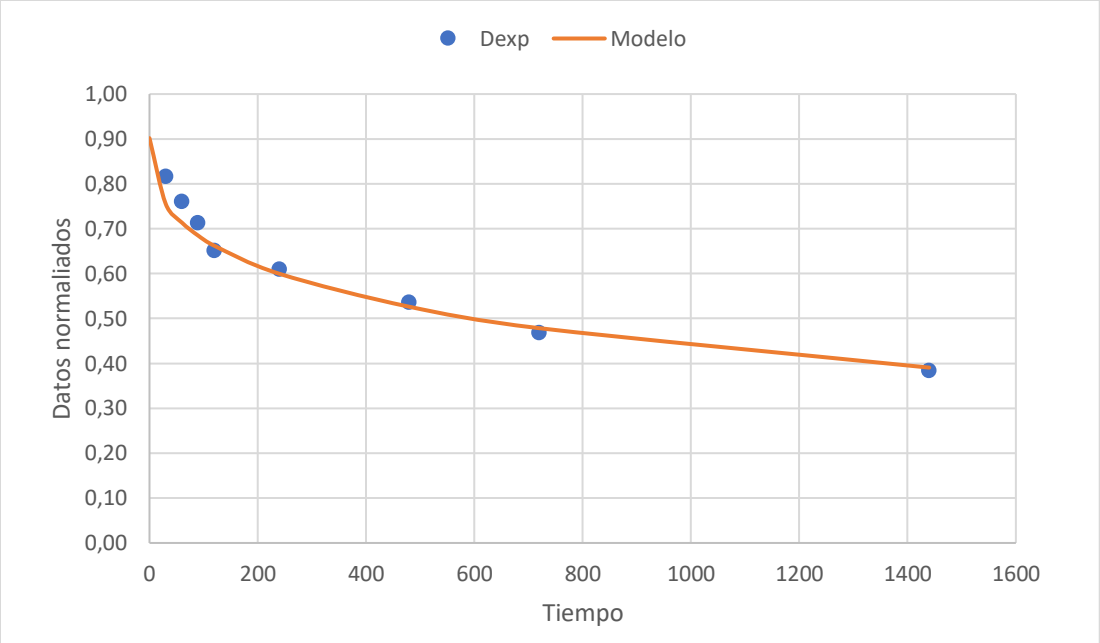


Figura 34 Modelo y datos Experimentales sin aplicación de campo eléctrico y 50% de profundidad de las microperforaciones

A través de la herramienta *solve* se pudo determinar los valores de K1, A y alfa los cuales son informados en la tabla 7:

Tabla 8 Obtención de los parámetros del modelo para distintos efectos.

Efecto	Alfa [-]	K1	A [-]
Con Campo eléctrico y 100% de profundidad de las Microperforaciones.	0,559	0,0846	1,000
Sin Campo eléctrico y 100% de profundidad de las Microperforaciones.	0,387	0,0648	1,005
Sin Campo eléctrico y 50% de profundidad de las Microperforaciones.	0,401	0,0454	0,902
Con Campo eléctrico y sin Microperforaciones.	0,460	0,0372	1,02
Con Campo eléctrico y 50% de profundidad de las Microperforaciones.	0,394	0,0552	0,999
Sin Campo eléctrico y sin Microperforaciones.	0,467	0,0328	1,04

Sin embargo, es necesario obtener el D_{eff} a partir de K1 según la ecuación 16:

Tabla 9 Valores del coeficiente de difusión efectiva para distintos efectos y aumento porcentual.

Efecto	$D_{eff}\left[\frac{m^2}{s}\right]$	% de aumento del D_{eff}
Con Campo eléctrico y 100% de profundidad de las Microperforaciones.	$1{,}05 * 10^{-7}$	158%
Sin Campo eléctrico y 100% de profundidad de las Microperforaciones.	$8{,}05 * 10^{-8}$	98%
Sin Campo eléctrico y 50% de profundidad de las Microperforaciones.	$5{,}64 * 10^{-8}$	39%
Con Campo eléctrico y sin Microperforaciones.	$4{,}62 * 10^{-8}$	14%
Con Campo eléctrico y 50% de profundidad de las Microperforaciones.	$6{,}86 * 10^{-8}$	69%
Sin Campo eléctrico y sin Microperforaciones.	$4{,}07 * 10^{-8}$	-

Calculo de modelo Fickiano.

a) Muestra control: Sin aplicación de campo eléctrico ni microperforaciones.

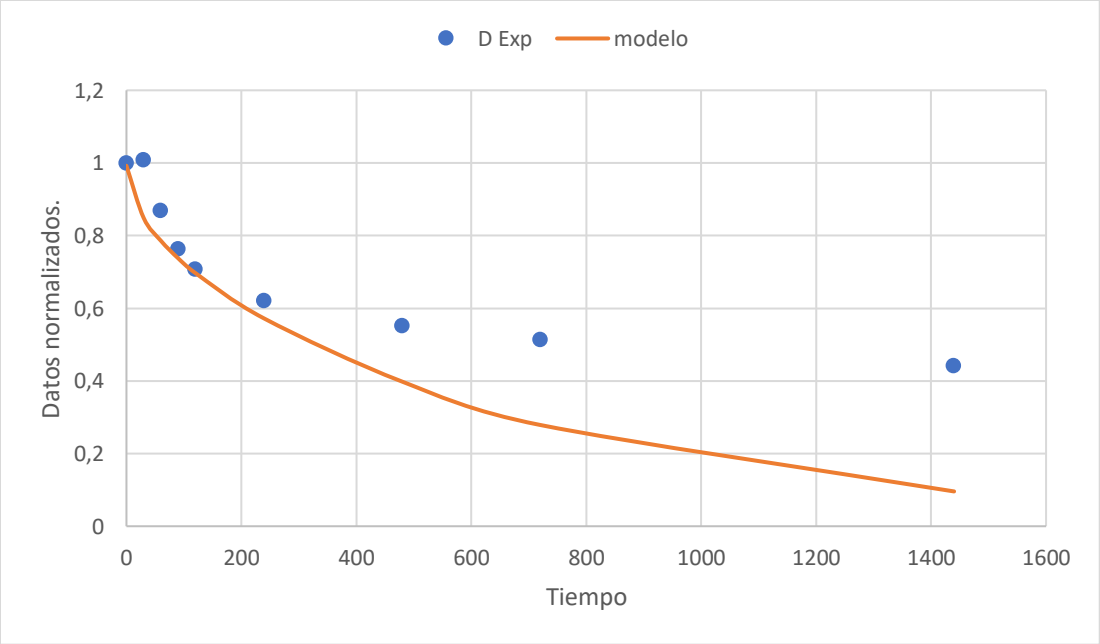


Figura 35 Modelo y datos Experimentales sin aplicación de campo eléctrico ni microperforaciones

b) Muestra 1: Aplicación de campo eléctrico sin microperforaciones.

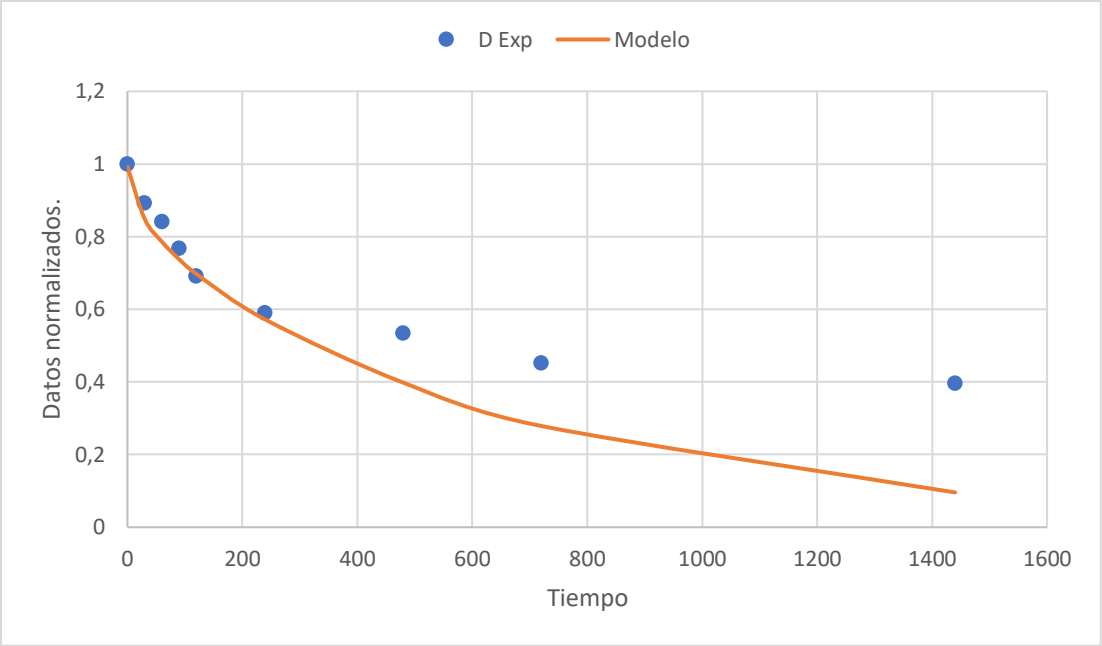


Figura 36 Modelo y datos Experimentales con aplicación de campo eléctrico y sin microperforaciones

c) Muestra 2: Aplicación de campo eléctrico moderado y 100% de profundidad de microperforaciones.

