



Universidad Nacional
SAN LUIS GONZAGA



[Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licencia permite a otras combinar, retocar, y crear a partir de su obra de forma no comercial, siempre y cuando den crédito y licencia a nuevas creaciones bajo los mismos términos.

http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0



UNIVERSIDAD NACIONAL SAN LUIS GONZAGA
EVALUACION DE ORIGINALIDAD



CONSTANCIA

El que suscribe, deja constancia que se ha realizado el análisis con el software de verificación de similitud al **Trabajo Monográfico** cuyo título es:

“CULTIVO DE ESPIRULINA EN POSOS ABIERTOS”

Presentado por:

CASTRO ROSAS, MIGUEL ANGEL


BACHILLER del nivel **PREGRADO** de la **ESCUELA DE INGENIERÍA PESQUERA**

Que. Se ha recibido del operador del programa informático evaluador de originalidad de la Facultad de Ingeniería Pesquera y de Alimentos de la UNICA, El informe automatizado de originalidad, el mismo que concluye de la siguiente manera:

El documento de investigación APRUEBA los criterios de originalidad con un porcentaje de similitud de 01%.

Para dar fe, se adjunta al presente el reporte de similitud de las bases de datos de iThenticate.

Pisco, 22 de julio de 2024


.....
VICTOR HERNAN ELIAS YUPANQUI
DIRECTOR (i) DE UNIDAD DE INVESTIGACION
FACULTAD DE INGENIERIA PESQUERA Y DE
ALIMENTOS

UNIVERSIDAD NACIONAL “SAN LUIS GONZAGA”

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

Facultad de Ingeniería Pesquera y de Alimentos



“CULTIVO DE ESPIRULINA EN POSOS ABIERTOS”

Línea de investigación:

Ciencias naturales, ingeniería y tecnologías sostenibles

TRABAJO MONOGRÁFICO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO
PESQUERO POR LA MODALIDAD DE EXAMEN SUFICIENCIA
ACADÉMICA

AUTOR:

BACH: MIGUEL ANGEL CASTRO ROSAS

ICA - PERÚ

2019

DEDICATORIA

A Dios todopoderoso ante todo por haberme dado la facilidad de concluir exitosamente desde el principio hasta el final en mis estudios.

A mis queridos padres que con mucho esfuerzo me apoyan incondicionalmente.

AGRADECIMIENTOS

A Dios todopoderoso, por darme la bendición cada día, la vida la salud y las fuerzas para luchar por este proyecto de vida.

A mis padres quienes fueron la fuerza y estímulo más grande que la vida me dio.

A mis docentes por brindarme sus enseñanzas y su amistad.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iii
ÍNDICE DE TABLAS.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT	viii
INTRODUCCIÓN.....	01
CAPITULO I. CULTIVO EN RACEWAYS	03
1.1 CONCEPTO.....	03
1.2 EL PROCESO	04
1.3 PROBLEMAS BIOLÓGICOS Y LIMITACIONES.....	05
1.4 EL EFECTO DE LA LUZ.....	06
1.5 LIMITACION DE LA LUZ.....	06
1.6 FOTOINHIBICION	09
1.7 INTERACCION DE TEMPERATURA Y LUZ	13
1.8 EL EFECTO DE ALTAS CONCENTRACIONES DE OXIGENO	15
1.9 MANTENIMIENTO DE CULTIVOS NONOALGALES	16
1.10 ECONOMIA Y PROSPECTIVA FUTURA.....	18
1.11 PERPECTIVAS A FUTURO.....	20
CAPÍTULO II. CULTIVO DE SPIRULINA AL AIRE LIBRE – LA EXPERIENCIA DE LAS GRANJAS EARTHRISE	21
2.1 LOS PRIMEROS INTENTOS DE PRODUCCION DE ESPIRULINA.....	22
2.2 PRODUCCION DE ESPIRULINA EN GRANJAS DE EARTHRISE.....	23
2.3 CULTIVO DE GRAN ESCALA.....	26
CAPÍTULO III.....	54
3.1 CONCLUSIONES	54
3.2 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I. EL EFECTO DE LA LUZ Y LA TEMPERATURA EN LA PRODUCTIVIDAD DE CULTIVOS ABIERTOS.....	¡Error! Marcador no definido. 5
TABLA II. PRINCIPALES ÍTEMS DE INVERSIÓN Y COSTOS DE PRODUCCIÓN EN UN SITIO DE PRODUCCIÓN DE SPIRULINA. SUPERFICIE TOTAL DE LA LAGUNA 50 000 M2 (DESTINADOS A LA PRODUCCIÓN DE ALTO VALOR ALIMENTARIO)	¡Error! Marcador no definido. 8
TABLA III. ACTUALES (1993) Y ANTERIORES PRODUCTORES DE ESPIRULINA EN EL MUNDO	23
TABLA IV. DEGRADACIÓN DEL PIGMENTO (PORCENTAJE DE INICIAL) BAJO DIFERENTES TEMPERATURAS Y CONDICIONES DE ENVASE	¡Error! Marcador no definido.
TABLA V. MICROBIOLOGICAL AND RELATED QUALITY STANDARDS IN RELATION TO THE QUALITY OF EARTHRISE FARMS SPIRULINA	45
TABLA VI. HEAVY-METAL CONTENT OF EARTHRISE FARMS SPIRULINA IN RELATION TO INTERNATIONAL STANDARS.....	49
TABLA VII. REALTIVE COSTO F PRODUCTION	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. detalle de las entradas y salidas en cultivo de spirulina y los usos en la industria.....	4
Fig. 2. Cambios diurnos en la concentración de O ₂ , temperatura y luz durante el curso de días representativos en diferentes estaciones. De izquierda a derecha: verano, primavera e invierno, □-□ temperatura en ° C; O-O irradiancia en klux; Δ-Δ O ₂ , porcentaje de saturación.	5
Fig. 3. La tasa de crecimiento específico de Spirulina afectada por la densidad de población y las estaciones del año; □□□ verano (junio a septiembre); O-O otoño y primavera (octubre a noviembre y abril a mayo); Δ-Δ invierno (diciembre a febrero).....	7
Fig. 4. El efecto de la densidad de población en la tasa de producción a través de las estaciones del año: ._. verano; O-O primavera y otoño; Δ-Δ invierno	8
Fig. 5. El efecto del flujo turbulento en la tasa de salida de cultivos de Spirulina al aire libre crecidos a diferentes concentraciones celulares: (A), 7 rpm (lento); (B), 17 rpm (rápido).....	9
Fig. 6. Cambios diarios en Fv / Fm en dos cultivos Spirulina cultivados al aire libre, ._. bajo radiación solar completa, y O-O en un 25 por ciento de corte por sombreado.. ¡Error! Marcador no definido.	
Fig. 7. Cambios diarios en Fv / Fm en dos cultivos de Spirulina cultivados al aire libre en dos concentraciones celulares: O-O 0,3 OD y ._. 0,6 OD..... ¡Error! Marcador no definido.	
Fig. 8. Cambios diarios en Fv / Fm de dos cultivos de Spirulina cultivados al aire libre a una velocidad O-O lenta y ._. de mezcla rápida..... ¡Error! Marcador no definido.	
Fig. 9. Cambios de temperatura diurna en tres cultivos de Spirulina cultivados al aire libre en Δ-Δ estanque abierto, ._. estanque abierto colocado en un invernadero, O-O un reactor tubular. ¡Error! Marcador no definido.	
Fig. 10. Cambios en Fv / Fm en dos cultivos de Spirulina cultivados al aire libre a O-O 25 ° C y □-□ 35 ° C. Los cambios diurnos en la intensidad de luz (PAR) se indican con Δ-Δ.	14
Fig. 11. El efecto de la luz y la temperatura en la relación Fv / Fm de Spirulina platensis crecido en estanques abiertos bajo (□, □) 25 por ciento de sombreado y (O, .) condiciones no sombreadas durante el día. Los cultivos se calentaron; □, O no se aplica calefacción.....	14
Fig. 12. Cambios diurnos en el rendimiento de fluorescencia de cultivos de Spirulina cultivados al aire libre en 22 (Δ), 32 (□) y 50-60 (×) mg ⁻¹ de oxígeno. Fm 'y Ft son máximos y la intensidad de fluoroescencia mínima de los cultivos adaptados a la luz, respectivamente.....	16
Fig. 13. Las fotomicrografías que muestran diferentes niveles de contaminación en cultivos al aire libre de Spirulina observan también la variación en los filamentos de Spirulina)..	17

Fig. 14. Vista aérea de estanques al aire libre en Earthrise Farms, Calipatria, California....	¡Error! Marcador no definido.
Fig. 15. Distribución estacional de la temperatura y la irradiancia en Calipatria, California (1984-1991).....	¡Error! Marcador no definido.
Fig. 16. Un diagrama esquemático del sistema de producción de Spirulina.	¡Error! Marcador no definido.
Fig. 17. Contaminación de algas verdes medida por densidad óptica (OD). Recuadro: Número de estanques renovados como porcentaje del número total inicial de estanques. Vea el texto para más detalles.	¡Error! Marcador no definido.
Fig. 18. Relación entre la tasa de crecimiento in situ, la tasa de crecimiento basada en la cosecha y la eficiencia de la cosecha..	¡Error! Marcador no definido.
Fig. 19. Crecimiento de Spirulina en filtrado de cultivo de estanque antes (O) y después (□) tratamiento del medio con carbón activado. Círculos y cajas abiertos para 1989; Círculos cerrados y cajas para 1991	¡Error! Marcador no definido.
Fig. 20. Variación temporal de la longitud del tricoma.	40
Fig. 21. Relación fotosíntesis-irradiación de Spirulina inmediatamente después del daño mecánico (día 0) y después de 7 días de recuperación (día 7)	40
Fig. 22. Tricomas longitud en función del tiempo antes (Control) y después (Retorno) daño mecánico	41
Fig. 23. Una comparación de la producción anual y el costo unitario de producción (1984-1993)	50
Fig. 24. Tasas de crecimiento y producción anual de Spirulina (1984-1991).....	51
Fig. 25. La demanda del mercado pasado y futuro de Earthrise Farms Spirulina	51

RESUMEN

La spirulina es una cyanobacteria, del reino procariota. El interés en este organismo radica en el porcentaje de proteína de alta calidad que posee, va de 60 a 70% dependiendo de las condiciones climáticas y medio de cultivo. Esta microalga naturalmente crece en países tropicales en lagunas alcalinas, llegando a reproducirse de manera óptima en pH de 9.5 a 11, lo que da una ventaja en acuicultura de spirulina en cuanto a contaminación de otras microalgas. Desde los años 70 con el inicio del cultivo a gran escala de spirulina por la empresa Sosa Texococo (Mexico), se han venido desarrollando una serie de experimentaciones del cultivo de esta alga pasando por cultivos caseros por pequeños acuicultores, pequeñas empresas con granjas en países como Francia y grandes empresas como Earthrise Farms (California) y Cyanotech (Hawaii) quienes de manera individual han adquirido en base a su experiencia, conocimientos que les han permitido desarrollar cultivos industriales de Spirulina. La tecnología de cultivo se comenzó con lagunas naturales y luego con pozas de geomembrana, sistemas cerrados tubulares, sistemas abiertos en cascada y sistemas raceway con pozas abiertas, utilizando geomembrana. Esta monografía se basa en un compendio de la información existente en cuanto a cultivos industriales en pozas tipo raceway.

ABSTRACT

Spirulina is a cyanobacteria, from the prokaryotic kingdom. Interest in this organism lies in the percentage of high quality protein it possesses, ranging from 60 to 70% depending on the climatic conditions and culture medium. This microalgae naturally grows in tropical countries in alkaline lagoons, and reproduces optimally at pH 9.5 to 11, which gives spirulina aquaculture advantages in terms of contamination of other microalgae. Since the 1970s with the start of large-scale spirulina cultivation by the company Sosa Texococo (Mexico), a series of experiments have been carried out on the cultivation of this alga through small-scale aquaculture farmers, small companies with farms in countries Such as France and large companies such as Earthrise Farms (California) and Cyanotech (Hawaii) who individually have acquired, based on their experience, knowledge that has enabled them to develop industrial Spirulina crops. The culture technology was started with natural lagoons and then with geomembrana pools, closed tubular systems, cascade open systems and raceway systems with open pools, using geomembrane. This monograph is based on a compendium of existing information on industrial crops in raceway ponds.

INTRODUCCIÓN

Spirulina maxima Geitler y *S. platensis* Geitler son cianobacterias planctónicas que forman poblaciones masivas en cuerpos de agua tropicales y subtropicales caracterizados por altos niveles de carbonato y bicarbonato y pH alto (hasta 11) (Busson, 1971, Iltis, 1970, 1971, 1980; Rich, 1931, 1933, Léonard y Compère, 1967, Marty y Busson, 1970, Clément, 1971, 1975, Durand-Chastel, 1980, Guérin-Dumartrait y Moyses, 1976). Aunque *S. platensis* parece ser una especie más ampliamente distribuida, principalmente en África, pero también en Asia y América del Sur, *S. maxima* (*S. geitleri*) parece estar esencialmente confinado a Centroamérica. Esta última especie representa el componente principal del fitoplancton del lago Texcoco, que podría considerarse como el hábitat original de esta especie (Busson, 1971; Clément, 1975; Durand-Chastel, 1980; Guérin-Dumartrait y Moyses, 1976). Del mismo modo, los lagos salinos alcalinos de la zona semidesértica Sudán-Sahel, con epicentro en el Lago Chad y los del Valle del Rift, dominados por floraciones de agua de *S. platensis*, pueden considerarse como los puntos de partida de esta especie (Iltis, 1970, 1971). , 1980, Rich, 1931, 1933, Léonard y Compère, 1967, Marty y Busson, 1970, Clément, 1971, 1975, Guérin-Dumartrait y Moyses, 1976).

Estas dos especies tradicionales, actualmente incluidas, según Castenholz (1989), en el Género *Arthrospira* Stizenberger 1852, Subsección III, Orden Oscillatoriales, bajo la designación respectiva de *A. maxima* Setchell y Gardner 1917, y *A. platensis* (Nordst.) Gomont 1892, han mantenido, desde la revisión de Geitler de las Cyanophyceae (Geitler, 1925, 1932), la designación incorrecta actual de *Spirulina maxima* y *S. platensis*.

La actual designación de *Spirulina* para las especies del género *Arthrospira* y particularmente para sus especies más importantes (*A. platensis* y *A. maxima*) tiene un significado más tradicional, práctico y tecnológico que taxonómico. Esta designación, sin embargo, a menudo crea confusión. Por lo tanto, es importante destacar, considerando el interés mundial en este organismo, que el género *Arthrospira* es diferente y filogenéticamente distante de *Spirulina*, aunque comparte con *Spirulina* la forma helicoidal de los tricomas y la distribución de algunas especies en los mismos hábitats selectivos. La fama de esta cianobacteria es un resultado de su importancia económica, que surge de las características peculiares de las especies cultivadas (*A. platensis*, *A. maxima* o *A. geitleri* y / o *A. fusiformis*). Estas características hacen que la explotación de este organismo en la cultura de masas sea muy atractiva como fuente de alimentos, piensos o productos químicos finos (Florencio, 1981, Jassby, 1988, Richmond, 1988, Seshadri y Jeeji Bai, 1992, Vonshak y Richmond, 1988).

A pesar de que el nombre genérico *Arthrospira* es aceptado, ad interim, como válido para las dos especies aquí discutidas, *A. platensis* y *A. maxima*, con frecuencia serán referidos por los nombres tradicionales de *S. platensis* y *S. maxima* cuando la referencia es hecho a los datos de otros autores.

La espirulina, o lo que era más probable *Arthrospira*, fue redescubierta a mediados de los años sesenta. Un informe de un botánico, Jean Léonard, que era miembro de una expedición franco-belga a África, describió un pastel azul-verdoso que se vendía en el mercado de comida de Fort Lamy, Chad. Un nuevo estudio reveló que este pastel, llamado en el dialecto local dihé, contenía un alga azul-verde identificado como *Spirulina* y fue consumido por la tribu Kanembu que vivía a lo largo de los lagos alcalinos de Chad y Níger. Informes anteriores en 1940 sobre el uso de dihé habían pasado sin más aviso.

Aproximadamente al mismo tiempo que Leonard había descubierto *Spirulina* en África, una solicitud fue recibida de una compañía llamada Sosa Texcoco, por el "Institut Français du Pétrole" para estudiar una floración de algas que ocurren en los estanques de evaporación de su instalación de producción de bicarbonato de sodio en un lago Cerca de la ciudad de México. Como resultado, se realizó el primer estudio sistemático y detallado de las necesidades de crecimiento y la fisiología de la espirulina. Este estudio, que fue parte de un Ph.D. Tesis de Zarrouk, fue la base para establecer la primera planta de producción a gran escala de *Spirulina*. Sin embargo, la mayor parte del trabajo nunca llegó a la atención de la comunidad científica internacional, esto fue porque la tesis fue publicada en francés y nunca fue traducida al inglés.

De alguna manera, establecer el sitio de producción de *Spirulina* en México fue una especie de cierre de un circuito. Cuatrocientos años antes de que Sosa Texcoco iniciara la producción comercial de *Spirulina*, en el siglo XVI, cuando los invasores españoles conquistaron México, descubrieron que los aztecas que vivían en el Valle de México en la capital Tenochtitlán estaban recolectando un "nuevo alimento" del lago. Este alimento, descrito como un pastel de color azul verdoso y llamado por los locales tecuitlatl, se utilizó de manera similar a la del dihé del Kanembu. Aunque no existe evidencia clara sobre la composición exacta de este alimento, está claro que contenía una alga azul-verde, y hasta el día de hoy *Spirulina maxima* es la especie dominante en esas aguas.

Así, a partir de una planta de producción semi-natural a principios de los años 70 con una gran variación en la producción anual de 100 a 400 toneladas, 25 años más tarde *Spirulina* alcanzó una producción anual total superior a 1000 toneladas al año con una previsión de duplicar su mercado al final de este siglo.

CAPITULO I. CULTIVO EN RACEWAYS

La última década ha visto un rápido aumento de la actividad relacionada con la producción de microalgas para uso comercial. Desde los pequeños inicios de las tabletas de *Chlorella* en Japón a finales de la década de 1950, han surgido nuevos esfuerzos en todo el mundo para convertirse en industrias especializadas para producir nutrientes, aditivos alimentarios, piensos, biofertilizantes y diversos productos naturales (Richmond 1986a, 1986b, Borowitzka & Borowitzka 1988). El objetivo de esta monografía es proporcionar al lector información básica sobre el cultivo de algas al aire libre a gran escala, proporcionar una base científica para los métodos utilizados en plantas comerciales y sugerir mejoras para lograr una mayor productividad a partir de los costos de producción del sistema. La producción de algas a gran escala al aire libre es más viable comercialmente. [1]

1.1 CONCEPTO

El concepto de biotecnología de algas es esencialmente el mismo que el de la agricultura convencional, que implica el uso de maquinaria fotosintética para producir biomasa como fuente de alimentos, piensos, productos químicos y energía. Las principales ventajas del cultivo de microalgas como fuente de biomasa son las siguientes.

