

MASTER INVESTIGACIÓN  
EN INGENIERÍA PARA EL  
DESARROLLO  
AGROFORESTAL

# TRABAJO FIN DE MASTER

Modelo de biomasa algal para la captura de dióxido de carbono  
y su desarrollo en un software de evaluación



---

**Universidad de Valladolid**

Jorge Miñón Martínez



<b>i. Índice</b>	
<b>ii. Índice de ecuaciones</b>	<b>ii</b>
<b>iii. Índice de figuras</b>	<b>ii</b>
<b>iv. Índice de tablas</b>	<b>iii</b>
<b>1. Resumen</b>	<b>1</b>
<b>2. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2.1. Materiales y métodos</b>	<b>2</b>
2.1.1. Lenguaje de programación informática	2
2.1.2. Calculo de la radiación solar potencial	3
<b>2.2. Antecedentes</b>	<b>4</b>
2.2.1. Evolución de concentración de las microalgas	4
2.2.2. Intensidad de la luz incidente	4
2.2.3. Productividad de las microalgas	5
2.2.4. Valor calorífico	6
2.2.5. Captura de CO <sub>2</sub> , emisión O <sub>2</sub>	7
<b>2.3. Procedimiento</b>	<b>8</b>
2.3.1. Modelos productivos	9
2.3.2. Balance de gases. Metabolismo del CO <sub>2</sub> y O <sub>2</sub>	11
2.3.3. Diseño de fotobiorreactores de cálculo	12
2.3.4. Variables resultantes de cálculo	13
<b>3. Resultados</b>	<b>14</b>
<b>3.1. Datos de partida</b>	<b>14</b>
3.1.1. Emisiones de CO <sub>2</sub> en Castilla y León	14
3.1.2. Características del fotobiorreactor	14
3.1.3. Especie de microalga	15
<b>3.2. Resultados del programa informático EvAlgae</b>	<b>15</b>
3.2.1. Evaluación de producción de biomasa total acumulada	15
3.2.2. Evaluación respecto a las estimaciones del balance gaseoso	16
<b>4. Conclusiones</b>	<b>17</b>
<b>v. Anejo. Índices productivos de las especies de microalgas</b>	<b>19</b>
<b>vi. Anejo. Tutorial de EvAlgae</b>	<b>21</b>
<b>vii. Abreviaturas</b>	<b>32</b>

## viii. Bibliografía .....33

## ii. Índice de ecuaciones

Expresión 1. Calculo de intensidad de luz incidente en el cultivo. Camacho et al., (1982).....	4
Expresión 2. Valor calorífico de compuestos y sus derivados a partir de fracción de compuestos y su valor calorífico superior. Williams & Laurens (2010).....	6
Expresión 3. Calculo de incremento de concentración por medio del valor calorífico.....	10
Expresión 4. Supuesto de relación fotosintética.....	11
Expresión 5. Estimación I de CO <sub>2</sub> . A partir del contenido de carbono expuesto por Chinnasamy et al., (2010).....	11
Expresión 6. Estimación II de CO <sub>2</sub> . A partir del contenido de carbono expuesto por Lardon et al., (2009).....	11
Expresión 7. Estimación III de CO <sub>2</sub> . A partir de la relación fotosintética expuesta por MacIntyre et al., (2002).....	11
Expresión 8. Estimación I de O <sub>2</sub> . A partir del contenido de carbono expuesto por Chinnasamy et al., (2010).....	11
Expresión 9. Estimación II de O <sub>2</sub> . A partir del contenido de carbono expuesto por Lardon et al., (2009).....	11
Expresión 10. Estimación III de O <sub>2</sub> . A partir de la relación fotosintética expuesta por MacIntyre et al., (2002).....	11

## iii. Índice de figuras

Figura 1. Código en LabVIEW. Estructura de eventos. Calculo de la radiación solar. ....	3
Figura 2. Curvas lumínicas de la fotosíntesis; energía lumínica consumo CO <sub>2</sub> . Extraído de Ziegler et al., (2002).....	5
Figura 3. Esquema de la estructura del modelo estimativo del potencial de las microalgas para la captura de emisiones de CO <sub>2</sub> en el ámbito geográfico.....	9
Figura 4. Crecimiento de <i>Chlorella</i> sp. Elaboración propia.....	10
Figura 5. Tipologías de fotobiorreactores. En canal o <i>raceway</i> (A), fotobiorreactor en "V" (B), fotobiorreactor tubular (C), fotobiorreactor de placas (D). ....	12
Figura 6. Interfaz de presentación del programa EvAlgae, para la estimación de la productividad de biomasa algal para la captura de fuentes de dióxido de carbono en el ámbito geográfico. ....	21
Figura 7. Ingreso de archivo .csv con datos de las fuentes emisoras a evaluar. ....	22
Figura 8. Interfaz completada correctamente. ....	22
Figura 9. Selección de periodo de cálculo.....	23
Figura 10. Definir fotobiorreactor por medio de las plantillas.....	24
Figura 11. Plantilla de la tipología de fotobiorreactor de placas. ....	24
Figura 12. Ingreso de parámetros estandarizados directamente. ....	25

Figura 13. Definir tipo de método para estimar la evolución de la concentración de microalgas en el medio de cultivo. ....	26
Figura 14. Método 1 por rendimientos, seleccionar la especie de la lista. ....	26
Figura 15. Calculo de valor calorífico. Método 2.....	27
Figura 16. Valor calorífico de trabajos científicos. ....	27
Figura 17. Selección de modelo estimativo del balance de gases: captura de CO <sub>2</sub> , emisión de O <sub>2</sub> . ....	28
Figura 18. Primero por medio de resultados discretos. ....	29
Figura 19. Los resultados se pueden visualizar en forma de gráficos. ....	29
Figura 20. Exportar resultados a un archivo .csv.....	30
Figura 21. Reinicio de EvAlgae.....	30
Figura 22. Cerrando EvAlgae. Por medio de clicar en, se cierra el programa informático. ....	31

#### iv. Índice de tablas

Tabla 1. Composición de <i>Chlorella vulgaris</i> extraído de Lixian (2011).....	6
Tabla 2. Valores caloríficos de <i>Chlorella vulgaris</i> y <i>Chlorella emersonii</i> extraídos de Illman et al., (2000) y Scragg et al., (2002) .....	6
Tabla 3. Relaciones fotosintéticas de C y O <sub>2</sub> . Varios autores.....	7
Tabla 4. Parámetros estandarizados de los fotobiorreactores .....	13
Tabla 5. Variables calculadas tomadas como resultados.....	13
Tabla 6. Fuentes emisoras de CO <sub>2</sub> en Castilla y León. PRTR-España. Datos 2010. Ámbito de Castilla y León. Actividades: 1.b. 1.c. ....	14
Tabla 7. Características del fotobiorreactor en canal empleado para el cálculo .....	15
Tabla 8. Resultados de producción de biomasa Método 1 y Método 2 y variación.....	15
Tabla 9. Resultados de superficie de producción necesaria en cada fuente y variación respecto al Método 1.....	16
Tabla 10. Resultados de calculo de superficie necesaria por medio de las tres estimaciones del balance. Variación respecto Estimación 1 .....	16



## 1. Resumen

El cultivo de microalgas como cultivo de segunda generación y como sumidero de gases de efecto invernadero es indiscutible. En cuanto a la hora de evaluar estas potencialidades es necesario establecer una serie de modelos productivos de biomasa algal y en el balance de gases. Modelos que deberán tener en cuenta los condicionantes de la especie, tipo de fotobiorreactor y localización de la instalación. Todo ello en este trabajo se ha evaluado y se ha programado en una herramienta informática denominada EvAlgae, a fin de que constituya una herramienta eficaz en la toma de decisión dentro del sector de la producción de biomasa algal.

## 2. Introducción

La Agencia Europea de Medio Ambiente, en su informe EEA (2009) señala a las industrias energéticas y del transporte terrestre, marino y aéreo como principales emisoras de gases de efecto invernadero (GEI). Estas actividades se encuentran localizadas generalmente en urbes y zonas industriales. Zonas que presentan una concentración de GEI superior a la normal. Derivando con ello que los habitantes de estos lugares presenten un índice de problemas de salud mayor a la normal, relación que ha sido demostrada por distintos investigadores (García-Ubaque *et al.*, 2011), (Bell *et al.*, 2005) o (Bloss, 2011).

Por otro lado según previsiones de Naciones Unidas (IPCC, 2007) estas emisiones de GEI derivaran en un aumento de la temperatura media de la superficie terrestre de 1,4°C a 5,8°C para el 2100. Unido a este cambio climático, la FAO (2009a) prevé que este traerá alteraciones en el rendimiento de los cultivos. Esto junto con la especulación en el mercado de materias primas, ocasionará situaciones como las vividas en el 2007, que hicieron aumentar el precio de los alimentos básicos y con ello la pobreza y las desigualdades sociales, según datos de la FAO (2009b).

Según el mismo informe de la FAO (2009b), este aumento del precio productos alimenticios básicos fue causa de varios factores: el cambio del valor de las divisas que tuvo lugar ese año, sumado a la especulación excesiva en los mercados de opciones y futuros, sumado a unas políticas agrícolas favorecedoras de cultivos agroenergéticos.

Desde aquel año a nivel mundial se viene desarrollo el Proyecto sobre Bioenergía y criterios e indicadores para la Seguridad Alimentaria (BEFSCI), bajo el amparo de las Naciones Unidas. Este busca mecanismos de control para que no se vuelva a producir lo que aconteció en el 2007, proponiendo nuevos cultivos energéticos compatibles con la alimentación. En un reciente informe (BEFSCI, 2012) se presentan a las microalgas como un cultivo que cumple este requisito, además de reseñar investigaciones y desarrollos tales como los de los investigadores de Arizona State University, que han desarrollado un sistema para producir microalgas a partir de los efluentes contaminantes.

Entre otros autores Stoate *et al.*, (2009) señala como uno de los impactos ecológicos del siglo veintiuno en Europa, la contaminación d el medio acuático y edáfico. Derivado de malas praxis en algunas actividades agro-ganaderas o industriales, como son la realización de vertidos o de enmiendas sobredimensionadas de residuos ganaderos, de digestatos y/o en general residuos con un alto contenido en formas nítricas y fosfóricas. También entre otros autores Aslan & Kapdan (2006) muestran el potencial de las microalgas para depurar estos efluentes.

Las algas son organismos que están presentes desde los comienzos del origen de la vida y se han adaptado a multitud de atmósferas, presentado actualmente una excelente respuesta en su crecimiento en atmósferas con un contenido en oxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), oxidos azufre (SO<sub>x</sub>), sulfuro de hidrogeno (H<sub>2</sub>S) y metano (CH<sub>4</sub>) (Mandeno *et al.*, 2005), (Michiki, 1995), (Chae *et al.*, 2006), (Olaizola, 2003), (Doucha *et al.*, 2005), (Maeda *et al.*, 1995) y (Travieso *et al.*, 1993).

Son las algas las especies vegetales que mayor tasa fotosintética presentan: entre un 10-50% más (Wang *et al.*, 2008). Con esta fotosíntesis se consigue metabolizar el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y emitir oxígeno ( $\text{O}_2$ ), constituyendo un sumidero de carbono: económico, con mínimo impacto en el medio ambiente y además produciendo una biomasa con múltiples aprovechamientos: desde el sector de los biocarburantes, alimentación animal, la industria de síntesis o la producción de fertilizantes.

Además esta biomasa constituye una enmienda orgánica para suelos que tienen un escaso contenido en materia orgánica; menor del 2%, suelos con potencial riesgo de erosión y en resumen de desertificación (MARM, 2008).

Para el cultivo de estas microalgas, y por lo tanto para la producción de biomasa algal se precisan fotobiorreactores que aseguren unas condiciones óptimas de crecimiento (Lee, 1995).

Existen muchos diseños de fotobiorreactores: en "V", raceway, tubulares, etc, diseños que tratan de maximizar la superficie iluminada para con ello maximizar la producción por metro cuadrado ocupado de suelo (Chinnasamy *et al.*, 2010).

Por todo lo anterior es necesario evaluar el potencial de las algas como sumideros de carbono y como herramienta de lucha contra el cambio climático. Esta evaluación responde a varios factores como especie de microalgas, tipología de fotobiorreactor, naturaleza de la fuente emisora de  $\text{CO}_2$  y localización de la instalación de fotobiorreactores. Evaluar estos factores es muy difícil ya que la experimentación previa y posterior de validación de los resultados debe ser ejecutada para cada combinación posible de estos factores.

Williams & Laurens (2010) presentaron una relación a partir del valor calorífico de las algas y de la radiación solar para estimar la productividad las microalgas. Por otro lado otros autores establecen una relación fotosintética entre la radiación y el metabolismo del carbono y/o del oxígeno como Platt & Irwin (1973), Sakshaug *et al.*, (1997), MacIntyre *et al.*, (2002), Behrenfeld *et al.*, (2004).