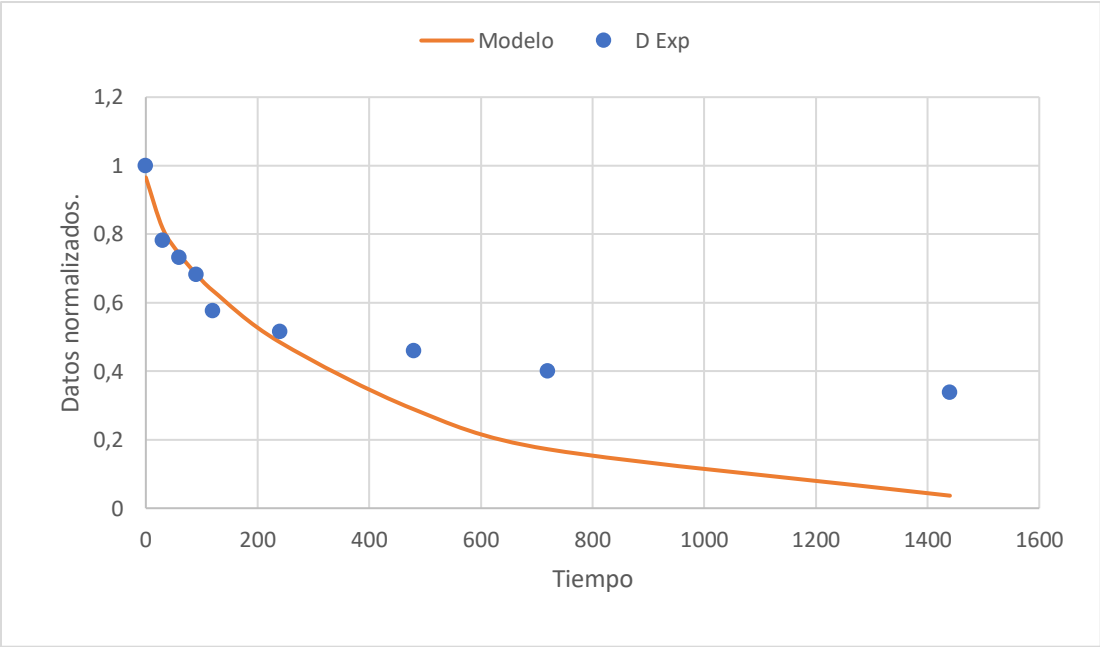


Figura 37Modelo y datos Experimentales con aplicación de campo eléctrico y 100% de profundidad de las microperforaciones.

d) Muestra 3: Aplicación de campo eléctrico moderado y 50% de profundidad de microperforaciones.

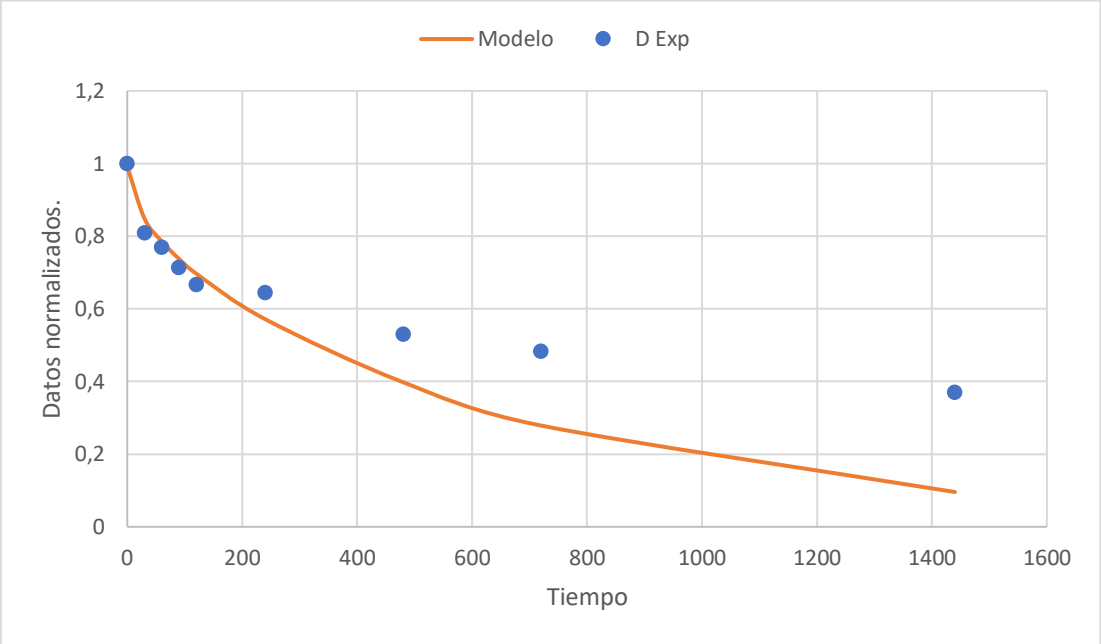


Figura 38 Modelo y datos Experimentales con aplicación de campo eléctrico y 50% de profundidad de las microperforaciones

e) Muestra 4: Sin aplicación de campo eléctrico moderado y 100% de profundidad de microperforaciones.

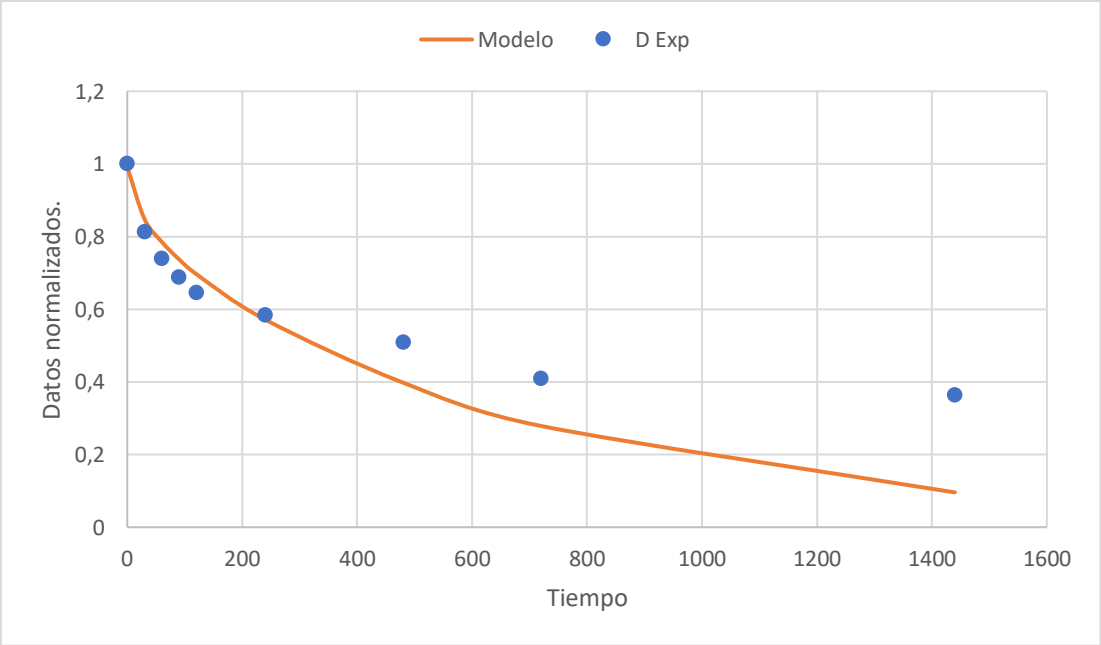


Figura 39 Modelo y datos Experimentales sin aplicación de campo eléctrico y 100% de profundidad de las microperforaciones

f) Muestra 5: Sin aplicación de campo eléctrico moderado y 50% de profundidad de microperforaciones.

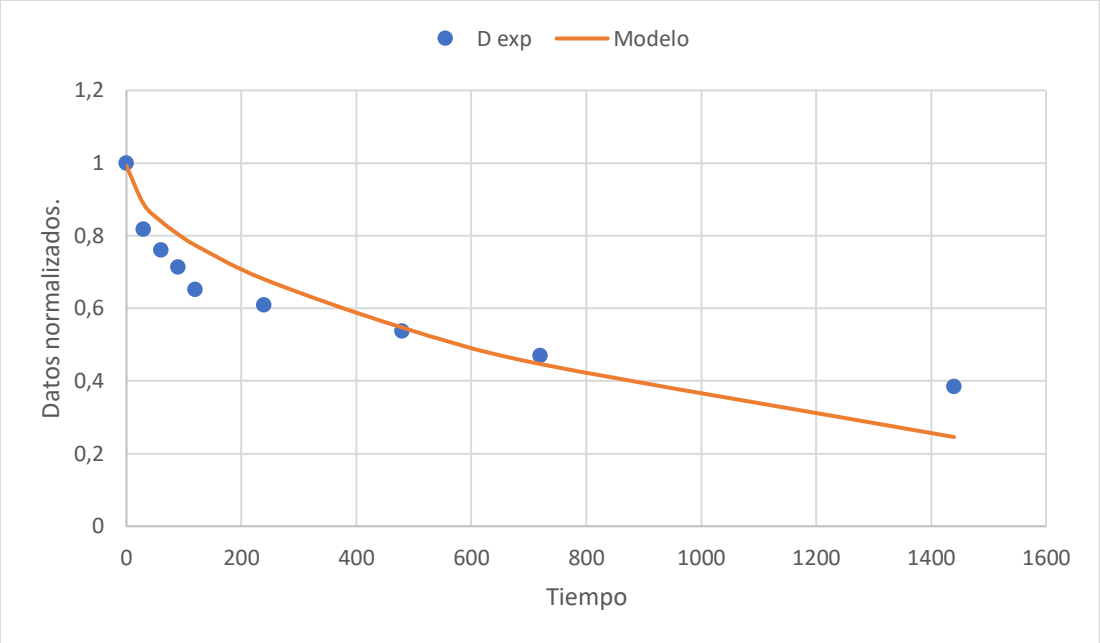


Figura 40 Modelo y datos Experimentales sin aplicación de campo eléctrico y 50% de profundidad de las microperforaciones

Determinación de diámetro de poros.