- Las microalgas se consideran un sistema biológico muy eficiente para recolectar energía solar y producir compuestos orgánicos mediante el proceso de fotosíntesis.
- Las microalgas son plantas no vasculares que (normalmente) carecen de órganos reproductivos complejos, por lo que toda la biomasa está disponible para su cosecha y uso.
- Muchas especies de microalgas pueden producir concentraciones extremadamente altas de compuestos seleccionados de valor comercial, como proteínas, carbohidratos, lípidos y pigmentos.
- Las microalgas son microorganismos que siguen un ciclo simple de división celular, en la mayoría de los casos sin fase sexual, lo que les permite completar el ciclo celular en pocas horas y someterse a selección genética y detección de estrés con relativa rapidez y facilidad. También permite un desarrollo y demostración más rápidos de los procesos de producción en comparación con otros cultivos.
- En muchas áreas con baja productividad debido a suelos pobres o falta de agua dulce, el uso de agua de mar o agua salobre y tierras marginales para el cultivo

de microalgas es casi la única manera de aumentar la productividad y asegurar un suministro básico de proteínas.

- Los sistemas de producción de biomasa de microalgas se pueden adaptar fácilmente a cualquier nivel de habilidad operativa o técnica, desde simples unidades de producción que requieren mucha mano de obra hasta sistemas totalmente automatizados que requieren una inversión significativa. [1]

1.2 EL PROCESO

Los principales componentes del proceso de producción de biomasa de microalgas se muestran en la Figura 1, que ilustra los principales insumos y usos potenciales de la biomasa producida. El proceso se puede dividir en dos etapas principales:

- Cultivo de biomasa de algas utilizando conocimientos biológicos y parámetros operativos;
- Aspectos técnicos relacionados con el diseño del reactor (tanques), recolección y procesamiento de la biomasa producida.

La producción exitosa de algas combina conocimientos sobre la biología de los microorganismos fotoautótrofos en crecimiento con requisitos específicos para el diseño de reactores apropiados para el proceso.

La comprensión biológica requerida incluye los efectos de factores ambientales como la luz y la temperatura e interacciones como la salinidad, la fotoinhibición y la respiración oscura sobre el crecimiento y la productividad de las algas. [1]

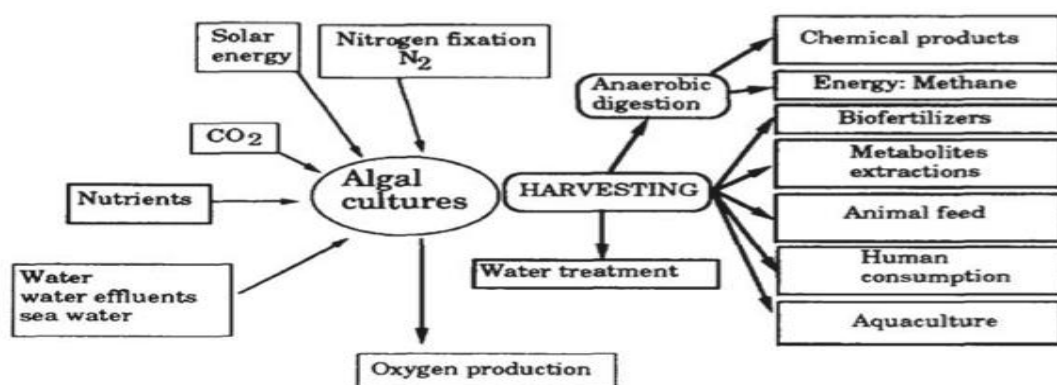


Fig. 1: detalle de las entradas y salidas en cultivo de spirulina y los usos en la industria. [1]

Al desarrollar un programa operativo de manejo de estanques para establecer un cultivo continuo para una producción continua y evitar la contaminación por herbívoros, depredadores y otras algas, se deben considerar parámetros fisicoquímicos, incluidos los niveles de nutrientes y el pH.

1.3 PROBLEMAS BIOLÓGICOS Y LIMITACIONES

Para conseguir la máxima productividad es necesario conocer las principales limitaciones biológicas de la producción de espirulina en grandes cultivos de exterior. Estas limitaciones también pueden servir como criterio para seleccionar cepas de espirulina superiores para su uso en estanques de producción al aire libre. Suponiendo que la tasa fotosintética puede servir como indicador de la actividad metabólica en cultivos de algas al aire libre, rastreamos los cambios diarios en la concentración de oxígeno en los estanques para relacionar los cambios en la concentración de oxígeno con los cambios diarios en la luz y la temperatura. En una explicación que hoy parece algo ingenua, inicialmente concluimos a partir de los resultados mostrados en la Figura 2 que el principal factor limitante para el crecimiento de la espirulina en cultivos de verano al aire libre es la luz. Esto se debe a que los picos diarios de concentración de oxígeno ocurren al mismo tiempo cuando la intensidad de la luz es más alta. Sin embargo, en invierno, el principal factor limitante es la temperatura (debido a los cambios en el oxígeno máximo después de la temperatura máxima del estanque) más que la intensidad de la luz. Efectos de la temperatura y la luz sobre el crecimiento en cultivos de laboratorio. Como ya se ha dicho, abordar estos dos. [1]

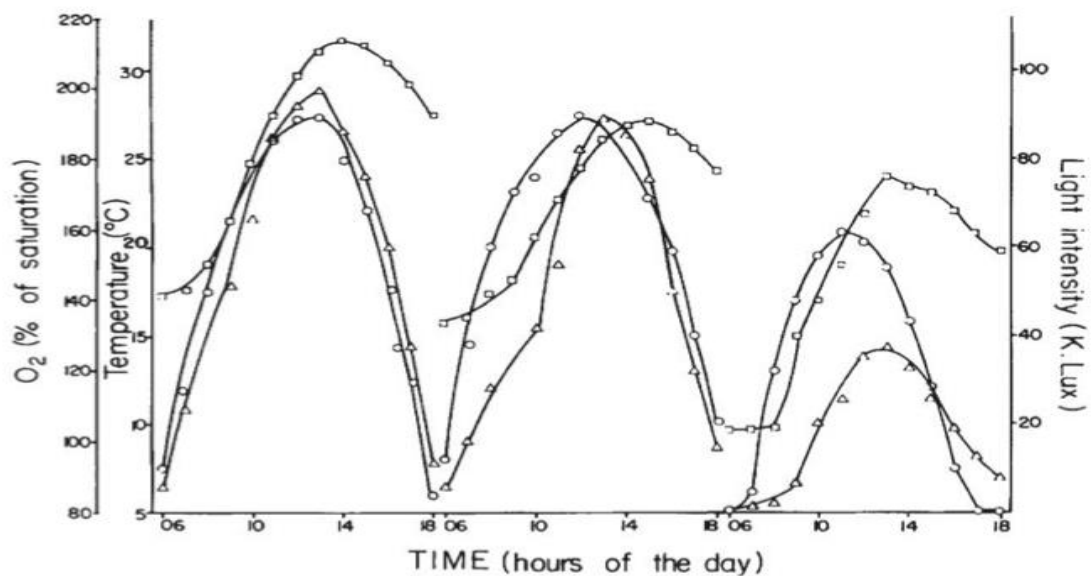


Fig. 2. Cambios diarios en la concentración de O₂, temperatura y luz durante el curso de días representativos en diferentes estaciones. De izquierda a derecha: verano, primavera e invierno, □-□ temperatura en ° C; O-O irradiancia en klux; Δ-Δ O₂, porcentaje de saturación. [1]

Los parámetros pueden ser un poco simples. Sin embargo, dado que durante muchos años fueron considerados los dos factores limitantes para el cultivo exterior de Spirulina a gran escala (Vonshak, 1987a, Richmond, 1992b), sólo estudios recientes han revelado

la interacción e interrelación entre estos factores y el grado de productividad (Vonshak, 1993).

1.4 EL EFECTO DE LA LUZ

Los cultivos de algas al aire libre están expuestos a un ritmo de dos condiciones de luz/oscuridad. El primero es relativamente rápido. Esto es causado por la mezcla en el estanque, lo que crea turbulencia en el cultivo que determina la frecuencia de los ciclos de luz/oscuridad (Laws et al., 1983). Durante este ciclo, las células de algas pasan entre plena luz solar cuando están en la parte superior del cultivo y oscuridad total cuando llegan al fondo del cultivo (generalmente a 12-15 cm de profundidad). La escala de tiempo para este ciclo es en segundos. Otro evento relativamente lento es el cambio en la radiación solar durante el día desde el amanecer hasta el atardecer. Estos dos fotoperíodos imponen mecanismos fisiológicos únicos para la adaptación o adaptación de las células de algas exteriores a la luz. [1]

1.5 LIMITACION DE LA LUZ

Cuando las algas se cultivan en estanques de canales abiertos a una profundidad de 12 a 15 cm, la autosombra regula las condiciones de luz para las células de cultivo individuales. A menos que se utilice un cultivo muy diluido para permitir que la luz penetre en toda la columna de agua, una parte del cultivo nunca recibirá suficiente luz para saturarla para la fotosíntesis. Así que casi por definición este tipo de cultura estará limitada por la luz. De hecho, nuestros estudios previos (Richmond y Vonshak, 1978; Vonshak et al., 1982) mostraron que aumentar la concentración celular en cultivo (lo que aumenta el sombreado automático) disminuye la tasa de crecimiento. Realizamos los siguientes experimentos en verano, invierno y primavera, y los resultados mostraron que la mayor tasa de crecimiento responde a la concentración celular, es decir. sombra, se observó en verano (Fig. 3). Nuestra primera explicación fue que la temperatura es lo suficientemente alta en verano, por lo que la principal limitación para cultivar espirulina al aire libre es leve. Sin embargo, en invierno y primavera, cuando la temperatura de los cultivos de exterior es baja, el efecto de autosombra es menos notorio (Figura 3).

Como en muchos otros sistemas microbianos, el factor importante a ser optimizado es la tasa de producción o la productividad. La productividad del sistema (Y) se define como:

$$Y=\mu x$$

donde μ es la inversa de la tasa de crecimiento unitario y X es la concentración de biomasa. Como lo muestran nuestros trabajos anteriores (Richmond y Vonshak, 1978, Vonshak et al., 1982) y el trabajo de otros (Richmond y Grobbelaar, 1986), existe una concentración óptima de biomasa correspondiente a la mayor productividad. Esta concentración no es necesariamente la concentración a la que se observa el μ más alto, lo que nuevamente sugiere que la condición para la productividad más alta es simple. Esto se ilustra con más detalle en la Figura 4, donde los datos de la Figura 3 se replicaron para examinar la tasa de eliminación del cultivo en función de la concentración celular.

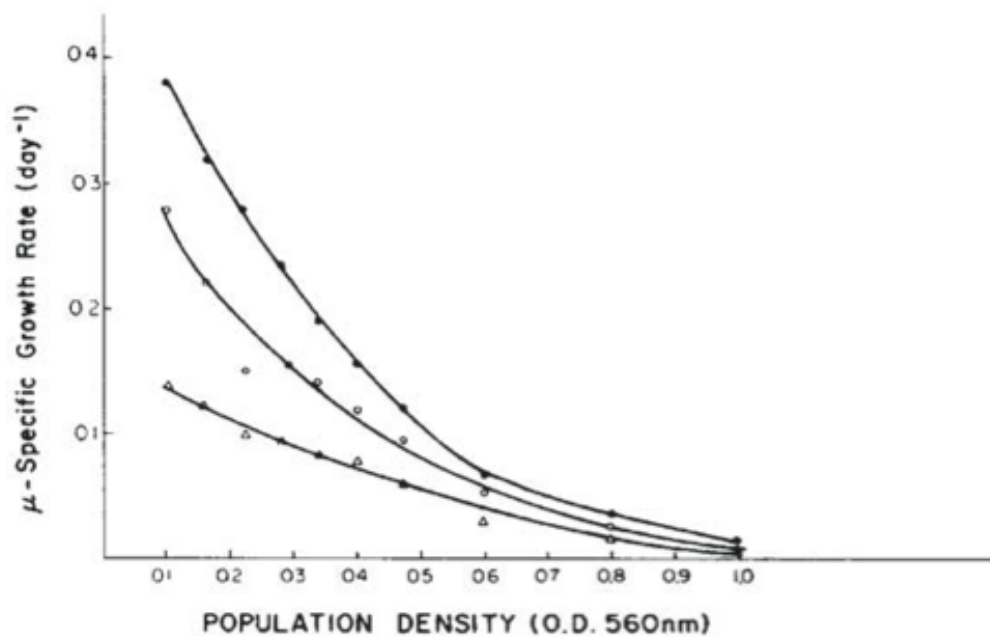


Fig. 3. La tasa de crecimiento específico de Spirulina afectada por la densidad de población y las estaciones del año; \square verano (junio a septiembre); \circ otoño y primavera (octubre a noviembre y abril a mayo); Δ invierno (diciembre a febrero).[1]

Esta observación apunta a uno de los parámetros más importantes en el manejo de cultivos de *Espirulina* al aire libre: la necesidad de mantener una concentración celular óptima, o posteriormente definida como una densidad de área óptima. En verano, cuando el principal factor limitante es la luz, se puede observar (Fig. 4) que cualquier desviación de la concentración óptima de biomasa resulta en una disminución significativa en la productividad del sistema. También es importante recordar que la concentración óptima también se verá afectada por la profundidad de cultivo, la cepa utilizada y la velocidad de agitación. Este último sigue siendo un tema controvertido. Desde los primeros informes (Richmond y Vonshak 1978, Vonshak et al. 1982) sobre

los efectos de la turbulencia en la productividad de estanques de espirulina en condiciones de campo abierto, se han observado dos efectos:

- Mayores tasas de crecimiento en condiciones de mayor turbulencia, lo que resulta en una mayor productividad.
- Aumentar la concentración celular óptima para una máxima productividad.

Aunque este fenómeno fue observado posteriormente por muchos otros (Laws et al., 1983, Richmond y Grobbelaar, 1986, Grobbelaar, 1991), siguió siendo un tema de debate (Grobbelaar, 1989). Las explicaciones van desde afirmaciones de que la turbulencia imita el efecto de luz parpadeante observado en los laboratorios (Kok, 1953; Friedrickson y Tsuchiya, 1970) hasta afirmaciones de que el aumento de la productividad es el resultado de fenómenos de transferencia de masa asociados con una mejor absorción de nutrientes y la eliminación de oxígeno tóxico. Todavía creemos que el efecto de la agitación turbulenta está relacionado con el papel de la disponibilidad de luz y su distribución en cultivos densos de algas. Si la mezcla es insuficiente, sólo se induce flujo laminar. Como en muchos estanques comerciales grandes, la distribución de la luz es desfavorable, dejando gran parte del cultivo en completa oscuridad, mientras que otros están sobreexposados e incluso pueden sufrir fotoinhibición (un fenómeno que se analiza en la siguiente sección). Por lo tanto, aumentar la turbulencia es, en algunos aspectos, el medio más práctico para mejorar la distribución de la luz. [1]

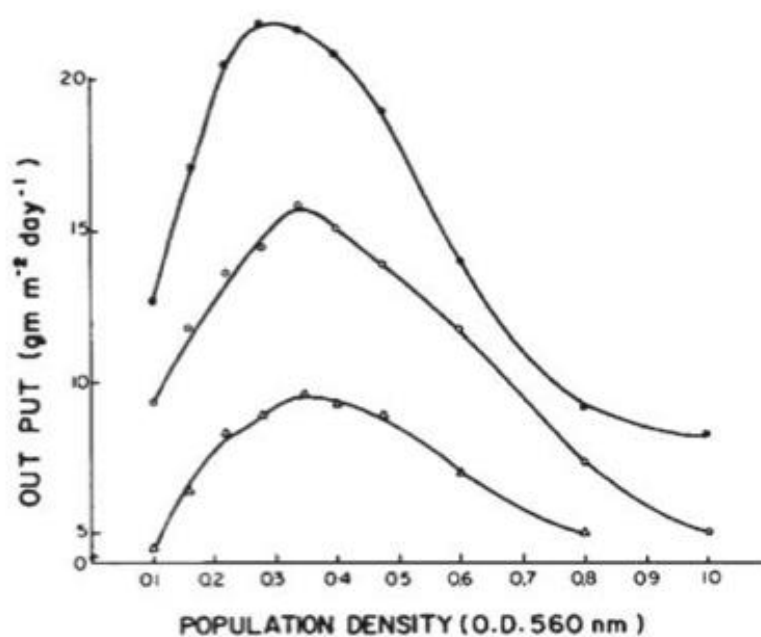


Fig. 4. El efecto de la densidad de población en la tasa de producción a través de las estaciones del año: ●, verano; ○-○ primavera y otoño; △-△ invierno.

Cultura al aire libre. Los resultados respaldan aún más nuestra interpretación de que no solo se observó un aumento en la productividad debido al aumento de la turbulencia, sino también que el mayor rendimiento se obtuvo a concentraciones de células más altas (Fig. 5).

1.6 FOTOINHIBICION

El fenómeno de la fotoinhibición ha sido ampliamente estudiado principalmente en condiciones de laboratorio (Kyle y Ohad, 1986; Neale, 1987). Durante muchos años, se creyó que los cultivos densos al aire libre, donde la luz penetra sólo la mitad del cultivo, no eran susceptibles a la fotoinhibición. Aunque el fenómeno de la fotoinhibición se discute como un factor en la productividad de las algas, se asocia principalmente con los hábitats naturales como factor ecológico (Powles, 1984). [1]

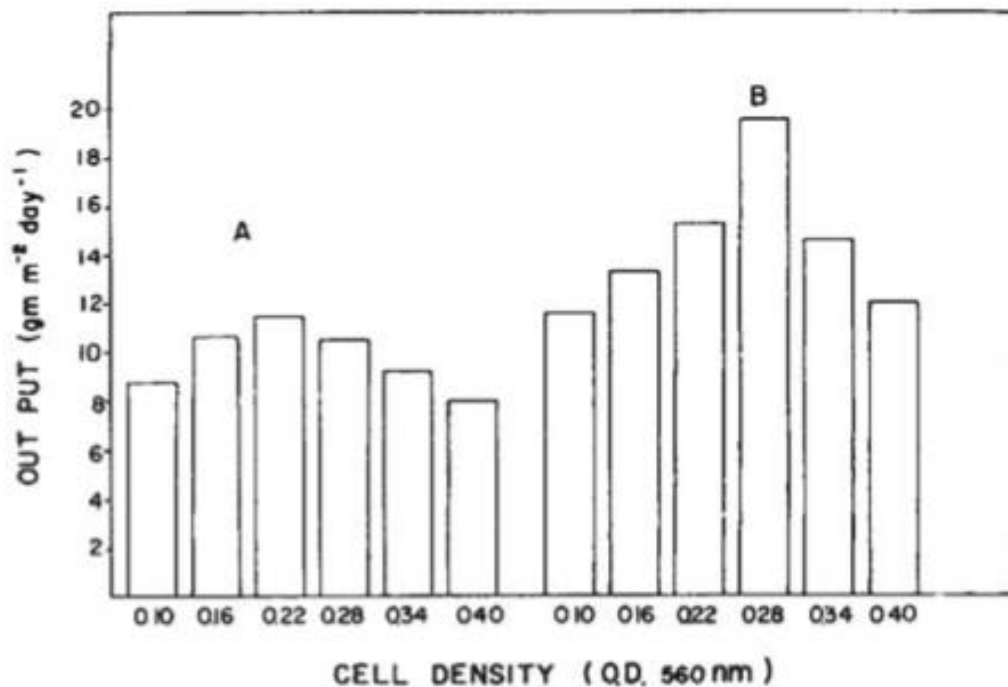


Fig. 5. El efecto del flujo turbulento en la tasa de salida de cultivos de Spirulina al aire libre crecidos a diferentes concentraciones celulares: (A), 7 rpm (lento); (B), 17 rpm (rápido).