Ambas relaciones permiten elaborar un modelo estimativo de la producción de biomasa y captura/emisión de  $\text{CO}_2/\text{O}_2$ , en función de la variable radiación.

En este sentido Quinn *et al.*, (2011) plantea un modelo como herramienta para estudiar la viabilidad de proyectos de producción de microalgas, para una zona concreta de Estados Unidos. También Zhang *et al.*, (2012) genera un modelo para estimar el potencial productivo del uso de las microalgas en suelos marginales y como sistema de amortiguación a las emisiones de  $\text{CO}_2$  provenientes de la combustión del carbón, modelo que no tiene en cuenta los condicionantes del fotobiorreactor ni de la especie de microalga

Por ello el objetivo de este trabajo es generar un modelo que sea lo más dinámico posible en cuanto a localización geográfica, diseño del fotobiorreactor y especie de microalgas. Además este deberá constituirse en un programa informático a fin de ser una herramienta útil en la toma de decisiones de localización de proyectos de cultivo de microalgas y/o captura de  $\text{CO}_2$ .

En este trabajo se explica el software programado con distintos modelos de producción y de balance gaseoso, a fin de posteriormente presentar y discutir los resultados obtenidos con las distintas variantes en los modelos para las fuentes emisoras de  $\text{CO}_2$  de Castilla y León. El nombre dado al programa informático es EvAlgae.

## 2.1. Materiales y métodos

### 2.1.1. Lenguaje de programación informática

Para el desarrollo de el software se ha utilizado es LabVIEW de *National Instruments* que se define como una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas, con un lenguaje de programación visual gráfico, también llamado lenguaje G.



La estructura empleada como se puede ver (Figura 1), consta de una secuencia iniciadora que contiene las variables y donde se inicializan las mismas y los valores por defecto, seguido de una secuencia ejecutora que contiene un bucle de estructura de eventos que responde a cada acción que el usuario solicita en el interfaz, ejecutando en cada paso los algoritmos que contienen los modelos. Por ultimo consta de una secuencia finalizadora que acaba con la aplicación.

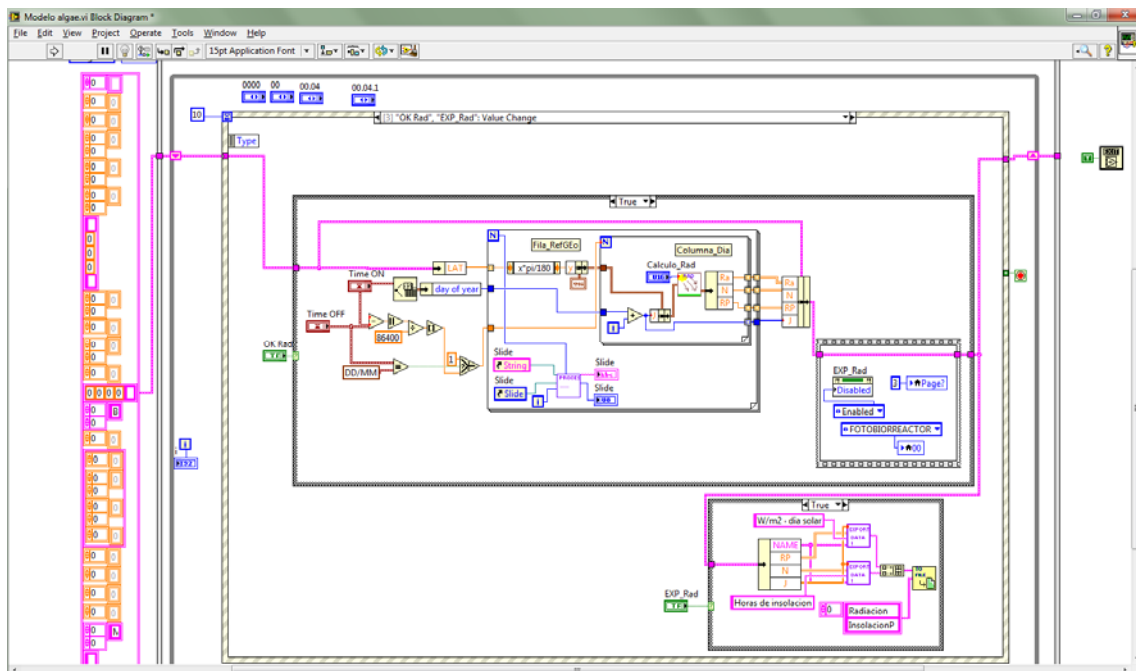


Figura 1. Código en LabVIEW. Estructura de eventos. Calculo de la radiación solar.

En el interfaz de usuario se han dispuesto los distintos apartados a cumplimentar en forma de pestañas. También se han generado una serie de algoritmos de control de cumplimentación correcta de los parámetros de configuración de forma que si no se configuran de forma adecuada dentro de los rangos y especificaciones indicadas, aparecen alertas y se deshabilitan los controles que posibilitan el avance en el software. Una vez cumplimentado una pestaña de forma correcta, se ha dispuesto un protocolo consistente en que el usuario debe clicar un control de “OK”, a fin de que se inicie el cálculo correspondiente, mostrándose su evolución en una barra de estado. Al finalizar estos cálculos automáticamente el software lleva al usuario al apartado siguiente.

### 2.1.2. Calculo de la radiación solar potencial

Para el cálculo de la radiación solar incidente en el fotobiorreactor se han tenido en cuenta las expresiones que se recogen en el manual FAO (2006). Ya que como no se cuenta con mediciones directas de radiación solar, ésta puede ser calculada a través de la aplicación de la fórmula de Angstrom que relaciona la radiación solar con la radiación extraterrestre y la duración relativa de la insolación. Insolación que hace referencia a la duración máxima, que también es calculada con las formulas recogidas en FAO (2006). De esta forma no estamos considerando la nubosidad en el cálculo. Es decir con este conjunto de expresiones se calcula de la radiación solar potencial en función de la longitud, latitud y día del año, sirviendo de algoritmo para poder aplicarlo en un punto geográfico concreto con ámbito mundial.

## 2.2. Antecedentes

### 2.2.1. Evolución de concentración de las microalgas

Si los factores que afectan a la productividad de las microalgas tales como nivel de nutrientes, temperatura del medio de cultivo, pH, etc., entre otros, no permanecen limitantes, se desencadena un aumento de la concentración de las microalgas en el medio de cultivo. Este aumento de la concentración afecta de forma directa al valor de la intensidad que penetra en el medio de cultivo hasta las células de las microalgas.

Para Camacho *et al.*, (1982), Sada *et al.*, (1988), Ogbonna *et al.*, (1995) y Martínez *et al.*, (1996), entre otros, establecen al factor de turbidez, de sombreo o el coeficiente de extinción, como el principal factor en la evolución de la concentración de las microalgas. Otros autores como Chinnasamy *et al.*, (2010), en vez de hablar de turbidez del medio de cultivo, hablan directamente de profundidad del fotobiorreactor.

Camacho *et al.*, (1982) desarrolló una ecuación (Expresión 1) para relacionar la intensidad de luz incidente en el fotobiorreactor ( $I_0$ ) [lux], con la intensidad de luz incidente dentro del medio de cultivo ( $I$ ) [lux], en función de la concentración de biomasa ( $C_b$ ), [g/L] y la profundidad del fotobiorreactor o recorrido de la luz hasta las células de las microalgas ( $L$ ), [cm]. En su trabajo demostró como el coeficiente de extinción ( $K_a$ ), [g/L·cm] es independiente de la intensidad de luz. Estableciendo como principal hipótesis de partida es que el medio de cultivo sea una mezcla homogénea.

$$I = \frac{I_0}{K_a \cdot L \cdot C_b} \cdot (1 - e^{-K_a \cdot L \cdot C_b})$$

Expresión 1. Cálculo de intensidad de luz incidente en el cultivo. Camacho *et al.*, (1982)

### 2.2.2. Intensidad de la luz incidente

Como enuncia Ziegler *et al.*, (2002), con una pequeña intensidad de radiación, la intensidad de la fotosíntesis es proporcional a la de la misma, si los otros factores que afectan al crecimiento no son limitantes. Por ello las curvas que relacionan la intensidad de la fotosíntesis aparente con la de la luz (curvas lumínicas de la fotosíntesis), se van aplanando, (Figura 2), hasta que finalmente la intensidad de la fotosíntesis no es afectada por un aumento de la luz; saturación lumínica o fotosaturación. Llegando las células fotosintéticas a sufrir daños si esta intensidad es incrementada.

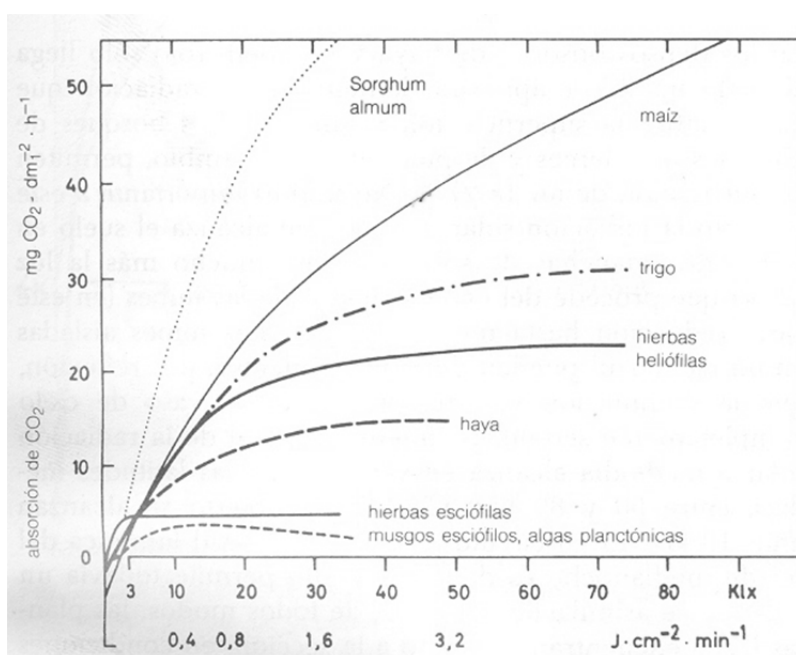


Figura 2. Curvas lumínicas de la fotosíntesis; energía lumínica consumo CO<sub>2</sub>. Extraído de Ziegler et al., (2002)

### INTENSIDAD DE SATURACIÓN

Benemann (1997) afirma que la producción de microalgas se ve inhibida a altas intensidades de luz. Talbot *et al.*, (1991) en su trabajo demuestra como distintas especies responden de forma diferente a la variación de la intensidad lumínica frente a una temperatura de cultivo constante. También demuestra que altas intensidades producen inhibición de la velocidad específica de crecimiento. Define como intensidad óptima 200  $\mu\text{mol fotón}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ , por encima de la cual se produce un descenso de la velocidad de crecimiento, rápida o lenta, según especie.

Los valores de fotosaturación para las especies de microalgas no son muy concisos, rondan 370 a 277  $\mu\text{mol fotón}/\text{m}^2\cdot\text{s}$  según Ziegler *et al.*, (2002) y para *Euglena gracilis*, según Chae *et al.* (2006) ronda 178,7  $\mu\text{mol fotón}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ . Chojnacka & Noworyta (2004) para *Spirulina sp.*, concluyó que a 228,5  $\mu\text{mol fotón}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ , se produce la fotosaturación. Otros como Mann & Myers (1968) cuantifican la intensidad de saturación de *Phaeodactylum tricornutum* y *Porphyridium cruentum* en 185  $\mu\text{mol fotón}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ . También Molina Grima *et al.*, (2000) presentan el valor de 200  $\mu\text{mol fotón}/\text{m}^2\cdot\text{s}$  como intensidad de fotosaturación. Estos valores hacen referencia a la intensidad incidente en la célula fotosintética.

En comparación con estos valores, la intensidad lumínica en las regiones próximas al ecuador, al mediodía rondan valores 2000  $\mu\text{mol fotón}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ .

### INTENSIDAD DE COMPENSACIÓN

Como en todo vegetal existe una intensidad por debajo de la cual la fotosíntesis no se realiza. Este punto se llama punto de compensación lumínica; consiste en que la producción de O<sub>2</sub> o CO<sub>2</sub> compensa exactamente la toma de CO<sub>2</sub> o O<sub>2</sub>, en este orden, es decir la respiración es compensada por la fotosíntesis o viceversa (Ziegler *et al.*, 2002). En el caso de las microalgas, en el caso concreto de *Chlorella sp.* Esta se sitúa en 0,66 mol fotón/d · m<sup>2</sup> según enuncia Ogonna *et al.*, (1995).

