

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA
GRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LOS ALIMENTOS



**ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO Y SENSORIAL
DE HELADO ENRIQUECIDO CON
ESPIRULINA**

TRABAJO FIN DE GRADO
NOVIEMBRE 2025

Autor: Francisco Segura

Tutor: Manuel Viuda Martos

TÍTULO: Análisis fisicoquímico y sensorial de helado enriquecido con espirulina

RESUMEN

La espirulina es el nombre que se le otorga al suplemento dietético que se obtiene a partir de varias especies de cianobacterias del género *Arthrospira*, principalmente *Arthrospira platensis* y *Arthrospira maxima*. El principal uso de la espirulina es como suplemento dietético debido a sus interesantes características nutricionales, destacando su elevado contenido en proteínas de alto valor biológico, ácidos grasos esenciales, vitaminas, minerales y pigmentos bioactivos.

En el presente trabajo se elaboraron diferentes muestras de helado enriquecido con distintas cantidades de espirulina (*Arthrospira platensis*), con el objetivo de evaluar sus características fisicoquímicas y su aceptación sensorial. Se observaron cambios notorios en el overrun, velocidad de derretimiento, color y textura.

Palabras clave: Espirulina, alga, helado, proteínas, verde.

TÍTULO: Physicochemical and sensory analysis of ice cream enriched with spirulina

RESUMEN

Spirulina is the name given to the dietary supplement obtained from various species of cyanobacteria of the genus *Arthrospira*, mainly *Arthrospira platensis* and *Arthrospira maxima*. The main use of spirulina is as a dietary supplement due to its remarkable nutritional properties, particularly its high content of high biological value proteins, essential fatty acids, vitamins, minerals, and bioactive pigments.

In the present study, different samples of ice cream enriched with varying amounts of spirulina (*Arthrospira platensis*) were prepared with the aim of evaluating their physicochemical characteristics and sensory acceptance. Notable changes were observed in overrun, melting rate, color, and texture.

Palabras clave: Spirulina, algae, ice cream, proteins, green.

1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. ESPIRULINA.....	5
1.1.1. DEFINICIÓN Y ORIGEN	5
1.1.2. COMPOSICIÓN NUTRICIONAL	6
1.1.2.1. CONTENIDO PROTEICO Y AMINOÁCIDOS.....	7
1.1.2.2. CARBOHIDRATOS	8
1.1.2.3. LÍPIDOS Y PERFIL DE ÁCIDOS GRASOS	9
1.1.2.4. VITAMINAS Y MINERALES.....	9
1.1.2.5. COMPUESTOS BIOACTIVOS Y ANTIOXIDANTES.....	10
1.1.3. APLICACIONES EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA	11
1.2. HELADO.....	12
1.2.1. DEFINICIÓN	12
1.2.2. COMPOSICIÓN BÁSICA Y PROCESO DE ELABORACIÓN	12
1.2.3. TENDENCIAS ACTUALES.....	13
2. OBJETIVOS	13
2.1. OBJETIVO GENERAL	13
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3. MATERIALES Y MÉTODOS	14
3.1. MATERIAS PRIMAS.....	14
3.2. PROCESO DE ELABORACIÓN.....	14
3.3. MÉTODOS.....	15
3.3.1. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS.....	15
3.3.1.1. OVERRUN.....	15
3.3.1.2. COLOR	15
3.3.1.3. PRUEBA DE FUSIÓN.....	15
3.3.1.4. TEXTURA.....	16
3.3.2. PROPIEDADES SENSORIALES	16
3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	17
4. RESULTADOS Y DICUSIÓN	17
4.1. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS	17
4.1.1. OVERRUN	17
4.1.2. COLOR.....	18
4.1.3. PRUEBA DE FUSIÓN	19
4.1.4. TEXTURA	20
4.2. PROPIEDADES SENSORIALES	20
5. CONCLUSIONES	22
6. BIBLIOGRAFÍA	23

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ESPIRULINA

1.1.1. DEFINICIÓN Y ORIGEN

Espirulina es el nombre comercial que se le otorga a la biomasa seca de cianobacterias del género *Arthrospira*, concretamente de las especies *Arthrospira platensis* y *Arthrospira maxima*, y que es un producto íntegro de origen biológico (Gershwin & Belay, 2007).

Se le otorgó el nombre de espirulina ya que inicialmente estas especies fueron clasificadas dentro del género *Spirulina* de manera errónea durante más de un siglo. Estudios de finales del siglo XX (Komárek & Lund, 1986), entre otros, han confirmado que *Arthrospira* y *Spirulina* representan dos géneros distintos, pese a sus similitudes (Nowicka-Krawczyk et al., 2019).

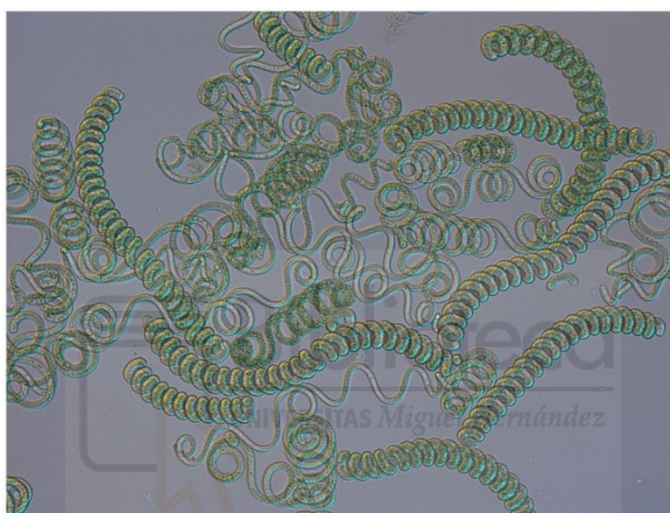


Figura 1. Microscopía óptica de filamentos de *Arthrospira*. Fuente: ResearchGate.

Las cianobacterias son un filo de bacterias que se caracterizan por ser capaces de realizar la fotosíntesis. Son conocidas como algas verde-azuladas, aunque en realidad no son algas, son bacterias fotosintéticas. Poseen forma de espiral y estructura procarionta, y se encuentran principalmente en ambientes acuáticos, cálidos y alcalinos, aunque pueden prosperar en un amplio rango de pH (Sharma & Rana, 2024).

Las algas han sido utilizadas como fuente de alimento por los humanos desde tiempos prehistóricos, y a día de hoy forman parte indispensable de la cultura gastronómica y de las tradiciones culinarias de multitud de países, sobre todo asiáticos. El primer uso documentado de la espirulina data del año 1521, momento en el que un miembro de las tropas de Hernán Cortés, Bernal Díaz del Castillo, describió que en el lago Texcoco, Tenochtitlan (actual México), se cultivaba un alga que se secaba y se empleaba para elaborar una especie de pan llamado “tecuítlatl”, el cual era vendido a la población local. (Gershwin & Belay, 2007).

Otro ejemplo de el uso de espirulina como alimento es la actual República del Chad, en África, donde la tribu Kanembu depende en gran medida de la espirulina como fuente de proteína (AlFadhly et al., 2022). En 1940, Pierre Clement Dangeard, un botánico

francés, publicó un artículo sobre una especie de tarta elaborada con espirulina de nombre “dihé” consumida por la tribu Kanembu cerca del lago Chad, donde crece de manera natural (Gershwin & Belay, 2007).



Figura 2. Mujeres cosechando y secando espirulina en un filtro de arena para la elaboración de dihé. Fuente: Spirulina Source

1.1.2. COMPOSICIÓN NUTRICIONAL

La composición nutricional de la espirulina es dependiente de factores como la disponibilidad de nutrientes, la salinidad, los niveles de pH y de la intensidad de la luz. Pese a la posible variabilidad de sus nutrientes, es indudable que la espirulina es una fuente de proteínas de alto valor biológico (55-70%), hidratos de carbono (15-25%), fibra dietética (8-10%), grasas (6-9%) y minerales (7-13%). También contiene numerosas vitaminas y pigmentos antioxidantes y antiinflamatorios como la clorofila y la ficocianina, carotenoides como la zeaxantina y el beta-caroteno y polifenoles (Podgórska-Kryszczuk, 2024). En la Figura 3 se puede apreciar la composición química y mineral de la espirulina.