Vonshak y Guy (1988) describieron por primera vez el fenómeno de la fotoinhibición en cultivos de espirulina cultivados al aire libre. Al examinar la actividad fotosintética in situ de cultivos al aire libre cultivados a pleno sol o sombra, observaron que los cultivos sombreados aumentaban la actividad fotosintética y aumentaban la productividad. Estos hallazgos parecieron contradecir en cierta medida el dogma de que los cultivos de algas al aire libre están limitados por la luz, por lo que se llevaron a cabo más investigaciones. Utilizando el método de fluorescencia variable de clorofila más

avanzado, se puede obtener una indicación muy rápida y fiable de la eficiencia cuántica fotoquímica, con la que se cree que el valor de F_v/F_m está directamente relacionado. Además, una disminución en la relación F_v/F_m en muchos sistemas sugiere que en PS II se induce daño fotoinhibitorio. Por lo tanto, rastreamos la proporción F_v/F_m de cultivos de espirulina cultivados al aire libre en estanques con y sin sombra. Como se muestra en la imagen, uno está etiquetado.

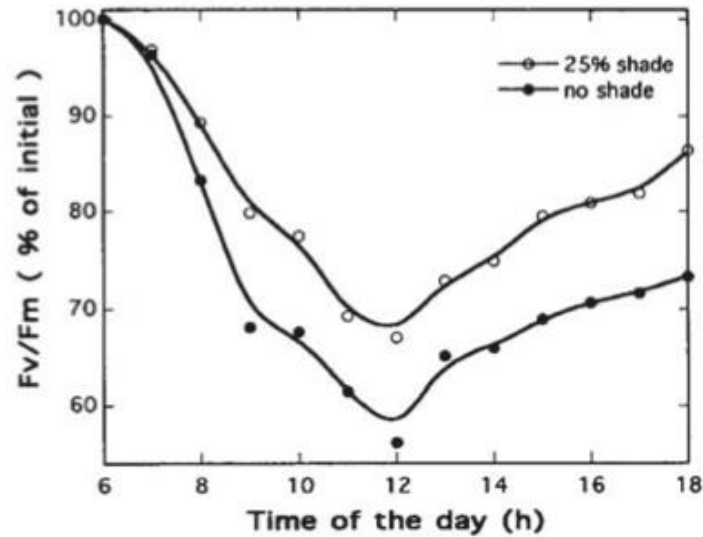


Fig. 6. Cambios diarios en F_v / F_m en dos cultivos *Spirulina* cultivados al aire libre, . . bajo radiación solar completa, y O-O en un 25 por ciento de corte por sombreado.

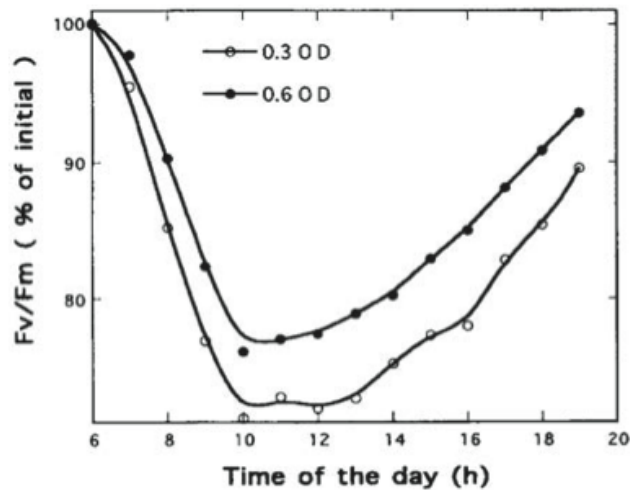


Fig. 7. Cambios diarios en F_v / F_m en dos cultivos de *Spirulina* cultivados al aire libre en dos concentraciones celulares: O-O 0,3 OD y . . 0,6 OD

Se observó que la relación alcanzó su valor más bajo al mediodía para los cultivos. El grado de inhibición también se redujo significativamente cuando el estanque estaba sombreado para reducir la intensidad de la luz en un 25%. Cabe señalar que la eficiencia del PS II se recupera cuando la radiación solar disminuye por la tarde. Como se

mencionó anteriormente, la disponibilidad de luz para las células individuales en cultivos al aire libre depende en gran medida de la concentración celular. Comparamos las proporciones F_v/F_m en cultivos al aire libre mantenidos a diferentes concentraciones celulares. Como se muestra en 5.7. en la figura, al diluir la concentración de células en el cultivo y aumentar así la cantidad de luz a la que se exponen las células, se consigue una mayor inhibición. Esta observación respalda aún más nuestra interpretación de que la disminución en la relación F_v/F_m se debe a procesos inhibidores causados por una exposición excesiva a la luz. En la sección anterior, sugerimos que aumentar la turbulencia en cultivos al aire libre es una forma muy práctica de mejorar las condiciones de iluminación. Usando los parámetros F_v / F_m , pudimos demostrar que este es efectivamente el caso. Al comparar cultivos mixtos rápidos y lentos, los niveles de eficiencia de PS II fueron mayores en los cultivos mixtos rápidos que en los cultivos mixtos lentos (Figura 8). Creemos que al menos parte de la razón de la mayor productividad lograda en sistemas de mayor turbulencia/agitación es la eliminación del estrés fotoinhibitorio que ocurre en cultivos lentamente mezclados. Después de casi 15 años de investigación sobre el papel de la luz en la productividad de los cultivos de algas al aire libre, especialmente la espirulina, parece que tenemos una mejor comprensión del complejo entorno luminoso al que están expuestas las células de las algas. Sabemos que puede ocurrir fotoinhibición, al menos en cultivos de Espirulina, debido a cambios extremos en los niveles de intensidad de la luz. El hecho de que los cultivos de espirulina fotoinhibidos tengan una menor eficiencia fotosintética (Figura 3) significa que necesitan más luz para alcanzar el mismo nivel de actividad que las células no fotoinhibidas, lo que hace que los cultivos fotoinhibidos tengan una luz realmente limitada. En última instancia, esto crea una ligera paradoja en la espirulina cultivada al aire libre: los cultivos al aire libre están fotoinhibidos y limitados al mismo tiempo durante la mayor parte del día.

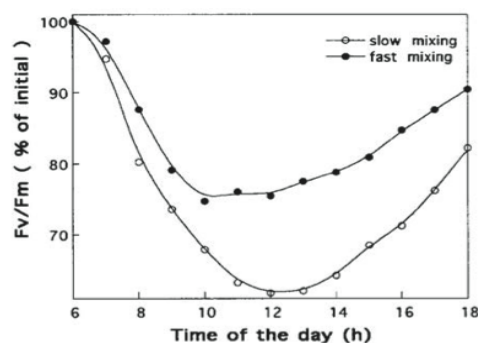


Fig. 8. Cambios diarios en F_v / F_m de dos cultivos de Spirulina cultivados al aire libre a una velocidad O-O lenta y . . . de mezcla rápida.

En muchas partes del mundo, la temperatura puede ser una limitación significativa para una alta productividad de biomasa en tanques de cultivo de espirulina al aire libre. Aunque el efecto de la temperatura sobre la tasa de crecimiento de los cultivos de algas en laboratorio está bien documentado, su efecto en los cultivos al aire libre aún no se comprende completamente.

El cultivo de algas al aire libre ocurre en un ciclo de día y noche, y fuera de los trópicos, las temperaturas del estanque por la mañana pueden estar solo en el rango de 15 a 20°C. La temperatura óptima alcanza los 35-38°C sólo a primera hora de la tarde. Incluso en las regiones tropicales donde los cultivos alcanzan temperaturas óptimas, las temperaturas están muy por debajo de las óptimas durante la mayor parte del día (temprano en la mañana). Un posible beneficio del ciclo circadiano pueden ser las temperaturas nocturnas más frescas.

Los estudios muestran que las temperaturas relativamente altas durante la noche aceleran la respiración, provocando una pérdida de biomasa durante la noche. La cantidad de pérdidas depende de la composición de la biomasa y puede alcanzar hasta el 30% de la productividad del día anterior (Torsillo et al., 1991; Guterman et al., 1989; Grobbelaar y Soeder, 1985). La espirulina no se puede cultivar en estanques abiertos al aire libre durante el invierno, excepto en zonas tropicales. La única forma de preservar cultivos que sobrevivan a las bajas temperaturas y reanudar la producción después del invierno es albergarlos en un invernadero o aumentar significativamente la concentración de biomasa.

Las limitaciones de temperatura en la productividad pueden ser una de las muchas desventajas de los sistemas de canal abierto. (Ésta es una de las grandes ventajas de los reactores cerrados.) La figura ilustra y compara los cambios diarios de temperatura de tres cultivos de espirulina en estanques abiertos, invernaderos y reactores tubulares. Se puede observar que en el sistema cerrado la temperatura óptima se alcanza casi 4 horas antes que en el cultivo en estanque abierto. Esto no sólo aumenta el tiempo durante el cual la fotosíntesis opera a su máxima capacidad, sino que también elimina algunos de los efectos inhibidores debido a la interacción de la baja temperatura y la alta intensidad de la luz, como se describe en la siguiente sección.

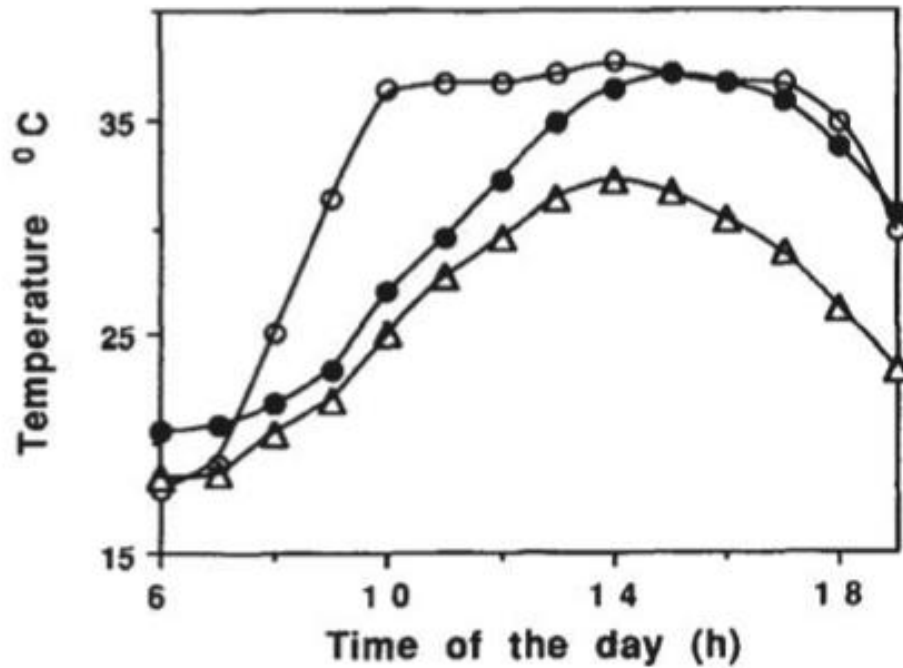


Fig. 9. Cambios de temperatura diurna en tres cultivos de Spirulina cultivados al aire libre en Δ-Δ estanque abierto, ●-● estanque abierto colocado en un invernadero, O-O un reactor tubular.

1.7 INTERACCION DE TEMPERATURA Y LUZ

La posible interacción entre la temperatura y la luz en cultivos de algas al aire libre ha sido ignorada durante muchos años (Vonshak, 1987a, Richmond, 1992b), aunque algunas observaciones iniciales sugieren que se puede observar productividad cuando la temperatura del estanque aumenta unos pocos grados por la mañana. lo anterior se supone basándose en un simple efecto de la temperatura.

La interacción específica entre el estrés luminoso y térmico en las plantas superiores nos llevó a investigar la posibilidad de una interacción similar en la espirulina. Un trabajo reciente (Vonshak et al., 1994) sugiere que las temperaturas relativamente bajas y los rápidos aumentos de la intensidad de la luz por la mañana pueden inducir estrés fotoinhibitorio. Esto se puede demostrar fácilmente en reactores tubulares que pueden calentarse rápidamente y, de hecho, la caída típica en F_v/F_m no ocurre cuando los cultivos de espirulina al aire libre se mantienen a 35°C (Fig. 5.10). En un estudio más detallado, utilizamos cultivos de espirulina cultivados en estanques abiertos de invierno en Sede-Boker, Israel.

Para dilucidar mejor la naturaleza de la interacción entre la luz y la temperatura, se probaron cuatro tratamientos experimentales: dos cultivos se calentaron durante el día (hasta 35 °C), mientras que los otros dos cultivos tuvieron temperaturas tempranas

inferiores a 5 °C. Un estanque en cada temperatura de tratamiento fue sombreado con redes para reducir la radiación solar total en un 25%. Al observar el desarrollo de la relación F_v/F_m durante el día en cuatro estanques (Fig. 5.11), se puede observar una rápida disminución de F_v/F_m , principalmente en los estanques sin calefacción. La disminución más rápida se produjo entre las 8:00 a. m. y las 11:00 a. m., y la disminución se desaceleró ligeramente cuando el cultivo estuvo a la sombra. Vale la pena señalar que la intensidad de la luz en esta época es solo el 50-60% de la del verano y alcanza un valor máximo de $1400 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ al mediodía. Aunque calentar los cultivos evitó significativamente los efectos inhibidores observados en los cultivos no calentados, la protección de los cultivos calentados no proporcionó ninguna protección adicional. Estos resultados indican claramente que las bajas temperaturas matutinas en campo abierto pueden inducir estrés fotoinhibitorio. Debido a una recuperación más lenta del estrés por fotoinhibición. [2]

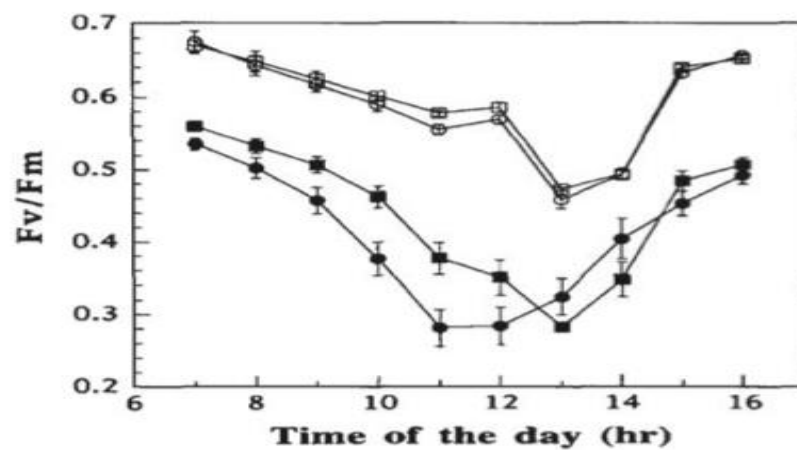


Fig.10. Cambios en F_v / F_m en dos cultivos de *Spirulina* cultivados al aire libre a O-O 25 ° C y □-□ 35 ° C. Los cambios diurnos en la intensidad de luz (PAR) se indican con Δ - Δ .

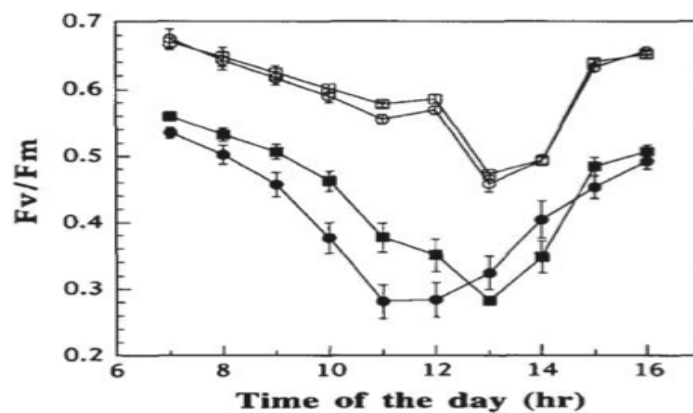


Fig. 11. El efecto de la luz y la temperatura en la relación F_v / F_m de *Spirulina platensis* crecido en estanques abiertos bajo (□, □) 25 por ciento de sombreado y (O, .) condiciones no sombreadas durante el día. Los cultivos se calentaron; □, O no se aplica calefacción.

Aunque las temperaturas aumentan más tarde durante el día, esta opresión matinal puede provocar una reducción de la productividad y estrés durante la mayor parte del día. El monitoreo diario de la productividad en cuatro estanques mostró una buena correlación entre la eficiencia del PS II y la productividad diaria (Tabla 1). Como era de esperar, la productividad aumentó en ambas piscinas climatizadas. El oscurecimiento de los cultivos calentados no protegió a PS II, lo que resultó en una reducción del 10% en la productividad. Lo más sorprendente es el efecto de sombra de los cultivos sin calefacción. Estos cultivos aumentaron significativamente su productividad en casi un 45% con una reducción del 25% en la intensidad de la luz. Por tanto, está claro que cuando la espirulina se expone a temperaturas subóptimas, la sensibilidad celular a la fotoinhibición aumenta significativamente. [1]

Se puede concluir que la luz y la temperatura no son factores independientes que afecten la productividad de la biomasa de forma sencilla como en los cultivos de laboratorio. El hecho de que el cultivo en estanques abiertos esté sujeto a fluctuaciones diurnas y estacionales hace que esta interacción sea aún más difícil de entender. La fisiología de los cultivos de algas al aire libre es una nueva área de investigación y queda mucho trabajo por hacer para revelar completamente las interacciones entre los factores ambientales y los cultivos de espirulina al aire libre.

TABLA I
EL EFECTO DE LA LUZ Y LA TEMPERATURA EN LA PRODUCTIVIDAD DE CULTIVOS
ABIERTOS.

Experiment conditions	Production (gm -2 day -1)
Heated	14.9
Heated + 25% shade	11.1
No heat, no shade	3.7
25% shade	5.3

1.8 EL EFECTO DE ALTAS CONCENTRACIONES DE OXIGENO

El oxígeno se forma durante la fotosíntesis y, por tanto, se acumula en el cultivo. Además de influir en el régimen luminoso correcto, las turbulencias desempeñan un papel importante en la eliminación de oxígeno. En tanques relativamente pequeños que pueden soportar altos caudales, las concentraciones de oxígeno no deben exceder el

200% de saturación de aire o 12-14 mg/l dependiendo de la temperatura y la presión del aire. En estanques grandes con flujo de agua relativamente lento (10 a 20 cms-1), las concentraciones de O₂ pueden alcanzar hasta el 500% de saturación cuando las tasas fotosintéticas son altas. Las altas concentraciones de oxígeno inhiben la fotosíntesis y el crecimiento y pueden provocar una pérdida total del rendimiento.