### 2.2.3. Productividad de las microalgas

Existe numerosa bibliografía en cuanto a productividad diaria en materia seca sobre distintas especies de microalgas (Mata *et al.*, 2009) (Rodolfi *et al.*, 2009), (Yoo *et al.*, 2010), (Illman *et al.*,

2000), (Cheng *et al.*, 2009), (Xiong *et al.*, 2008), (Xu *et al.*, 2006), (Gouveia & Oliveira, 2009). , valores que son recogidos en el Anejo v.

#### 2.2.4. Valor calorífico

Las microalgas capturan según Williams & Laurens (2010) el 55% de la radiación incidente en la microalgas, frente al 20-24%, que toman según Benemann (1997).

Benemann (1997) explica que la cantidad de energía luminosa que es transformada a biomasa, constituye luego el valor calorífico. Parámetro utilizado para relacionar la energía incidente y la fotosintetizada y así clasificar a las distintas especies en función de su productividad.

En la bibliografía existen diferentes valores caloríficos evaluados a nivel fracción de biomasa de microalgas o a nivel de compuestos formadores. Estos valores no tienen en cuenta las pérdidas biológicas, de respiración ni de las excreciones (Williams & Laurens, 2010).

Para estimar el valor calorífico de las especies se puede recurrir a la Expresión 2 que recoge Williams & Laurens (2010). Donde las variables C, H, O, N, S, son las fracciones en peso de la microalgas de los compuestos de carbono, hidrogeno, oxígeno, nitrógeno y azufre.

$$\frac{\text{KJ}}{\text{g}} = 35,17 \cdot \text{C} + 116,25 \cdot \text{H} + 11,00 \cdot \text{O} + 6,28 \cdot \text{N} + 10,47 \cdot \text{S}$$

**Expresión 2.** Valor calorífico de compuestos y sus derivados a partir de fracción de compuestos y su valor calorífico superior. Williams & Laurens (2010)

Estas fracciones las recoge Lixian (2011) para el caso de *Chlorella vulgaris*, que se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Composición de *Chlorella vulgaris* extraído de Lixian (2011)

Componentes	Medio cultivo Watanabe	Medio cultivo bajo en nitrógeno
C	45,80%	53,80%
H	5,60%	7,72%
O	38,70%	37,00%
N	4,60%	1,10%
P	0,99%	0,24%

En cambio otros como Illman *et al.*, (2000) o Scragg *et al.*, (2002) en su trabajo presentan distintos valores caloríficos en función del contenido en nitrógeno del medio y de la especie (Tabla 2).

**Tabla 2.** Valores caloríficos de *Chlorella vulgaris* y *Chlorella emersonii* extraídos de Illman *et al.*, (2000) y Scragg *et al.*, (2002)

Especie microalga. Medio cultivo	Valor calorífico	Referencia
<i>Chlorella vulgaris</i> . Medio cultivo Watanabe	18	Illman <i>et al.</i> , (2000)
<i>Chlorella vulgaris</i> . Bajo nitrógeno	23	Illman <i>et al.</i> , (2000)
<i>Chlorella</i> . Emersonii. Medio cultivo Watanabe	21	Illman <i>et al.</i> , (2000)
<i>Chlorella</i> . Emersonii. Bajo nitrógeno	29	Illman <i>et al.</i> , (2000)
<i>Chlorella protothecoides</i> . Medio cultivo Watanabe	19	Illman <i>et al.</i> , (2000)
<i>Chlorella protothecoides</i> . Bajo nitrógeno	24	Illman <i>et al.</i> , (2000)

Especie microalga. Medio cultivo	Valor calorífico	Referencia
Chlorella sorokiniana. Medio cultivo Watanabe	21	Illman <i>et al.</i> , (2000)
Chlorella sorokiniana. Bajo nitrógeno	20	Illman <i>et al.</i> , (2000)
Chlorella minutissima. Medio cultivo Watanabe	21	Illman <i>et al.</i> , (2000)
Chlorella minutissima. Bajo nitrógeno	21	Illman <i>et al.</i> , (2000)
Chlorella vulgaris. Medio de cultivo Watanabe	21	Scragg <i>et al.</i> , (2002)
Chlorella vulgaris. Medio de cultivo bajo en nitrógeno	28	Scragg <i>et al.</i> , (2002)
Chlorella emersonii. Medio de cultivo Watanabe	21	Scragg <i>et al.</i> , (2002)
Chlorella emersonii. Medio de cultivo bajo en nitrógeno	24	Scragg <i>et al.</i> , (2002)

En el caso del crecimiento de microalgas en un medio de cultivo con alta presencia de fuentes nitrogenadas ocasiona una pérdida en el contenido de lípidos. Además esto está relacionado con el rendimiento calorífico de las especies, mostrándose valores caloríficos superiores en medios pobres en fuentes nitrogenadas (Illman *et al.*, 2000), (Scragg *et al.*, 2002) y (Williams & Laurens, 2010). Esto repercute en la capacidad fotosintética de las especies, ya que cuanto mayor valor calorífico, mayor es la capacidad fotosintética.

Por lo anterior y conociendo los valores caloríficos de cada especie de forma directa o por medio de la Expresión 2, se puede estimar la evolución de la concentración de microalgas en el medio relacionándolo con la radiación incidente en las mismas.

### 2.2.5. Captura de CO<sub>2</sub>, emisión O<sub>2</sub>

#### RELACIONES FOTOSINTÉTICAS Y VALORES ENERGÉTICOS

Para estimar el consumo de CO<sub>2</sub> por las microalgas, es necesario establecer una relación fotosintética entre la radiación y el metabolismo del carbono y del oxígeno. Packer *et al.* (2010) para su modelo de crecimiento y producción de lípidos de origen de microalgas, utiliza los valores de MacIntyre *et al.*, (2002), que muestran una relación entre la energía lumínica consumida y el carbono y oxígeno metabolizado. Estas son las que se recogen en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Tabla 3. Relaciones fotosintéticas de C y O<sub>2</sub>. Varios autores.

Metabolismo fotosíntesis	Relación fotosintética	Referencia
Carbono	0,001 – 0,10 mol C/mol fotón/m <sup>2</sup> ·s	MacIntyre <i>et al.</i> , (2002)
	1 g C / 47,7 KJ	Platt & Irwin (1973)
Oxígeno	0,077 – 0,12 mol O <sub>2</sub> /mol fotón/m <sup>2</sup> ·s	Sakshaug <i>et al.</i> , (1997)
		MacIntyre <i>et al.</i> , (2002)
		Behrenfeld <i>et al.</i> , (2004)

#### CANTIDAD DE CARBONO

Para hacer las estimaciones de consumo de CO<sub>2</sub> es preciso cuantificar la cantidad de carbono que tiene en su estructura. Para ello Lardon *et al.*, (2009) estimaron 367 g/Kg ms. La bibliografía

es diversa, por ello también Chinnasamy *et al.* (2010) en su estudio cuantificaron este valor en un 49,80% sobre materia seca partiendo de *Chlamydomonas globosa*, *Chlorella minutissima* y *Scenedesmus bijuga*. Valores ambos bastante próximos.

Así mismo debido a la bibliografía consultada se estima que el consumo de CO<sub>2</sub> supone un 80% de la cantidad inyectada (Travieso *et al.*, 1993), (Mandeno *et al.*, 2005). Esta relación carece de unidad de tiempo, por lo que debemos solo tomarlo como referencia.

### 2.3. Procedimiento

En la Figura 3 se muestra un esquema del protocolo de cálculo empleado para estimar el modelo productivo y el balance gaseoso con sus sendas variantes y la interconexión entre ambas estimaciones. El fin primero de estos cálculos es estimar la superficie necesaria para capturar las emisiones de CO<sub>2</sub> que se evalúan. Superficie que posteriormente resulta en otras variables resultantes como veremos.

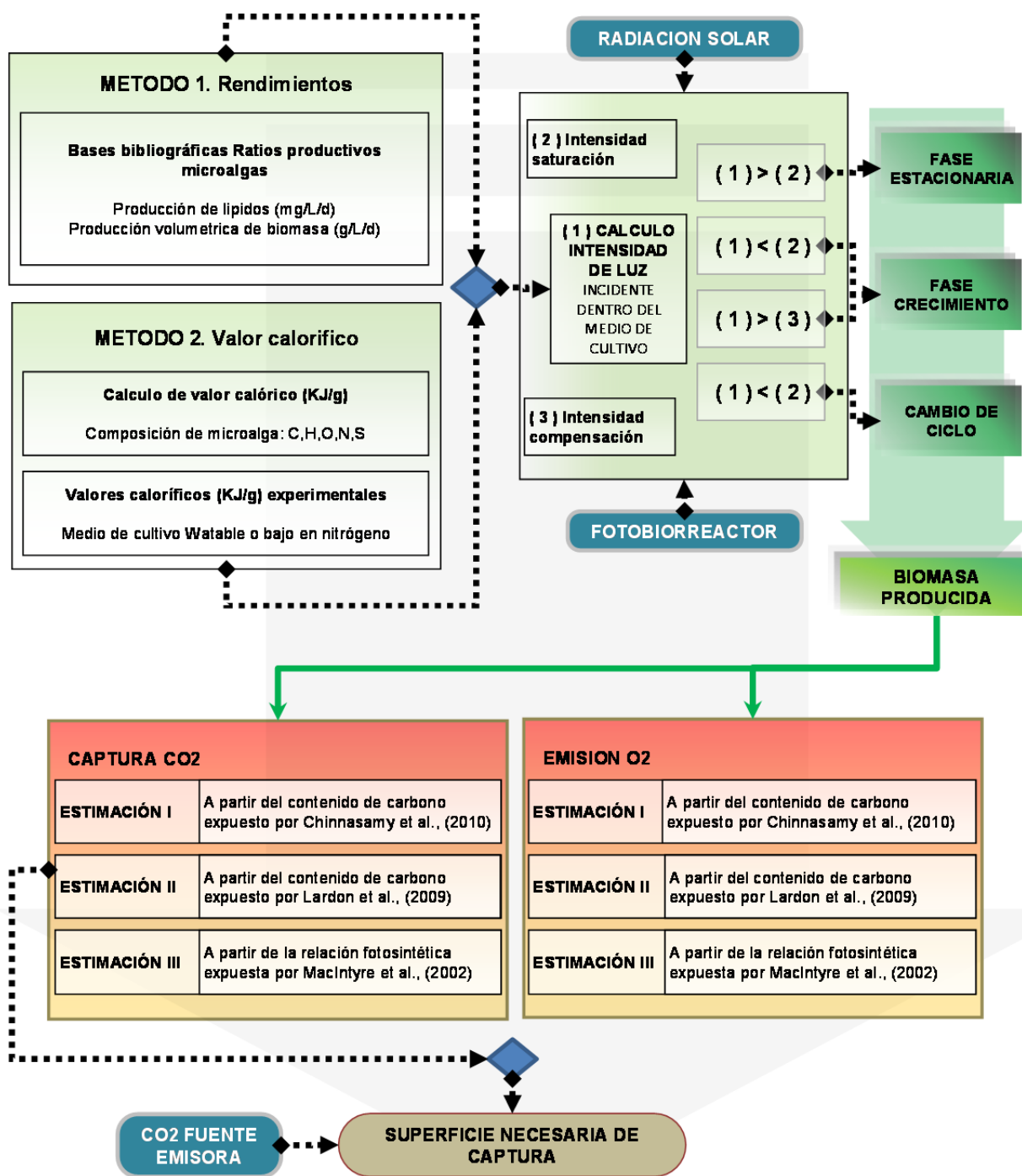


Figura 3. Esquema de la estructura del modelo estimativo del potencial de las microalgas para la captura de emisiones de CO2 en el ámbito geográfico

### 2.3.1. Modelos productivos

#### METODO 1. ESTIMACIÓN POR RENDIMIENTOS

Para determinar la evolución de la concentración en el medio de cultivo, se hace uso de la Expresión 1, por la que el modelo de crecimiento de microalgas está ligado a las horas de insolación y a la radiación solar. De ahí que este sea un modelo dinámico, variable con el día del año y la localización geográfica, por medio de las expresiones de la FAO (2006).

Esta intensidad lumínica media es evaluada para ver si se encuentra por encima de la intensidad de compensación y por debajo de la fotosaturación. En caso afirmativo se incrementa a la concentración actual el valor correspondiente de productividad diaria de la especie de microalgas en cuestión (Anejo v). En caso negativo la concentración permanece igual, siendo en el caso que el valor de la intensidad efectiva ( $I$ ) sea menor a la intensidad de compensación, se cambia de ciclo productivo y por lo tanto el algoritmo establece para el siguiente día la concentración de inoculación como concentración de cálculo de intensidad efectiva.

Este cambio de ciclo productivo responde a lo mostrado en la Figura 4, donde se muestra que para esa concentración en el medio de cultivo se obtiene una intensidad efectiva que está por debajo de la intensidad de compensación, lo que va a ocasionar que no se siga incrementando la concentración, derivando en una pérdida de productividad del sistema. Por ello hay que cambiar de ciclo productivo con la correspondiente recolección de la biomasa suspendida en el medio de cultivo.