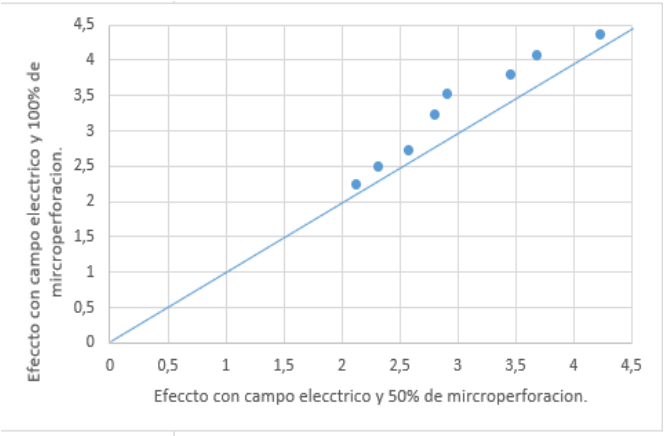
También como se mostró en materiales y método se procede a informar los valores de diámetro de poro obtenidos a través del microscopio electrónico (Hund typ: 600/12 230V-50-60 Hz).

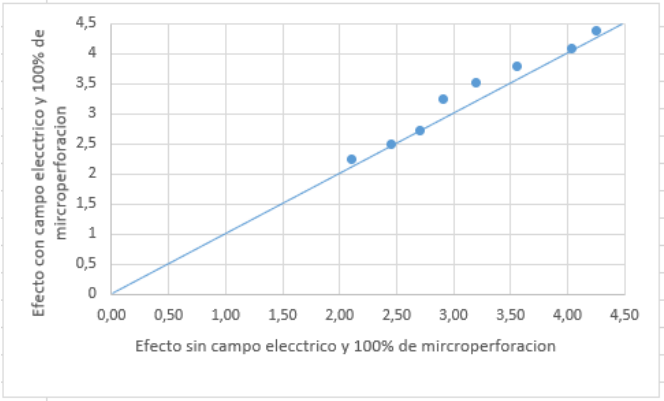
Tabla 10 Distribución de tamaños de poros

N° de medición.	Radio $[\mu m]$	Diámetro $[\mu m]$
1	114,82	229,64
2	122	244
3	113,36	226,72
4	129,35	258,7
5	116,27	232,54
6	114,82	229,64
7	130,8	261,6
8	107,55	215,1
9	116,27	232,54
10	119,18	238,36
11	100,26	200,52
Promedio	116,79	233,58
Desviación.	8,75	17,50

Predominación de efectos

A continuación, pueden ver una representación gráfica de la predominancia de un efecto por sobre otro en las figura 33. La rubrica de efectos se encuentra en Anexos.





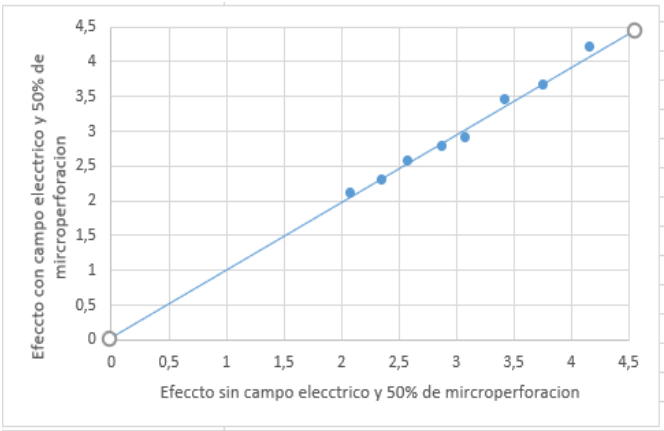


Figura 41 Preponderancia de un factor por sobre otro.

Análisis.

Concentración de sal.

Para la concentración de sal es posible observar como en las muestra de control alcanza un valor máximo menor a cuatro, siendo este el valor máximo al que se puede llegar sin la aplicación de campo eléctrico ni microperforaciones, además este valor se alcanza a las 24 horas de estar sumergida la muestra en la solución osmótica.

A continuación, se compararán la muestra control con los resultados obtenidos para las muestras 1-5 discutiendo el posible efecto que se tiene cuando se contrasta con el caso base.

La muestra uno fue expuesta solo al campo eléctrico no teniendo microperforaciones de ningún tipo, a través de la figura 20 es posible ver gráficamente como el porcentaje de sal excede ligueramente el 4% lo cual se debe al efecto de los campos eléctricos moderados puesto que el valor máximo del caso de control no supera el 4% de sal.

En la muestra 2 (figura 21) se aplicó un campo eléctrico moderado y microperforaciones al 100% del espesor. El resultado es un máximo de sal cercano al 4,5%, lo cual puede estar explicado por un aumento en el área de transferencia y, sumado a esto, el efecto de electroporación. Además, si se compara con la muestra uno, también existe una diferencia entre los valores máximos alcanzados, lo que podría indicar una fuerte influencia del efecto de las microperforaciones en la transferencia de materia.

En la muestra 3 (figura 22) se da el caso de 50% de profundidad de las microperforaciones en conjunto con la aplicación del campo eléctrico. En este caso se tiene un aumento en la concentración máxima de sal, que es menor al de la muestra 2 pero mayor que la muestra 1. También es posible observar un comportamiento anómalo ente los 200 y 400 minutos donde se aprecia un aumento menor de la concentración en comparación con las dos muestras anteriores.

Con respecto a la muestra 4 (figura 23), al igual que la muestra 2 alcanza valores cercanos a4,5 siendo levemente menor. Esto puede deberse que en la muestra 4 no hubo aplicación de campo eléctrico, por ende, la liguera diferencia puede explicarse por la ausencia del campo eléctrico moderado en la muestra.

Para la muestra 5, en que no se aplicó un campo eléctrico y se tuvo un 50% de profundidad en las microperforaciones se tiene que el máximo valor alcanzado es muy cercano a la muestra 3, sin embargo, es posible observar una tendencia mas clara en los valores de las contracciones entre los 200 y 600 minutos. Esto podría significar que el efecto que produce el campo eléctrico es mucho menor al que generan las microperforaciones producto de valores experimentales similares.

En base a la discusión es posible afirmar que la aplicación de campos eléctricos moderados y microperforaciones aumentan el valor máximo de la concentración de sal sobre las muestras.

Comparación de efectos combinados.

En la figura 25 es posible observar la grafica de la muestra de control y la muestra 1 en que se aplica un campo eléctrico, pero no se microperfora. A través del grafico es posible afirmar que el campo eléctrico aumenta los porcentajes de sal de las muestras sin embargo la diferencia entre los datos sugiere que es un efecto muy bajo.

En la figura 26 se puede ver la comparación del efecto de las microperforaciones, sin la utilización del campo eléctrico. En particular era predecible que la utilización del 100% de la profundidad de las microperforaciones beneficiaba de mejor manera la transferencia de masa que solo tener la mitad del área de contacto, como es el caso de la microperforación a 50% de profundidad. Sin embargo, también es posible observar que la diferencia aumenta en el tiempo, siendo en los primeros minutos poco distinguible. Esto puede deberse a una mayor concentración inicial del Salmon utilizado en el experimento.

La principal diferencia que se tiene entre la fig.26 y la fig. 27, es que es el segundo caso se compara el efecto del diferente grado de microperforación con la aplicación de campos eléctricos, por ello es posible ver una diferencia mas marcada entre los porcentajes de sal obtenidos en el caso del 100% de microperforación y aplicación de campo eléctrico que sin la aplicación de estos.

Además, también se aprecia una disminución para el caso del 50% de microperforación y aplicación de campo eléctrico entre los minutos 200 y 600, retomando un aumento posterior a esto.

En la figura 28 donde se comparan se deja fijo el grado de profundidad de la microperforación (50%) a fin de observar el efecto del campo eléctrico a esa condición. Por lo que se extra del grafico se tiene que para un mismo grado de microperforación, el campo eléctrico no es significativo.

Al igual que en la figura, en la fig. 29 se compara el efecto de campo eléctrico, con diferencia que el grado de microperforación es del 100%. Como se observo en el caso anterior el campo eléctrico no parece influir de forma significativa en los porcentajes de salado.

Cambio en la Humedad.

En la tabla 6 se muestran las distintas humedades que se obtuvieron para los distintos efectos en diferentes tiempos de medición. Sin embargo, los resultados mostraron la humedad se vio afectada. por los campos eléctricos moderados o las microperforaciones puesto que la diferencia en los datos no es significativa para ninguno de los efectos. Esto podría atribuirse al contenido de proteína del salmón que actúa como un Factor limitante durante el proceso de desnaturalización por NaCl (Simpson R., Núñez H. et al 2018). Por esta razón, la concentración de sal aumenta con los campos eléctricos y las microperforaciones, pero la humedad se mantiene en los parámetros de literatura.

Reducción del tiempo de salado.