Recientemente se han investigado los efectos nocivos de la alta tensión de oxígeno en los cultivos de espirulina (Márquez et al., 1995; Singh et al., 1995). Ambos informaron que la exposición de cultivos de espirulina en laboratorio a altos niveles de oxígeno reducía la tasa de crecimiento y el blanqueo de los pigmentos. En lugar de aumentar artificialmente el oxígeno, intentamos estudiar los efectos de los altos niveles de oxígeno en condiciones exteriores permitiéndoles acumularse mediante la fotosíntesis. Al medir el rendimiento de fluorescencia, pudimos demostrar que no se observó una reducción significativa en la actividad fotosintética cuando el nivel de oxígeno se mantuvo en el rango de 20 a 22 mg/l. Cuando los cultivos se exponen a condiciones superiores a este nivel, la actividad fotosintética disminuye rápidamente (Figura 12). Esto se correlaciona con la productividad diaria del cultivo y se observó que un gran estanque abierto con una saturación superior al 300% tiene un efecto depresor sobre la productividad de la espirulina. [1]

1.9 MANTENIMIENTO DE CULTIVOS NONOALGALES

La contaminación con diferentes especies de algas puede causar problemas muy graves a los cultivos de microalgas cultivados en estanques abiertos. En trabajos anteriores (Vonshak et al., 1983), describimos un conjunto de métodos preventivos.

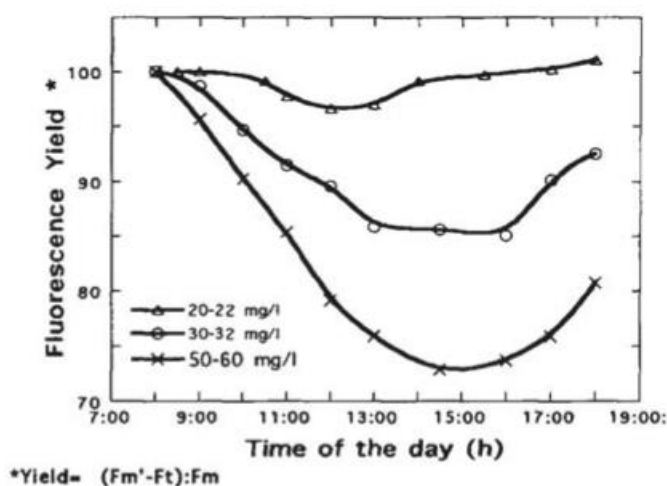


Fig.12. Cambios diurnos en el rendimiento de fluorescencia de cultivos de Spirulina cultivados al aire libre en 22 (Δ), 32 (□) y 50-60 (×) mg/l de oxígeno. Fm 'y Ft son máximos y la intensidad de fluorescencia mínima de los cultivos adaptados a la luz, respectivamente

El cultivo de espirulina al aire libre está contaminado con chlorella. En la mayoría de los casos, las medidas que han demostrado ser efectivas para prevenir la contaminación por Chlorella son mantener una concentración alta de bicarbonato (por ejemplo, 0,2 M), tomar precauciones para mantener la materia orgánica disuelta en el medio lo más baja posible y aumentarla. Uso de calefacción de invernadero en temperaturas invernales. El desarrollo de herbívoros (principalmente especies de amebas) en los cultivos plantea otro problema. Von Schack et al. (1983) observaron la ameba alimentándose de chlorella, y también se observó la ameba espirulina en algunos estanques comerciales mal mantenidos. La adición de amoníaco (2 mM) impidió el desarrollo de estos herbívoros. Lincoln y cols. (1983) también informaron una reducción significativa en la abundancia de herbívoros cuando se usaba amoníaco como fuente primaria de nitrógeno.

Cuando las poblaciones de células de Chlorella cultivadas en cultivos de colonias de Spirulina aumentaron (más de 10^6 ml⁻¹), el tratamiento repetido con amoníaco 1 mM fue suficiente para evitar una mayor proliferación de Chlorella (Vonshak y Boussiba)..

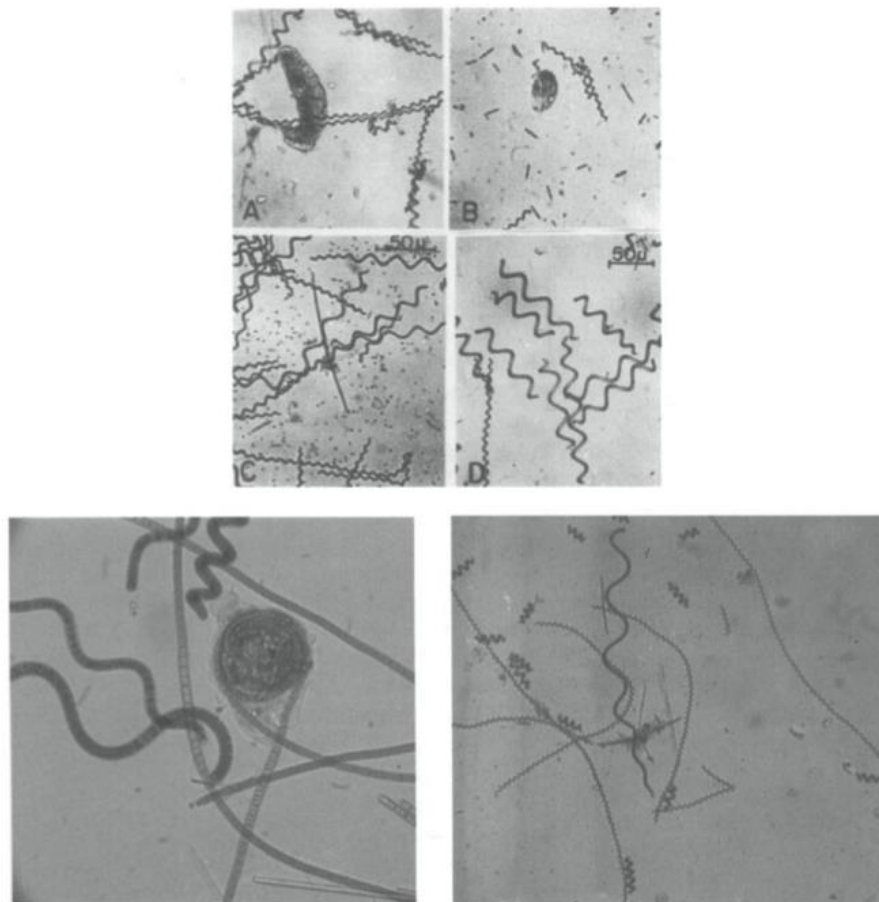


Fig. 13. Las fotomicrografías que muestran diferentes niveles de contaminación en cultivos al aire libre de Spirulina observan también la variación en los filamentos de Spirulina).

Resultados no publicados. En la Figura 13 se muestran los contaminantes y enemigos naturales típicos que pueden aparecer en los cultivos de espirulina en la imagen.

En resumen, se puede controlar la contaminación de cultivos de espirulina al aire libre por otros organismos. La experiencia ha demostrado que los organismos contaminantes normalmente no causan problemas graves siempre que se mantenga un buen crecimiento de los cultivos de monoalgas. Es decir, hasta el momento no se han observado cianófagos que ataquen a la espirulina.

1.10 ECONOMIA Y PROSPECTIVA FUTURA COSTO Y EVALUACION ECONOMICA.

Se han realizado muchos intentos para predecir los costos de producción de biomasa de algas a gran escala (Benemann et al., 1987, Dynatech, 1978). En lugar de ofrecer otro cálculo económico, pretendemos detallar la base económica de una planta comercial y señalar las enormes diferencias entre los costos de producción reales y los pronosticados por algunas estimaciones preliminares. La principal dificultad es la falta de información debido a los secretos comerciales. Evaluamos en bases de producción intensiva (Tailandia, EE.UU.). EE.UU.) El costo de producción (excluidos los costos de capital) de la espirulina en polvo en aerosol es de 7 a 10 dólares EE.UU. por kilogramo (algunas estimaciones se resumen en la Tabla 2). La mano de obra representa entre el 20 y el 30 por ciento de los costos operativos.

TABLA II

PRINCIPALES ÍTEMS DE INVERSIÓN Y COSTOS DE PRODUCCIÓN EN UN SITIO DE PRODUCCIÓN DE SPIRULINA. SUPERFICIE TOTAL DE LA LAGUNA 50 000 M² (DESTINADOS A LA PRODUCCIÓN DE ALTO VALOR ALIMENTARIO)

Item	Cost (thousand \$US)
Investment costs	
land preparation and development; site operation	138
water and power network	257
Buildings (labs, office, shops)	79
Nutrients, storage and stock	50
Pond: including lining, pump, mixing	493
Harvesting: including filtering, drying, packing	541
TOTAL	1558
Annual production costs	
Manpower	320
Repair and maintenance	42
Fixed operation costs	163
Variable operating costs (gas, nutrients, power, etc.)	123
Administracion, capital and depreciation	390
TOTAL	1038

Elemento. Esto representa una de las principales dificultades para intentar reducir costes. Incluso en la instalación de producción más grande de Estados Unidos (que consta de diez estanques de 0,5 hectáreas), el área de producción total es todavía demasiado pequeña para lograr reducciones significativas en los costos laborales por unidad de producto. Según las últimas publicaciones, el año pasado (1995) se duplicó el número de estanques en este lugar. Según algunos análisis económicos publicados, el tamaño mínimo de la planta no debería ser inferior a 10 a 100 hectáreas con una superficie de presa de 1 a 10 hectáreas. Una planta de producción tan grande aún no ha sido construida ni probada, por lo que la cuestión del efecto del volumen de producción en el coste de la unidad de producción sigue abierta. Otra cuestión no resuelta es el impacto del aumento de la oferta y los precios de venta más bajos en la demanda de los consumidores. Otro componente importante de los costos de producción es el costo de los nutrientes, especialmente el carbono. Representa entre el 15% y el 25% de los costos operativos totales. La razón principal del alto costo es la eficiencia relativamente baja de convertir nutrientes en algas. Si el nitrógeno se suministra como amoníaco líquido, una parte importante se pierde a la atmósfera en forma de amoníaco (NH_3). Esto se debe al nivel de pH más alto (alrededor de 10,0) que utiliza la espirulina para el crecimiento. Este problema se soluciona utilizando nitrato NO_3^- como fuente de nitrógeno, pero es mucho más caro que el amoníaco. La desnitrificación puede causar pérdidas de nitrato, especialmente en estanques grandes con bajas tasas de mezcla, y todavía se pueden encontrar charcos anaeróbicos en las esquinas del estanque. En plantas comerciales, estimamos pérdidas de nitrato de hasta el 50%. Después de un suministro inicial de bicarbonato de sodio 0,2 M, la demanda de carbono suele cubrirse con CO_2 (Vonshak, 1986). La eficiencia máxima de conversión de dióxido de carbono en biomasa en reactores comerciales de espirulina es de aprox. 80%. Esta alta tasa se puede lograr en unidades operativas relativamente pequeñas (0,1-0,2 hectáreas) donde se instalan sistemas precisos de seguimiento y control. En la mayoría de las instalaciones de producción donde se utilizan estanques grandes (0,3-0,5 hectáreas), los sistemas de carbonatación son menos eficientes. Cuando la espirulina se cultiva a valores de pH superiores a 9,6, el dióxido de carbono atmosférico puede cubrir parte del requerimiento de carbono (BenYaakov et al., 1985). [2]

La baja eficiencia actual del uso de nutrientes también está relacionada con la falta de comprensión del uso a largo plazo de los medios regenerativos. Dependiendo del sitio de producción y la experiencia local, el medio debe cambiarse completamente de tres a

seis veces al año para mantener la producción y evitar el deterioro del cultivo. Al menos en un caso se recurrió al reciclaje de este soporte de "baja calidad" para la llamada "biomasa alimentaria". Está claro que la información de seguimiento sobre la recuperación de medios puede reducir significativamente los costos al reducir la frecuencia de los costosos reemplazos de medios. En la mayoría de los casos, la energía representa aprox. 15% de los costos operativos, que reflejan los requisitos de capacidad para mezclar, bombear y secar. Serían necesarios avances en el uso económico de la energía solar y/o eólica para reducir significativamente los costos. Eso sí, para que la biomasa de espirulina se convierta en un producto ampliamente utilizado, los costes de producción deben reducirse a 4-6 dólares por kilogramo de materia seca. Esta cifra sólo se alcanzará si se logra una productividad comercialmente mayor (aproximadamente el doble de la actual). Los últimos datos del mercado muestran que, aunque el coste de producción de la espirulina se ha reducido a unos 8 dólares por kilogramo, el precio de la espirulina en polvo disponible en el mercado es de más de 20 dólares por kilogramo. Una razón del alto precio podría ser la mayor demanda de Sosa Texcoco, que suministró entre 200 y 300 toneladas de espirulina y detuvo la producción en 1994 debido a problemas administrativos y de huelga. [2]

El análisis económico de los esfuerzos de baja tecnología basados en recursos locales es mucho más complicado porque no hay cifras fijas para evaluar la rentabilidad de las proteínas producidas localmente. Los costos laborales pueden volverse menos importantes si se tienen en cuenta factores sociales como la creación de empleo, la mejora del nivel de vida y la prevención de la migración de pequeños agricultores a los centros urbanos.

1.11 PERSPECTIVAS A FUTURO

El futuro de la biotecnología de algas depende en gran medida de dos factores: a) la capacidad de reducir los costos de producción para que la biomasa de algas se convierta en un producto básico que se comercialice en grandes cantidades y no se limite al mercado de alimentos saludables, y b) el desarrollo de productos adecuados. . reactores. Los sistemas cerrados tienen varias ventajas sobre las vías abiertas. En un sistema cerrado, el cultivo está mejor protegido de la contaminación, por lo que mantener cultivos de monoalgas debería ser más fácil. La pérdida de agua y el consiguiente aumento de la salinidad ambiental se han reducido significativamente. Este modelo de producción abre la posibilidad de utilizar agua de mar con bicarbonato de baja concentración, ahorrando agua y costes medioambientales. Debido a la mayor densidad

celular, el área puede ser más pequeña, lo que reduce los costos de recolección. Finalmente, las temperaturas óptimas se pueden determinar y mantener más fácilmente en un sistema cerrado, lo que aumenta la productividad. Este último es un aspecto importante en la producción de microorganismos como la espirulina, que crece a 37°C. Todos estos avances aún deben probarse a gran escala para evaluar si los mayores costos de inversión pueden compensarse efectivamente con mayores rendimientos anuales. En los últimos cinco años, varios grupos de investigación en Francia, Italia, Israel, Singapur y Australia han informado de avances en los intentos de ampliar los reactores tubulares experimentales para la producción a gran escala de diferentes especies de algas en el laboratorio. [3]

CAPÍTULO II. CULTIVO DE SPIRULINA AL AIRE LIBRE – LA EXPERIENCIA DE LAS GRANJAS EARTHRISE

Aunque el uso de espirulina en humanos tiene una larga historia (Dangeard, 1940, Cifferi, 1983), Dainippon Ink Chemical Co., Ltd. (DIG) producción comercial de espirulina en estanques artificiales en 1978 en Bangkok, Tailandia. Earthrise Farms fue fundada en 1981 por la entonces empresa estadounidense Proteus. Se fusionó con Japan DIC en 1982



Fig. 14 Vista aérea de estanques al aire libre en Earthrise Farms, California

Verano de 1983. Actualmente, la granja es una subsidiaria de DIG y suministra a América del Norte y del Sur, Europa, Japón y la región del Pacífico. La superficie total de la finca es de 75.000 metros cuadrados y la capacidad de producción anual de espirulina comestible supera los 200.000 kg. Es la planta de espirulina alimenticia más grande del mundo. Hay un total de 15 piscinas de producción, cada una con una superficie de 5.000 metros cuadrados (Figura 14).

Además, la instalación cuenta con aproximadamente 40.000 metros cuadrados de superficie de presa dedicada a la producción de espirulina de calidad alimentaria. Anualmente se producen unos 20.000 kg de espirulina comestible.

La finca también cuenta con varios estanques experimentales desde 2 metros cuadrados hasta 1000 metros cuadrados. La información disponible públicamente sobre la producción a gran escala de espirulina es bastante escasa y hay pocos datos a largo plazo sobre grandes plantas comerciales. Debido a la falta de disponibilidad o confidencialidad de dichos datos, el fabricante no puede publicar los resultados de su experiencia con cultivos masivos de espirulina al aire libre. El propósito de este capítulo es brindar una descripción general de la experiencia de Earthrise Farms en el cultivo de espirulina a gran escala, resaltar algunos de los desafíos clave encontrados y discutir el estado actual y las perspectivas futuras de la producción comercial de espirulina. [4]

2.1 LOS PRIMEROS INTENTOS DE PRODUCCION DE ESPIRULINA

a. PROCTORES DE ESPIRULINA

Durante la última década, varias empresas han intentado producir espirulina comercialmente. 8.1. La tabla resume el estado de los fabricantes anteriores y actuales de Spirulina. Esta información no está completa y algunas cifras son aproximadas. Sin embargo, proporcionan una visión general del estado de la producción de espirulina en todo el mundo. Sólo se incluyeron empresas que producen espirulina de calidad alimentaria. A excepción de Sosa Texcoco, el área de producción y la producción anual que se muestran en la tabla son espirulina grado alimenticio. Muchos intentos de producción comercial han fracasado, mientras que unos pocos productores exitosos siguen confinados al mercado interno. Algunas empresas son importantes en los mercados internacionales. De eso, excluyendo la instalación de producción seminatural de Sosa Texcoco, Earthrise Farms representa aproximadamente el 60% de la superficie total y aproximadamente el 45% de su producción anual vendida en los mercados de EE. UU. e internacionales. Las dos granjas de Dainippon Ink & Chemicals (Earthrise Farms y Siam Algae Company) juntas representan el 75% del área total y el 70% de la producción total. [7]

En los últimos años, el conocimiento de los posibles efectos terapéuticos de la espirulina ha atraído la atención de algunos fabricantes chinos basándose en los

resultados de investigaciones actuales en China y otros lugares (Belay et al., 1993). Sólo en los últimos dos años, la República Popular China ha construido varias instalaciones nuevas y hay más en construcción. En 1988, Myanmar también inició la primera producción comercial de espirulina utilizando lagos naturales (Thein, 1993). La creciente conciencia de los beneficios de la espirulina para humanos y animales conducirá sin duda a un aumento continuo en la construcción de nuevas instalaciones en todo el mundo.

TABLA III

ACTUALES (1993) Y ANTERIORES PRODUCTORES DE ESPIRULINA EN EL MUNDO

	Location	Area (m ²)	Annual Production (kg)
<i>International Market</i>			
Sosa Texcoco	Mexico	430 000	300 000 ^a
Siam Algae Company	Thailand	20 000	75 000
Cyanotech	USA	33 600	110 000
Earthrise Farms	USA	75 000	143 000
<i>Domestic Market</i>			
Solarium	Chile	760	500
Cyanotech Bioproducts Ltd	India		10 000–12 000
Murugappa Chettir Research Center	India	5 000	
New Ambadi Estates Private Ltd	India	4 000	6 500
Sun Farms	Japan	13 500	30 000
Shenzhen Blue-Algae Biotechnology Corp.	P.R. China	12 000	10 000
Shenzhen Alginate Biological Company	P.R. China	12 000	33 000
Sanya Hainang Biological Develop. Co.	P.R. China	10 000	110 000
Chenghai Spirulina Co.	P.R. China		44 000
Wuhan Lanbao Microbial Algae Technology Joint Co.	P.R. China	10 000	110 000
Hainan Haiwen Pharmaceutical Research Center	P.R. China		110,000
Hainan Ocean Research Institute	P.R. China	2 000	13 200
Tian Microalgae Co.	P.R. China		55 000
Nanhua Bio-tech Development Labs	P.R. China	300	1 100
Provimin (harvested from lakes)	Myanmar		25 000–30 000
IMADE S. L.	Spain	5 000	
Nan Pao	Taiwan	66 000	200 000
Neotech Food Co.	Thailand	14 000	24 000
<i>Failed Projects</i>			
Proteal	French Indies	12 000	
Ein-Yahav	Israel	5 500	10 000
Koor Foods	Israel	12 000	17 000
Nippon Spirulina	Japan	13 500	60 000
Photo Bioreactor Ltd	Spain		
Blue Continent	Taiwan	30 000	60 000
Far East Microalgae	Taiwan	33 000	
Tung Hai	Taiwan	30 000	60 000
Cal Alga ^b	USA	30 000	
Spirutec ^c	USA		

^aincludes feed grade.