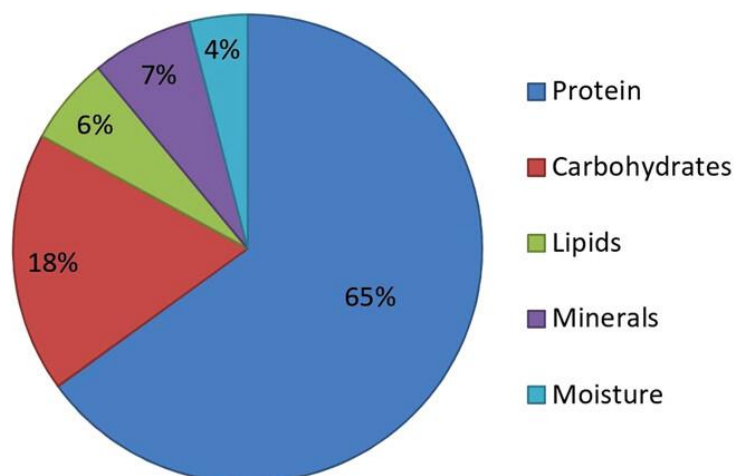


Figura 3. Composición química y mineral de la espirulina. Fuente: (Maddiboyina et al., 2023).

1.1.2.1. CONTENIDO PROTEICO Y AMINOÁCIDOS

El contenido proteico de la espirulina es del 55-70% de su peso seco, lo que la convierte en una fantástica fuente de este macronutriente. Comparándola con alimentos vegetales altos en proteínas como la soja (35-40%), lentejas (25%) o garbanzos (19%) se ve que la espirulina es una excelentísima fuente de proteínas en lo que a cantidad se refiere (Gutiérrez-Salmeán et al., 2015).

Además de la cantidad, las proteínas de la espirulina son de muy alta calidad. Su digestibilidad es muy buena, debido principalmente a que la pared celular de la espirulina carece de celulosa; la celulosa es un polisacárido estructural no digerible, por lo que las enzimas digestivas no pueden acceder completamente a las proteínas internas, lo que reduciría su digestibilidad (R. Sharma & Rana, 2024). La calidad de una proteína depende del contenido, proporción y disponibilidad de sus aminoácidos. Numerosos estudios han concluido que la espirulina contiene todos los aminoácidos esenciales y casi todos los no esenciales, por lo que la espirulina proporciona proteínas completas y de máxima calidad (Gutiérrez-Salmeán et al., 2015).

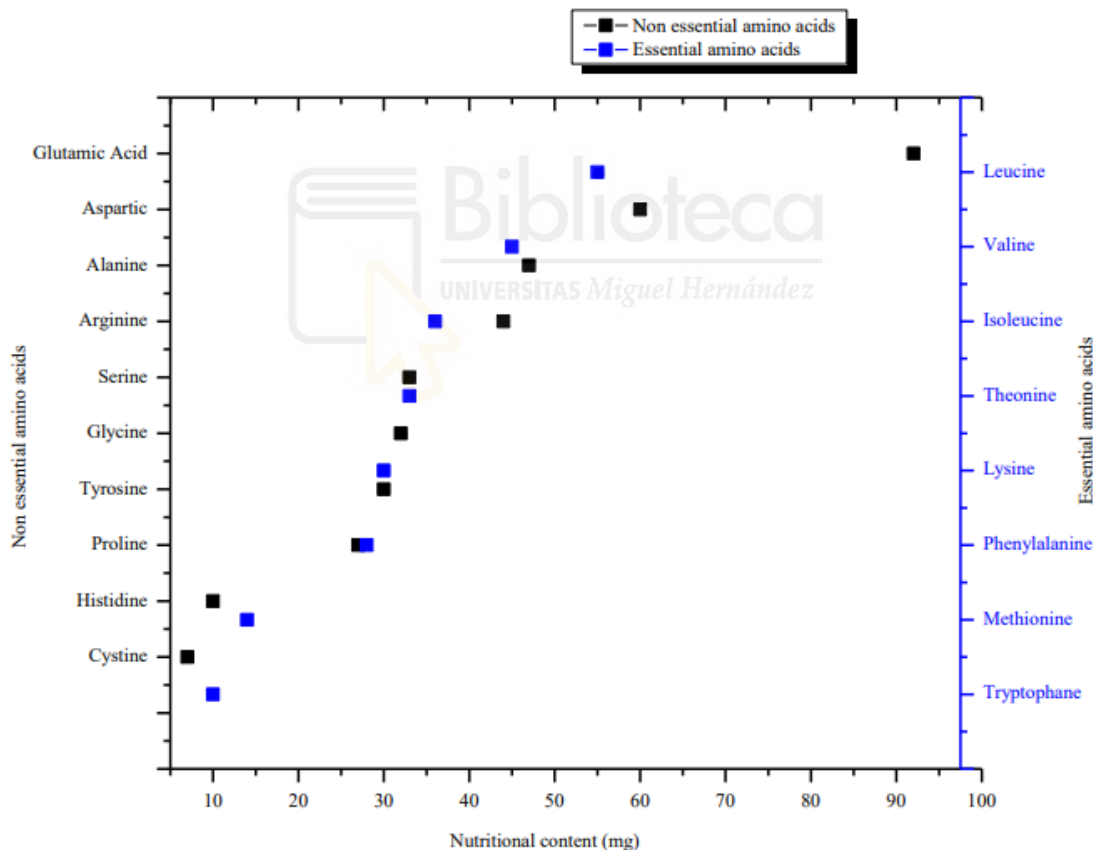


Figura 4. Aminoácidos esenciales y no esenciales de la espirulina. Fuente: (Deasy Liestianty et al., 2019).

Otros factores que determinan la calidad de una proteína son el valor biológico, utilización neta de proteína, coeficiente de digestibilidad y el coeficiente de eficiencia proteica. Históricamente la proteína de referencia siempre ha sido la caseína ya que tiene un perfil de aminoácidos equilibrado, buena digestibilidad y alto valor biológico. En la siguiente tabla se comparan los valores que determinan la calidad de la proteína

de la espirulina con la caseína, y se puede observar que no existen grandes diferencias entre ambas, lo que indica la gran calidad proteica de la espirulina (Tessier et al., 2020).

Tabla 1. Valores de la proteína de espirulina comparados con la proteína de referencia (caseína). Fuente: (Gutiérrez-Salmeán et al., 2015).

Característica	Espirulina	Caseína	% de la referencia
Valor biológico	75	87	86.20
Utilización neta de proteína	62	83	74.69
Digestibilidad	85	95	89.47
Eficiencia proteica	1.9	2.5	76.00

1.1.2.2. CARBOHIDRATOS

La espirulina y otras microalgas y cianobacterias sintetizan los hidratos de carbono a través de la fotosíntesis y la fijación de carbono. Estos carbohidratos desempeñan tanto funciones estructurales (pared celular) como metabólicas (fuente energética, almacenamiento energético, comunicación celular, etc.) (Markou et al., 2021). En condiciones de cultivo estándar, los carbohidratos representan aproximadamente entre un 15 y un 25% del peso seco de la espirulina. No obstante, estudios como (Liu et al., 2019) han demostrado que, modificando determinados parámetros de cultivo como temperatura, salinidad, intensidad de la luz o limitar nutrientes como el nitrógeno o fósforo, la espirulina puede acumular mucho más carbohidrato, alcanzando hasta el 65% del peso seco. A continuación, se muestra la Tabla 2, donde se puede observar la mayor acumulación de carbohidratos en la espirulina al limitar el fósforo durante el cultivo.

Tabla 2. Composición bioquímica de *A. platensis* cultivada con distintas concentraciones de fósforo. Fuente: (Markou et al., 2021).

Concentración de P (mg-P/L)	Proteínas totales (% PDS)	Carbohidratos totales (% PDS)	Lípidos totales (% PDS)
89 (Control)	59.03 ± 3.61	23.04 ± 1.95	8.58 ± 1.43
1.5	22.45 ± 3.55	65.25 ± 3.88	5.56 ± 1.03
2	23.09 ± 1.57	65.01 ± 3.24	6.68 ± 1.16
3	25.88 ± 1.99	51.06 ± 3.24	7.98 ± 1.66
4	33.02 ± 2.91	33.42 ± 2.67	7.38 ± 1.98

Tras la hidrólisis de los carbohidratos, el monosacárido predominante resulta ser la glucosa, aunque también aparecen otros azúcares como la ramnosa, galactosa o manosa en menor proporción (Markou et al., 2021). La mayoría de los carbohidratos de la espirulina no son azúcares libres, son polisacáridos: glucanos, almidones o polisacáridos de reserva y polisacáridos estructurales (Liu et al., 2019). Entre los diferentes tipos de carbohidratos, los β -glucanos son los de mayor interés debido a sus estudiadas funciones y propiedades, entre las que se incluyen regulación del metabolismo de glucosa y lípidos, estimulación del sistema inmunológico, actividad antioxidante y antiinflamatoria y efectos anticancerígenos. Podemos encontrar β -glucanos en alimentos como hongos, cereales (avena o cebada), algas y microalgas (incluida la

espirulina). Debido a sus numerosos beneficios y propiedades para la salud, los β -glucanos son cada vez más utilizados en la elaboración de alimentos funcionales (Murphy et al., 2023).