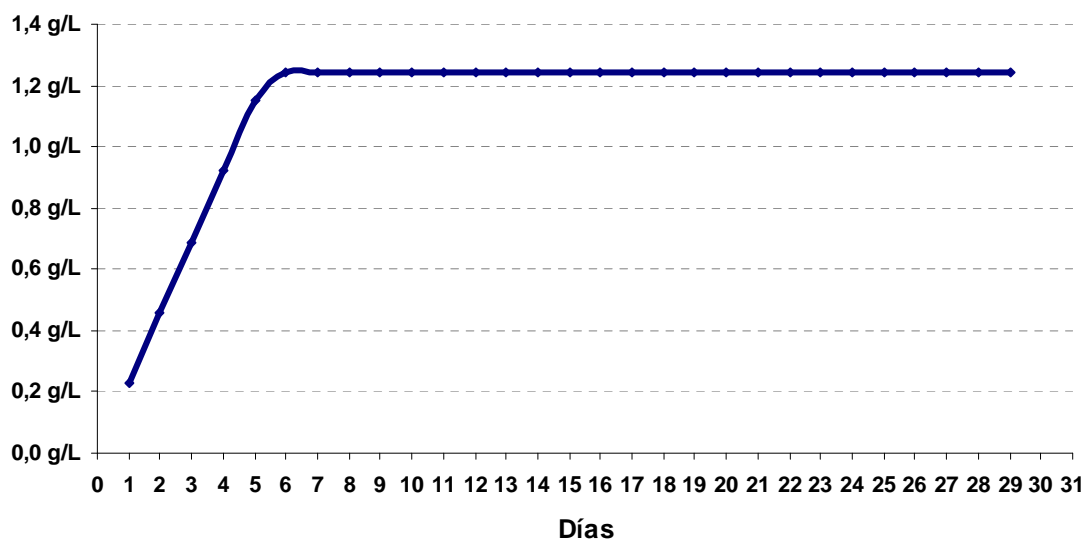


Figura 4. Crecimiento de *Chlorella* sp. Elaboración propia.

## METODO 2. ESTIMACION POR VALOR CALORIFICO

Haciendo uso de la Expresión 2 para calcular el valor de una especie de microalga a partir de los compuestos que la componen o de los valores recogidos en la Tabla 2 referentes a valores caloríficos, se puede estimar cual es la evolución diaria de la concentración para la especie en cuestión.

Para ello con la Expresión 3 obtenemos el incremento en la concentración de microalgas en el medio de cultivo ( $C_{VC}$ ), donde  $R_n$  es la radiación solar acumulada en un día [ $KJ/m^2 \cdot día$ ],  $S_b$ , es la superficie iluminada de fotobiorreactor por metro cuadrado de suelo ocupado [ $m^2/m^2$ ] y  $V_b$  es el volumen de medio de cultivo que tiene el fotobiorreactor por metro cuadrado de suelo ocupado [ $m^3/m^2$ ].

$$C_{VC} = \frac{R_n \cdot S_b}{VC \cdot V_b \cdot 1000}$$

**Expresión 3.** Cálculo de incremento de concentración por medio del valor calorífico

Previo al cálculo de la Expresión 3 se comprueba si la intensidad media lumínica se encuentra entre la intensidad de compensación y de saturación (Expresión 1). En caso afirmativo el valor obtenido de la Expresión 3 es sumado a la concentración del día anterior, obteniendo la concentración en el medio de cultivo. En caso negativo se inicia un nuevo ciclo de cultivo a razón de la explicada con el uso de la Figura 4.



### 2.3.2. Balance de gases. Metabolismo del CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>

Partir de los datos reportados en el apartado 2.3.1 se pueden establecer tres formas de estimación del CO<sub>2</sub> consumido cada día, para una concentración de biomasa dada estimada según descrito en el apartado 2.2.5. En el establecimiento de las relaciones, se supone que el metabolismo las reacciones ocurren mol a mol como en la Expresión 4.



**Expresión 4.** Supuesto de relación fotosintética

A continuación se presentan las tres formas de cálculo (Expresión 5), (Expresión 6) y (Expresión 7), donde  $\rho_{CO_2}$  es la densidad del CO<sub>2</sub> en condiciones normales [Kg/m<sup>3</sup>],  $\rho_{O_2}$  es la densidad del O<sub>2</sub> en condiciones normales [Kg/m<sup>3</sup>],  $P_{m\ CO_2}$  es el peso molecular de una molécula de CO<sub>2</sub> [g/mol],  $P_{m\ C}$  es el peso molecular del carbono [g/mol],  $\varepsilon$  es la relación fotosintética definida para la captura de CO<sub>2</sub> o la emisión de O<sub>2</sub> (Tabla 3),  $I_n$  es la intensidad de luz solar media incidente en las células de las microalgas [μmol/fotón],  $h_i$  son las horas de insolación diaria,  $V_b$  es el volumen de medio de cultivo contenido en un metro cuadrado de suelo que ocupa el fotobiorreactor [m<sup>3</sup>],  $S_b$  es la superficie iluminada en un fotobiorreactor que ocupa un metro cuadrado de suelo [m<sup>2</sup>].

**Expresión 5.** Estimación I de CO<sub>2</sub>. A partir del contenido de carbono expuesto por Chinnasamy *et al.*, (2010)

$$\frac{g\ biomasa}{L} \cdot \frac{0,49\ g\ C}{1\ g\ biomasa} \cdot \frac{1\ mol\ C}{P_{m\ C}\ g} \cdot \frac{1\ mol\ CO_2}{1\ mol\ C} \cdot \frac{P_{m\ CO_2}\ g}{1\ mol\ CO_2} \cdot \frac{1\ Kg}{1000\ g} \cdot \frac{1\ m^3\ CO_2}{\rho_{CO_2}\ Kg} = \left[ \frac{m^3\ CO_2}{L} \right]$$

**Expresión 6.** Estimación II de CO<sub>2</sub>. A partir del contenido de carbono expuesto por Lardon *et al.*, (2009)

$$\frac{g\ biomasa}{L} \cdot \frac{0,367\ g\ C}{1\ g\ biomasa} \cdot \frac{1\ mol\ C}{P_{m\ C}\ g} \cdot \frac{1\ mol\ CO_2}{1\ mol\ C} \cdot \frac{P_{m\ CO_2}\ g}{1\ mol\ CO_2} \cdot \frac{1\ Kg}{1000\ g} \cdot \frac{1\ m^3\ CO_2}{\rho_{CO_2}\ Kg} = \left[ \frac{m^3\ CO_2}{L} \right]$$

**Expresión 7.** Estimación III de CO<sub>2</sub>. A partir de la relación fotosintética expuesta por MacIntyre *et al.*, (2002)

$$\frac{I_n\ \mu\text{mol}\ \text{foton}}{m^2 \cdot s} \cdot \frac{1\ mol\ \text{foton}}{10^6\ mol\ \text{foton}} \cdot \frac{\varepsilon\ mol\ C}{1\ mol\ \text{foton}} \cdot \frac{1\ mol\ CO_2}{1\ mol\ C} \cdot \frac{P_{m\ CO_2}\ g}{1\ mol\ CO_2} \cdot \frac{1\ Kg\ CO_2}{1000\ g\ CO_2} \cdot \frac{1\ m^3\ CO_2}{\rho_{CO_2}\ Kg} \cdot \frac{S_b\ m^2}{V_b\ m^3} \cdot \frac{1\ m^3}{1000\ L} \cdot \frac{3600 \cdot h_i}{1\ d} = \left[ \frac{m^3\ CO_2}{L} \right]$$

Al igual que en la estimación del CO<sub>2</sub> consumido, se establecen las mismas tres estimaciones, pero variando los valores de las variables (Expresión 8, Expresión 9 y Expresión 10).

**Expresión 8.** Estimación I de O<sub>2</sub>. A partir del contenido de carbono expuesto por Chinnasamy *et al.*, (2010)

$$\frac{g\ biomasa}{L} \cdot \frac{0,49\ g\ C}{1\ g\ biomasa} \cdot \frac{1\ mol\ C}{P_{m\ C}\ g} \cdot \frac{1\ mol\ O_2}{1\ mol\ C} \cdot \frac{P_{m\ O_2}\ g}{1\ mol\ O_2} \cdot \frac{1\ Kg}{1000\ g} \cdot \frac{1\ m^3\ O_2}{\rho_{O_2}\ Kg} = \left[ \frac{m^3\ O_2}{L} \right]$$

**Expresión 9.** Estimación II de O<sub>2</sub>. A partir del contenido de carbono expuesto por Lardon *et al.*, (2009)

$$\frac{g\ biomasa}{L} \cdot \frac{0,367\ g\ C}{1\ g\ biomasa} \cdot \frac{1\ mol\ C}{P_{m\ C}\ g} \cdot \frac{1\ mol\ O_2}{1\ mol\ C} \cdot \frac{P_{m\ O_2}\ g}{1\ mol\ O_2} \cdot \frac{1\ Kg}{1000\ g} \cdot \frac{1\ m^3\ O_2}{\rho_{O_2}\ Kg} = \left[ \frac{m^3\ O_2}{L} \right]$$

**Expresión 10.** Estimación III de O<sub>2</sub>. A partir de la relación fotosintética expuesta por MacIntyre *et al.*, (2002)

$$\frac{I_n\ \mu\text{mol}\ \text{foton}}{m^2 \cdot s} \cdot \frac{1\ mol\ \text{foton}}{10^6\ mol\ \text{foton}} \cdot \frac{\varepsilon\ mol\ O_2}{1\ mol\ \text{foton}} \cdot \frac{P_{m\ O_2}\ g}{1\ mol\ O_2} \cdot \frac{1\ Kg\ O_2}{1000\ g\ O_2} \cdot \frac{1\ m^3\ O_2}{\rho_{O_2}\ Kg} \cdot \frac{S_b\ m^2}{V_b\ m^3} \cdot \frac{1\ m^3}{1000\ L} \cdot \frac{3600 \cdot h_i}{1\ d} = \left[ \frac{m^3\ O_2}{L} \right]$$

### CONSIDERACIONES RESPECTO A LA SOLUBILIDAD DEL CO<sub>2</sub>

Conociendo la solubilidad del CO<sub>2</sub> a 30 °C, cabe preguntarse si el volumen diario de gas carbónico que se va inyectar, va a ser admitido en el medio de cultivo. Quizás la concentración de CO<sub>2</sub> y el

valor de la solubilidad (~1,35 g CO<sub>2</sub>/L), están muy próximos pero hay que tener en cuenta que la unidad del tiempo con la que se trabaja que es un día. Día en el que la inyección se supone que será optimizada a fin de saturar la actividad fotosintética de las microalgas.

**2.3.3. Diseño de fotobiorreactores de cálculo**

Para desarrollar los cálculos anteriores y determinar el potencial productivo del sistema de producción de microalgas se hace necesario definir el tipo de fotobiorreactor con dimensiones y características. Por ello se han partido de una serie de plantillas de las tipologías de: canal o *raceway*, fotobiorreactor tubular, fotobiorreactor de placas y fotobiorreactor en “V” a fin de automatizar los cálculos. También se ha dispuesto de un método directo de ingreso de los parámetros que se definen en la Tabla 4.