^{b,c}never fully established.

El número limitado de productores de espirulina y varios proyectos de algas abandonados indican que la producción comercial de espirulina a gran escala está en problemas. Como señala Decker (1994), “El crecimiento exitoso de algas es 'alta tecnología', es más o menos un arte y un paseo diario por la cuerda floja para lograr las condiciones previas necesarias y varios aspectos del proceso de cultivo, eventos impredecibles.

La pesca en todos los sitios de desembarque de la región Ica y especialmente en la provincia de Pisco, donde se ubica el DPA Chaco, es muy importante porque forma parte de la actividad económica local y, además, genera diferentes actividades durante la captura, desembarque y comercio. en el recurso. [6]

2.2 PRODUCCION DE ESPIRULINA EN GRANJAS DE EARTHRISE

Condiciones ambientales para el cultivo de espirulina

a. UBICACIÓN DE LA GRANJA

Earthrise Farms está ubicada en el Valle Imperial de California, aproximadamente a 33°N de latitud y aproximadamente a 60 m bajo el nivel del mar. Está ubicada en una remota y extensa región agrícola cuya agua de riego proviene del río Colorado. La finca está lejos de ciudades, carreteras y aeropuertos.

b. TEMPERATURA

La temperatura óptima para el crecimiento de la espirulina es de alrededor de 35-38°C, mientras que la temperatura mínima requerida para cierto crecimiento es de alrededor de 15°C. . Por lo tanto, la producción de estanques al aire libre está en gran medida limitada por la temperatura. Las plantas ubicadas en latitudes bajas, como Tailandia y México, pueden producir durante aproximadamente 10 a 12 meses, mientras que las plantas en latitudes altas pueden producir durante aproximadamente 6 a 7 meses. Las temperaturas máximas, mínimas y promedio registradas en la estación meteorológica Kalipatria en 1984-1991 se muestran en la Figura 8.2. Debido a las bajas temperaturas entre noviembre y marzo, la producción de espirulina sólo se puede realizar durante el período de siete meses, de abril a octubre. Incluso durante el pico de producción en verano, las oscilaciones diarias de temperatura son grandes, alrededor de 20°C. Aún no se ha estudiado el impacto de estos

cambios diurnos en la productividad global. Aunque esto puede afectar la productividad de la fotosíntesis matutina (Richmond et al., 1990), puede reducir el tiempo nocturno. [9]

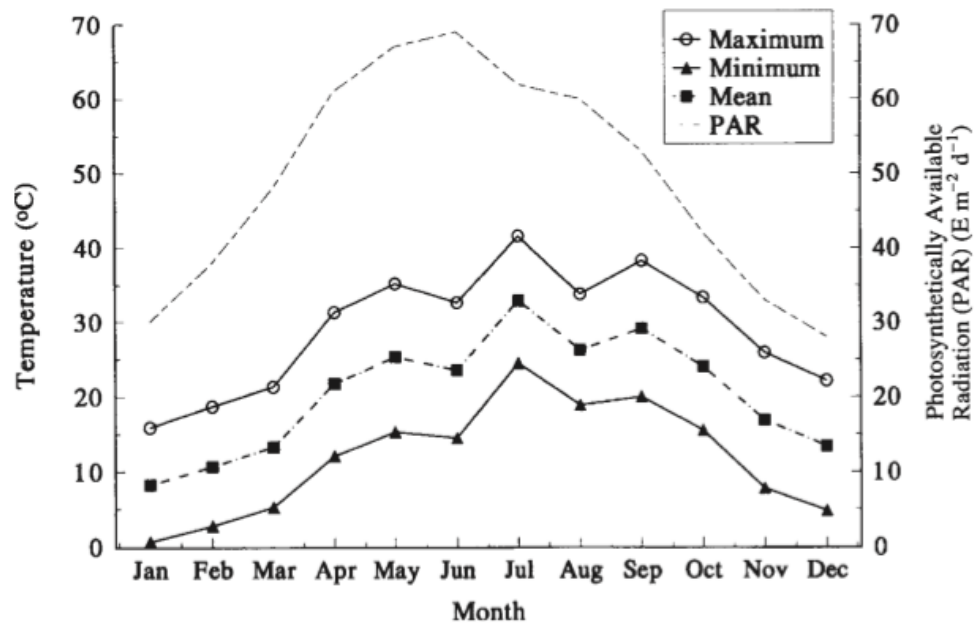


Fig. 15. Distribución estacional de la temperatura y la irradiancia en Calipatria, California (1984-1991).

Otro problema con las bajas temperaturas invernales es la dificultad de mantener un cultivo saludable en un estanque al aire libre para usarlo como cultivo de semillas en la siguiente temporada de crecimiento. Los cultivos tienden a echarse a perder rápidamente con las frías temperaturas invernales y eventualmente pueden colapsar. Por lo tanto, la expansión del cultivo debe llevarse a cabo en estanques de invernadero o en cultivos de laboratorio de volumen limitado, lo que hace que el proceso de expansión del cultivo sea lento y costoso. Desde 1990, Earthrise Farms ha invernado con éxito espirulina en estanques al aire libre, haciendo que el proceso de expansión de la granja sea más rápido y económico. [8]

c. IRRADIACION

La radiación solar promedio diaria (400-700 nm) que incide sobre la superficie horizontal del Valle de los Reyes (estación El Centro) se muestra en la Figura 8.2. en la imagen. La radiación máxima es en mayo y junio (67-69 E m⁻² d⁻¹), mientras que la radiación mínima es en diciembre (28 E m⁻² d⁻¹). Sin embargo, hay suficiente exposición para una producción razonable incluso en invierno.

Por lo tanto, la producción en invierno está limitada principalmente por la temperatura (8-15°C). [10]

d. PRECIPITACION Y EVAPORACION

La precipitación media anual es inferior a 80 mm. La temporada de lluvias es de noviembre a marzo, con un promedio de precipitaciones de 16 horas, poco más de 3 horas por mes, lo que hace que la zona tenga un aspecto claramente desértico.

La evaporación diaria promedio es de unos 6 mm. Por lo tanto, existe una gran escasez de agua, que debe reponerse con agua dulce todos los días en el cultivo de estanques. Las limitaciones ambientales que enfrenta el funcionamiento de la explotación se caracterizan por: a) bajas temperaturas en invierno, que sólo pueden satisfacer los 7 meses del año; (b) diferencias significativas de temperatura entre el día y la noche durante la temporada de crecimiento, que pueden reducir las tasas de crecimiento. en las primeras etapas (c) altas tasas de evaporación que conducen a una alta recarga de agua que resulta en precipitación y acumulación de CaCO₃. [11]

2.3 CULTIVO DE GRAN ESCALA

a. ESQUEMA DEL SISTEMA DE PRODUCCION

El sistema de producción de espirulina se puede dividir en cuatro fases: cultivo, cosecha, secado y envasado. Cada uno de estos procesos es importante para la producción de espirulina de alta calidad. En la Figura 8.3 se muestra un diagrama esquemático del sistema de producción de Earthrise Farm. en la imagen. Se han estudiado y revisado ampliamente los factores que afectan la producción de espirulina en estanques al aire libre (Richmond et al., 1990; Vonshak et al., Vonshak, 1987a; Goldman, 1978). Por lo tanto, una discusión detallada de las condiciones de crecimiento en Earthrise Farm está más allá del alcance de este capítulo. A continuación se muestra una breve descripción de los procesos y algunos de los desafíos asociados con cada etapa del sistema de producción. [11]

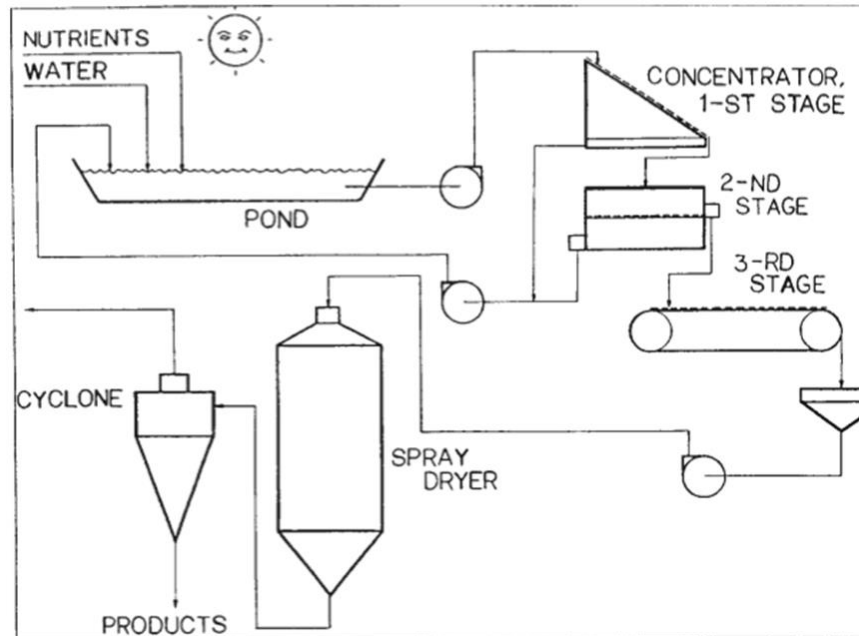


Fig. 16. Un diagrama esquemático del sistema de producción de Spirulina.

b. DISEÑO Y AGITACION DE ESTANQUES.

Shimamatsu (1987) describe en detalle la estructura básica del estanque. El cultivo se cultiva en tuberías recubiertas de PVC en una superficie de 5000 m². La mezcla se introduce a través de una paleta simple o doble. La profundidad del estanque depende de la estación del año, de la densidad de algas deseada y, en cierta medida, de la composición bioquímica deseada, especialmente de la concentración de pigmentos. Por tanto, la profundidad puede variar de 15 a 30 cm. Generalmente se sabe por esta y otras plantas de espirulina que la mezcla con paletas no proporciona suficiente turbulencia para asegurar un tiempo de residencia óptimo para las algas en la zona eufótica. Los caudales recomendados son 60 cm s⁻¹. Según nuestra experiencia, mayores caudales por encima de 30 cm⁻¹ invariablemente resultan en una mayor rotura y rizado de los tricomas, lo que conduce progresivamente a una recolección menos eficiente y a menores rendimientos. El aumento de los caudales por encima de 30 cm s⁻¹ también aumenta el mantenimiento de la presa y el consumo de energía (Oswald, 1988). El caudal óptimo para garantizar una alta tasa de crecimiento depende de la profundidad de trabajo del estanque, la densidad de algas mantenida y el estado fisiológico de las algas. [13]

c. EL MEDIO DE CULTIVO

Este medio se basa en el medio original de Zarouk (1966) y suele estar compuesto por carbonato de sodio, una fuente de nitrógeno, fósforo, hierro y oligoelementos. Después de la cosecha, el agua del cultivo se reutiliza continuamente en el estanque durante toda la temporada de crecimiento. Sólo se utilizan productos químicos aprobados para alimentos. La elección de los productos químicos y la concentración utilizada depende del costo del producto químico y de su compatibilidad con el agua no tratada.

Los costos de nutrientes representan aproximadamente entre el 15% y el 25% de los costos totales de producción. La granja llevó a cabo una extensa investigación en un intento de desarrollar un régimen medio de alimento y concentrado que proporcionara tasas de crecimiento óptimas al menor costo. Al comparar los costos de producción relativos durante un período de 10 años (ver Figura 8.10), se puede observar una reducción gradual en los costos unitarios de producción. La reducción de los costos de producción puede atribuirse en parte a mejoras en la composición y cantidad de nutrientes utilizados. Este último se basa en estudios de laboratorio y de campo de las necesidades nutricionales específicas de las algas. El principal problema del cultivo de espirulina al aire libre es el alto contenido de calcio del agua cruda. Esto da como resultado la precipitación de CaCO_3 durante el inicio del cultivo y la adición diaria de agua dulce para compensar las pérdidas por evaporación. Este fenómeno conduce a una disminución de la alcalinidad y, hasta cierto punto, a una pérdida de hierro y fósforo en el sistema. Las medidas tomadas para mitigar estos problemas incluyen el tratamiento previo del agua cruda durante la inicialización y la eliminación continua de desechos durante la temporada de crecimiento. [13]

d. SELECCIÓN DE LA CEPA

Los principales factores determinantes para la selección de cepas para producción comercial son la tasa de crecimiento, la composición bioquímica y la resistencia al estrés mecánico y fisiológico. Diferentes personas en diferentes países han estudiado diferentes especies y cepas de espirulina. Los más notables son los estudios realizados en Israel (Vonshak, 1987b) y Japón (DIG, datos no publicados). Como parte de sus operaciones, Earthrise Farms recolecta grandes cantidades de *Spirulina platensis* y *Spirulina maxima* de todo el mundo en

colaboración con su empresa matriz DIG. Se ha seleccionado un gran número de cepas para determinar las características deseables mencionadas anteriormente y su idoneidad para el cultivo a gran escala en las condiciones agrícolas predominantes. Aunque es relativamente fácil seleccionar cepas adecuadas y aumentar los rendimientos, los procesos de cosecha y procesamiento pueden provocar contaminación cruzada, haciendo imposible mantener cepas puras durante toda la temporada de crecimiento. Esto es especialmente cierto cuando se cultivan y cosechan varias variedades al mismo tiempo. Este problema se puede minimizar utilizando la misma cepa durante toda la temporada de crecimiento o durante un periodo concreto de la misma. A menudo es difícil saber si se está utilizando la misma cepa debido a su morfología similar. Sin embargo, se pueden utilizar algunos marcadores bioquímicos para proporcionar una idea aproximada de la composición de la población. Por ejemplo, el contenido total de carotenoides, el contenido de ficocianina y la sensibilidad a ciertos factores estresantes (como la fotoinhibición o el daño mecánico) se pueden monitorear y comparar con niveles conocidos para cada cepa. [13]

e. AMPLIACION DE LOS CULTIVOS

Una de las tareas más difíciles de la cultura popular al aire libre es el proceso de amplificación. Debido a la naturaleza inicialmente diluida del inóculo de espirulina, esta es la etapa del proceso donde la contaminación por otras algas y bacterias es el mayor problema. Según los resultados no publicados de Richmond (1990) y Earthrise Farms, parece haber una correlación directa entre la densidad de Spirulina en el cultivo y la densidad de los contaminantes. La contaminación por algas verdes fue mayor cuando la densidad del inóculo inicial fue menor. Por el contrario, a medida que aumenta la densidad de los cultivos de espirulina, disminuye la cantidad de contaminación. Se ha especulado que los productos extracelulares de la espirulina pueden tener algún efecto alelopático. Las concentraciones umbral de estas sustancias se pueden alcanzar con densidades celulares elevadas. Los fenómenos observados también podrían explicarse por la limitación de luz de las algas verdes causada por los tricomas flotantes positivos a la espirulina. Controlando cuidadosamente la concentración de nutrientes y enemigos naturales beneficiosos, los cultivos de monoalgas pueden mantenerse incluso durante el período de inoculación inicial.

Earthrise Farms utiliza tres modelos de expansión. El primer método consiste en propagar cultivos a partir de cepas conservadas en tubos de ensayo. El escalado se realiza mediante una proporción de dilución de aprox. 1:5 con volúmenes de cultivo continuo de hasta 1000 m³ en tanques de producción. En el segundo modo de operación, la operación a escala utiliza cultivos de la temporada de crecimiento anterior que se almacenaron en el invernadero. Desde 1992, Earthrise Farms ha desarrollado con éxito un método de hibernación en estanques de producción abiertos. Cuando se mantiene adecuadamente, este tercer modo de operación puede proporcionar un inóculo que es tan viable como los otros dos modos de operación. En este último modo de operación, sólo se necesitan unos pocos estanques para aumentar el cultivo a la capacidad total de 15 estanques de producción (15.000 metros cúbicos) en menos de un mes.

f. MANTENIMIENTO DE CULTURA

El mantenimiento adecuado de los cultivos requiere un seguimiento periódico de diversos parámetros físicos, químicos y biológicos. A continuación se muestra una breve descripción de los procedimientos de mantenimiento cultural utilizados en Earthrise Farms. [14]

g. CONTROL DE PH

El pH del medio de cultivo es uno de los factores más importantes para el crecimiento de la espirulina. El valor del pH del cultivo de espirulina debe ser superior a 9,5 para evitar la contaminación con otras algas. El pH se ajusta añadiendo gas CO₂ al medio. Como en otras plantas grandes, los sistemas de suministro o entrada de CO₂ son un equilibrio entre el suministro de gas altamente eficiente, los costos de capital y los costos operativos del sistema. A lo largo de sus operaciones, Earthrise Farms utiliza una variedad de sistemas de suministro de dióxido de carbono, que van desde intercambiadores de cúpula de plástico hasta piedras difusoras y tuberías de PVC perforadas (Becker, 1994; Bonnin, 1992). Los tres tipos de sistemas son económicos de usar. Sin embargo, hasta ahora la mayor eficiencia de transmisión en las granjas que utilizan estos sistemas es sólo de alrededor del 60%. Las principales áreas de pérdida son el intercambio con la atmósfera, la precipitación de CaCO₃ y la pérdida de aquellas partes del medio ambiente que no se reutilizan en el estanque. Aún no se ha evaluado la contribución relativa de los factores anteriores a la pérdida total de CO₂ del sistema. La inyección de CO₂ se realiza controlando

manualmente la presión de la válvula. Actualmente, la granja está estudiando métodos alternativos de inyección de CO₂ y planea automatizar el sistema. El pH del medio rara vez cae por debajo de 9,0. Sin embargo, es bastante común que un error humano provoque que el pH suba más allá de 10,5. Si esto ocurre, a veces va acompañado de precipitación de CaCO₃.