1.1.2.3. LÍPIDOS Y PERFIL DE ÁCIDOS GRASOS

La fracción lipídica de la espirulina suele ser de en torno al 5-10% de su peso seco. La cantidad total de lípidos, así como el perfil lipídico pueden variar dependiendo de factores como la temperatura o la disponibilidad de nutrientes. Esto se ha demostrado en estudios como (Colla et al., 2004), donde se vio que un aumento en la temperatura de cultivo de 30 a 35 °C influye positivamente en la concentración de lípidos, mientras que un aumento en la concentración de nitrato de sodio produce el efecto contrario.

El perfil lipídico de la espirulina es bastante diverso, ya que incluye ácidos grasos saturados, monoinsaturados y poliinsaturados (PUFAs). Estos últimos son de especial interés, puesto que no pueden ser sintetizados por el cuerpo humano debido a que no poseemos las enzimas necesarias para su síntesis, por lo que tienen que ser suministrados a través de la dieta. La espirulina contiene ácido linoleico (18:2 ω -6) y ácido α -linolénico (18:3 ω -3), que son los dos ácidos grasos esenciales. A partir de ellos se sintetizan otros ácidos grasos de grandísima importancia como son el ácido γ -linolénico, el ácido eicosapentaenoico (EPA) y ácido docosahexaenoico (DHA). Estos dos últimos son ácidos grasos omega-3 considerados esenciales porque, a pesar de que el cuerpo puede formarlos a partir del ácido α -linolénico, esta conversión es poco eficiente y deben ser suministrados en la dieta (Vlamos, 2021). Los ácidos grasos EPA y DHA son vitales para el cuerpo ya que existe evidencia de que ambos mejoran el perfil lipídico, reducen la inflamación y reducen el riesgo de padecer enfermedades cardiovasculares (Rengachar et al., 2022). Además, tienen efectos positivos sobre el desarrollo y función cerebral, el estado de ánimo y ayudan a prevenir trastornos neuro-psiquiátricos (Kidd, 2007). En cuanto al ácido γ -linolénico, la espirulina es uno de los pocos alimentos que contienen cantidades significativas. A pesar de no ser esencial, su importancia radica en que es precursor de prostaglandinas, leucotrienos y tromboxanos, que son eicosanoides que contribuyen al equilibrio del organismo actuando sobre procesos fisiológicos y patológicos como la inflamación, las respuestas inmunes y la coagulación (Gutiérrez-Salmeán et al., 2015).

1.1.2.4. VITAMINAS Y MINERALES

La espirulina es un alimento con numerosas vitaminas, principalmente hidrosolubles del grupo B (B1, B2, B3, B5, B7, B9 y B12), aunque también contiene vitaminas liposolubles como son la vitamina A y E. Estas cantidades se pueden observar en la Tabla 3. Según estudios, la espirulina puede contener también vitaminas C y K en algunos casos, pero depende de factores como la cepa y el método de cultivo (Rahim et al., 2021). Las vitaminas del grupo B desempeñan papeles fundamentales en rutas metabólicas de producción de energía, funciones neuronales y de síntesis de ADN, entre otras. Se ha demostrado que este grupo de vitaminas tiene efectos positivos sobre la fatiga, la

función cerebral y cognitiva y ayuda a ralentizar el declive y la atrofia cerebral (Tardy et al., 2020).

Tabla 3. Composición vitamínica de la espirulina. Fuente: (Podgórska-Kryszczuk, 2024).

Vitaminas (mg/100g)	
Tiamina (vitamina B1)	3.5 - 4.8
Riboflavina (vitamina B2)	4 - 5.5
Niacina (vitamina B3)	14 - 15
Ácido pantoténico (vitamina B5)	0.1 - 0.2
Piridoxina (vitamina B6)	0.8
Biotina (vitamina B7)	0.01 - 0.055
Ácido fólico (vitamina B9)	0.01 - 0.071
Cianocobalamina (vitamina B12)	0.32 - 0.36
B-caroteno (vitamina A)	177 - 580
Tocoferol (vitamina E)	12.5 - 100

Como se aprecia en la Tabla 4, la espirulina presenta cantidades significativas de potasio, fósforo, hierro sodio y magnesio, además de ser rica en sodio, zinc, cobre, manganeso y selenio. Los minerales se clasifican en macrominerales (ingesta diaria mayor a 100mg/día) y microminerales (menor a 100mg/día). Dentro de los macrominerales encontramos algunos como el potasio, fósforo, calcio y sodio, que son los minerales más abundantes en la espirulina. Una buena ingesta de minerales es esencial para mantener las funciones básicas del cuerpo ya que son esenciales en la homeostasis, el metabolismo y un correcto crecimiento general de nuestro cuerpo (M. A. Farag et al., 2023).

Tabla 4. Composición mineral de la espirulina. Fuente: (Podgórska-Kryszczuk, 2024).

Minerales (mg/100g)	
Potasio	1400 - 1600
Fósforo	800 - 1000
Calcio	700 - 1500
Sodio	250 - 900
Magnesio	370 - 400
Hierro	100 - 170
Zinc	3 - 7
Cobre	1.2
Manganeso	3.5
Selenio	0.09 - 0.72

1.1.2.5. COMPUESTOS BIOACTIVOS Y ANTIOXIDANTES

La espirulina es rica en una amplia variedad de compuestos bioactivos con propiedades antioxidantes tales como ficocianina, β -caroteno, tocoferoles, fenoles y flavonoides. Una excesiva cantidad de radicales libres y de especies reactivas de oxígeno (ROS) en el cuerpo puede causar daño celular y está demostrado que son la causa de muchas enfermedades relacionadas con la oxidación de lípidos y proteínas y daño en el material genético. Estos compuestos antioxidantes de la espirulina son capaces de eliminar las

moléculas reactivas causantes de numerosas enfermedades, por lo que tiene un gran potencial terapéutico (Han et al., 2021).

La ficocianina, un pigmento natural de color azul, es el compuesto más bioactivo de la espirulina. En la naturaleza, es difícil encontrar una fuente de ficocianina mayor que la espirulina. Este pigmento posee una capacidad antioxidante muy elevada debido principalmente a su estructura química (Figura 5). La ficocianina es capaz de proteger a las células del cuerpo frente al estrés oxidativo provocado por las especies reactivas de oxígeno (Hirata et al., 2000).

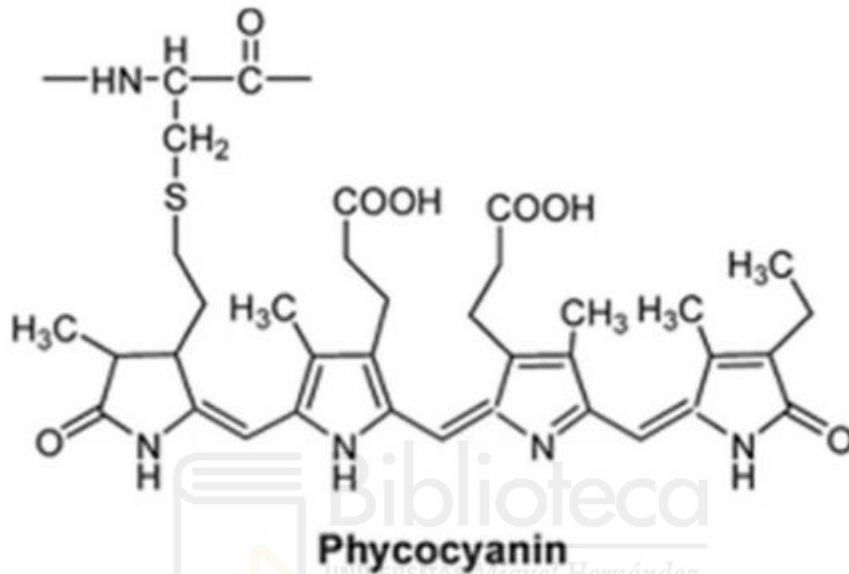


Figura 5. Estructura de la ficocianina. Fuente: (Han et al., 2021).