Para el cálculo de la reducción de tiempo del salado se escogió el valor de 3,5% de concentración de sal como control. Esto se debe a que industrialmente los productos salados tienen entre un 2% y un 3,9%, por ende, entra en los rangos aceptables. Además, según lo observado en la figura 29 el modelo calculado tiene a un comportamiento lineal para tiempos mayores a 600 min que es donde en su mayoría se alcanzan porcentajes de sal cercanos al control.

Como se describen en materiales y métodos se utilizó una interpolación lineal (ec.13) para determinar el tiempo en el cual se alcanzaba el porcentaje. En la tabla 7 se observa de menor a mayor los tiempos calculados por la interpolación. En donde el efecto combinado de los campos eléctricos moderados y las microperforaciones logran una reducción del tiempo de salado de un 66% con respecto al tiempo que tarda la muestra sin la ampliación de los factores. También de esta tabla es posible observar que el efecto del 100% de microperforaciones, pero sin la utilización de los campos eléctricos moderados queda en segundo lugar en la reducción de tiempo, reduciendo un 35% el tiempo en que alcanza el valor de control.

Finalmente, la menor reducción de tiempo se tiene cuando se aplican 50% de microperforaciones con aplicación de campo eléctrico variando solo en un 5%. Esto puede deberse a una interferencia entre los factores cuando no se tiene una perforación del 100% o errores en la toma de datos.

Ajuste de parámetros del modelo.

En la figura 29 puede observarse la representación del modelo para los datos experimentales sin campo eléctrico ni microperforaciones, se puede ver como el modelo se ajusta a los datos experimentales. El valores del coeficiente de cinética fraccional tuvo es 0,46 lo que indica un proceso subdifusivo y el valor de coeficiente de difusión efectivo de $4{,}07 * 10^{-8}\ \left[\frac{m^2}{s}\right]$ lo cual esta dentro de los rangos informados por la literatura.

El modelo se ajusta de mejor forma en la fig. 30 que representa los datos experimentales con una aplicación de campo eléctrico sin la presencia de microperforaciones. Al igual que el experimento anterior el valor del coeficiente de cinética fraccionaria fue 0,460 lo cual, al ser menor a uno, se considera subdifusivo. El valor del coeficiente de difusión efectivo es reportado en la tabla 9 y tiene un valor de $4{,}62 * 10^{-8}\ \left[\frac{m^2}{s}\right]$y es ligeramente mayor al caso de control pues tiene un aumento del 14% con respecto al caso base.

La figura 31 representa el efecto del campo eléctrico y el 100% de profundidad de microperforación, este es el caso donde se alcanzó el máximo de concentración de sal en las muestras y su coeficiente de cinética fraccional es el mas algo de la batería de experimento con un valor de 0,559. Por otro lado, el coeficiente de difusión efectivo es de $1{,}05 * 10^{-7}\left[\frac{m^2}{s}\right]$ cómo se informa en la tabla 9, lo que representa un aumento de 158% con respecto al caso base.

El caso de la aplicación del campo eléctrico moderado y un 50% de profundidad en las microperforaciones es abordado en la figura 32, donde el coeficiente de cinética fraccionaria, al igual que los casos anteriores es menor a uno, tomando un valor de 0,394. El coeficiente de difusión efectiva es de $6{,}86 * 10^{-8}\ \left[\frac{m^2}{s}\right]$, el aumento del valor del coeficiente puede estar relacionado con el campo eléctrico y el 50% de las microperforaciones puesto que es mayor que el caso de la figura 30 donde solo se aplica el campo eléctrico. El incremento en el coeficiente de difusión efectiva es de un 69% con respecto al caso base.

Para los dos últimos casos donde solo se varía el grado de profundidad de las microperforaciones sin la aplicación del campo eléctrico se tiene que los coeficientes de cinética fraccional son 0,401 y 0,387 para 50% de profundidad y 100% de profundidad para las microperforaciones lo que indica que ambos procesos son subdifusivo, en cuanto al coeficiente de

difusión efectiva para el caso del 50% de profundidad de las microperforaciones es $5{,}64 * 10^{-8} \left[\frac{m^2}{s}\right]$ para el caso del100% de microperforaciones el valor es $8{,}05 * 10^{-8} \left[\frac{m^2}{s}\right]$. Se recalca el efecto del 100% de microperforaciones como el efecto responsable del aumento en los factores de difusión efectiva en los caso estudiados.

Ajuste modelo Fickiano.

Al realizar el ajuste Fickiano se pueden observar a través de los gráficos como el modelo puede ajustarse para tiempos cortos, lo que indicaría que sigue el comportamiento de Fick normal, no obstante, pasada un tiempo largo el modelo no se ajusta a los datos experimentales.

Esto podría deberse a la estructura del salmón, debido a que en los primeros 240 minutos la matriz alimenticia no está saturada de sal lo que indica un proceso difusivo sin obstáculos que se adecua a la ley de Fick.

Pasado el tiempo la estructura interna del salmón colapsa producto del aumento de la concentración de sal, lo que dificulta la difusión no siendo representado por la ley de Fick.

Esto se da en ambos niveles de perforación de espesor con o sin la aplicación del campo eléctrico.

Determinación del tamaño de poro.

En la tabla 10 es posible encontrar los valores de radio y diámetro de poro cuyo valor promedio es de $116{,}77\ \mu m$ con una desviación estándar de $8{,}75\ \mu m$ .Para el caso del diametro es de $233.58\ \mu m$ con una desviación estándar de $17{,}5\ \mu m$. Se obtuvo que los valores de radio y diámetro se encuentra entre los rangos informados por la literatura

Determinación de predominancia de efectos.

En la figura 35 se puede observar tres casos en los que se determino el efecto de un factor por sobre otro, como son 100% de profundidad de microperforación y 50% de profundidad de la microperforación con aplicación de campo eléctrico (fig.35a); el efecto de la aplicación de campo eléctrico manteniendo constante el 100% de profundidad de las microperforaciones (fig. 35b); el caso

En este caso de la figura 35a se puede apreciar como la mayoría de los puntos están sobre la línea con pendiente igual a 1, esto indica la predominancia de l efecto de la microperforación al 100% por sobre la de 50%, esto quiere decir que independiente de la acción del campo eléctrico el efecto de microperforar por completo la muestra es mas efectivo que solo tener una perforación del 50%. Esto debido a una mayor área de transferencia que ocurre cuando la perforación es por completo.

En la fig. 35b se puede contrastar el efecto de la aplicación o no del campo eléctrico moderado manteniendo el grado de perforación de las microperforaciones en 100%.

Como se aprecia en el grafico la mayoría de los puntos se encuentran muy cercanos a la bisectriz sin embargo el efecto del campo eléctrico mejora levemente la transferencia de materia.

Esto puede deberse que al haber una área mayor producto del 100% de microperforado, el efecto de la electroporación producida por el campo eléctrico.

Y finalmente en la fig.35c se grafica el efecto de la aplicación o no del campo eléctrico mantenido un 50% de profundidad de las microperforaciones. En el grafico se puede apreciar como para un 50% de profundidad de microperforaciones el efecto del campo eléctrico no es significante en la transferencia de materia.

Conclusiones y Recomendaciones

Como se ha mencionado la innovación y búsqueda de nuevas aplicaciones para el tratamiento de los alimentos es necesario. Realizar mejoras en los tiempos de tratamiento, consumo energético, seguridad e inocuidad deben ser prioritarios para la industria alimentaria.

El presente trabajo de investigación ha permitido establecer mediante la experimentación, análisis da datos y posterior discusión que la aplicación de los campos eléctricos moderados y las microperforaciones con láser de CO2 como pretratamiento reducen el tiempo de salado de salmón atlántico (salmón salar) y aumentan el valor de la concentración máxima.

Se determinó que el proceso por el cual se produce la transferencia de materia en el salado del salmón salar es de carácter subdifusivo, puesto que la determinación del coeficiente de cinética fraccional es menor a uno para todos los casos de estudio.

En cuanto al aumento en la concentración de sal se tiene que para el efecto del acoplamiento de los campos eléctricos moderados y el 100% de microperforación se alcanza un máximo de 4,5% aproximadamente.

El efecto de los factores permitió una reducción de 68% en el tiempo de salado para un porcentaje de 3,5% de concentración de sal en comparación con el tiempo necesario para alcanzar el mismo porcentaje a las condiciones del tratamiento control.

Los valores de Coeficiente de difusión efectivos indican una mejora en el proceso de salado cuando se aplican el campo eléctrico y las microperforaciones, observándose un valor de $1{,}05 * 10^{-7} \left[\frac{m^2}{s}\right]$. Esta tendencia se repite para la aplicación de efectos separados o en conjunto, pero con un menor grado de microperforación.

Los resultados obtenidos muestran una potencialidad para las microperforaciones y el campo eléctrico en la optimización del proceso del salado.

Se recomienda que el estudio de las microperforación se varíe los parámetros del láser de forma de reducir el tiempo de proceso en esta etapa. Futuros estudios debieran incluir la investigación para el escalamiento industrial de estas tecnologías, dimensionando los costos, equipos y restricciones del proceso.

Bibliografía.

-Bilanski, W., & Ferraz, A. (1991, diciembre 17-20). Processing agricultural materials with a CO2 laser: a liner model. Intl. inter-Meeting, Chicago, Illinois, Estados Unidos de América.

-Cavada. G. (2017) “Estudio de la aplicación de campos eléctricos moderados como proceso de aceleración en el salado de salmón atlántico” memoria de pregrado. Departamento de ingeniera química y ambiental. Universidad técnica Federico santa maría.

-Crank, 1975. "The Mathematics of Diffusion. Oxford university. Clarnadon Press, páginas 23-32."