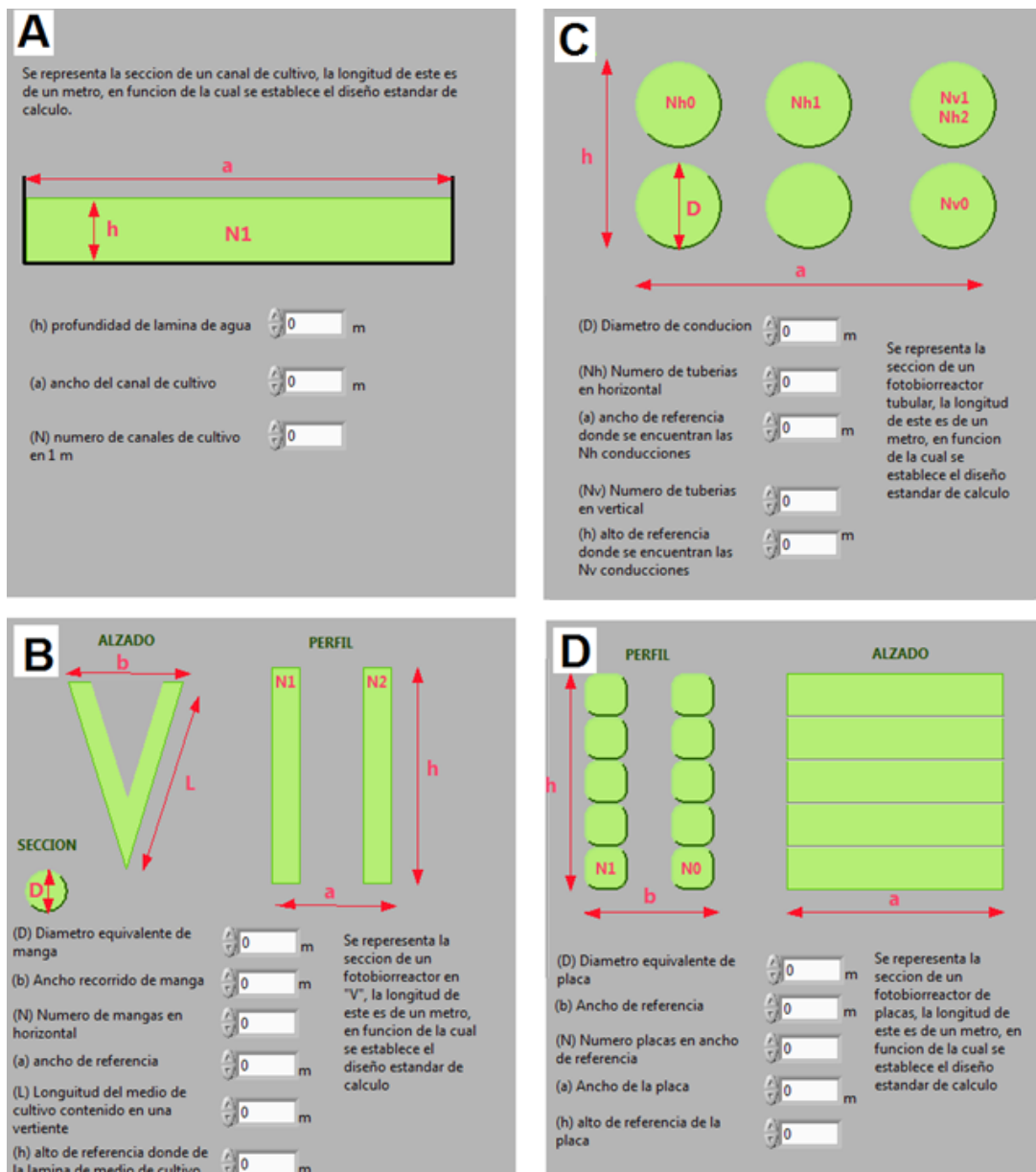


Figura 5. Tipologías de fotobiorreactores. En canal o *raceway* (A), fotobiorreactor en “V” (B), fotobiorreactor tubular (C), fotobiorreactor de placas (D).

A partir de los parámetros definidos se determinan los parámetros estandarizados, comunes para todos los fotobiorreactores y particulares de cada diseño. Estos parámetros estandarizados se explican en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Parámetros estandarizados de los fotobiorreactores

Parámetro	Comentarios
Recorrido de la luz en el medio de cultivo [m]	Es la distancia máxima que debe recorrer un rayo de luz hasta alcanzar una célula fotosintética. En la tipología en canal se corresponde con la profundidad, y en las demás tipologías en las que la disposición del fotobiorreactor es en vertical y que por lo tanto la iluminación se produce por ambas caras, se corresponde con la mitad del ancho de la conducción o recipiente. Ya que se supone que la iluminación es homogénea en ambas caras.
Superficie iluminada [m <sup>2</sup> ]	Esta es el área iluminada de un fotobiorreactor en el caso de la tipología en canal esta es en el plano horizontal. En las demás tipologías salvo indicación se corresponde con la superficie desarrollado de las conducciones o recipientes que la componen. Por ejemplo en el fotobiorreactor tubular es la superficie desarrollada de los tubos por el número de tubos. Se considera que no hay sombreado.
Volumen contenido [m <sup>3</sup> ]	Es el volumen de medio de cultivo que contiene el fotobiorreactor por unidad de metro cuadrado de suelo ocupado.
Superficie de suelo ocupada [m <sup>2</sup> ]	Es la superficie de suelo ocupada en horizontal.

### 2.3.4. Variables resultantes de cálculo

Las variables que son presentadas como resultados de las distintas estimaciones formuladas son las que se muestran en la Tabla 5. El objetivo de estas primeras es determinar para un metro cuadrado de suelo ocupado, cuánto CO<sub>2</sub> se captura para luego obtener la superficie necesaria para metabolizar en biomasa las emisiones carbónicas de una fuente en cuestión.

**Tabla 5.** Variables calculadas tomadas como resultados

Variables referidas a un metro cuadrado de suelo ocupado por el fotobiorreactor	Variables referidas a la superficie necesaria para la captura de las emisiones de CO <sub>2</sub>
Captura de CO <sub>2</sub> [Nm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·periodo]	Superficie de suelo ocupada [m <sup>2</sup> ]
Emisión de O <sub>2</sub> [Nm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·periodo]	Emisión de O <sub>2</sub> total [Nm <sup>3</sup> ]
Superficie iluminada [m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]	Captura de CO <sub>2</sub> total [Nm <sup>3</sup> ]
Volumen de medio de cultivo contenido en el fotobiorreactor [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ]	Volumen de medio cultivo contenido en el fotobiorreactor [m <sup>3</sup> ]
Productividad media acumulada [g/m <sup>2</sup> ·periodo]	Producción de biomasa seca [Kg]
	Ratios por unidad de superficie

### 3. Resultados

#### 3.1. Datos de partida

En este apartado se muestran las diferencias entre el uso de Método 1 y el Método 2 para determinar el potencial productivo de captura de CO<sub>2</sub> por microalgas. Las fuentes emisoras corresponden a industrias de combustión de la región de Castilla y León, España.

Para ello se parte de unos datos comunes para ambos métodos como son la tipología del fotobiorreactor y su diseño, así como la especie de microalgas y un periodo de estimación de 365 días.

##### 3.1.1. Emisiones de CO<sub>2</sub> en Castilla y León

Los valores de las fuentes industriales emisoras de CO<sub>2</sub> han sido tomados del Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (PRTR-España). En este registro recoge la información sobre las emisiones y transferencias de residuos fuera del emplazamiento de todos aquellos complejos industriales que realizan alguna de las actividades contempladas en el Reglamento Europeo o en la legislación española, siempre que se superen los umbrales de información establecidos. Para el rescate de la información correspondiente a Castilla y León ha sido solo tenido en cuenta la actividad tipificada como instalaciones de combustión, ya que se entiende que es la más representativa. Los datos son los correspondientes al 2010.

Estas fuentes emisoras se muestran en la Tabla 6, así como las coordenadas geográficas y emisiones anuales.

**Tabla 6.** Fuentes emisoras de CO<sub>2</sub> en Castilla y León. PRTR-España. Datos 2010. Ámbito de Castilla y León. Actividades: 1.b. 1.c.

Nombre de la fuente emisora	Latitud	Longitud	Emisión CO <sub>2</sub> (kg/año)
GENFIBRE, S.A.	42,682500	-2,923300	204000000
MOTORES VALLADOLID	41,648550	-4,728670	744000000
CENTRAL TERMICA DE ANLLARES, C.B.	42,823840	-6,485750	115000000
CENTRAL TERMICA LA ROBLA	42,794558	-5,631351	769000000
ENERGYWORKS VITVALL S.L.	41,648550	-4,728670	152000000
ENERGYWORKS ARANDA, S.L.	41,664096	-3,707843	116000000
UPT COMPOSTILLA	42,627460	-6,563330	209000000
CENTRAL TÉRMICA DE VELILLA	42,818259	-4,854434	443351000
COMPAÑIA ENERGETICA PARA EL TABLERO (TALOSA)	41,764870	-2,470730	265302000
TABLEROS TRADEMA / VALLADOLID	41,648550	-4,728670	151577000
MINERA DE SANTA MARTA	42,416667	-3,183333	199000000
GRABISA TINTES Y ACABADOS, S.L	42,346667	-3,644444	102105998
IBERDROLA COGENERACIÓN, S.R.L.U.	41,950556	-5,643056	102105998
ACCIONA ENERGÍA, S.A	42,262500	-5,515278	102105998
ENDESA GENERACIÓN S.A CICLO COMBINADO	42,608333	-6,566111	102105998
ECO2 BIOMASA, S.L.	42,432500	-4,380278	102105998

##### 3.1.2. Características del fotobiorreactor

Las características del fotobiorreactor empleado se presentan en la Tabla 7. Se trata de un fotobiorreactor en canal abierto en el que se supone que existen dispositivos de control de temperatura del medio de cultivo así como de inyección de CO<sub>2</sub>.

**Tabla 7. Características del fotobiorreactor en canal empleado para el cálculo**

Parámetro	Valor
(N) numero de canales de cultivo en 1 m	1
Recorrido de la luz hasta el fondo del canal	0,500 m
(a) ancho del canal de cultivo	0,900 m
Recorrido de la luz en el medio de cultivo	0,500000 m
Superficie horizontal ocupada en 1 m2	0,900000 m2
Superficie iluminada en 1 m2 de superficie horizontal	0,900000 m2
Volumen de cultivo en la superficie ocupada	0,450000 m3

### 3.1.3. Especie de microalga

Para ambas estimaciones se ha hecho uso de la especie de microalgas *Chlorella vulgaris*. Para el caso del Método 1 o por rendimientos se toman los ratios productivos documentados en el trabajo de Rodolfi *et al.*, (2009) (ver Anejo v). En el caso del Método 2 o por valor calorífico se toma el valor de Scragg *et al.*, (2002) que se muestra en la Tabla 2.

## 3.2. Resultados del programa informático EvAlgae

### 3.2.1. Evaluación de producción de biomasa total acumulada

Para esta evaluación aparte de los condicionantes recogidos en el apartado 3.1, para esta evaluación el balance de gases se lleva por medio de la estimación 1 (Expresión 5 y Expresión 8).

La variable determinante en los cálculos productivos es la evolución de la concentración de microalgas en el medio, y con ello la producción de biomasa obtenida al final del periodo evaluado.

Esta variable determina cuál va a ser la captura de CO<sub>2</sub> y la emisión de O<sub>2</sub>. Captura que determina la superficie necesaria para transformar en biomasa algal toda la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido.

A nivel de referencia se muestra la Tabla 8, donde vemos que el número de ciclos productivos es mayor por el Método 1, al igual que la biomasa acumulada anualmente es también menor por medio de la estimación del Método 2.

**Tabla 8. Resultados de producción de biomasa Método 1 y Método 2 y variación.**

Fuente emisora	Numero de ciclos			Producción biomasa algal seca (t)		
	Met. 1	Met. 2	Δ%	Met. 1	Met. 2	Δ%
GENFIBRE, S.A.	15	2	-87%	420513685	349915242	-17%
MOTORES VALLADOLID	14	2	-86%	1548721011	1294778866	-16%
CENTRAL TERMICA DE ANLLARES, C.B.	15	2	-87%	237054283	196450396	-17%
CENTRAL TERMICA LA ROBLA	15	2	-87%	1585171686	1313987299	-17%
ENERGYWORKS VITVALL S.L.	14	2	-86%	316405368	264524715	-16%
ENERGYWORKS ARANDA, S.L.	14	2	-86%	241467254	201848290	-16%
UPT COMPOSTILLA	15	2	-87%	430820393	358660672	-17%
CENTRAL TÉRMICA DE VELILLA	15	2	-87%	913897857	757397191	-17%
COMPAÑIA ENERGETICA PARA EL TABLERO (TALOSA)	14	2	-86%	551459630	461260814	-16%
TABLEROS TRADEMA // VALLADOLID	14	2	-86%	315524845	263788570	-16%
MINERA DE SANTA MARTA	14	2	-86%	412747067	342114161	-17%
GRABISA TINTES Y ACABADOS, S.L	14	2	-86%	211778649	176149998	-17%
IBERDROLA COGENERACIÓN, S.R.L.U.	14	2	-86%	212238641	176736789	-17%
ACCIONA ENERGÍA, S.A	14	2	-86%	211778649	176275222	-17%
ENDESA GENERACIÓN S.A CICLO COMBINADO	15	2	-87%	210475341	175250713	-17%

Fuente emisora	Numero de ciclos			Producción biomasa algal seca (t)		
	Met. 1	Met. 2	Δ%	Met. 1	Met. 2	Δ%
ECO2 BIOMASA, S.L.	14	2	-86%	211778649	175513615	-17%

En la Tabla 9 se muestra que la superficie estimada por medio del Método 2 es entorno a un 3% más que por el Método 1. Esto confirma lo ya razonado, ya que la captura de CO<sub>2</sub> es intrínseca a la producción de biomasa y viceversa.