1.1.3. APLICACIONES EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA

En los últimos años se ha experimentado un rápido crecimiento de la población mundial, un agotamiento de los recursos energéticos e hídricos, una escasez de alimentos y un aumento de la contaminación y de las emisiones. Producir el alimento necesario para toda a población dentro de algunos años será todo un desafío. Es por ello que en este tiempo ha cobrado cada vez más importancia la producción de alimentos sostenibles que ayuden a revertir esta situación (Withana et al., 2025).

La espirulina y otras microalgas son una fuente de alimento relativamente novedosa que va ganando peso con el pasar de los años. En primer lugar, porque la composición nutricional de la espirulina es muy valiosa: gran contenido en proteínas de muy alta calidad, PUFAs de cadena larga, vitaminas y minerales o carotenoides, entre otros. Pero también es una fuente sostenible, ya que el cultivo de las microalgas no resta espacio de cultivo de otros alimentos y en muchos casos puede ser cultivada con agua salada o no potable. En nutrición humana sus principales usos son en forma de suplemento alimenticio y como ingrediente tecno funcional debido a sus propiedades emulsionantes, gelificantes y espumantes (Ramírez-Rodrigues et al., 2021).

También pueden tener varias aplicaciones como ingredientes en piensos para acuicultura, aves, rumiantes, cerdos y mascotas debido a su perfil nutricional. Además es ampliamente utilizada en el sector cosmético y farmacéutico por sus propiedades antiinflamatorias, antioxidantes y antimicrobianas (Withana et al., 2025).

1.2. HELADO

1.2.1. DEFINICIÓN

La definición legal de helado varía según el país. En España, la definición de helado es la siguiente: los helados son preparaciones alimenticias que han sido llevadas al estado sólido, semisólido o pastoso, por una congelación simultánea o posterior a la mezcla de las materias primas utilizadas y que han de mantener el grado de plasticidad y congelación suficiente, hasta el momento de su venta al consumidor (Real Decreto 618/1998).

El helado es una emulsión de tipo aceite en agua con una estructura formada por de pequeños cristales de hielo, burbujas de aire y gotas de grasa que otorgan al helado su característica textura cremosa. Existen diferentes tipos de helado según sus ingredientes; helado lácteo, helado sin lácteos, gelato o sorbete son algunos ejemplos. Existen además tres categorías donde se pueden clasificar los helados. Estas son: económico, estándar o premium. Los helados de menor calidad están elaborados con ingredientes de menor calidad y suelen tener una mayor cantidad de aire (overrun) en comparación con el premium («The Story Of Ice Cream», 2024).

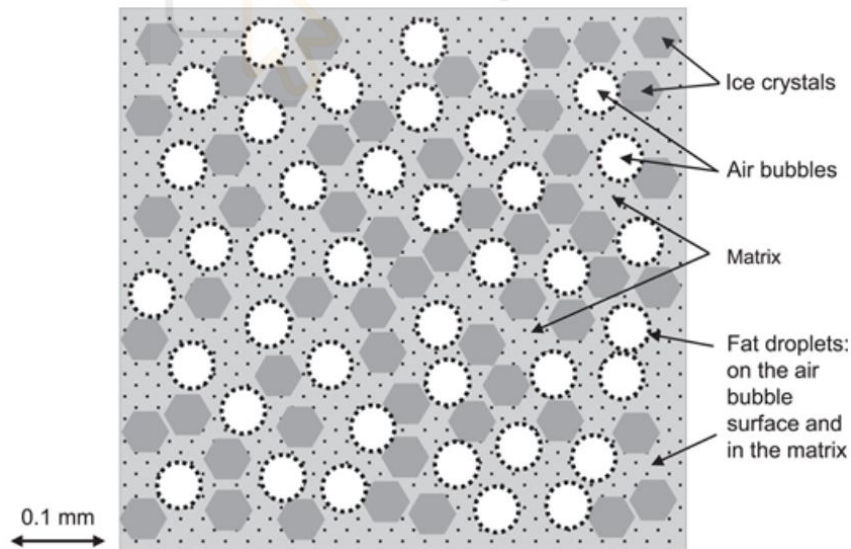


Figura 6. Microestructura del helado. Fuente: («The Story Of Ice Cream», 2024).

1.2.2. COMPOSICIÓN BÁSICA Y PROCESO DE ELABORACIÓN

La mayoría de los helados tradicionales están elaborados a partir de leche y grasa láctea, que gracias a su contenido graso y proteico ayuda a dar cuerpo y sensación cremosa al producto final. Se utilizan también azúcares, los cuales cumplen una doble función; aportar dulzor a la mezcla y ayudar a controlar la congelación y a evitar la formación de

grandes cristales de hielo. Muchas veces también se emplean estabilizantes como carragenatos o goma-guar y emulsionantes como monoglicéridos, diglicéridos o lecitinas para mantener la mezcla estable durante la congelación y el almacenamiento (Goff & Hartel, 2013).

El proceso de elaboración es bastante similar en todas las fábricas: en primer lugar, se mezclan todos los ingredientes y se pasteuriza la mezcla para asegurar su inocuidad. Después se homogeniza y se deja reposar durante algunas horas a baja temperatura para que las proteínas absorban agua y aumenten su viscosidad. Este paso se llama maduración. La fase más importante en la elaboración de helado es el mantecado, que es la fase en la que se mezcla y se congela la mezcla al mismo tiempo. El objetivo de esto es la incorporación de aire a la mezcla, conocido como overrun. El movimiento continuo combinado con la baja temperatura provoca que los cristales de hielo y las gotas de grasa y aire sean de muy pequeño tamaño, lo que garantiza una textura suave y cremosa (Gallagher & Hartel, 2025).

1.2.3. TENDENCIAS ACTUALES

En la actualidad los helados se han transformado en un producto mucho más diverso que busca satisfacer a consumidores modernos preocupados por distintos aspectos como la salud o la sostenibilidad. Los helados reducidos en grasa, elaborados con grasas vegetales en lugar de animales y reducidos en azúcar son cada vez más populares. Un ejemplo de esto es el estudio elaborado por Da Silva Faresin et al. (2021), donde se elaboró un helado enriquecido con espirulina e inulina reducido un 50% en grasa y un 25% en azúcar, sin comprometer los parámetros sensoriales.

Por otro lado, el crecimiento de las dietas vegetarianas y veganas y la creciente preocupación por el bienestar animal han hecho que se elaboren helados que cumplan con estas características. Helados a base de plantas, con bebida vegetal (almendra, avena, coco, arroz...) en sustitución de la leche tiene cada vez más demanda.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

El objetivo general del presente trabajo de fin de grado fue evaluar y analizar el efecto de la adición de espirulina (*A. platensis*) sobre las propiedades fisicoquímicas y sensoriales de un helado.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcanzar este objetivo principal se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Determinar el efecto de las distintas concentraciones de espirulina sobre las propiedades fisicoquímicas del helado (color, pH, textura, overrun y velocidad de derretimiento).

- Evaluar el efecto de las distintas concentraciones de espirulina sobre las características organolépticas del helado (aparición, sabor o aroma marino/vegetal, dulzor...)
- Determinar la aceptación sensorial de las muestras de helado con distintas concentraciones de espirulina

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIAS PRIMAS

Las materias primas empleadas para elaborar las distintas muestras de helado enriquecido con espirulina fueron las siguientes: leche entera de vaca, nata, azúcar, yema de huevo y espirulina.

3.2. PROCESO DE ELABORACIÓN

En primer lugar, se pesan las cantidades necesarias de cada ingrediente. El azúcar se adiciona a las yemas de huevo y se bate ligeramente hasta que la mezcla blanquee. Por otro lado, en un cazo se añade la leche y la nata y se calientan hasta una temperatura de 40 °C. A continuación, se añade una parte de la mezcla de leche y nata caliente sobre las yemas con azúcar y se remueve, evitando así la coagulación del huevo. Tras esto se adiciona el resto de la leche y nata y se lleva nuevamente al cazo hasta alcanzar una temperatura de 60 °C durante 3 minutos sin dejar de remover. Se retira la mezcla del fuego, se añade la espirulina y se mezcla hasta que la mezcla sea homogénea.

Previo al comienzo de la elaboración se deja el recipiente de la máquina heladera en el congelador por al menos 12 horas. Se utilizó una máquina heladera Silvercrest SECM 12 C7 (Figura X). Una vez atemperada la mezcla, esta se vierte en el recipiente de la máquina heladera, el cual está a una temperatura de -18 °C, y se deja batiendo por aproximadamente 30 minutos. Por último, se traspasa el helado a un recipiente hermético y se introduce en el congelador para conservarlo a -18 °C.