-Fito et al., 2003 “Cold Salting Manufacturing Analysis”, 36, 447–453.

-Flaumenbaum, 1949; Zagorulko, 1953 "Pulsed-Electric-Fields-Induced Effects in Plant Tissues"

-Kaymak-ertekin y Sultanoglu, 2000 “Modelling of mass transfer during osmotic dehydration of apples. Journal of Food Engineering”pag. 243-250

-L.M. and B.M. Burr, 1991. “A field guide to freshwater fishes of North America north of Mexico. Houghton Mifflin Company”, Boston. 432 p.

-Moreno et al, 2011; Moreno et al. 2012 "LWT - Food Science and Technology Effect of ohmic heating and vacuum impregnation on the osmodehydration kinetics and microstructure of strawberries (Cv. Camarosa). LWT-Food Science and Technology, 45(2), 148–154."

-Núñez 2013,"Effect ohmic heating on salting kinetics and quality properties of Atlantic salmon (Salmo Salar)”. Master´s Tesis. Deparment of Chemical and Enviromental. Universidad Técnica Federico Santa María."

-Panagou, E. (2006). “Greek dry-salted olives: Monitoring the dry-salting process and subsequent physico-chemical and microbiological profile during storage under different packing conditions at 4 and 20 °C”, 322–329p.

-Quiroz. 2016 “Efectos de un campo eléctrico moderado sobre la cinética de salado y propiedades de calidad en salmón atlántico (Salmo Salar)”. Memoria de pregrado. Departamento de ingeniería química y ambiental. Universidad Técnica Federico Santa María”

-Robins, C.R. and G.C. Ray, 1986. “A field guide to Atlantic coast fishes of North America”. Houghton Mifflin Company, Boston, U.S.A. 354 p.

-Simpson et al. 2015 "Diffusion mechanisms during the osmotic dehydration of Granny Smith apples subjected to a moderate electric field"

-Sood, P., Ference, C., Narciso, J., & Etxeberria, E. (2009). “Laser etching: a novel technology to label Florida grapefruits. Horttechnolgy” 19, 504-510 p.

-Spiazzi y mascheroni, 1997 "Mass transfer model for os-motic dehydration of fruits and vegetables. I. development of the simulation model”. J. Food Eng. 34:387-410"

-Tanzi and others 2003; Ferraz and others 2007 "Effects of Carbon Dioxide (CO2) Laser Perforation as Skin Pretreatment to Improve Sugar Infusion Process of Frozen Blueberries”

-trademap, 2018. Página de internet de exportaciones e importaciones, visto el día 13 de noviembre a las 23:40."

-Wang & Sastry, 2002 "Effects of moderate electrothermal treatments on juice yield from cellular tissue"

Anexos.

Anexo A

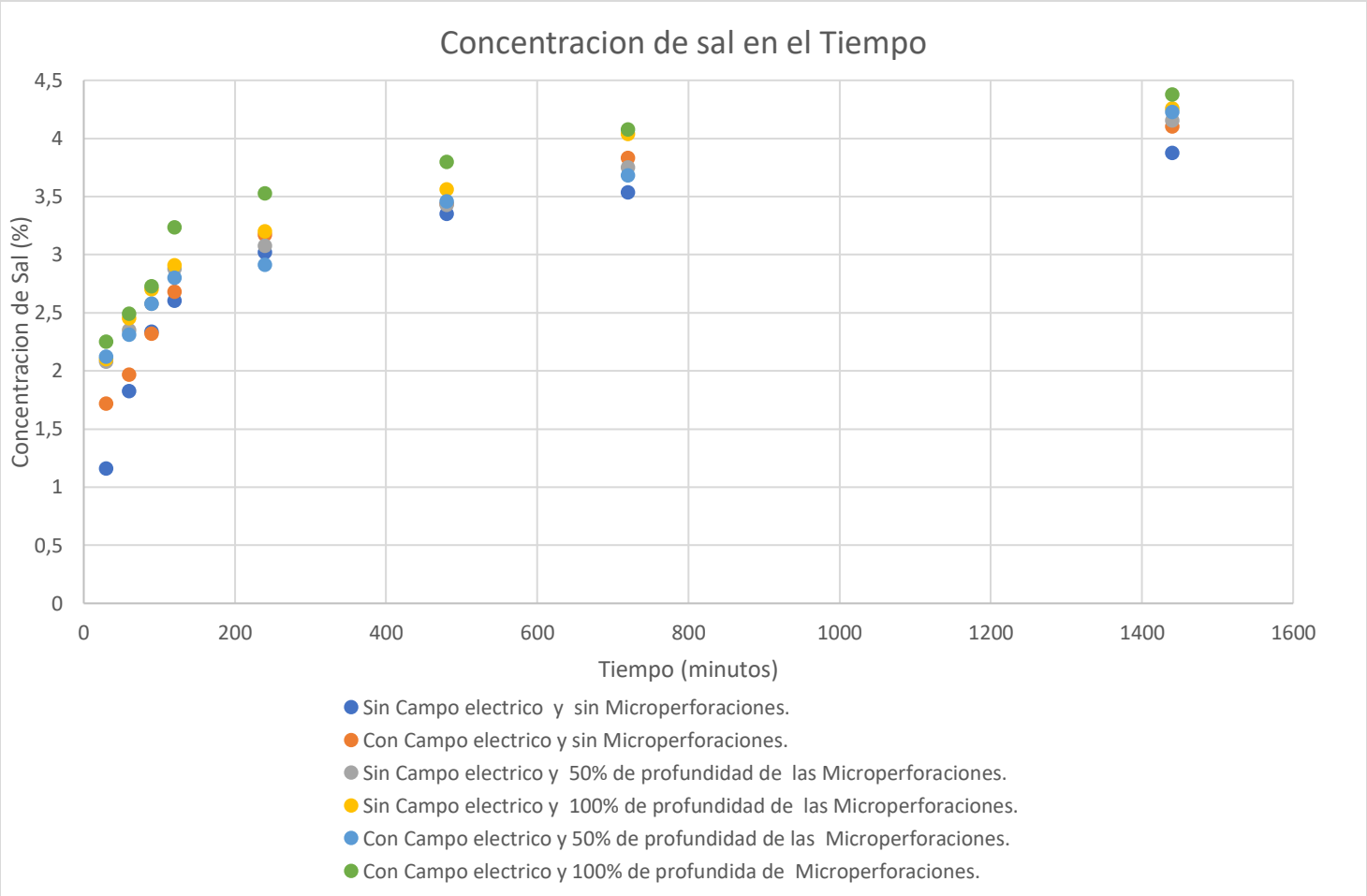


Figura 42 Concentraciones totales de sal para diferentes efectos.

Tabla 11 resumen de concentraciones de sal para diferentes efectos.

	Sin Campo eléctrico y sin microperforaciones.		Con Campo eléctrico y sin Microperforaciones.		Sin Campo eléctrico y 50% de profundidad de las Microperforaciones.	
Medición	Promedio	Desviación.	Promedio	Desviación.	Promedio	Desviación.
30	1,1575	0,09546	1,7175	0,371	2,08	0,057
60	1,825	0,17678	1,965	0,375	2,35	0,071
90	2,335	0,20506	2,32	0,113	2,575	0,035
120	2,6	0,13435	2,68	0,170	2,875	0,035
240	3,02	0,14142	3,17	0,269	3,075	0,106
480	3,35	0,02828	3,435	0,134	3,425	0,035
720	3,535	0,04950	3,83	0,042	3,75	0,000
1440	3,875	0,03536	4,1	0,141	4,155	0,078

Tabla 10 Continuación de tabla resumen de concentración de sal a distintas condiciones.

Sin Campo electrico y 100% de profundidad de las Microperforaciones.		Con Campo electrico y 50% de profundidad de las Microperforaciones.		Con Campo electrico y 100% de profundida de Microperforaciones.	
Promedio	Desviacion.	Promedio	Desviacion.	Promedio	Desviacion.
2,10	0,028284271	2,12	0,296984848	2,250	0,021
2,45	0,155563492	2,31	0,268700577	2,490	0,071
2,70	0,113137085	2,575	0,318198052	2,725	0,035
2,91	0,007071068	2,8	0,141421356	3,235	0,021
3,20	0,070710678	2,91	0,155563492	3,525	0,035
3,56	0,056568542	3,455	0,134350288	3,795	0,007
4,04	0,120208153	3,68	0,169705627	4,075	0,035
4,26	0,007071068	4,23	0,035355339	4,375	0,035

Tabla 11 Datos de experimento sin campo eléctrico ni microperforaciones

Medicion	hora	hora	Concentracion de sal	Peso humedo	Tara	peso seco	Humedad
1	30	0,5	1,12	25,07	18,02	21,04	57%
2	60	1	1,95	19,83	13,34	15,87	61%
3	90	1,5	2,53	25,02	18,43	20,79	64%
4	120	2	2,75	18,57	12,75	14,77	65%
5	240	4	3,18	27,04	17,56	20,22	72%
6	480	8	3,38	19,02	13,45	14,87	75%
7	720	12	3,57	24,43	18,9	20,34	74%
8	1440	24	3,9	24,18	19,78	20,79	77%

Tabla 12 Datos experimentales sin campo eléctrico ni microperforaciones (duplicado)