**Tabla 9.** Resultados de superficie de producción necesaria en cada fuente y variación respecto al Método 1.

Fuente emisora	Superficie necesaria (ha)		
	Met. 1	Met. 2	Δ%
GENFIBRE, S.A.	45050372	46409161	3%
MOTORES VALLADOLID	164301356	169149939	3%
CENTRAL TERMICA DE ANLLARES, C.B.	25396043	26165742	3%
CENTRAL TERMICA LA ROBLA	169822235	174966707	3%
ENERGYWORKS VITVALL S.L.	33566944	34557514	3%
ENERGYWORKS ARANDA, S.L.	25616878	26373029	3%
UPT COMPOSTILLA	46154548	47545384	3%
CENTRAL TÉRMICA DE VELILLA	97907487	100874580	3%
COMPAÑIA ENERGETICA PARA EL TABLERO (TALOSA)	58588008	60320197	3%
TABLEROS TRADEMA // VALLADOLID	33473530	34461345	3%
MINERA DE SANTA MARTA	43946196	45265933	3%
GRABISA TINTES Y ACABADOS, S.L	22548594	23223271	3%
IBERDROLA COGENERACIÓN, S.R.L.U.	22548594	23218948	3%
ACCIONA ENERGÍA, S.A	22548594	23222346	3%
ENDESA GENERACIÓN S.A CICLO COMBINADO	22548594	23227868	3%
ECO2 BIOMASA, S.L.	22548594	23225920	3%

### 3.2.2. Evaluación respecto a las estimaciones del balance gaseoso

En esta evaluación se estudian las diferencias en el balance gaseoso por medio del uso de las tres estimaciones para el CO<sub>2</sub> y el O<sub>2</sub>: Estimación 1 con la Expresión 5 y Expresión 8, Estimación 2 con las Expresión 6 y Expresión 9 y la Estimación 3 con las Expresión 7 y Expresión 10.

Para ello se toman las consideraciones antes relatadas en el apartado 3.1, y se evalúan por medio del Método 1 para especie antes señalada.

En esta evaluación las variables significativas para observar las diferencias es la superficie de cálculo, ya que la estimación del balance gaseoso modifica la relación de consumo de CO<sub>2</sub> que puede presentar diferencias significativas entre las tres estimaciones del estudio.

**Tabla 10.** Resultados de calculo de superficie necesaria por medio de las tres estimaciones del balance. Variación respecto Estimación 1

Fuente emisora	Superficie necesaria (ha)				
	Estimación 1	Estimación 2	Estimación 3	Δ%1,2	Δ%1,3
GENFIBRE, S.A.	45050372	60148998	53624420	34%	19%
MOTORES VALLADOLID	164301356	219366933	187704618	34%	14%
CENTRAL TERMICA DE ANLLARES, C.B.	25396043	33907523	30405705	34%	20%
CENTRAL TERMICA LA ROBLA	169822235	226738134	203076055	34%	20%
ENERGYWORKS VITVALL S.L.	33566944	44816900	38348255	34%	14%
ENERGYWORKS ARANDA, S.L.	25616878	34202371	29283301	34%	14%
UPT COMPOSTILLA	46154548	61623238	54815247	34%	19%
CENTRAL TÉRMICA DE VELILLA	97907487	130721168	117193849	34%	20%
COMPAÑIA ENERGETICA PARA EL TABLERO (TALOSA)	58588008	78223772	67234777	34%	15%



TABLEROS TRADEMA // VALLADOLID	33473530	44692180	38241536	34%	14%
MINERA DE SANTA MARTA	43946196	58674758	51748176	34%	18%
GRABISA TINTES Y ACABADOS, S.L	22548594	30105752	26477110	34%	17%
IBERDROLA COGENERACIÓN, S.R.L.U.	22548594	30105752	26064409	34%	16%
ACCIONA ENERGÍA, S.A	22548594	30105752	26388050	34%	17%
ENDESA GENERACIÓN S.A CICLO COMBINADO	22548594	30105752	26758851	34%	19%
ECO2 BIOMASA, S.L.	22548594	30105752	26568711	34%	18%

Podemos observar como en la comparación de la Estimación 1 frente a la 2, supone una variación constante debido a que ambas estimaciones están justificadas en relaciones inmóviles de las características del sistema de producción de microalgas. En cambio en la comparación de la Estimación 1 frente a la 3 se muestra que hay una mayor variabilidad derivada porque la Estimación 3 contiene relaciones fotosintéticas que permiten representar la variabilidad geográfica por medio de la radiación solar.

## 4. Conclusiones

Esta gestión de las emisiones por medio de las microalgas es una actividad local que no supone tener que depender de grandes infraestructuras ni de subvenciones. Ya que la instalación de los fotobiorreactores necesarios y los costes variables derivados de su funcionamiento son amortizables, ya que se esta obteniendo con ello una biomasa susceptible de ser introducida en la actividad económica agroindustrial: obtención de biocombustibles, piensos de alimentación animal o compuestos de síntesis de alto valor añadido.

El programa informático desarrollado con el nombre de EvAlgae permite de una forma eficaz cuantificar el potencial de captura de las emisiones de CO<sub>2</sub> de cualquier tipo de fuente industrial o domestica. Además de ser una útil herramienta en la toma de decisiones de proyectos relacionados con este cultivo. Estas emisiones son puntuales en el territorio por ello el modelo implantado en el programa permite evaluar los resultados en el ámbito geográfico, resultando para ellos un valor de superficie de suelo necesaria para amortiguar las emisiones. También permite plantear distintos escenarios de cálculo en función de la especie de microalga y característica del fotobiorreactor.

A la vista de los resultados que se obtienen y de los ratios productivos documentados, se muestra que el gran factor limitante a estos sistemas es la disposición de suelo. En concreto suelo cercano a las fuentes de GEI que se pretenden mitigar. Fuentes emisoras que se encuentran como se ha dicho en núcleos urbanos e industriales. Zonas cuyo suelo que se encuentra en la mayoría de los casos comprometido por la existencia de calles o carreteras o por la mera opción de ampliación de industrias o edificios e infraestructuras en general. También el disponer de suelo agrícola es contradictorio con los propósitos o los fundamentos de cultivo de segunda generación ya que se esta compitiendo por el recurso suelo a la agricultura y ganadería.

El ratio de superficie necesario para capturar una tonelada de CO<sub>2</sub> varía según el Método y Estimación que se emplee así como por el fotobiorreactor y la especie de microalga. Tampoco en la bibliografía existe consenso al respecto, ya que es un ratio muy condicionado. Para Chisti (2007) exponen que el ratio para un fotobiorreactor en canal es 0,23 toneladas de CO<sub>2</sub> por hectárea y año. En cambio para Michiki (1995) este es de 3,65 toneladas de CO<sub>2</sub> por hectárea y año. Este programa informático permite evaluar de una forma dinámica todos los factores que intervienen en la captura de GEI y producción de biomasa algal.

Como futuros desarrollos dentro del programa EvAlgae se deberán considerar los *inputs* de nutrientes tales como nitrógeno y fosforo principalmente bien de origen mineral o de efluentes. También completar el programa con una estimación de costes fijos y variables. Esto supondrá un

punto interesante, para lo cual se deberán antes plantear balances térmicos y modelos optimizados de funcionamiento para los distintos fotobiorreactores.



## v. Anejo. Índices productivos de las especies de microalgas

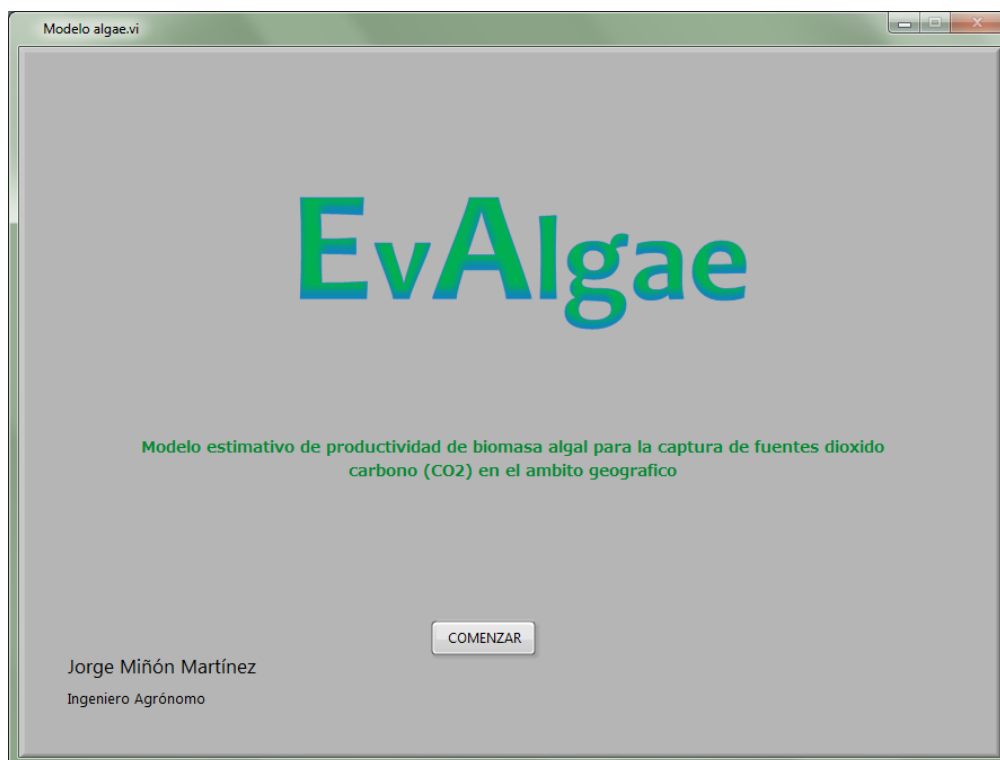
Especies de microalgas	Productividad volumétrica (g/L·d)	Contenido en lípido (% sobre peso seco)	Productividad lípidos (mg/L·d)	Referencia
Botryococcus braunii. UTEX 572	0,02	50%	0	Mata et al., (2009)
Chaetoceros calcitrans. CS 178	0,04	39,8%	17,6	Rodolfi et al. (2009)
Chaetoceros muelleri. F&M-M43	0,07	33,6%	21,8	Rodolfi et al. (2009)
Chlorella emersonii. CCAP 211/11N	0,0385	44%	16,08	Mata et al., (2009)
Chlorella minutissima. UTEX 2341	0,025	44,0%	4,6	Illman et al. (2000)
Chlorella protothecoides. CCAP 211/8D	2,426	27%	2,8	Illman et al. (2000)
Chlorella pyrenoidosa	3,27	2%	0	Mata et al., (2009)
Chlorella sorokiniana. IAM-212	0,23	19,3%	44,7	Rodolfi et al. (2009)
Chlorella sorokiniana. UTEX 1230	0,004	21,0%	0,85	Illman et al. (2000)
Chlorella sp.	1,26	29%	42,1	Mata et al., (2009)
Chlorella sp.. F&M-M48	0,23	18,7%	42,1	Rodolfi et al. (2009)
Chlorella vulgaris	0,03	43,0%	12,55	Scragg et al. (2002)
Chlorella vulgaris	0,035	29,0%	5,15	Illman et al. (2000)
Chlorella vulgaris. #259	0,01	35,5%	4	Liang et al. (2009)
Chlorella vulgaris. #259	0,17	27,5%	38	Liang et al. (2009)
Chlorella vulgaris. CCAP 211/11B	0,17	19,2%	32,6	Rodolfi et al. (2009)
Chlorella vulgaris. F&M-M49	0,2	18,4%	36,9	Rodolfi et al. (2009)
Chlorella vulgaris. INETI 58	0,18	5,1%	7,4	Gouveia & Oliveira (2009)
Chlorella vulgaris. KCTC AG10032	0,1	6,6%	6,9	Yoo et al. (2010)
Chlorococcum sp.. UMACC 112	0,28	19,3%	53,7	Rodolfi et al. (2009)
Cryptocodinium cohnii	10	36%	0	Mata et al., (2009)
Dunaliella primolecta	0,09	23%	0	Mata et al., (2009)
Dunaliella salina	0,28	6%	116	Mata et al., (2009)
Dunaliella sp.	0	42%	33,5	Mata et al., (2009)
Dunaliella tertiolecta	0,12	44%	0	Mata et al., (2009)
Dunaliella tertiolecta. ATCC 30929	0,1	64,2%	65,2	Takagi et al. (2006)
Dunaliella tertiolecta. IPIMAR	0,12	16,7%	20	Gouveia & Oliveira (2009)
Ellipsoidion sp.	0,17	27%	47,3	Mata et al., (2009)
Ellipsoidion sp.. F&M-M31	0,17	27,4%	47,3	Rodolfi et al. (2009)
Euglena gracilis	7,7	17%	0	Mata et al., (2009)
Haematococcus pluvialis	0,055	25%	0	Mata et al., (2009)
Isochrysis galbana	0,96	4%	0	Mata et al., (2009)
Isochrysis sp.	0,125	7%	37,8	Mata et al., (2009)
Isochrysis sp.. (T-ISO) CS 177	0,17	22,4%	37,7	Rodolfi et al. (2009)
Isochrysis sp.. F&M-M37	0,14	27,4%	37,8	Rodolfi et al. (2009)
Monallanthus salina	0,08	21%	0	Mata et al., (2009)
Monodus subterraneus	0,19	16%	30,4	Mata et al., (2009)
Monodus subterraneus. UTEX 151	0,19	16,1%	30,4	Rodolfi et al. (2009)
Nannochloris sp.	0,34	38%	68,7	Mata et al., (2009)
Nannochloris sp.. UTEX LB1999	0,195	35,1%	12,45	Takagi et al. (2000)
Nannochloropsis oculata.	0,425	26%	63	Mata et al., (2009)
Nannochloropsis oculata. NCTU-3	0,425	26,2%	63	Chiu et al. (2009)
Nannochloropsis sp.	0,09	28,7%	25,8	Gouveia & Oliveira (2009)
Nannochloropsis sp.	0,8	33%	63,8	Mata et al., (2009)
Nannochloropsis sp.. F&M-M24	0,18	30,9%	54,8	Rodolfi et al. (2009)
Nannochloropsis sp.. F&M-M26	0,21	29,6%	61	Rodolfi et al. (2009)
Nannochloropsis sp.. F&M-M27	0,2	24,4%	48,2	Rodolfi et al. (2009)
Nannochloropsis sp.. F&M-M28	0,17	35,7%	60,9	Rodolfi et al. (2009)