Figura 7. Máquina heladera Silvercrest SECM 12 C7.

3.3. MÉTODOS

3.3.1. PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS

3.3.1.1. OVERRUN

El overrun de un helado se refiere a la cantidad de aire que se introduce en la mezcla de manera natural durante el proceso de mantecado (batido y congelación). En heladería, este es uno de los parámetros más importantes, puesto que determina la textura, la cremosidad y el rendimiento del producto final. El overrun se calculó mediante el peso de la mezcla sin congelar (P_m) y el peso de la mezcla congelada (P_c) utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Overrun (\%)} = \frac{P_m - P_c}{P_c} \cdot 100$$

3.3.1.2. COLOR

El color de las distintas muestras fue determinado mediante un colorímetro Minolta CM-2600d (Minolta Camera Co, Osaka, Japón) utilizando el iluminante D65 y un observador estándar de 10°. Para separar las muestras del equipo se utilizaron cristales de baja reflectancia (Minolta CR-A51/1829- 752). Fueron realizadas 3 mediciones por muestra, en 3 puntos diferentes de la misma.

El modelo de color utilizado para analizar las muestras fue CIELAB con sus respectivas coordenadas: luminosidad (L^*), coordenada rojo-verde (a^*) y coordenada amarillo-azul (b^*). A partir de estas mediciones se obtuvieron los datos del tono (h^*) y croma (C^*) mediante las fórmulas:

$$h^* = \tan^{-1} \cdot \left(\frac{b^*}{a^*} \right)$$

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

3.3.1.3. PRUEBA DE FUSIÓN

Para medir la derretibilidad o la velocidad de fusión del helado se utilizó el método gravimétrico de drenaje. Fueron empleados un colador de malla fina metálica que se situó sobre un vaso recolector. Previo al inicio del análisis, las muestras fueron almacenadas a una temperatura de -10 °C para asegurar una temperatura uniforme. El tamaño de las muestras fue de 10 g y la temperatura ambiente en el momento del análisis fue de 22 °C. Cada análisis se realizó por triplicado.

Las muestras de helado se colocaron en el colador y se midió el tiempo que tarda en derretirse una cantidad de 5 mL de muestra. También se midió el tiempo que tarda en caer la primera gota de cada muestra. Con esto obtenemos la tasa de derretimiento, expresada en mL/min y obtenida mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Tasa de derretimiento} = \frac{\text{mL derretidos}}{\text{min}}$$

3.3.1.4. TEXTURA

Para la determinación de las propiedades de firmeza y fuerza de cizallamiento, se utilizó un texturómetro TA-XT2i (Stable Micro Systems, Surrey, Inglaterra) (Figura 8) con el accesorio TCC Spreadability Rig (Three Cone Container) acoplado. Este accesorio está compuesto por una copa troncocónica en la que se introduce la muestra a analizar, y un pistón de punta cónica de 90° que se desplaza verticalmente hasta el punto de máxima profundidad de penetración.

Las muestras se introdujeron en la copa asegurándose que no quedara ninguna burbuja de aire en su interior. El sobrante se eliminó con una espátula para que la superficie fuera plana. Se seleccionó una distancia inicial de 25 mm entre ambos accesorios y una velocidad de penetración de 3 mm/s. Las muestras se analizaron a una temperatura de entre -10 y -5 °C y cada análisis se realizó por triplicado.



Figura 8. Texturómetro TA-XT2i (Stable Micro Systems).

3.3.2. PROPIEDADES SENSORIALES

Para la evaluación sensorial del helado se contó con la ayuda de 30 jueces no entrenados: alumnos, profesores y trabajadores de la escuela. Esta evaluación tuvo lugar en la sala de catas del edificio Oriol de la Escuela Politécnica Superior de Orihuela (EPSO). Los atributos sometidos a evaluación en el cuestionario fueron los siguientes: color, homogeneidad, olor, dulzor, sabor general, cremosidad, textura y presencia o ausencia de algún sabor extraño. También se dejó espacio a que los jueces indicaran de manera escrita qué sabores o aromas eran capaces de reconocer, o si les recordaba a algo en concreto. Se utilizó una escala hedónica de 9 puntos: (1: Extremadamente desagradable y 9: Extremadamente agradable). Cada juez probó las tres muestras y

valoró mediante el cuestionario las características sensoriales de cada una. Se proporcionó agua para limpiar el paladar entre muestra y muestra.

3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico de los datos se realizó mediante análisis de varianza unifactorial (ANOVA de una vía) y se aplicó la prueba post-hoc de Tukey con un nivel de significancia estadística de $p < 0,05$. Se utilizó el software IBM SPSS Statistics 30.0 (SPSS Inc. Chicago, EE. UU.) Los resultados se expresaron como media \pm desviación estándar y las diferencias estadísticamente significativas fueron indicadas con letras en superíndice.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS

4.1.1. OVERRUN

El overrun es la cantidad de aire que se incorpora al helado durante su mantecado y es uno de los parámetros más importantes. En la Tabla 3 están reflejados los datos de overrun de las diferentes muestras, con el objetivo de determinar si la presencia de espirulina influye de alguna manera en el overrun del helado.

Tabla 3. Peso de la masa sin congelar, congelada y overrun de las distintas muestras.

Muestra	Peso líquido (g)	Peso congelado (g)	Overrun (%)
HC	45.65 \pm 1.01 ^a	39.51 \pm 0.90 ^a	15.54 \pm 0.99 ^c
H1	46.35 \pm 0.07 ^a	38.15 \pm 0.13 ^{ab}	21.50 \pm 0.40 ^b
H2	45.65 \pm 0.49 ^a	36.82 \pm 0.42 ^b	23.99 \pm 0.08 ^a

Valores seguidos de la misma letra dentro de una misma columna indican que no existen diferencias significativas ($p > 0,05$) según el test de rangos múltiples de Tukey. HC: muestra sin espirulina; H1: muestra con 0,5% espirulina; H2: muestra con 1% de espirulina.

Observando la tabla vemos que existen diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre el overrun de todas las muestras, donde HC presenta los valores más pequeños, seguida de H1, y H2 con los mayores números. En el estudio publicado por Boyanova et al. (2022) se analizaron las propiedades fisicoquímicas y sensoriales de helados enriquecidos con espirulina, donde se elaboraron 4 muestras con las siguientes concentraciones de espirulina: 0%, 0,5%, 1% y 1,5%. En comparación con los resultados obtenidos en este estudio, los valores obtenidos son muy similares: no se observa un overrun tan elevado en ninguna de las muestras, pero en ambos el overrun aumenta a medida que aumenta la concentración de espirulina. La justificación de este aumento reside en que la espirulina actúa como estabilizante y emulsionante gracias a su contenido graso y proteico, lo que favorece a estabilizar las burbujas de aire y a retenerlas más eficientemente.

4.1.2. COLOR

A continuación, en la Tabla 4, se muestran los datos de color de las muestras obtenidos tras el análisis con el colorímetro:

Tabla 4. Coordenadas de color de las tres muestras de helado enriquecido con espirulina.

Muestra	L*	a*	b*	C*	h*
HC	81.40±0.20 ^a	2.23±0.07 ^a	13.50±0.24 ^a	13.61±0.28 ^a	80.54±0.27 ^a
H1	63.51±0.66 ^b	-12.11±0.44 ^c	3.87±0.47 ^c	12.72±1.03 ^a	162.66±0.75 ^b
H2	60.31±1.70 ^c	-11.44±1.41 ^b	3.64±0.64 ^b	12.02±1.56 ^a	162.59±2.13 ^b

Valores seguidos de la misma letra dentro de una misma columna indican que no existen diferencias significativas ($p > 0,05$) según el test de rangos múltiples de Tukey. HC: muestra sin espirulina; H1: muestra con 0,5% espirulina; H2: muestra con 1% de espirulina.