Medicion	hora		Concentracion de sal	Peso humedo	Tara	peso seco	Humedad
1	30	0,5	1,255	24,83	20,45	22,24	59%
2	60	1	1,7	24,83	19,1	21,23	63%
3	90	1,5	2,24	18,23	14,05	15,34	69%
4	120	2	2,56	24,18	18,5	20,34	68%
5	240	4	2,98	18,25	14,7	15,86	67%
6	480	8	3,34	26,2	22,05	23,23	72%
7	720	12	3,5	24,02	19,25	20,45	75%
8	1440	24	3,85	24,18	19,3	20,34	79%

Tabla 13 Datos experimentales con campo eléctrico ni microperforaciones

Medicion	hora	hora	Concentracion de sal	Peso humedo	Tara	Peso seco	Humedad
1	30	0,5	1,98	21,2	15	17,4	61%
2	60	1	2,23	26,3	20,26	22,45	64%
3	90	1,5	2,4	27,2	19,57	21,4	76%
4	120	2	2,8	24,65	19,18	20,56	75%
5	240	4	3,36	23,98	17,79	19,45	73%
6	480	8	3,53	24,34	19,55	20,65	77%
7	720	12	3,86	21,98	16,36	17,55	79%
8	1440	24	4,2	23,73	17,24	18,54	80%

Tabla 14 Datos experimentales con campo eléctrico ni microperforaciones (duplicado)

Medicion	Hora	Hora	Concentracion de sal	Peso humedo	Tara	peso seco	Humedad
1	30	0,5	2	21,2	15	17,4	61%
2	60	1	2,25	26,3	20,26	22,45	64%
3	90	1,5	2,42	27,2	19,57	21,4	76%
4	120	2	2,82	24,65	19,18	20,56	75%
5	240	4	3,38	23,98	17,79	19,45	73%
6	480	8	3,55	24,34	19,55	20,65	77%
7	720	12	3,88	21,98	16,36	17,55	79%
8	1440	24	4,22	23,73	17,24	18,54	80%

Tabla 15 Datos experimentales con campo eléctrico y 50% de microperforaciones

Medicion	hora	hora	Concentracion de sal	Peso humedo	Tara	peso seco	Humedad
1	30	0,5	2,38	29,02	20,032	23,52	61%
2	60	1	2,5	27,07	19,69	22,4	63%
3	90	1,5	2,8	22,4	13,23	16,5	64%
4	120	2	2,9	25,3	13,84	17,79	66%
5	240	4	3,02	21,72	12,85	15,66	68%
6	480	8	3,25	24,88	13,56	16,99	70%
7	720	12	3,8	28,25	19,47	21,71	74%
8	1440	24	4,2	22,05	12,8	14,45	82%

Tabla 16 Datos experimentales con campo eléctrico y 50% de microperforaciones (duplicado)

Medicion	Hora	Hora	Concentracion de sal	Peso humedo	peso seco	tara	Humedad
1	30	0,5	1,96	29,02	20,032	22,62	71%
2	60	1	2,12	27,07	19,69	21,94	70%
3	90	1,5	2,35	22,4	13,23	15,7	73%
4	120	2	2,7	25,3	13,84	16,71	75%
5	240	4	2,8	21,72	12,85	15,44	71%
6	480	8	3,06	24,88	13,56	16,09	78%
7	720	12	3,56	28,25	19,47	21,1	81%
8	1440	24	4,25	22,05	12,8	14,5	82%

Tabla 17 Datos experimentales con campo eléctrico y 100% de microperforaciones

Medicion	hora	hora	Concentracion de sal	Peso humedo	tara	peso seco	Humedad
1	30	0,5	2,14	27,42	19,24	23,1	53%
2	60	1	2,44	24,79	17,79	20,73	58%
3	90	1,5	2,7	25,05	19,18	21,34	63%
4	120	2	3,25	22,85	15	17,67	66%
5	240	4	3,55	27,54	19,57	22,24	66%
6	480	8	3,8	25,5	19,55	21,86	61%
7	720	12	4,1	28,23	20,26	22,17	76%
8	1440	24	4,4	27	17,8	19,23	84%

Tabla 18 Datos experimentales con campo eléctrico y 100% de microperforaciones (duplicado)

Medicion	Hora	Hora	Concentracion de sal	Peso humedo	Tara	peso seco	Humedad
1	30	0,5	2,11	27,42	19,24	23,1	53%
2	60	1	2,41	24,79	17,79	20,73	58%
3	90	1,5	2,67	25,05	19,18	21,34	63%
4	120	2	3,22	22,85	15	17,67	66%
5	240	4	3,52	27,54	19,57	22,24	66%
6	480	8	3,77	25,5	19,55	21,86	61%
7	720	12	4,07	28,23	20,26	22,17	76%
8	1440	24	4,37	27	17,8	19,23	84%

Tabla 19 Datos experimentales sin campo eléctrico y 100% de microperforaciones

Medicion	hora	hora	Concentracion de sal	Peso humedo	tara	peso seco	peso seco 2	Humedad
1	30	0,5	1,62	22,65	17,5	19,37	19,2	67%
2	60	1	2,56	18,47	10,74	16,95	13,1	69%
3	90	1,5	2,86	22,33	17,65	20,28	19,15	68%
4	120	2	2,91	19,47	12,83	15,54	15,02	67%
5	240	4	3,15	24,15	19,85	21,21	21	73%
6	480	8	3,52	19,35	12,85	15,63	14,71	71%
7	720	12	4,12	19,22	13,65	15,51	14,86	78%
8	1440	24	4,25	18,45	13,75	15,05	14,65	81%

Tabla 20 Datos experimentales sin campo eléctrico y 100% de microperforaciones (duplicado)

Medicion	Hora	Hora	Concentracion de sal	Peso humedo	tara	peso seco1	peso seco2	Humedad
1	30	0,5	1,58	22,93	19,96	21,24	21,24	57%
2	60	1	2,34	23,95	19,87	21,18	21,18	68%
3	90	1,5	2,7	24,22	19,72	21,35	21,04	71%
4	120	2	2,9	25,19	19,24	21,37	21,05	70%
5	240	4	3,25	25,35	20,96	22,05	22,05	75%
6	480	8	3,6	24,67	18,48	20,67	19,94	76%
7	720	12	3,95	27,32	19,42	21,22	21,22	77%
8	1440	24	4,26	27,37	19,42	21,41	20,86	82%

Tabla 21 Datos experimentales sin campo eléctrico y 50% de microperforaciones

Medicion	hora	hora	Concentracion de sal	Peso humedo	tara	peso seco	Humedad
1	30	0,5	2,13	27,45	22,62	24,74	56%
2	60	1	2,3	26,94	21,94	24,1	57%
3	90	1,5	2,55	20,95	15,7	17,64	63%
4	120	2	2,85	22,04	16,71	18,45	67%
5	240	4	3	20,54	15,44	17,05	68%
6	480	8	3,4	22,1	16,99	18,4	72%
7	720	12	3,75	27,34	21,71	22,99	77%
8	1440	24	4,33	20,04	14,45	15,55	80%

Tabla 22 Datos experimentales sin campo eléctrico y 50% de microperforaciones (duplicado)

Medicion	Hora	Hora	Concentracion de sal	Peso humedo	tara	peso seco	Humedad
1	30	0,5	2,21	27,45	22,62	24,74	56%
2	60	1	2,4	26,94	21,94	24,1	57%
3	90	1,5	2,6	20,95	15,7	17,64	63%
4	120	2	2,9	22,04	16,71	18,45	67%
5	240	4	3,15	20,54	15,44	17,05	68%
6	480	8	3,45	22,1	16,99	18,4	72%
7	720	12	3,75	27,34	21,71	22,99	77%
8	1440	24	4,28	20,04	14,45	15,55	80%

Anexo B

A continuación, se presenta todas las graficas de los efectos de las microperforaciones y el campo eléctrico.

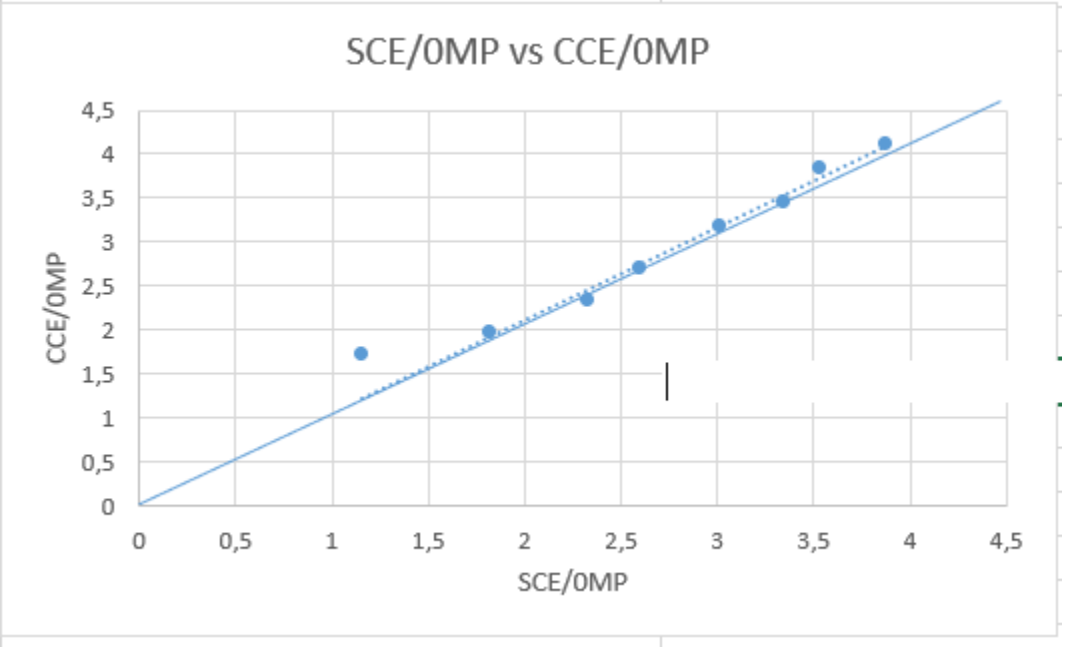


Figura 43 Comparación del efecto de campo eléctrico sin microperforaciones.