Siguen la floculación y sedimentación de algas. La deposición excesiva de dichos desechos puede afectar negativamente a los cultivos. Por ejemplo, la resuspensión de residuos puede provocar un desmayo. En casos extremos, la absorción de luz de dichos componentes no algales puede alcanzar hasta el 25% de la luz incidente. Además, la descomposición de la materia orgánica provoca un aumento de las poblaciones de bacterias; en estas condiciones, los ciliados, en particular, parecen prosperar. En este caso, el cultivo debe reemplazarse por completo para cumplir con las pautas de calidad. [14]

h. CONCENTRACION DE NUTRIENTES

En cultivo continuo, la concentración real de nutrientes en el medio está determinada por la concentración y productividad de la biomasa, así como por otras pérdidas en el sistema (por ejemplo, sedimentación o escorrentía). Además, durante el crecimiento, la composición relativa de varios nutrientes puede cambiar con respecto a la composición relativa del medio inicial debido a cambios en el entorno biológico, químico y físico del cultivo en estanque. Para evitar el agotamiento, se deben realizar análisis químicos de rutina de nutrientes clave como nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio. Se sabe poco sobre el destino del hierro y los micronutrientes en ambientes alcalinos para los cultivos de espirulina. Debido al alto contenido de iones Ca en el entorno del agua cruda, se pueden formar depósitos de Ca₃(PO₄)₂ y FePO₄. Esto se puede inferir de las pérdidas constantes de P y Fe del medio, que no pueden explicarse por el crecimiento y otras pérdidas conocidas. Se estima que alrededor del 20% del fósforo y el hierro se pierden en las precipitaciones durante el crecimiento de los cultivos. Además de la pérdida de nutrientes, estos sedimentos y desechos asociados también afectan la penetración de la luz. A veces, especialmente al final de la temporada de crecimiento, la atenuación de la luz causada por fuentes de luz no halógenas puede alcanzar el 25%. La recuperación parcial de estos nutrientes es posible, aunque el pH alto, la alcalinidad alta y las concentraciones altas de oxígeno pueden inhibir esta transferencia. En los estanques de tierra

que utilizamos para la producción de espirulina alimentaria, esta transferencia de nutrientes ocurre en la capa anóxica de estos estanques no completamente mezclados en la interfaz sedimento-agua. Los oligoelementos son difíciles de analizar químicamente. Por lo tanto, las granjas utilizan métodos de bioensayo para determinar los límites de todos o algunos de los componentes de las mezclas de trazadores. Como se mencionó anteriormente, los costos de los nutrientes representan entre el 15% y el 25% de los costos totales de producción. Actualmente se carece de una comprensión detallada de la cinética de absorción de nutrientes de la espirulina en grandes sistemas de estanques abiertos y del destino de ciertos nutrientes en ambientes con alto pH y alto contenido de oxígeno. Una vez que esté disponible, esta información sin duda ayudará a reducir los costos de nutrición y/o aumentar la productividad. Profundidad de iluminación subacuática y control ambiental. [14]

Mantener una profundidad óptima es una característica importante de los sistemas grandes, ya que afecta la mezcla del estanque y la penetración de la luz. La cantidad de luz que incide sobre las células depende de la cantidad de radiación superficial, la profundidad del cultivo, el grado de turbulencia y la densidad de las células (Vonshak et al., 1982; Richmond y Vonshak, 1978). La luz es el principal factor limitante para los densos cultivos de algas que se encuentran comúnmente en estanques abiertos. Para lograr una buena eficiencia de cosecha (Richmond et al., 1980), la biomasa óptima debe estar en el rango de 400-500 mg de peso seco l⁻¹. Con esta densidad, el tiempo de residencia de las algas en la zona eufótica se reduce aprox. 75%. Por lo tanto, el cultivo en estanques abiertos al aire libre está realmente limitado por la luz. En densidades inferiores a 250 mg de peso seco l⁻¹, la eficiencia de la cosecha se reduce y es probable que el crecimiento del cultivo se deba a la fotoinhibición. Este último fenómeno ha sido demostrado en varios estudios de campo y de laboratorio (Belay, 1981; Belay y Fogg, 1978) y es objeto de varias revisiones (Neale, 1987), pero hasta el momento se conocen sus efectos sobre la producción. Aclarado. El desafío para los grandes productores de espirulina al aire libre es maximizar la cantidad de luz que recibe una sola célula. Se pueden utilizar varios métodos, aunque ninguno producirá exactamente el efecto deseado. La disminución de la densidad de biomasa aumenta la penetración de la luz y da como resultado mayores tasas de crecimiento. Pero con una densidad de

biomasa baja, el rendimiento de biomasa por unidad de tiempo de cosecha, lo que da como resultado mayores cantidades de cultivos a procesar y, por lo tanto, aumenta el tiempo de procesamiento.

Además, la fotoinhibición a densidades tan bajas afecta a la producción, al menos en verano. Otra forma de solucionar este problema es reducir la profundidad. Este método funciona siempre que la mezcla del impulsor no se vea afectada por la profundidad de la superficie (como es el caso con un diseño de impulsor fijo).

Aumentar la tasa de mezcla de cultivos puede aumentar la tasa de crecimiento y la concentración óptima de biomasa (Richmond y Grobbelaar, 1986). Generalmente se sabe por esta y otras plantas de espirulina que la mezcla con paletas no proporciona suficiente turbulencia para asegurar un tiempo de residencia óptimo para las algas en la zona eufótica. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, aumentar la velocidad de mezcla del impulsor más allá de cierto límite puede tener algunas consecuencias indeseables. [15]

i. MANTENER UNA CULTURA UNIALGAL

Mantener cultivos de monoalga espirulina durante la temporada de crecimiento es un desafío para cualquier planta comercial (Vonshak y Richmond, 1988). La producción económica de espirulina requiere una recuperación continua de nutrientes después de la eliminación de la biomasa. La circulación continua de los medios a menudo resulta en una acumulación excesiva de materia orgánica. Esto puede conducir no sólo a la contaminación de otras algas (Richmond et al., 1990, Vonshak, 1987a), sino también a la autodestrucción del crecimiento de Spirulina. Además, la acumulación de materia orgánica se presenta en ocasiones como exceso de espuma resultante de la descomposición y muerte de las algas. Earthrise Farms ha mitigado con éxito este problema mejorando las condiciones de cosecha, monitoreo y control de cultivos. Estas mejoras reducen significativamente la rotura de células y la suciedad. Como resultado, el agua de los cultivos se puede reutilizar continuamente durante la temporada de producción de siete meses sin una acumulación excesiva de materia orgánica. Según Vonshak y Richmond (1988), las principales algas contaminantes en los estanques de espirulina son la Chlorella y una forma menor de espirulina, Spirulina sp. Estos trabajadores estiman que la pérdida total de productividad

anual es de aprox. 15% a 20% debido a la contaminación y posterior destrucción de cultivos. Es probable que el principal alga contaminante en Earthrise Farm sea el alga verde unicelular *Oocystis* sp. Al igual que la espirulina, es alcalófila y se ve poco afectada por los aumentos de alcalinidad o pH. Antes de 1991, la contaminación por esta alga ocurría durante los meses del año al inicio y al final de la temporada de cosecha cuando las condiciones de temperatura eran favorables para su crecimiento.

La contaminación por estas algas, que constituyen el 25% de la biomasa, se mide por la diferencia de densidad óptica entre la absorbancia total del cultivo y la densidad óptica de la misma agua filtrada a través de una malla de 40 mm (Figura 8.4). Por ejemplo, en 1986, cinco de cada diez estanques se desbordaron en sólo un mes debido a la excesiva contaminación por algas verdes (Figura 8.4). Earthrise Farms ha utilizado eficazmente métodos biológicos patentados para controlar la contaminación por algas verdes desde 1990. La contaminación por zooplancton es mínima en cultivos cuidadosamente gestionados. En malas condiciones de crecimiento, los principales contaminantes son los ciliados. Se vuelven abundantes en los meses más fríos, cuando las condiciones ambientales y el estrés mecánico hacen que la espirulina sea susceptible a agrietarse y pudrirse. [15]

j. CONTROL DE INSECTOS

En estanques abiertos, los insectos acuáticos son inevitables. Los grupos más importantes son EHydridae (peces de salmuera), Corixidae (barqueros acuáticos) y Chironomidae (mosquitos). En cuanto a la contribución de los desechos de insectos al producto, la efedra fue la más abundante en nuestros estanques y esto también se ha informado en otros lugares (Venkataraman y Kanya, 1981). Las larvas de estas moscas tienen muchas pequeñas pápulas endurecidas y ganchos que se rompen en pedazos más pequeños durante el proceso de recolección. Los corrios suelen ser lo suficientemente grandes como para ser retenidos por una presa. Además de los insectos acuáticos que pueden reproducirse in situ, también puede producirse contaminación por insectos terrestres o partes de ellos, pero esto no es grave. Estos y los insectos acuáticos se controlan mediante redes in situ y procesos de detección previos a la cosecha.

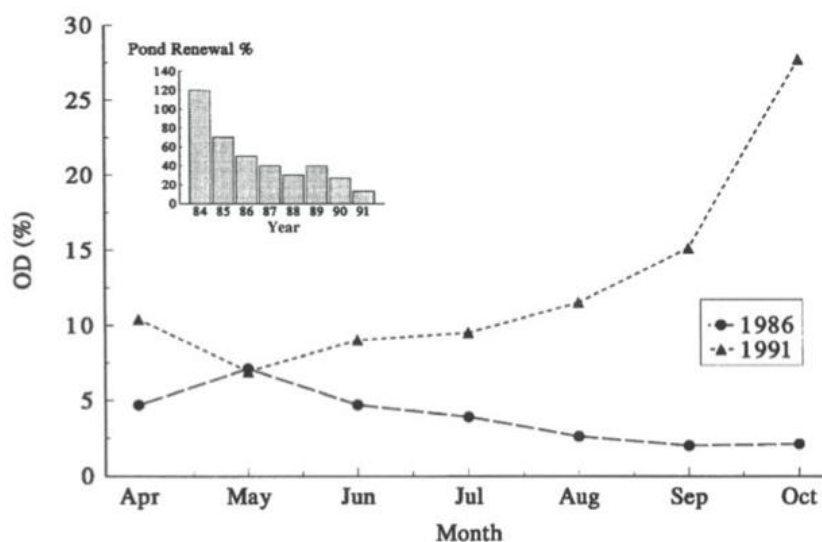


Fig. 17. Contaminación de algas verdes medida por densidad óptica (OD). Recuadro: Número de estanques renovados como porcentaje del número total inicial de estanques. Vea el texto para más detalles.

k. CONTROL DE ROEDORES

Como se analizará más adelante, el nivel de acción defectuosa (DAL) de la FDA de EE. UU. para pelo de roedor es de 0,5 en 50 gramos de polvo seco. Por tanto, es imperativo controlar la entrada de roedores al barrio. El área alrededor del estanque está diseñada para evitar la entrada accidental de roedores. También se instalaron trampas para roedores alrededor del estanque. Sin embargo, en las zonas agrícolas circundantes, el viento puede arrastrar el pelo de los roedores, especialmente si los campos se queman después de la cosecha. Eliminación ligera adicional de suciedad mediante aplicación in situ y compensación previa a la cosecha. [16]

I. COSECHA DE LA BIOMASA

- **EL SISTEMA DE COSECHA**

Los sistemas de recolección de plantas de espirulina suelen incluir varias etapas de filtración. Como se muestra en 8.3. Como se muestra en la figura, Earthrise Farms utiliza tres etapas de filtración para producir biomasa. La suspensión final suele contener aprox. 15-20% de sólidos.

- **EFICIENCIA DE LA COSECHA**

La eficiencia de la cosecha (biomasa cosechada / biomasa procesada) depende del tamaño del tricoma y del tamaño de malla de los filtros utilizados en cada etapa. Cuanto menor sea el tamaño de la malla, mayor será la eficiencia. Sin embargo, los caudales son invariablemente más bajos a las mayores eficacias asociadas con filtros de malla más pequeña. El aumento de la fuerza del flujo de agua a menudo da como resultado la rotura de las células y, por lo tanto, la pérdida de eficacia, y el agua de retorno tiene consecuencias indeseables en el cultivo del estanque. Sin embargo, debe lograrse un cierto caudal óptimo para eliminar la mayor parte de la producción diaria. Si esto no se consigue, la acumulación de biomasa en los estanques da como resultado una penetración de luz reducida y una reducción de las tasas de crecimiento y la productividad. Estas circunstancias pueden eventualmente conducir a la muerte inevitable y la descomposición de las algas. Los sistemas de filtrado aguas abajo también pueden verse afectados si el caudal en el sistema aguas arriba es superior a un valor dado. La configuración de la pantalla final en las diversas etapas es, por lo tanto, una compensación entre la eficiencia y el caudal y debe ajustarse dependiendo del tamaño del tricoma y de la cantidad total de biomasa que se va a eliminar.

Por lo tanto, el control de la cultura depende en gran medida de la eficiencia de la cosecha y viceversa.

Tasa de crecimiento basada en la cosecha versus tasa de crecimiento in situ

Hasta la fecha, ningún sistema de recolección ha podido eliminar completamente la biomasa de entrada a un caudal suficiente para eliminar la cantidad de biomasa requerida en grandes plantas comerciales. Los daños mecánicos a los cultivos causados por la maquinaria de transporte y cosecha son un problema inevitable durante la cosecha. Este daño se manifiesta como fragmentación de los tricomas, que eventualmente pasan a través de la unidad de filtración. Además de la fragmentación, el rizado de los tricomas también aumenta

gradualmente y, por lo tanto, el tamaño de los tricomas disminuye gradualmente durante la temporada de cosecha. Las tasas de crecimiento calculadas a partir de la biomasa obtenida fueron de aprox. 30% más bajas que las tasas de crecimiento calculadas a partir de cambios in situ en la biomasa (Figura 8.5). Parte de esta pérdida se debe a la descomposición y sedimentación de la biomasa dañada en el agua circulante.

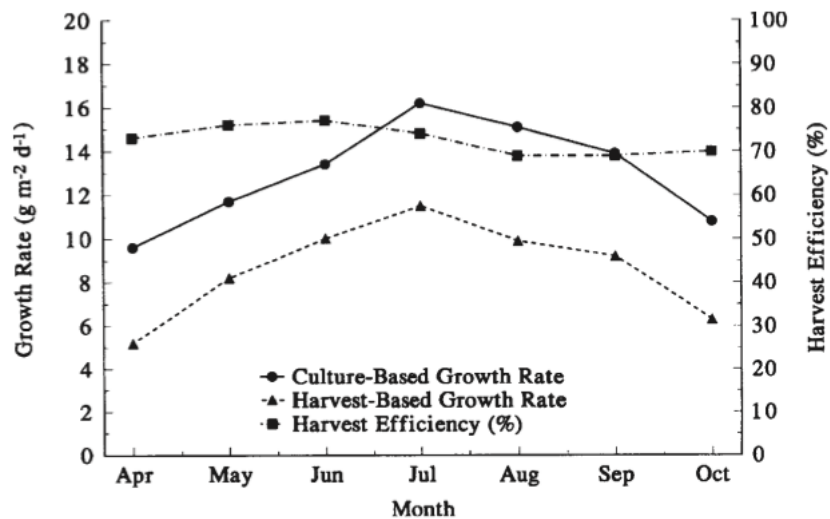


Fig. 18. Relación entre la tasa de crecimiento in situ, la tasa de crecimiento basada en la cosecha y la eficiencia de la cosecha.

El rizado y la reducción del tamaño de los tricomas dan como resultado una recolección menos eficiente al final de la temporada de producción (Figura 8.5). La eficiencia de la cosecha, calculada como la relación entre la biomasa total cosechada y la biomasa total procesada (peso seco), también mostró una reducción del 30%. [16]

- **EL STRESS INDUCIDO POR LA COSECHA EN SPIRULINA**

La producción económica de materia orgánica disuelta y espirulina autoinhibida requiere una recuperación continua de nutrientes después de la eliminación de la biomasa. El reciclaje constante de los medios a menudo resulta en una acumulación excesiva de materia orgánica causada por la fragmentación de los tricomas en los sistemas de transporte y recolección. Esto no sólo conduce a la contaminación con otras algas y bacterias, sino que también puede provocar un retraso en el crecimiento. 8.6. La Figura 1 muestra los resultados de un bioensayo simple de crecimiento de espirulina con agua filtrada extraída de un

estanque que tuvo que ser drenado debido a una contaminación excesiva de algas verdes. Los bioensayos en los que el agua filtrada del estanque se trató con carbón para eliminar la materia orgánica mostraron que la espirulina creció mucho más rápido que los controles no tratados, lo que sugiere que el crecimiento de la espirulina puede verse inhibido por la acumulación de algo de materia orgánica. Como se mencionó anteriormente, las mejoras en las condiciones de cultivo y recolección redujeron el rizado y la fragmentación celular. De hecho, los estudios de bioensayos con carbón realizados al final de la temporada de producción de 1991 no mostraron diferencias en la tasa de crecimiento de la espirulina en comparación con el control no tratado. Mayor división y curvatura de los tricomas Un fenómeno muy común observado en las granjas Earthrise es un cambio gradual en el tamaño y la forma de los tricomas a medida que aumenta el tiempo o la frecuencia de la cosecha. A medida que avanza la temporada de crecimiento, existe una tendencia a que aumente el rizado. Parece comenzar en los meses más cálidos de la temporada y luego pasar a los meses más fríos de la temporada. El rizado y la reducción del tamaño de los tricomas dan como resultado una recolección menos eficiente al final de la temporada de producción. Los cultivos que pasaron el invierno en estanques abiertos pasaron gradualmente al tipo pavo largo y suelto, mientras que los cultivos transferidos a invernaderos cálidos conservaron la estructura enrollada. Varios investigadores han informado sobre estos cambios en la morfología de los tricomas de espirulina (Bai, 1980; Bai y Seshadri, 1980; Lewin, 1980). Según Bai y Seshadri (1980), una alta intensidad de luz y una alta concentración de nutrientes conducen a una transformación de una variedad ligeramente rizada (tipo S) a una variedad más rizada (tipo C), que inicialmente muestra un mayor rizado.) tiene alta intensidad de luz y baja concentración de nutrientes. Ni la luz ni los nutrientes cambiaron significativamente durante la transformación observada en nuestro caso. Por lo tanto, parece que la alta temperatura y/o el estrés mecánico pueden ser factores. La poca luz, las bajas temperaturas y la falta de estrés mecánico asociado con la

cosecha pueden ser razones por las cuales los tricomas regresan al estado libre en invierno.

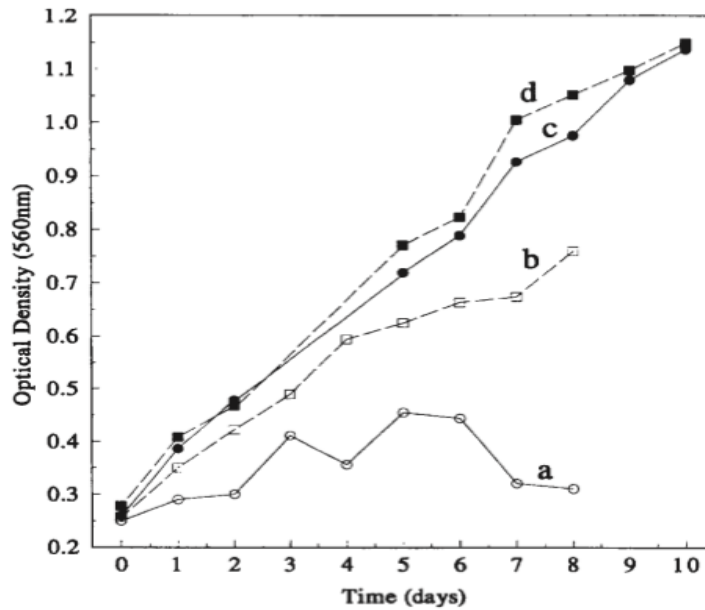


Fig. 19. Crecimiento de Spirulina en filtrado de cultivo de estanque antes (O) y después (□) tratamiento del medio con carbón activado. Círculos y cajas abiertos para 1989; Círculos cerrados y cajas para 1991.