La luminosidad (L^*), como es lógico, es bastante superior en la muestra HC ya que esta no contiene espirulina. Las muestras H1 y H2 tienen una luminosidad similar entre ellas, pero bastante menor en comparación con HC. A pesar de esta proximidad, existen diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre las tres muestras. La coordenada rojo-verde (a^*) también es bastante mayor en HC, mientras que H1 y H2 tienen valores muy similares entre ellas y bastante menores en comparación con HC, lo que sugiere un color más verdoso. Además, existen diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre las tres muestras. La coordenada amarillo-azul (b^*) vuelve a ser mayor en HC, seguida de H1 y H2 con el valor mínimo. Existen diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en todas las muestras. Los valores del croma (C^*) son muy similares en las tres muestras, no existiendo diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$) entre ellas. Por último, el tono (h^*) de la muestra HC es el menor de los tres, situándose en la zona amarilla, mientras que las muestras H1 y H2 presentan valores más altos correspondientes con una zona más verdosa, debido a su contenido en espirulina. Existen diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre HC con respecto a H1 y H2, pero no entre H1 y H2 ($p > 0,05$).

Los resultados obtenidos concuerdan con los obtenidos en el estudio publicado por Da Silva Faresin et al. (2021), donde se analizaron las coordenadas de color de helados enriquecidos con espirulina y/o inulina. En él se observaron mayores valores de L^* , a^* y b^* en la muestra sin espirulina que en las muestras enriquecidas. El efecto de la adición de espirulina tiene un efecto claro sobre las coordenadas de color: disminución de L^* debido al oscurecimiento de la mezcla, disminución de a^* debido al color verde de la espirulina y disminución de b^* debido a los tonos azulados de la espirulina.



Figura 9. Color de las muestras HC, H1 y H2, de izquierda a derecha.

4.1.3. PRUEBA DE FUSIÓN

Para evaluar las propiedades de fusión de las muestras se midió el tiempo que tarda en caer la primera gota de cada muestra, el tiempo que tarda en derretirse la muestra completa y la tasa de derretimiento (mL/min). En la Tabla 5 se observan los resultados obtenidos:

Tabla 5. Tiempo de caída de primera gota, tiempo de derretimiento total y tasa de derretimiento de las tres muestras de helado.

Muestra	Primera gota (min)	Tiempo de fusión (min)	Tasa derretimiento (mL/min)
HC	7.38 ± 0.185 ^c	14.57 ± 0.455 ^c	0.206 ± 0.0065 ^c
H1	8.72 ± 0.421 ^a	16.75 ± 0.175 ^a	0.179 ± 0.0019 ^a
H2	9.01 ± 0.850 ^b	17.07 ± 1.462 ^b	0.176 ± 0.0145 ^b

Valores seguidos de la misma letra dentro de una misma columna indican que no existen diferencias significativas ($p > 0,05$) según el test de rangos múltiples de Tukey. HC: muestra sin espirulina; H1: muestra con 0,5% espirulina; H2: muestra con 1% de espirulina.

El tiempo que tardó en caer la primera gota de la muestra HC fue el menor de las tres muestras, seguido de H1 con valores algo mayores, y H2 con los valores más altos. Existen diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre las tres muestras. En cuanto al tiempo de fusión de las muestras, los resultados son similares, HC presenta los menores tiempos, con H1 y H2 algo mayores, observándose diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre las tres muestras. Por último, la tasa de derretimiento fue mayor en la muestra HC y menor en la H2, H1 se situó ligeramente por encima de H2. Existen diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre las tres muestras. La adición de espirulina tuvo un efecto directo sobre las propiedades de fusión del helado; el tiempo de derretimiento de la primera gota aumentó en casi 2 minutos por cada 0,5% de espirulina adicionada, la fusión del helado se retrasó en 2,2 minutos en H1 y 2,5 en H2, y los mililitros derretidos por minuto disminuyeron considerablemente entre HC y las muestras enriquecidas. Esto se puede ver de manera más visual en la Figura 10.

Los resultados muestran una mayor resistencia a la fusión en las muestras enriquecidas con espirulina en comparación con la muestra control. Entre ellas, la muestra con mayor concentración de espirulina es ligeramente más resistente a la fusión. Moharam et al. (2025) realizaron un estudio similar, en el que evaluaron las propiedades de fusión de helados enriquecidos con espirulina en concentraciones de 0,5%, 1% y 1,5%, donde la muestra con mayor cantidad de espirulina fue la más resistente. Solo existieron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre las muestras 0,5% y 1%.

La mejora en las propiedades de fusión de las muestras enriquecidas con espirulina se relaciona directamente con la capacidad de retención de agua de las proteínas de la espirulina, las cuales actúan como emulsionantes que estabilizan las burbujas de aire y las gotas de grasa, disminuyendo así el tiempo de fusión (El-Rahman et al., 1997). Boyanova et al. (2022) es otro estudio muy similar en el que los resultados finales son muy parecidos a los obtenidos. En él se obtienen tiempos de fusión bastante más

elevados y distantes entre cada muestra, pero el patrón se repite; a mayor concentración de espirulina, mayor resistencia a la fusión.

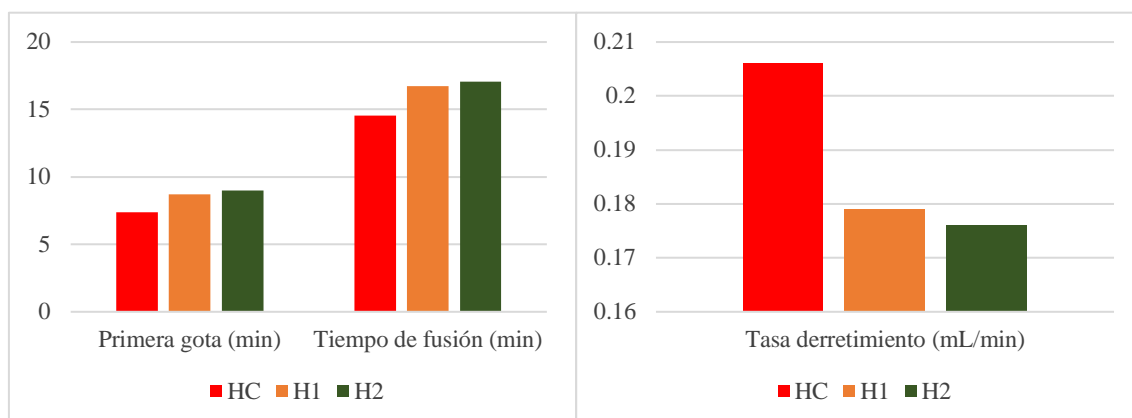


Figura 10. Propiedades de fusión de las muestras de helado.

4.1.4. TEXTURA

En la Tabla 6 se muestran los datos de textura (firmeza y trabajo de cizalla) de las tres muestras de helado.

Tabla 6. Datos de textura de las distintas muestras de helado.

Muestra	Firmeza (N)	Trabajo de cizalla (N·sec)
HC	13.68 ± 2.77 ^b	11.72 ± 1.49 ^b
H1	8.97 ± 0.76 ^a	7.74 ± 0.72 ^a
H2	6.69 ± 0.82 ^a	7.35 ± 0.91 ^a

Valores seguidos de la misma letra dentro de una misma columna indican que no existen diferencias significativas ($p > 0,05$) según el test de rangos múltiples de Tukey. HC: muestra sin espirulina; H1: muestra con 0,5% espirulina; H2: muestra con 1% de espirulina.

Los atributos de firmeza y trabajo de cizallamiento de las muestras H1 y H2 son bastante similares entre sí. En cuanto a la muestra HC, esta obtuvo valores más elevados tanto en firmeza como en trabajo de cizallamiento en comparación con H1 y H2. Existen diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) de HC con el resto, mientras que entre H1 y H2 no existen diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$).

La adición de espirulina influye directamente en la textura del producto disminuyendo la dureza y el trabajo de cizalla. Los valores de overrun de las distintas muestras de helado están relacionados con las propiedades texturales tal y como reporta Boyanova et al. (2022) en su estudio, cuyos resultados son muy similares a estos. El overrun está relacionado de manera indirecta con la firmeza y el trabajo de cizalla, si el helado tiene una mayor cantidad de aire en su interior su textura será más suave y cremosa.

4.2. PROPIEDADES SENSORIALES

En el análisis sensorial la muestra HC fue la que obtuvo las mejores puntuaciones en todos los atributos. En referencia a los atributos visuales, color y homogeneidad, se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) en las puntuaciones de la muestra HC en

comparación con H1 y H2. Las puntuaciones de color y homogeneidad de HC fueron de 8 puntos aproximadamente, mientras que en H1 y H2 fueron de 5,7 y 6,7 respectivamente. En cuanto a los atributos gustativos, hubo diferencias significativas ($p < 0,05$) tanto en sabor como en dulzor entre las tres muestras. Los atributos de textura, cremosidad y olor fueron calificados de manera similar en las tres muestras, por lo que no existen diferencias significativas ($p > 0,05$). Por último, en la valoración general de las muestras hubo diferencias significativas ($p < 0,05$) entre todas las muestras, donde HC fue valorada con una nota media de 7,6, H1 obtuvo 6,9 y H2 6,4.