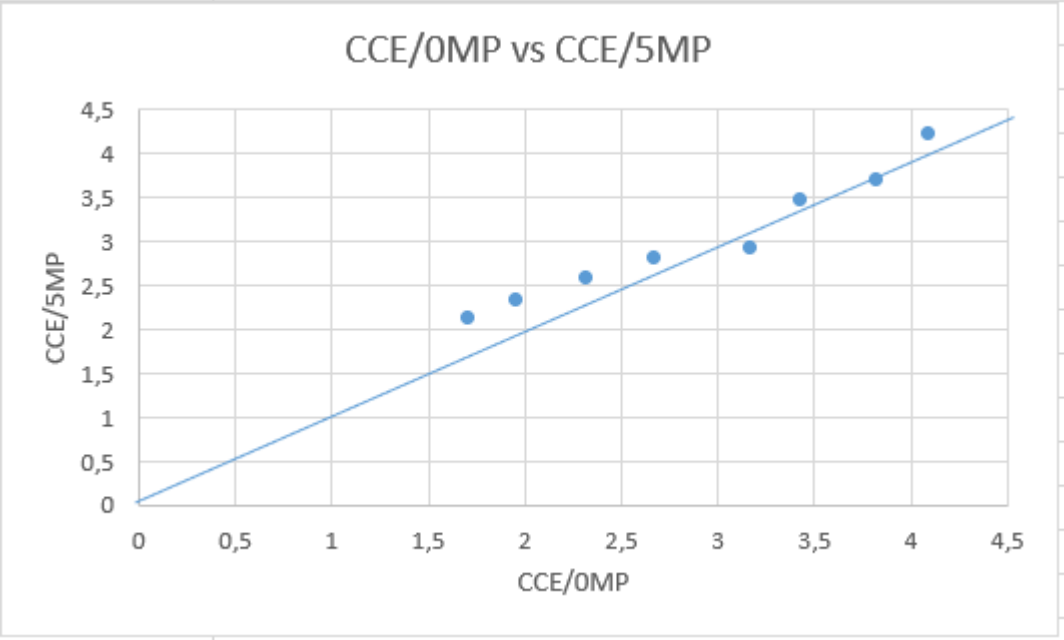


Figura 44 Comparación del efecto de 50% microperforaciones 0% con presencia de campo eléctrico.

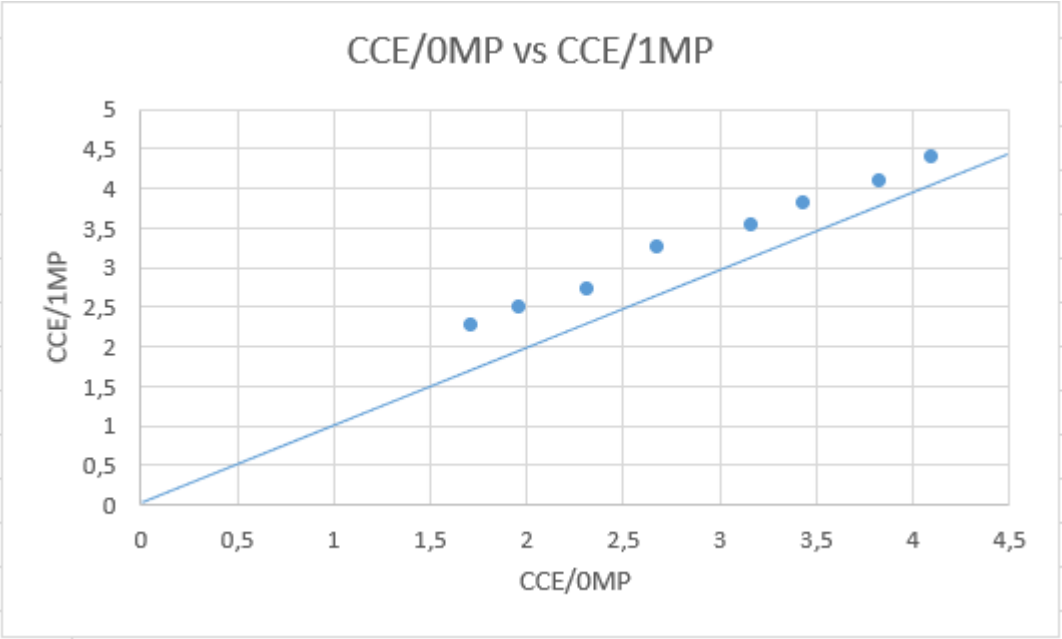


Figura 45 Comparación del efecto de 100% microperforaciones y 0% con presencia de campo eléctrico

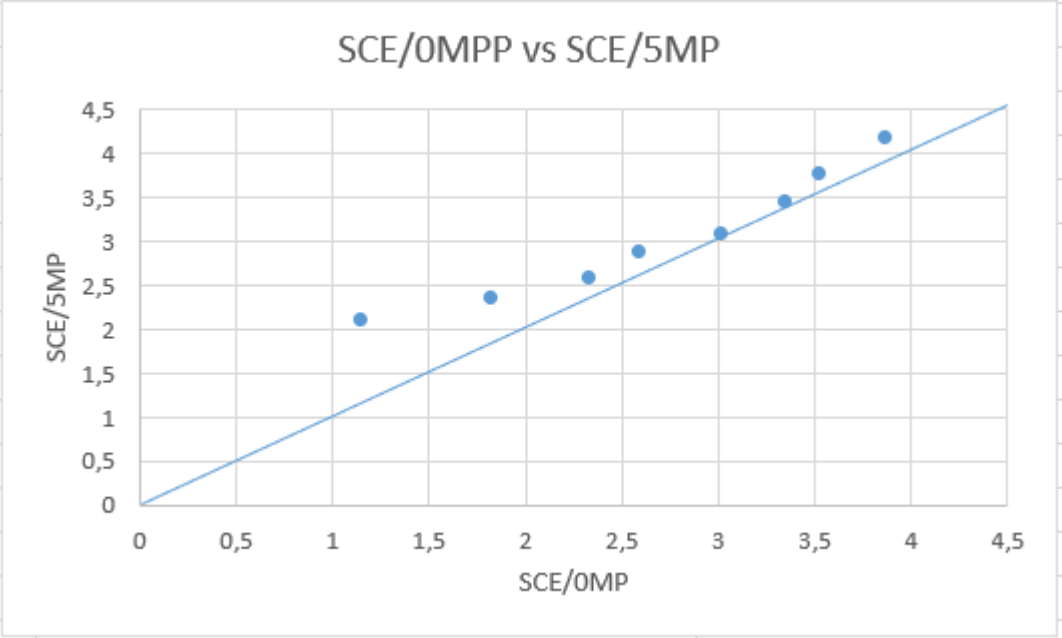


Figura 46 Comparación del efecto de 50% microperforaciones y 0% sin presencia de campo eléctrico

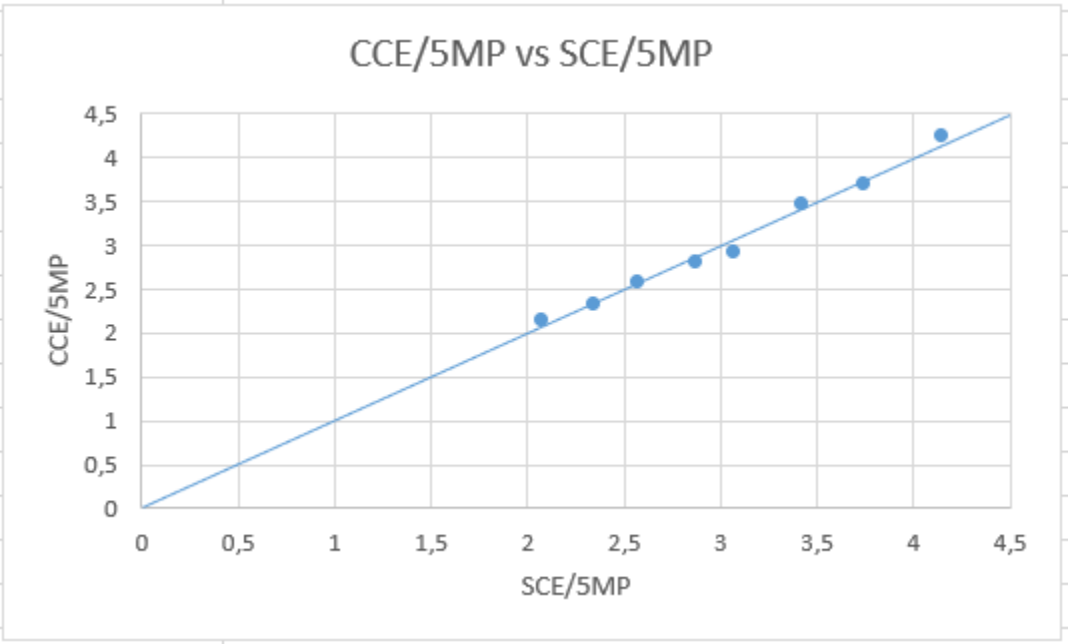


Figura 47 Comparación del efecto con y sin campo eléctrico manteniendo 50% de microperforación.