Para comprender mejor este fenómeno, se llevaron a cabo una serie de experimentos para estudiar los efectos del daño mecánico en el crecimiento y la fotosíntesis. Los resultados de estos estudios se han informado en otros lugares (Belay, 1993). Como se muestra en 8.8. y 8.9. , tanto la fotosíntesis como el crecimiento de los tricomas se ven gravemente afectados a medida que aumenta la frecuencia de recolección. A medida que avanza la temporada de crecimiento, el número de trabajadores tiende a aumentar (Figura 19). Parece comenzar en los meses más cálidos de la temporada, pero puede progresar incluso en los meses más fríos de la temporada. La eficiencia de la cosecha disminuye hacia el final de la temporada de producción (Figura 19). Los cultivos que pasaron el invierno en estanques abiertos finalmente volvieron al tipo de pavo largo y suelto, mientras que los cultivos transferidos a invernaderos cálidos conservaron la estructura enrollada. Varios investigadores han informado sobre estos cambios en la morfología de los tricomas de espirulina (Bai, 1980; Bai y Seshadri, 1980; Lewin, 1980). Según Bai y Seshadri (1980), la alta intensidad de la luz y la alta concentración de nutrientes conducen a una transición de

una variedad ligeramente rizada (tipo S) a una variedad más rizada (tipo C) como muestra Very (tipo C).) Aumento del frizz. En nuestro caso, ni la luz ni los nutrientes cambiaron durante la transición observada. Por lo tanto, parece probable que la alta temperatura y el estrés mecánico sean factores. La poca luz, las bajas temperaturas y la falta de mecanismos relacionados con la cosecha pueden provocar un retorno al estado de tricomas libres en invierno. Para comprender mejor este fenómeno, se llevaron a cabo una serie de experimentos para estudiar los efectos del daño mecánico en el crecimiento y la fotosíntesis. Los resultados de estos estudios se han informado en otros lugares (Belay, 1993). Como se muestra en 20. y 21. en la figura, las fotografías y el crecimiento después del daño se vieron gravemente afectados.

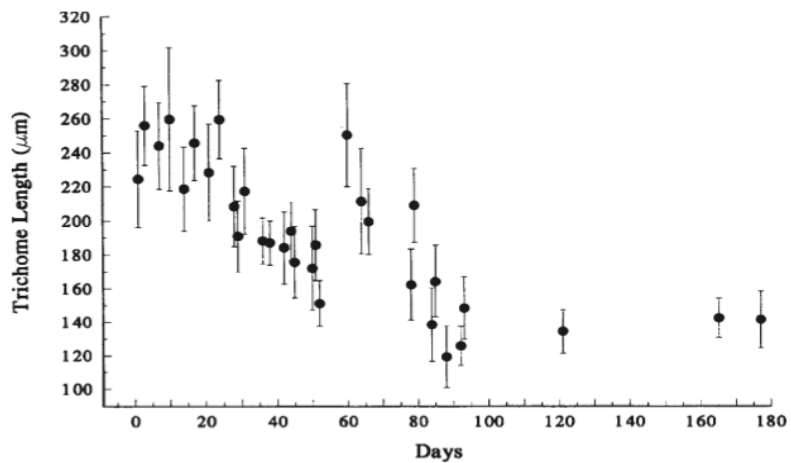


Fig. 20. Variación temporal de la longitud del tricoma.

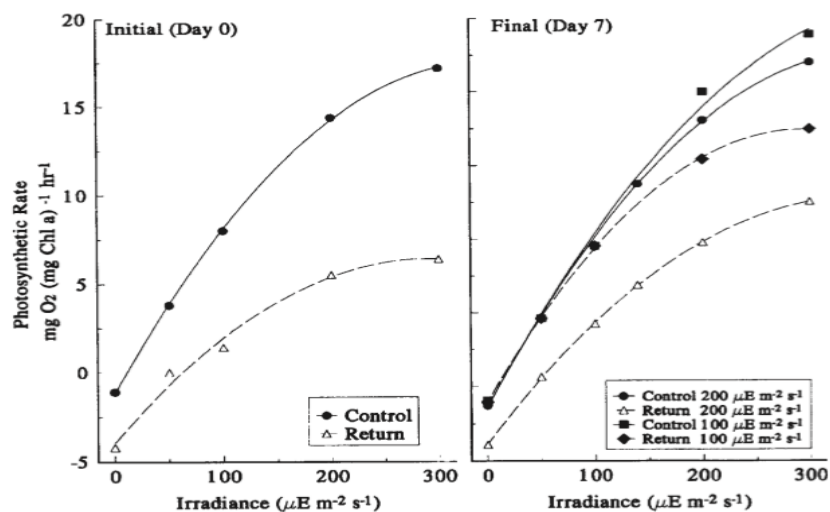


Fig. 21. Relación fotosíntesis-irradiación de Spirulina inmediatamente después del daño mecánico (día 0) y después de 7 días de recuperación (día 7).

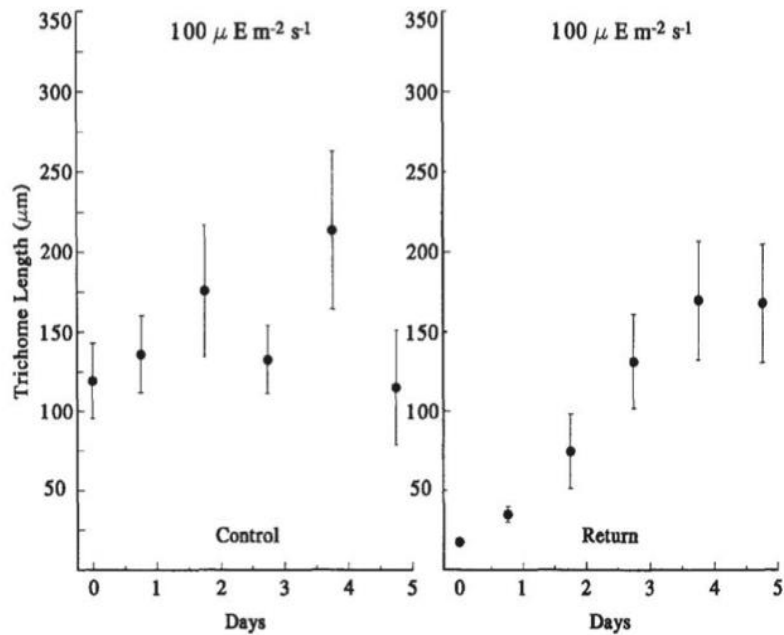


Fig. 22. Tricomas longitud en función del tiempo antes (Control) y después (Retorno) daño mecánico.

Sin embargo, se observó cierto grado de recuperación en cultivo después de varios días. Aunque se puede predecir la recuperación de tricomas in situ basándose en las observaciones anteriores, aún no se ha evaluado el alcance de esta recuperación. [15]

m. SECADO Y ENVASADO

- **IMPORTANCIA EN EL CONTROL DE CALIDAD**
- Un secado adecuado y rápido son características esenciales para la producción de espirulina de alta calidad. En la industria se utilizan diferentes tipos de sistemas de secado para secar la espirulina. Por razones económicas, el secador preferido en las grandes plantas de espirulina es el secador por aspersion. La liofilización puede proporcionar una mejor calidad general del producto, pero es bastante costosa. Earthrise Farms utiliza secado por aspersion. Rocíe las gotas de espirulina en la cámara de secado el tiempo suficiente para que el agua se evapore rápidamente. Cuando el polvo llega al fondo, se expone a altas temperaturas de $60^{\circ}C$ durante unos segundos. Se seca sin el uso de conservantes, aditivos o estabilizantes y nunca se irradia. Este rápido proceso de secado por aspersion garantiza la conservación de nutrientes, pigmentos y enzimas sensibles al calor. De acuerdo con las buenas

prácticas de fabricación, este producto no es manipulado por manos humanas durante la cosecha, el secado y el envasado. El embalaje adecuado es otra característica importante en la producción de espirulina de alta calidad. El polvo que sale de la secadora se aspira inmediatamente a un recipiente de recolección en la sala de empaque y se sella al vacío en un tambor con bolsas especiales con barrera de gas para reducir la oxidación de ciertos pigmentos importantes, como los carotenoides. Luego, el producto sellado se coloca en tambores para su transporte. En estas barricas el producto se puede almacenar hasta por 4 años, cambiando ligeramente la composición bioquímica o las propiedades nutricionales. La elección de los materiales de embalaje se basó en estudios relacionados con cambios en el tiempo de pérdida de pigmento en diferentes condiciones de almacenamiento. Los resultados de uno de estos estudios se muestran en 8.2. en la mesa. Parece que no hay más pérdidas debajo de la bolsa de barrera para gases después de que se agota la concentración inicial de oxígeno en la bolsa. [15]

- **CONTENIDO DE HUMEDAD**

Un secado inadecuado a menudo da como resultado un producto con demasiada humedad. Un contenido de humedad superior al 8 % puede provocar que crezcan moho y bacterias en el producto. Utilice un secador por aspersión para un secado rápido y eficiente. Debido a las altas propiedades de adsorción del polvo seco, el producto se envasa inmediatamente en un ambiente seco. Mantener la temperatura óptima en la secadora es un aspecto importante del proceso de secado. El secado excesivo a menudo provoca la pérdida de componentes esenciales como vitaminas, clorofila y carotenoides. Por lo tanto, las secadoras de Earthrise Farms están controladas por un microprocesador para que la temperatura de secado se mantenga y controle constantemente.

- **DENSIDAD A GRANEL**

La propiedad física más importante del polvo de espirulina es la densidad aparente. Esto se debe a que afecta la tabletabilidad del producto. Generalmente existen dos tipos de procesos de formación de tabletas: uno requiere productos con una alta densidad aparente y el otro requiere una baja densidad aparente. Por tanto, es difícil que una planta

de producción satisfaga las necesidades de diferentes clientes. La densidad aparente del producto se ve afectada por la distribución del tamaño de las partículas, el tipo de aglomeración y el tamaño de las partículas

TABLA IV
DEGRADACIÓN DEL PIGMENTO (PORCENTAJE DE INICIAL) BAJO
DIFERENTES TEMPERATURAS Y CONDICIONES DE ENVASE

Time (months)	Phycocyanin		Carotenoids		Chlorophyll	
	25 °C	50 °C	25 °C	50 °C	25 °C	50 °C
polyethylene bag						
0.0	100	100	100	100	100	100
0.1		87		59		98
1.0	108	93	96	44	105	96
2.0	97	75	88	29	96	87
5.0	89	57	50	10	95	74
Gas-barrier bag						
0.0	100	100	100	100	100	100
0.1		96		99		101
1.0	96	109	102	97	100	100
2.0	97	83	102	98	100	98
5.0	95	88	98	97	100	97

porosidad y, en cierta medida, contenido de agua. La distribución del tamaño de las partículas se ve afectada por el tamaño inicial de los tricomas cuando ingresan al orificio del secador y del atomizador. Por tanto, la calidad final (densidad aparente) del producto depende de las condiciones de cultivo, cosecha y secado. Hasta cierto punto, todos estos factores tienen como objetivo obtener un producto que satisfaga las diversas necesidades de los clientes. [13]

- **SEGURIDAD EN LA CALIDAD**

El análisis periódico de las propiedades químicas, físicas, bioquímicas y microbiológicas del producto es esencial para la producción de espirulina aprobada para uso alimentario. Es esencial contar con laboratorios bien equipados y personal bien capacitado porque el análisis in situ es razonable y económico. Los análisis fuera del laboratorio son costosos y, a menudo, poco fiables. Earthrise Farms realiza la mayoría de los análisis químicos y microbiológicos in situ. En ocasiones, las muestras se envían a laboratorios independientes para su

validación y estandarización. Esto es necesario para asegurar el cumplimiento del producto final con los estándares de calidad de los mercados nacionales e internacionales. Solo después de que cada lote de producción haya pasado todas las pruebas, estará certificado y listo para su envío.

- **COMPOSICION QUIMICA**

Un aspecto de la producción de espirulina de alta calidad es que el producto debe tener las mismas propiedades químicas y físicas. 8.3. La tabla muestra la composición química típica del polvo de espirulina producido por Earthrise Farms, así como algunas propiedades físicas. El Laboratorio de la Asociación Japonesa de Alimentos analizó muestras de productos mixtos que representaban todos los productos de las temporadas de cultivo de 1988 y 1992 y observó cambios estacionales y anuales en la calidad del producto. Sin embargo, cuando se considera la apertura del sistema de producción, la consistencia de la composición bioquímica es notable (Belay y Ota, 1994). Esto puede indicar que, aunque no hay duda de que la calidad y consistencia del producto de las algas cultivadas en biorreactores cerrados es mucho mejor, la diferencia en la calidad del producto de las algas cultivadas en estanques abiertos bien mantenidos no es tan diferente como en los humanos. Las buenas condiciones de cultivo y la gestión del producto son requisitos previos para la calidad del producto y la homogeneidad de la composición bioquímica. [14]

- **NORMAS MICROBIOLÓGICAS**

El uso de aguas superficiales para el cultivo de microalgas en grandes estanques abiertos conducirá sin duda a la contaminación de los productos recolectados con otros microorganismos. La manipulación adicional del producto durante la cosecha, el secado y el envasado también puede provocar contaminación microbiana. Por lo tanto, la carga microbiana final del producto dependerá del cultivo y del cuidado con el que se manipule el producto en las distintas etapas. Por ello, es muy importante comprobar la flora microbiana directamente en cada lote de productos secos. El recuento en placa estándar (SPC) y los recuentos de coliformes validados se utilizan en la industria alimentaria

para monitorear y verificar la manipulación durante el procesamiento de alimentos.

TABLA V
MICROBIOLOGICAL AND RELATED QUALITY STANDARDS IN RELATION
TO THE QUALITY OF EARTHRISE FARMS SPIRULINA

	France ^a	Sweden ^b	Japan ^c	USA ^d	EF ^e	EF (89-93) ^f
Moisture (%)			<7.0		<7.0	4.3 ± 0.4
SPC (×10 ⁶)/g	<0.1	<10.0	<0.05		<1.0	2.17 ± 1.36
Mold (#/g)		<1000	<100		<100	<11
Yeast (#/g)					<40	Neg
Coliforms (MPN/g)	<10	<100	Neg		Neg	Neg
Salmonella	Neg	Neg	Neg		Neg	Neg
Staphylococcus (#/g)	<100	<100			Neg	Neg
Insect Fragments (#/10g)				<30	<500	48 ± 32
Rodent Hair (#/150g)				<1.5	<1.5	0.1 ± 0.2

^aSuperior Public Hygiene of France

^bMinistry of Health, Sweden

^cJapan Health Food Association

^dUnited States Food and Drug Administration

^eEarthrise Farms Standard

^f1989-1993 data (average)

EF=Earthrise Farms

Neg=Negative

SPC=Standard Plate Count

MPN=Most Probable Number

(Eisenberg, 1985; Jay, 1992). Diez años de inspecciones en las granjas de Earthrise prácticamente no han mostrado casos confirmados de *E. coli*, lo que indica buenas condiciones sanitarias de crecimiento, cosecha, secado y empaque en general. Los estudios de productos de Chad, Argelia y México han mostrado recuentos de coliformes más altos (Jacquet, 1976). Sin embargo, los análisis de cientos de muestras de espirulina de granjas comerciales modernas en Tailandia, Japón, Taiwán y México mostraron que los coliformes eran raros (Jassby, 1988a). El uso de estos organismos como especies indicadoras puede ser engañoso porque también pueden estar presentes otras formas de organismos patógenos. Por lo tanto, generalmente se recomiendan buenas prácticas de fabricación para evitar la contaminación en todas las etapas del sistema de producción. El contenido microbiano final debe cumplir con los estándares establecidos por los distintos países donde se comercializa el producto. 8.4. La tabla muestra una comparación de varios estándares microbiológicos nacionales con los estándares de calidad internos de Earthrise Farm. Los datos promedio de control de calidad obtenidos entre 1989 y 1993 estuvieron muy por debajo de los estrictos estándares de la granja. Esto debe tenerse en cuenta en el número de placas estándar. Se sabe que el número de placas de

espirulina estándar disminuye en un orden de magnitud después de varios meses de almacenamiento en seco (Jacquet, 1976). Por lo tanto, se pueden seguir incluso las estrictas directrices de la CPS francesa.

- **MATERIAL EXTRAÑO**

Según la AOAC (1990a), materia extraña es "cualquier materia extraña en un producto debida a condiciones o prácticas inaceptables de producción, almacenamiento o distribución". Si la materia extraña es causada por contaminación de insectos, roedores, pájaros u otros animales, se llama suciedad. Los principales componentes de las materias extrañas en los alimentos son fragmentos de insectos, pelos de roedores y fragmentos de plumas. En los alimentos convencionales, los fragmentos de insectos a menudo indican condiciones inadecuadas de producción y/o almacenamiento. En los productos de microalgas, esto es difícil de explicar porque los insectos acuáticos son nativos de los estanques de microalgas al aire libre. Como se mencionó anteriormente, los estanques de espirulina suelen albergar pulgones de agua salada (Ephididae), corixidae (Corixidae) y chironomidae (Chironomidae). La presencia de fragmentos de insectos locales en el polvo seco no debería suponer ningún riesgo para la salud humana. De hecho, la efedra es el insecto acuático dominante en nuestros estanques y ha sido utilizada como alimento por los nativos americanos en Estados Unidos y México (Aldrich, 1912; Wirth, 1971). Los indios Paiute de California y Nevada llamaron a este alimento "Koo-chah-bi" y los aztecas de México llamaron a las orugas "Puxi". Existe un método analítico estandarizado para contar fragmentos de insectos (AOAC, 1990a,b). Earthrise Farms colaboró para desarrollar este método oficial para el análisis de fragmentos de insectos espirulina (Nakashima, 1989). Aunque los métodos de preparación y recuento de muestras están altamente estandarizados, el proceso de identificación deja mucho que desear. Los autores enviaron la misma formulación a tres laboratorios diferentes y descubrieron que los resultados diferían en dos órdenes de magnitud. La mayor parte de la literatura sobre identificación de fragmentos de insectos se basa en insectos agrícolas o insectos de almacén. Además, a menudo es difícil distinguir las partes de insectos de las partes de

plantas, lo que da lugar a una sobreestimación de partes de insectos no identificadas. Investigadores de Earthrise Farms y la Universidad de Texas en Austin están desarrollando un método para detectar restos de insectos utilizando la tecnología ELISA de miosina. El número promedio relativamente alto de fragmentos de insectos en la producción de Earthrise Farms (1989-1993) se debe al número relativamente alto de insectos observados en los primeros cuatro años de este período. Las mejoras posteriores en el control de insectos dieron como resultado productos que contenían relativamente pocos fragmentos de insectos. Por ejemplo, en 1993, todos los productos alimenticios tenían menos de 30 fragmentos de insectos aprobados, un requisito estadounidense. FDA. Más del 95% de las partes de insectos registradas suelen ser de origen de insectos acuáticos. Si las partes de insectos autóctonos siguen considerándose poco saludables, muchos productores de espirulina tendrán dificultades para vender sus productos en los Estados Unidos. Para muchos productores, el coste de controlar los insectos acuáticos es prohibitivo. [14]

- **SPIRULINA A PEQUEÑA ESCALA**

La presencia de pelos de roedores en productos con microalgas se considera un indicador de posible contaminación. La posible fuente de pelo de roedor de Earthrise Farm es el ratón ciervo *Peromyscus maniculatus*. Hay muchas maneras en que el pelo de roedor puede llegar a los productos. Aunque nunca se han visto en Earthrise Farm, los roedores pueden ingresar accidentalmente a los estanques de producción si no se implementan las medidas adecuadas de control de roedores. Otra fuente de pelo de roedores es el transporte por el viento desde las zonas circundantes, especialmente si los campos se queman después de la cosecha. Los datos de Earthrise Farms muestran una correlación directa entre la velocidad del viento y los niveles de roedores en las algas marinas recolectadas. También observamos una correlación significativa entre las medidas de control como atrapar y recortar y la cantidad de pelo de roedor en el producto. Si se toman las medidas adecuadas de control de roedores, rara vez se observan pelos de roedores en los productos secos. Actualmente, Earthrise Farms no tiene

problemas para evitar que el pelo de roedores contamine sus productos. Casi todos los lotes de alimentos cumplen con las regulaciones actuales de la Administración de Alimentos y Medicamentos de EE. UU. (USFDA) de 1,5 pelos de roedor por unidad. 150 g de espirulina (Tabla 8.4). Las plumas, los residuos vegetales y otras materias extrañas se filtran mediante el proceso de atado y tamizado antes de la cosecha. Por tanto, el producto está relativamente libre de materias extrañas.