Los resultados obtenidos del análisis sensorial de las muestras de helado muestran que la adición de espirulina tiene un efecto significativo en el sabor, el dulzor y sobre todo en el color, donde la mejor valorada es HC y la peor H2. La muestra H1 fue la mejor valorada entre las muestras que contenían espirulina.

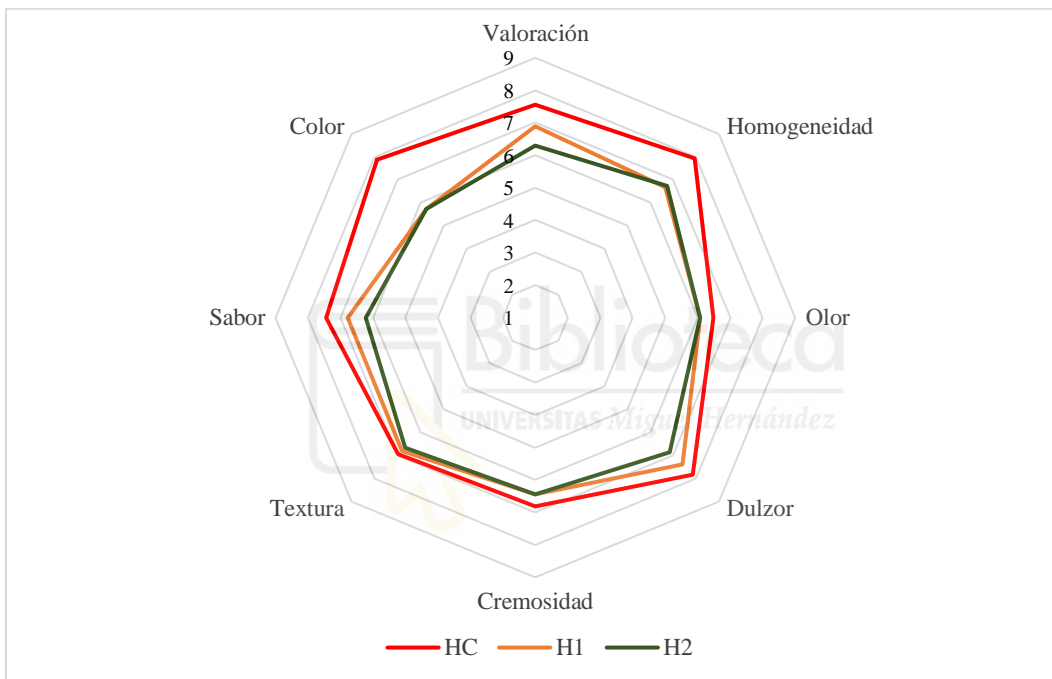


Figura 11. Análisis sensorial de las muestras de helado.

Por otro lado, también se evaluó la presencia o la ausencia de sabores que fuesen extraños o desagradables para los panelistas. Los resultados pueden verse en las Figuras 12 y 13.

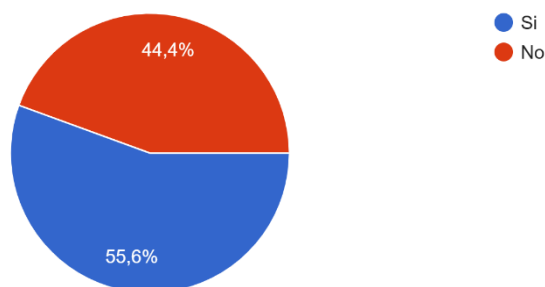


Figura 12. Presencia o ausencia de sabores extraños o desagradables en la muestra H1.

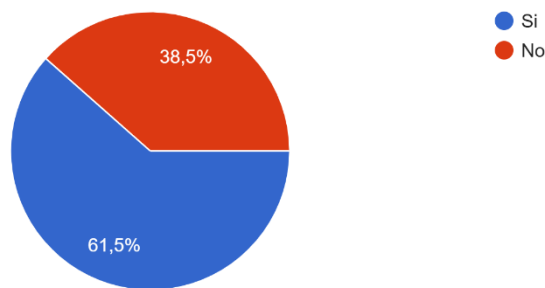


Figura 13. Presencia o ausencia de sabores extraños o desagradables en la muestra H2.

En la muestra H1 un 55,6% de los panelistas reportaron sabores extraños o desagradables, los cuales fueron definidos como gusto herbáceo, sabor a infusión de hierbas, acelga o cucurucho de helado. Por su parte, en la muestra H2 un 61,5% de los panelistas asegura sentir un sabor extraño o desagradable que les recuerda a vegetales amargos, arroz, cebada, turrón o anís.

5. CONCLUSIONES

- La espirulina es una excelente fuente de proteínas de alta calidad debido a su alta digestibilidad y a su completo perfil de aminoácidos. Tiene un muy buen perfil lipídico, donde predominan PUFAs como el ácido linoleico, ácido α -linolénico y el ácido γ -linolénico, precursores de EPA y DHA con importantes beneficios para la salud. Destaca también su contenido en β -glucanos, con propiedades funcionales muy valiosas. Por todo esto, el interés en el uso de la espirulina en la elaboración de alimentos funcionales es cada vez mayor.
- La adición de espirulina en el helado tuvo efectos positivos en el overrun, proporcionando un aumento de un 9,5% entre la muestra sin espirulina y la muestra con mayor concentración de alga. También se observaron resultados positivos en las propiedades de fusión de las muestras; aunque no hubo deferencias tan marcadas, se puede concluir que la espirulina ralentiza el proceso de derretimiento.
- El color de las muestras también se vio influenciado en gran medida por la adición de espirulina. Las muestras enriquecidas presentan valores de L^* , a^* y b^* significativamente menores que la muestra control. La muestra control tuvo valores de h^* más elevados que las muestras enriquecidas, las cuales fueron muy similares. Por último, C^* fue prácticamente igual en todas las muestras.
- Al observar los resultados del análisis de textura podemos concluir que tanto la firmeza como el trabajo de cizallamiento se vieron reducidos e las muestras enriquecidas con espirulina. La muestra control obtuvo los parámetros más elevados, debido probablemente a la relación indirecta de estos dos parámetros con el overrun del helado.
- Por último, el análisis sensorial de las muestras sugiere que el helado control fue el que obtuvo mejores puntuaciones en todos los atributos que se estaban evaluando,

registrando una puntuación media final de 7,6 puntos (gusta mucho). La muestra enriquecida con un 0,5% de espirulina obtuvo una nota de 6,9 (gusta moderadamente) y la enriquecida con 1% de espirulina tuvo 6,4 puntos (gusta ligeramente). Las diferencias no fueron tan grandes entre las muestras enriquecidas, no así en comparación con la muestra control. La adición de un 1% de espirulina supuso una menor aceptación que un 0,5%, por lo que se concluye que la cantidad óptima se encuentra entre 0,1% y 0,5%.

6. BIBLIOGRAFÍA

- AlFadhly, N. K. Z., Alhelfi, N., Altemimi, A. B., Verma, D. K., & Cacciola, F. (2022). Tendencies Affecting the Growth and Cultivation of Genus Spirulina: An Investigative Review on Current Trends. *Plants*, 11(22), 3063. <https://doi.org/10.3390/plants11223063>
- Altmann, B. A., & Rosenau, S. (2022). Spirulina as Animal Feed: Opportunities and Challenges. *Foods*, 11(7), 965. <https://doi.org/10.3390/foods11070965>
- Ascencio, J. J., Philippini, R. R., Gomes, F. M., Pereira, F. M., Da Silva, S. S., Kumar, V., & Chandel, A. K. (2021). Comparative Highly Efficient Production of β -glucan by *Lasiodiplodia theobromae* CCT 3966 and Its Multiscale Characterization. *Fermentation*, 7(3), 108. <https://doi.org/10.3390/fermentation7030108>
- Boyanova, P., Gradinarska, D., Dobрева, V., Panayotov, P., Momchilova, M., & Zsivanovits, G. (2022). Effect of *Spirulina platensis* on the quality and antioxidants characteristics of ice cream. *BIO Web Of Conferences*, 45, 01009. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20224501009>
- Colla, L. M., Bertolin, T. E., & Costa, J. A. V. (2004). Fatty Acids Profile of *Spirulina platensis* Grown Under Different Temperatures and Nitrogen Concentrations. *Zeitschrift Für Naturforschung C*, 59(1-2), 55-59. <https://doi.org/10.1515/znc-2004-1-212>