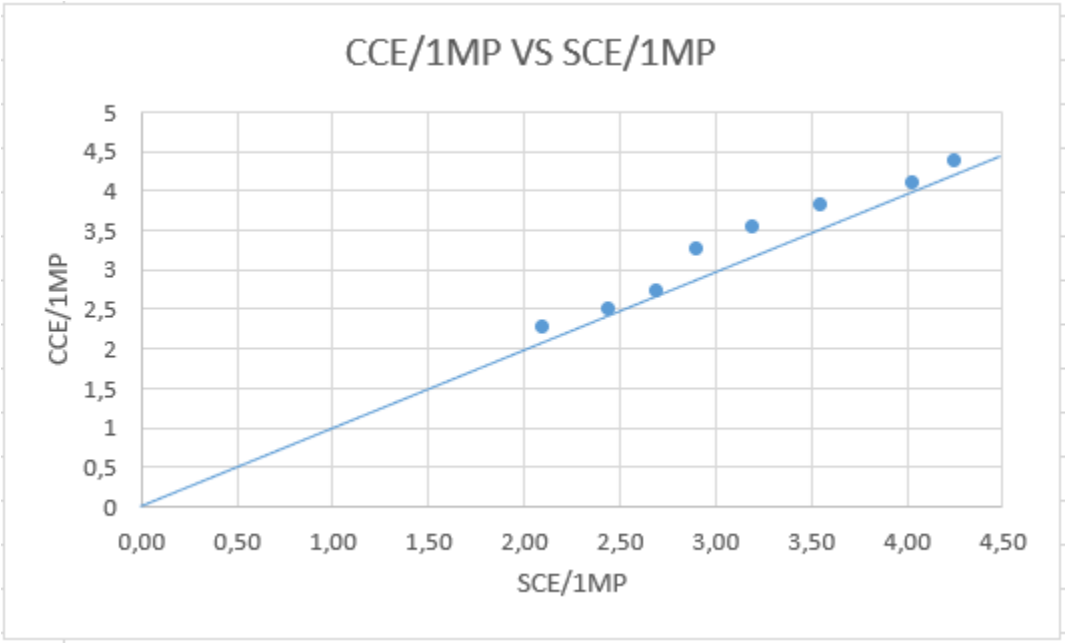


Figura 48 Comparación del efecto con y sin campo eléctrico manteniendo 100% de microperforación.

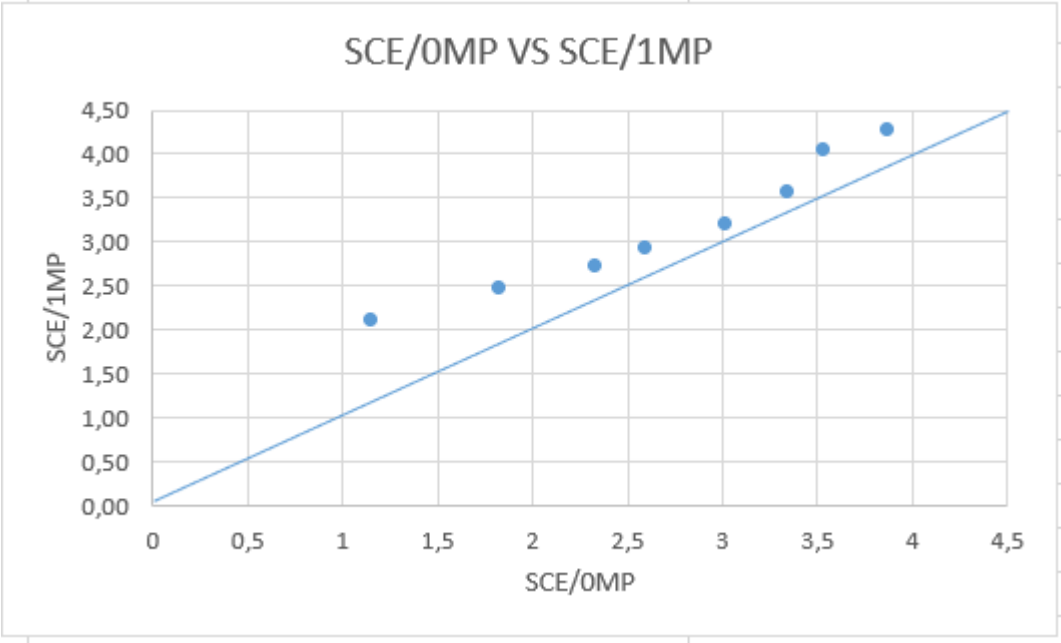


Figura 49 Comparación del efecto de 100% microperforaciones y 0% sin presencia de campo eléctrico

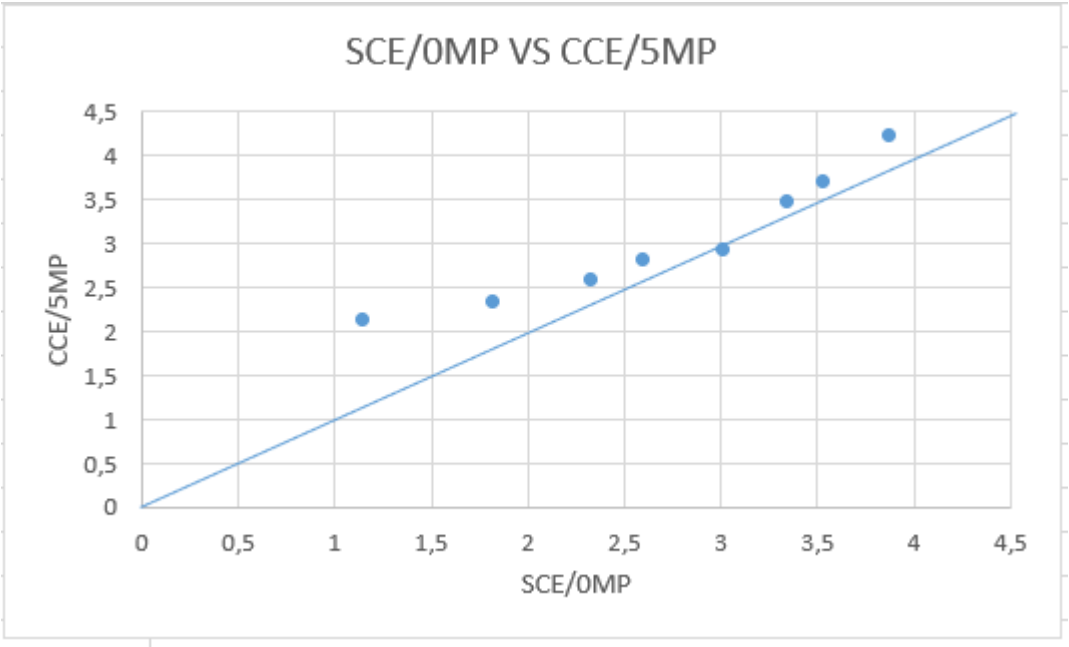


Figura 50 Comparación del efecto de 50% microperforaciones con aplicación de campo eléctrico y 0% sin presencia de campo eléctrico sin campo eléctrico.

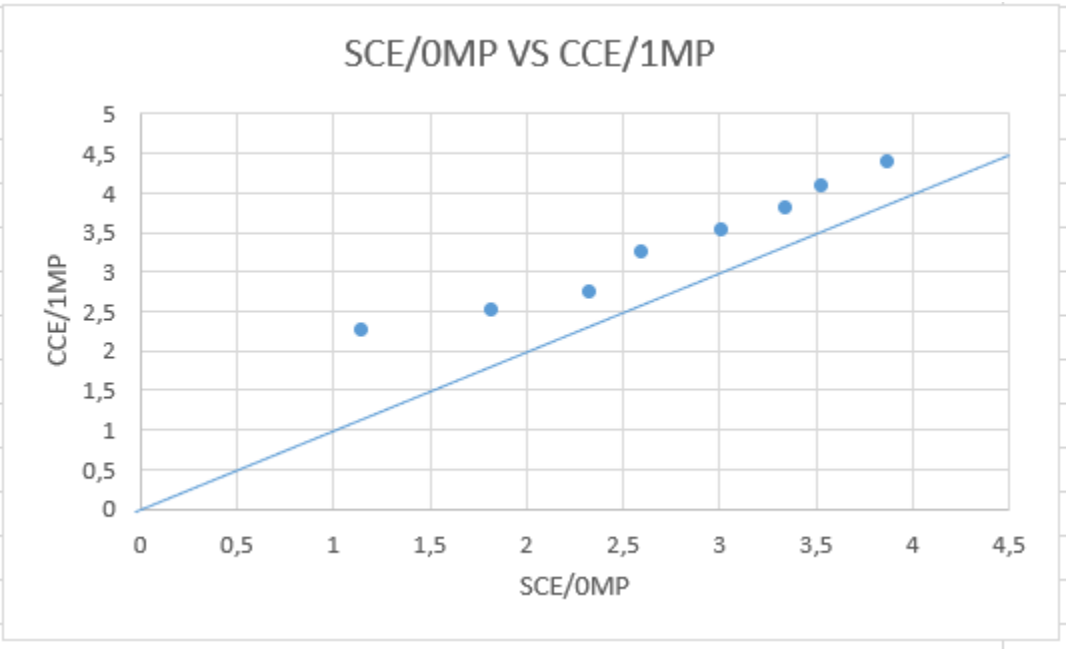


Figura 51 Comparación del efecto de 0% microperforaciones sin campo eléctrico y 100% de microperforaciones con presencia de campo eléctrico