- **NORMAS PARA METALES PESADOS**

El plomo, el mercurio, el cadmio y el arsénico son contaminantes importantes en los productos de microalgas porque son componentes de la contaminación industrial y están presentes en pequeñas cantidades en algunos pesticidas y fertilizantes agrícolas. Se sabe que la espirulina concentra metales pesados en concentraciones superiores a las encontradas en los medios de cultivo (Lacquerbe et al., 1970). Por tanto, la producción de espirulina de alta calidad requiere el uso de nutrientes avanzados, que son caros. También se requieren análisis regulares o de rutina de los metales pesados en los productos. Esto es especialmente importante si la espirulina alimentaria se va a producir en estanques subterráneos o lagos naturales. En algunas zonas, el suelo puede contener grandes cantidades de metales pesados que las algas pueden acumular fácilmente. Se observó que algunas muestras analizadas de este tipo de estanque tenían niveles relativamente altos de metales pesados (no publicado). Dado que algunos revestimientos de plástico para estanques también pueden ser una fuente de metales pesados, se debe tener cuidado al seleccionar el material del revestimiento. 8.5. La tabla muestra los niveles de metales pesados en Earthrise Farms Spirulina (1984-1993) en comparación con algunas pautas disponibles. Los datos mostraron que la concentración de metales pesados estaba muy por debajo de las pautas de proteínas unicelulares establecidas por el Grupo Asesor de Proteínas de las Naciones Unidas (UNPAG) (1974) y las pautas establecidas por la Asociación Japonesa de Alimentos Saludables para chlorella y espirulina. pesticida

Earthrise Farms cultiva espirulina sin el uso de pesticidas. Sin embargo, dado que Earthrise Farm está ubicada en una zona agrícola, es posible.

TABLA VI
HEAVY-METAL CONTENT OF EARTHRISE FARMS SPIRULINA IN
RELATION TO INTERNATIONAL STANDARDS

	Lead	Mercury	Cadmium (ppm)	Arsenic	Total as lead
Aquatic animals (USFDA)		<1.0			
Single-cell protein (UNPAG)	<5.0	<0.1	<0.1	<2.0	
<i>Chlorella</i> (JHFA)				<2.0	<20
<i>Spirulina</i> (JHFA)				<2.0	<20
<i>Spirulina</i> (EF standard)	<1.0	<0.05	<0.05	<1.0	
<i>Spirulina</i> (EF 1988 & 1991)	<0.32	0.01	0.01	1.8	3.4

USFDA=United States Food and Drug Administration
UNPAG=United Nations Protein Advisory Group
JHFA=Japan Health Food Association
EF=Earthrise Farms

El agua afluyente puede contener pesticidas. Aunque el alto pH del medio inhibe la persistencia de muchos compuestos pesticidas (Jassby, 1988a), todavía es necesario un control rutinario de los pesticidas en la producción. Los análisis periódicos de más de treinta pesticidas diferentes realizados por laboratorios independientes muestran niveles indetectables de estos compuestos. Debido a que las pruebas de rutina por sí solas son costosas y no pueden garantizar la seguridad, Earthrise Farms utiliza bioensayos para liberar peces en embalses que suministran agua cruda. Observe el estado de los peces en el tanque todos los días. Se sabe que la espirulina es sensible a muchos pesticidas (Bednarz, 1981). Como señaló Jassby (1988a), las reducciones anormales en la productividad pueden servir como señal de advertencia de exposición a pesticidas. [15]

n. COSTE DE PRODUCCION

- **DETERMINANTES DEL COSTO DE PRODUCCION**

Recientemente se han revisado los aspectos económicos de la producción de espirulina (Jassby, 1988b, Vonshak, 1992). Los costos fijos de producción (costos de capital) de la espirulina varían considerablemente con el tiempo. Jassby (1988b) intentó estimar los costos fijos y variables basándose en la experiencia de Earthrise Farms antes de 1988. Este no es un análisis de costos fijos, sino simplemente una comparación de los costos variables actuales con los presentados

por Jassby (1988b). Curiosamente, a pesar de que el área de la presa se multiplicó por 1,5 desde su informe, las contribuciones relativas de los diversos componentes del costo variable no difirieron (Tabla 7). En Earthrise Farms, el factor más importante que afecta los costos de producción es la mano de obra, seguido de los costos de operación, reparación y mantenimiento. Como se muestra en la Figura 8.10. En el gráfico, la producción anual por unidad de superficie en 1991 fue aproximadamente el doble que en 1984. Durante el mismo período, los costos de producción han caído a menos del 50% de los valores de 1984, en parte debido a las economías de escala, ya que el área total de la presa aumentó de 50.000 a 75.000 m². Las principales razones de la importante reducción de los costos de producción desde 1990 son (1) mayores tasas de crecimiento (Figura 23), (2) la capacidad de extender la temporada de crecimiento un mes adicional mediante una combinación de selección de cultivares y cambios en las condiciones de crecimiento, (3) la capacidad de pasar el invierno con espirulina en estanques abiertos, lo que reduce significativamente el tiempo requerido para la expansión del cultivo, (4) mejora del cultivo.

TABLA VII
REALTIVE COSTO F PRODUCTION

	1991	1992	1993	Average
Labor	38	36	38	37
Operations	29	29	30	29
Repairs & maintenance	5	4	5	5
Depreciation	15	15	15	15
Administrative Cost	12	16	13	14
Net Operating Cost	100	100	100	100

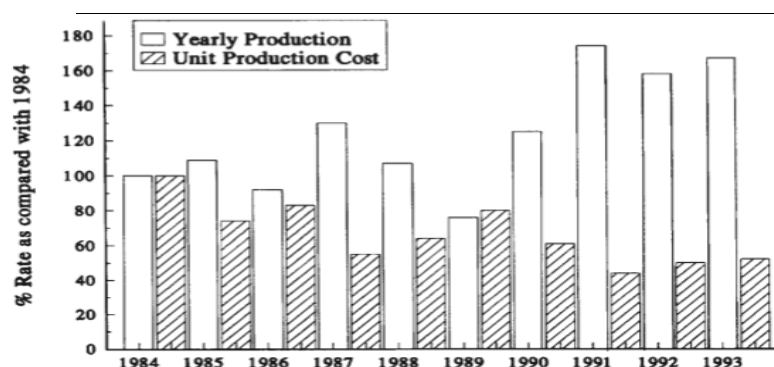


Fig. 23. Una comparación de la producción anual y el costo unitario de producción (1984-1993).

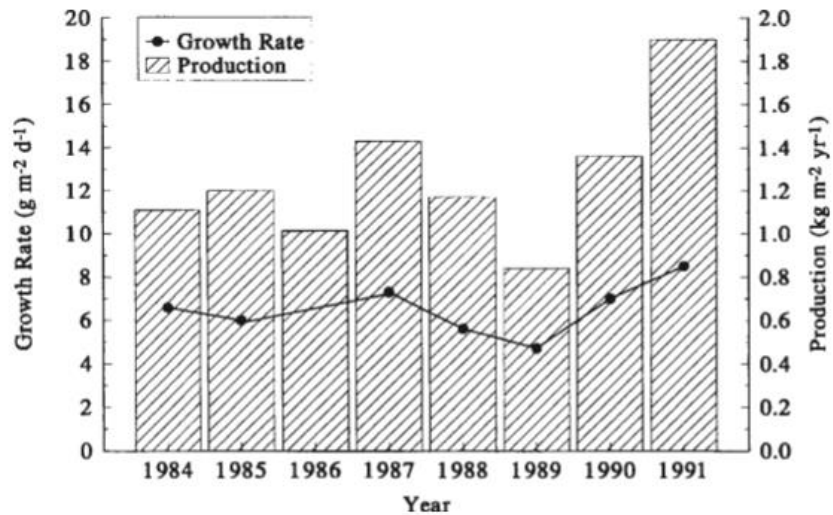


Fig. 24. Tasas de crecimiento y producción anual de Spirulina (1984-1991).

Las condiciones de cosecha pueden mejorar la eficiencia de la cosecha y (5) aumentar el área cultivada. Los costos de producción se pueden reducir significativamente extendiendo la temporada de producción al menos dos meses seleccionando cepas adaptadas a las temperaturas más frías de finales del invierno y principios de la primavera. Una mayor optimización de las condiciones de cultivo conducirá sin duda a mayores rendimientos..

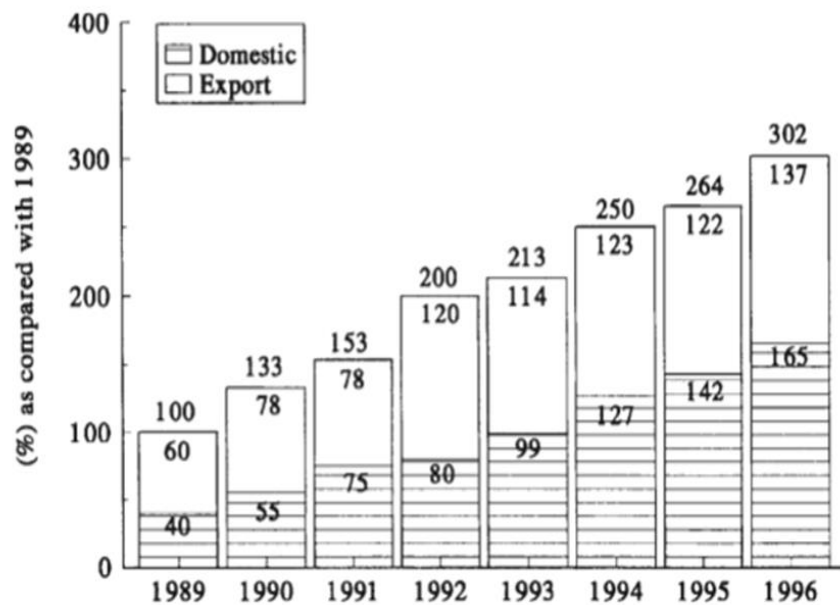


Fig. 25. La demanda del mercado pasado y futuro de Earthrise Farms Spirulina.

o. DEMANADA DE MERCADO

La demanda del mercado de espirulina de Earthrise Farm se muestra en 8.12. en la imagen. Los valores de 1989-1993 son la demanda real, mientras que los valores de 1994-1996 son aproximados. Se espera que los mercados nacionales y de exportación sigan desarrollándose. La demanda de exportación y consumo interno de espirulina de Earthrise Farms se duplicó entre 1989 y 1993. Se espera que aumente en un 50% entre 1993 y 1996.

Conclusiones

Si bien hay poca información procedente de estudios a pequeña escala y a corto plazo sobre el cultivo de espirulina al aire libre a gran escala, también hay poca información publicada sobre sistemas de producción a gran escala y, de hecho, poca información sobre instalaciones de producción comercial a gran escala. Aunque parte de la información publicada sobre el cultivo de espirulina al aire libre a gran escala a partir de sistemas de producción a corto plazo y/o de pequeña escala ayuda a aclarar algunos fenómenos básicos, no es necesariamente aplicable a la producción comercial de espirulina a gran escala. Los problemas encontrados en sistemas grandes rara vez se encuentran en sistemas pequeños. Los problemas encontrados en las operaciones a largo plazo difieren, al menos en gravedad, de los encontrados en estudios a corto plazo. Los datos de estos estudios a corto plazo y/o menos sistemáticos tampoco tienen en cuenta los aspectos económicos de la producción, que son muy importantes para la producción comercial. Además, estos estudios a pequeña escala (estudios experimentales o piloto) rara vez informan sobre la estabilidad de las propiedades bioquímicas y microbianas del producto final. [15]

No hay duda de que los principales productores comerciales de espirulina han acumulado un conocimiento considerable en esta área. Sin embargo, debido a los riesgos comerciales, no toda la información que han recopilado a través de investigación y desarrollo a largo plazo está abierta al mundo exterior. Estas empresas han alcanzado una etapa de desarrollo de la tecnología de producción que los nuevos fabricantes no podrían alcanzar sin invertir tiempo y dinero. Esta comprensión puede dar a estos productores exitosos la confianza para descubrir cada vez más sobre el cultivo al aire libre a gran escala. En los últimos años, Earthrise Farms ha participado activamente en conferencias internacionales

sobre biotecnología de algas. A través de estos compromisos se pueden intercambiar ideas sobre la cultura popular al aire libre Spirulina. Esperamos que otros fabricantes eventualmente sigan su ejemplo. Actualmente, muchos investigadores alrededor del mundo están trabajando en el cultivo masivo de Spirulina. La mayoría de estos investigadores están afiliados a universidades o instituciones de investigación que realizan investigación básica y aplicada. Generan mucha información valiosa a partir de laboratorios y sistemas pequeños que pueden probarse en instalaciones más grandes. Incluso dentro del libre flujo de información que domina las plantas comerciales, es posible cierta colaboración en investigación entre la industria y las universidades o instituciones de investigación. Sin duda, esto es beneficioso para todos. Los investigadores de Earthrise Farms han iniciado programas de investigación colaborativos con otros investigadores en EE. UU. y Japón en varias áreas de interés mutuo. Cada planta de producción puede tener sus propios problemas específicos que deben solucionarse a su manera. Cierta información también puede considerarse secreto comercial por determinadas razones. Si bien algunos problemas son específicos de un entorno de producción específico, hay otros que son comunes a todas las instalaciones de producción. La cooperación entre estas instituciones para resolver problemas comunes puede reducir significativamente los costos de investigación. [15]

CAPÍTULO III.

3.1 CONCLUSIONES

- Si bien hay poca información procedente de estudios pequeños y de corto plazo sobre el cultivo de espirulina al aire libre a gran escala, también hay poca información publicada sobre sistemas de producción a gran escala y muy poca información sobre plantas comerciales a gran escala. Aunque parte de la información publicada sobre el cultivo de espirulina al aire libre proviene de sistemas de producción a corto plazo y/o de pequeña escala y ayuda a aclarar algunos fenómenos básicos, no es necesariamente aplicable a la producción comercial de espirulina a gran escala. Los problemas encontrados en sistemas grandes rara vez se encuentran en sistemas pequeños. Los problemas encontrados en las operaciones a largo plazo difieren, al menos en gravedad, de los encontrados en estudios a corto plazo. Los datos de estos estudios a corto plazo y/o menos sistemáticos tampoco tienen en cuenta los aspectos económicos de la producción, que son muy importantes para la producción comercial. Además, estos estudios a pequeña escala (estudios experimentales o piloto) rara vez informan sobre la estabilidad de las propiedades bioquímicas y microbianas del producto final.
- Los grandes productores comerciales de espirulina cuentan sin duda con un considerable know-how técnico acumulado. Sin embargo, debido a los riesgos comerciales, no toda la información que han recopilado a través de investigación y desarrollo a largo plazo está abierta al mundo exterior. Estas empresas han alcanzado una etapa de desarrollo de la tecnología de producción que los nuevos fabricantes no podrían alcanzar sin invertir tiempo y dinero. Esta comprensión puede brindar a estos productores exitosos la confianza para descubrir cada vez más sobre el cultivo al aire libre a gran escala. En los últimos años, Earthrise Farms ha participado activamente en conferencias internacionales sobre biotecnología de algas. A través de esta participación se podrán intercambiar ideas para el cultivo de espirulina al aire libre a gran escala.

3.2 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] *Spirulina platensis* (Arthrospira) Physiology, cell-biology and biotechnology. Edited by AVIGAD VONSHAK.
- [2] ALDRICH, J.M. (1912) The biology of some western species of the dipterous genus *Ephydra*, J.N.Y.Entomol. Soc., 20, 77.
- [3] AOAC (1990a) Official Methods of Analysis, Fifteenth Edn, HELRICH, K., (Ed.) Association of Official Analytical Chemists, Inc., Arlington, 372.
- [4] AOAC (1990b) Official Methods of Analysis, Fifteenth Edn, First Supplement, HELRICH, K., (Ed.) Association of Official Analytical Chemists, Inc., Arlington, 17.
- [5] BAI, N.J. (1980) Competitive exclusion or morphological transformation? A case study with *Spirulina fusiformis*, Arch. Hydrobiol. Suppl. 71, Algological Studies, 38, 191.
- [6] BAI, N.J. and SESHADRI, C.V. (1980) On coiling and uncoiling of trichomes in the genus *Spirulina*, Arch. Hydrobiol. Suppl. 60, Algological Studies, 26, 32.
- [7] BECKER, E.W. (1994) *Microalgae: Biotechnology and Microbiology*, Cambridge Studies in Biotechnology 10, Cambridge: Cambridge University Press.
- [8] BEDNARZ, T. (1981) The effect of pesticides on the growth of green and blue-green algal cultures, Acta Hydrobiol., 23, 155.
- [9] BELAY, A. (1981) An experimental investigation of inhibition of phytoplankton photosynthesis at lake surfaces, New Phytol., 89, 67.
- [10] BELAY, A. (1993) Harvest-induced mechanical and physiological damage and recovery in *Spirulina*, in MASOJÍDEK, J. and SETLIK, I. (Eds) Book of Abstracts of the 6th International Conference on Applied Algology, Czech Republic, p. 48.
- [11] BELAY, A. and FOGG, G.E. (1978) Photoinhibition of photosynthesis in *Asterionella formosa* (Bacillariophyceae), J. Phycol., 14, 341.
- [12] BELAY, A. and OTA, Y. (1994) Temporal variations in the quality of *Spirulina* products from Earthrise Farms: a ten year study. Paper presented at Second Asia-Pacific Conference on Algal Biotechnology, Singapore, 25–27 April.

- [13] BELAY, A., OTA, Y., MIYAKAWA, K. and SHIMAMATSU, H. (1993) Current knowledge on potential health benefits of Spirulina, *J. Appl. Phycol.*, 5, 235.
- [14] BONNIN, G. (1992) B.E.C.C.M.A.'S Spirulina Production Engineering Handbook, B.E.C.C.M.A., Nantes, 56.
- [15] CIFFERI, O. (1983) Spirulina, the edible microorganism, *Microbiol. Rev.*, 47, 551.
- DANGEARD, P. (1940) Sur une algue bleue alimentaire pour l'homme: *Arthrospira platensis* (Nordst.) Gomont. *Actes Soc. Linn. Boreaux Extr. Procés-verbaux*, 91, 39.
- [16] EISENBERG, W.V. (1985) Sources of food contaminants, in GORHAM, J.R. (Ed.) *FDA Technical Bulletin*, Assoc. of Official Analytical Chemists in Cooperation with the FDA, Arlington, 15.