- Da Silva Faresin, L., Devos, R. J. B., Reinehr, C. O., & Colla, L. M. (2021). Development of ice cream with reduction of sugar and fat by the addition of inulin, *Spirulina platensis* or phycocyanin. *International Journal Of Gastronomy And Food Science*, 27, 100445. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100445>
- El-Rahman, A. A., Madkor, S., Ibrahim, F., & Kilara, A. (1997). Physical Characteristics of Frozen Desserts Made with Cream, Anhydrous Milk Fat, or Milk Fat Fractions. *Journal Of Dairy Science*, 80(9), 1926-1935. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(97\)76133-2](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(97)76133-2)
- Farag, M. A., Abib, B., Qin, Z., Ze, X., & Ali, S. E. (2023). Dietary macrominerals: Updated review of their role and orchestration in human nutrition throughout the life cycle with sex differences. *Current Research In Food Science*, 6, 100450. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100450>
- Farag, M. R., Alagawany, M., El-Hac, M. E. A., & Dhama, K. (2015). Nutritional and Healthical Aspects of *Spirulina* (Arthrospira) for Poultry, Animals and Human. *International Journal Of Pharmacology*, 12(1), 36-51. <https://doi.org/10.3923/ijp.2016.36.51>
- Gallagher, L. R., & Hartel, R. W. (2025). Microstructural evolution of ice cream after start-up in a continuous scraped surface freezer. *Journal Of Food Engineering*, 392, 112466. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2025.112466>
- Gershwin, M., & Belay, A. (2007). *Spirulina in Human Nutrition and Health*. <https://doi.org/10.1201/9781420052572>
- Goff, H. D., & Hartel, R. W. (2013). *Ice cream*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6096-1>

- Han, P., Li, J., Zhong, H., Xie, J., Zhang, P., Lu, Q., Li, J., Xu, P., Chen, P., Leng, L., & Zhou, W. (2021). Anti-oxidation properties and therapeutic potentials of spirulina. *Algal Research*, 55, 102240. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102240>
- Hirata, T., Tanaka, M., Ooike, M., Tsunomura, T., & Sakaguchi, M. (2000). Antioxidant activities of phycocyanobilin prepared from *Spirulina platensis*. *Journal Of Applied Phycology*, 12(3-5), 435-439. <https://doi.org/10.1023/a:1008175217194>
- Kidd, P. M. (2007). Omega-3 DHA and EPA for cognition, behavior, and mood: clinical findings and structural-functional synergies with cell membrane phospholipids. *PubMed*, 12(3), 207-227. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18072818>
- Lafarga, T., Fernández-Sevilla, J. M., González-López, C., & Acien-Fernández, F. G. (2020). Spirulina for the food and functional food industries. *Food Research International*, 137, 109356. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109356>
- Liestianty, D., Rodianawati, I., Arfah, R. A., Assa, A., Patimah, N., Sundari, N., & Muliadi, N. (2019). Nutritional analysis of spirulina spto promote as superfood candidate. *IOP Conference Series Materials Science And Engineering*, 509, 012031. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/509/1/012031>
- Liu, Q., Yao, C., Sun, Y., Chen, W., Tan, H., Cao, X., Xue, S., & Yin, H. (2019). Production and structural characterization of a new type of polysaccharide from nitrogen-limited *Arthrospira platensis* cultivated in outdoor industrial-scale open raceway ponds. *Biotechnology For Biofuels*, 12(1), 131. <https://doi.org/10.1186/s13068-019-1470-3>
- Maddiboyina, B., Vanamamalai, H. K., Roy, H., Ramaiah, N., Gandhi, S., Kavisri, M., & Moovendhan, M. (2023). Food and drug industry applications of microalgae

- Spirulina platensis: A review. *Journal Of Basic Microbiology*, 63(6), 573-583.
<https://doi.org/10.1002/jobm.202200704>
- Markou, G., Eliopoulos, C., Argyri, A., & Arapoglou, D. (2021). Production of Arthrospira (Spirulina) platensis Enriched in β -Glucans through Phosphorus Limitation. *Applied Sciences*, 11(17), 8121. <https://doi.org/10.3390/app11178121>
- Moharam, M. S., El-Hawary, M. Y., Awad, S. A., & Amer, D. A. (2025). Development of Functional Ice Cream Fortified with Spirulina (Arthrospira platensis): Improvements in Nutritional and Antioxidant Properties. *Journal Of Sustainable Agricultural And Environmental Sciences*, 4(3), 95-102.
<https://doi.org/10.21608/jsaes.2025.410814.1153>
- Murphy, E. J., Rezoagli, E., Collins, C., Saha, S. K., Major, I., & Murray, P. (2023). Sustainable production and pharmaceutical applications of β -glucan from microbial sources. *Microbiological Research*, 274, 127424.
<https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127424>
- Nowicka-Krawczyk, P., Mühlsteinová, R., & Hauer, T. (2019). Detailed characterization of the Arthrospira type species separating commercially grown taxa into the new genus Limnospira (Cyanobacteria). *Scientific Reports*, 9(1), 694.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-36831-0>
- Podgórska-Kryszczuk, I. (2024). Spirulina—An Invaluable Source of Macro- and Micronutrients with Broad Biological Activity and Application Potential. *Molecules*, 29(22), 5387. <https://doi.org/10.3390/molecules29225387>
- Rahim, A., Çakir, C., Ozturk, M., Şahin, B., Soulaïmani, A., Sibaoueih, M., Nasser, B., Eddoha, R., Essamadi, A., & Amiri, B. E. (2021). Chemical characterization and nutritional value of Spirulina platensis cultivated in natural conditions of

- Chichaoua region (Morocco). *South African Journal Of Botany*, 141, 235-242.
<https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.05.006>
- Ramírez-Rodrigues, M. M., Estrada-Beristain, C., Metri-Ojeda, J., Pérez-Alva, A., & Baigts-Allende, D. K. (2021). Spirulina platensis Protein as Sustainable Ingredient for Nutritional Food Products Development. *Sustainability*, 13(12), 6849.
<https://doi.org/10.3390/su13126849>
- Rengachar, P., Bhatt, A. N., Polavarapu, S., Veeramani, S., Krishnan, A., Sadananda, M., & Das, U. N. (2022). Gamma-Linolenic Acid (GLA) Protects against Ionizing Radiation-Induced Damage: An In Vitro and In Vivo Study. *Biomolecules*, 12(6), 797. <https://doi.org/10.3390/biom12060797>
- Sharma, D., Mridul, M., Ritika, R., & Verma, K. K. (2024). Review Article on Nutritional and Toxicological Aspects of Spirulina (Arthrospira). *Asian Journal Of Pharmaceutical Research*, 14(3), 315-318. <https://doi.org/10.52711/2231-5691.2024.00049>
- Sharma, R., & Rana, A. (2024a). Algal Elixirs: Unraveling the multifaceted impact of Spirulina in human health. *Food Bioscience*, 62, 105365.
<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.105365>
- Sharma, R., & Rana, A. (2024b). Algal Elixirs: Unraveling the multifaceted impact of Spirulina in human health. *Food Bioscience*, 62, 105365.
<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.105365>
- Tardy, A., Pouteau, E., Marquez, D., Yilmaz, C., & Scholey, A. (2020). Vitamins and Minerals for Energy, Fatigue and Cognition: A Narrative Review of the Biochemical and Clinical Evidence. *Nutrients*, 12(1), 228.
<https://doi.org/10.3390/nu12010228>

Tessier, R., Calvez, J., Khodorova, N., & Gaudichon, C. (2020). Protein and amino acid digestibility of 15N Spirulina in rats. *European Journal Of Nutrition*, 60(4), 2263-2269. <https://doi.org/10.1007/s00394-020-02368-0>

The Story of Ice Cream. (2024). En *The science of ice cream* (pp. 1-14). <https://doi.org/10.1039/bk9781837673032-00001>

Vlamos, P. (2021). GENEDIS 2020. En *Advances in experimental medicine and biology*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78771-4>

Withana, T. N., Ranasinghe, Y. S., Rathnayake, A. I., Bamunuarachchige, T. C., & De Zoysa, H. (2025). Applications of Spirulina in the food industry: Scientometric and systematic review. *Food And Humanity*, 5, 100644. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2025.100644>