Especies de microalgas	Productividad volumétrica (g/L-d)	Contenido en lípido (% sobre peso seco)	Productividad lípidos (mg/L-d)	Referencia
Nannochloropsis sp.. F&M-M29	0,17	21,6%	37,6	Rodolfi et al. (2009)
Nannochloropsis. CS 246	0,17	29,2%	49,7	Rodolfi et al. (2009)
Neochloris oleabundans. UTEX 1185	0,09	36,0%	24,75	Gouveia et al. (2009)
Neochloris oleabundans. UTEX 1185	0,09	29,0%	26,1	Gouveia & Oliveira (2009)
Neochloris oleabundans. UTEX 1185	0,47	3,7%	35,5	Li et al. (2008)
Pavlova lutheri	0,14	36%	40,2	Mata et al., (2009)
Pavlova lutheri. CS 182	0,14	35,5%	50,2	Rodolfi et al. (2009)
Pavlova salina	0,16	31%	49,4	Mata et al., (2009)
Pavlova salina. CS 49	0,16	30,9%	49,4	Rodolfi et al. (2009)
Phaeodactylum tricorutum	0,9515	38%	44,8	Mata et al., (2009)
Phaeodactylum tricorutum. F&M-M40	0,24	18,7%	44,8	Rodolfi et al. (2009)
Porphyridium cruentum	0,37	9,5%	34,8	Rodolfi et al. (2009)
Scenedesmus obliquus	0,06	12,7%	7,14	M&al & Mallick (2009)
Scenedesmus obliquus	0,305	4,2%	35,1	M&al & Mallick (2009)
Scenedesmus obliquus	0,372	33%	0	Mata et al., (2009)
Scenedesmus obliquus. FCTU Coimbra	0,09	17,7%	15,9	Gouveia & Oliveira (2009)
Scenedesmus quadricauda	0,19	18,4%	35,1	Rodolfi et al. (2009)
Scenedesmus sp.	0,145	20%	47,35	Mata et al., (2009)
Scenedesmus sp. DM	0,26	21,1%	53,9	Rodolfi et al. (2009)
Scenedesmus sp.. F&M-M19	0,21	19,6%	40,8	Rodolfi et al. (2009)
Scenedesmus sp.. KCTC AG20831	0,22	9,5%	20,7	Yoo et al. (2010)
Skeletonema costatum	0,08	32%	17,4	Mata et al., (2009)
Skeletonema costatum. CS 181	0,08	21,1%	17,4	Rodolfi et al. (2009)
Skeletonema sp.	0,09	23%	27,3	Mata et al., (2009)
Skeletonema sp.. CS 252	0,09	31,8%	27,3	Rodolfi et al. (2009)
Spirulina maxima	0,23	7%	0	Mata et al., (2009)
Spirulina maxima. LB 2342	0,21	4,1%	8,6	Gouveia & Oliveira (2009)
Spirulina platensis	2,18	5%	0	Mata et al., (2009)
Tetraselmis sp.	0,3	14%	43,4	Mata et al., (2009)
Tetraselmis sp.. F&M-M34	0,3	14,7%	43,4	Rodolfi et al. (2009)
Tetraselmis suecica	0,22	6%	31,7	Mata et al., (2009)
Tetraselmis suecica. F&M-M33	0,32	8,5%	27	Rodolfi et al. (2009)
Tetraselmis suecica. F&M-M35	0,28	12,9%	36,4	Rodolfi et al. (2009)
Thalassiosira pseudonana	0,08	21%	17,4	Mata et al., (2009)
Thalassiosira pseudonana. CS 173	0,08	20,6%	17,4	Rodolfi et al., 2009

## vi. Anejo. Tutorial de EvAlgae

Con las siguientes figuras se presenta un tutorial de funcionamiento del programa informático EvAlgae.

En la Figura 6 se muestra la interfaz de presentación del programa EvAlgae, donde clicando "COMENZAR" podremos empezar a introducir los datos que se nos solicitan.



**Figura 6.** Interfaz de presentación del programa EvAlgae, para la estimación de la productividad de biomasa algal para la captura de fuentes de dióxido de carbono en el ámbito geográfico.

En la Figura 7 vemos que los campos necesarios son la posición geográfica de estas fuentes (longitud y latitud), nombre de la fuente, y cantidad o volumen de emisión anual, con su correspondiente tipificación. En la Figura 8 vemos que se deben tipificar todos los campos, ya que no se avisa de ningún tipo de error en la parte inferior de la tabla. También es importante definir en qué unidad de las mostradas se encuentra la emisión anual de CO<sub>2</sub> de las distintas fuentes.

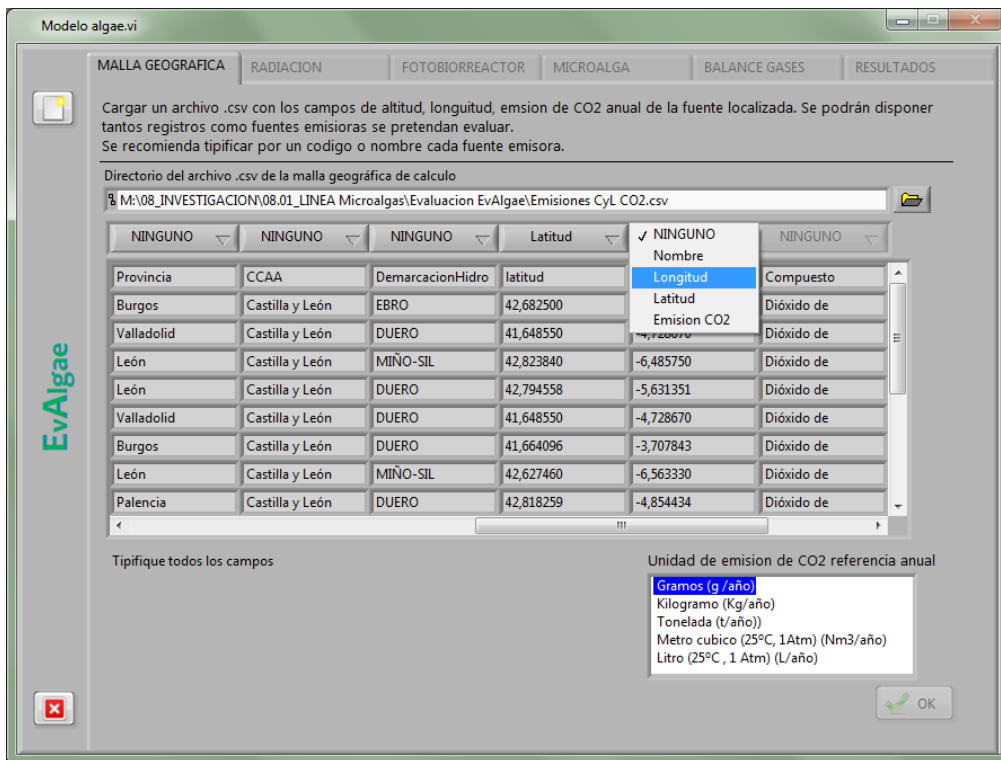


Figura 7. Ingreso de archivo .csv con datos de las fuentes emisoras a evaluar.

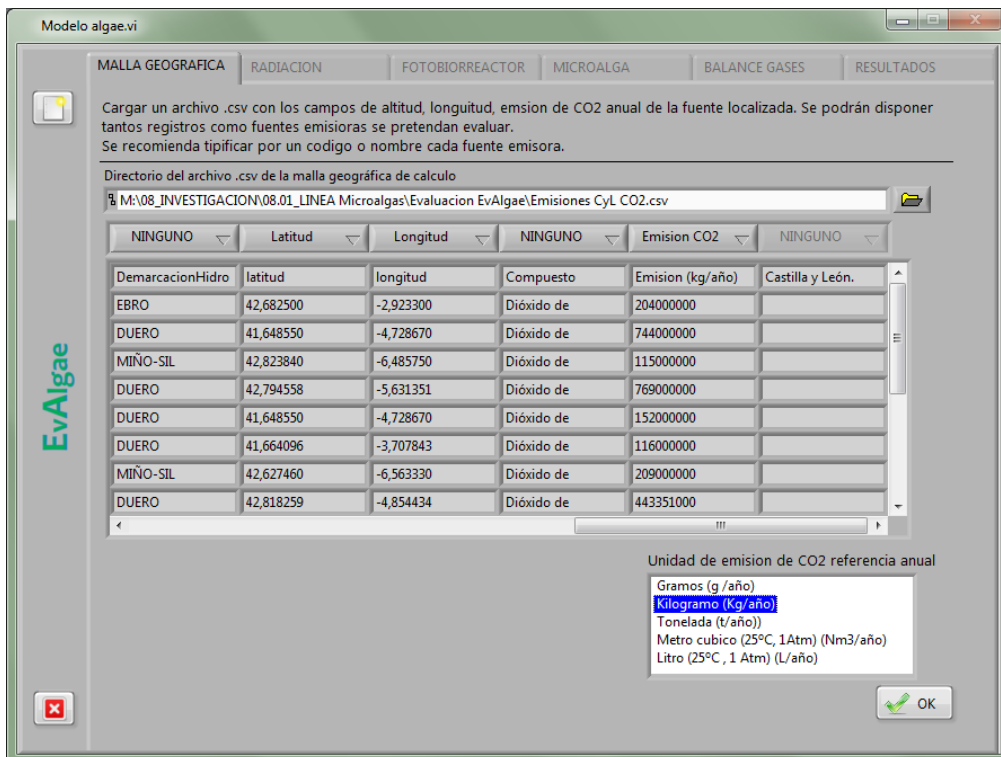


Figura 8. Interfaz completada correctamente.

En la Figura 9 seleccionamos dentro de un año de 365 días, del periodo sobre el cual se pretende evaluar el potencial. Una vez introducido el periodo y calculado estos datos pueden ser exportados en un archivo .csv

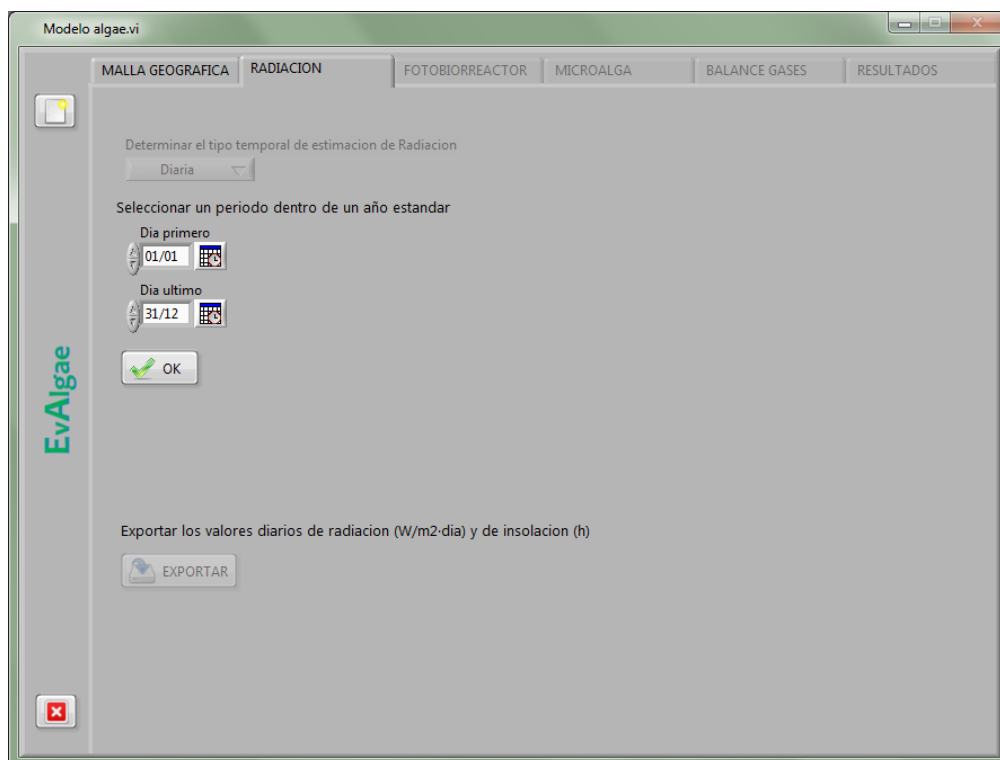


Figura 9. Selección de periodo de cálculo

En el panel de la Figura 10 tenemos que definir el tipo de fotobiorreactor así como sus características de diseño. Para ello por medio del *display* inferior-izquierdo, y completar las características del mismo. Posteriormente validar si el ingreso el correcto para finalmente salir del panel con el botón inferior derecho. Existen cuatro tipologías de fotobiorreactor introducidas en forma de plantilla como se ve en la Figura 11.

Por otro lado como se ve en la Figura 12 se puede, deshabilitar el control de “ingreso de parámetros con plantillas” para introducir directamente los parámetros estandarizados. Siendo útil para tipologías no tenidas en cuenta en el programa EvAlgae.

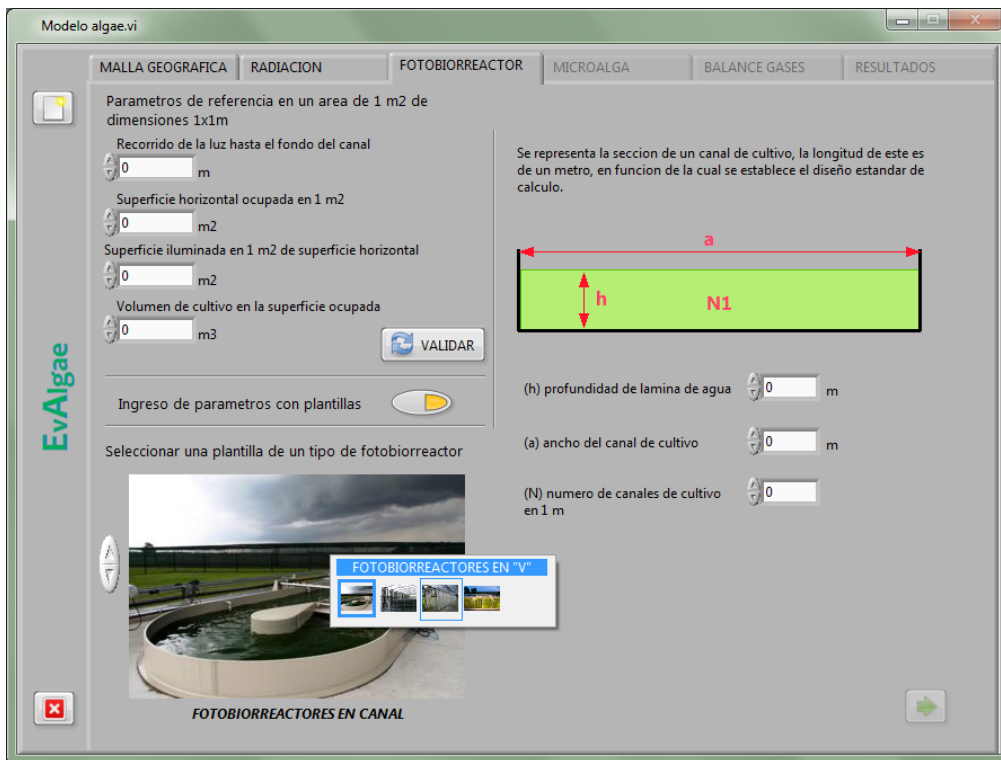


Figura 10. Definir fotobiorreactor por medio de las plantillas.

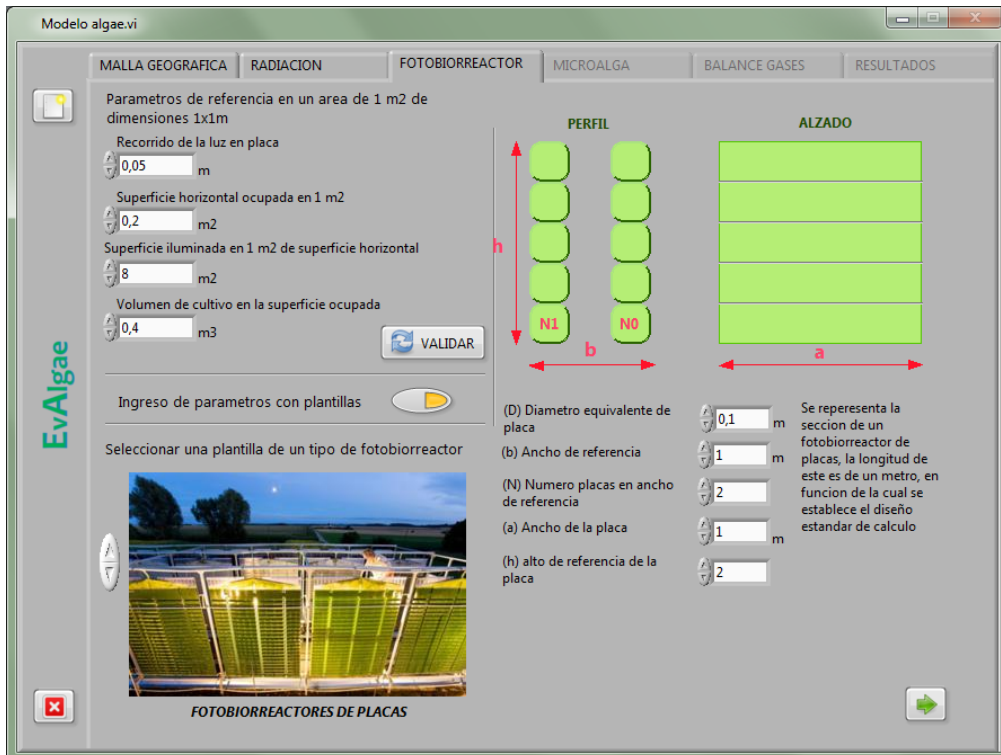


Figura 11. Plantilla de la tipología de fotobiorreactor de placas.

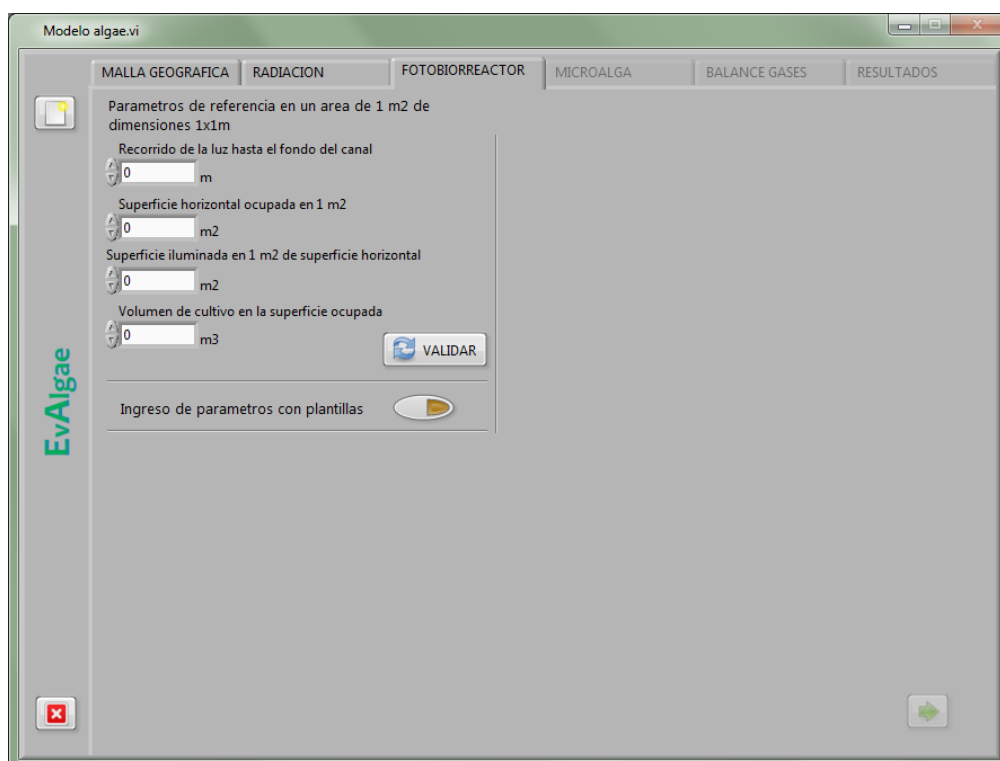


Figura 12. Ingreso de parámetros estandarizados directamente.

En el panel que se muestra en la Figura 13, debemos definir que método vamos a utilizar para estimar la evolución de la concentración de las microalgas en el medio de cultivo: Método 1 de estimación por medio de rendimientos, o el Método 2 de estimación por medio de valores caloríficos. Para ambos métodos hay unas variables que son comunes que se encuentran en la parte superior del panel, como intensidad de compensación, intensidad de fotosaturación, coeficiente de extinción, factor fotosintético o concentración de inoculación.

Como se muestra en la Figura 14 con el Método 1, solo hace falta seleccionar la especie en cuestión visualizando sus ratios productivos.

Para el método 2 existen dos vertientes, la primera que se ve en la Figura 15 calcula el valor calorífico de la especie, previo conocimiento la composición de la alga en los elementos de carbono (C), hidrogeno (H), nitrógeno (N), oxigeno (O) y azufre (S). Se indica si el ingreso no es correcto por medio de un texto en rojo

En la segunda vertiente que se muestra en la Figura 16 es por medio de valores publicados en distintos artículos científicos, definiendo primero si se trata de un medio de cultivo pobre en nitrógeno o no, y luego seleccionado la especie en cuestión.

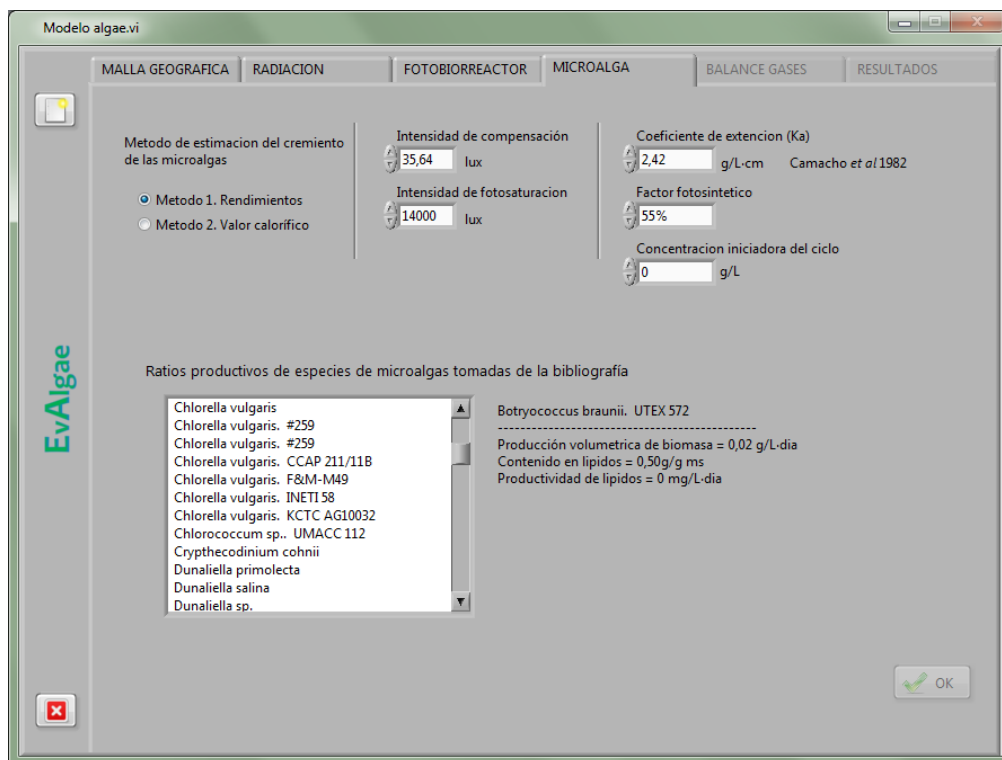


Figura 13. Definir tipo de método para estimar la evolución de la concentración de microalgas en el medio de cultivo.

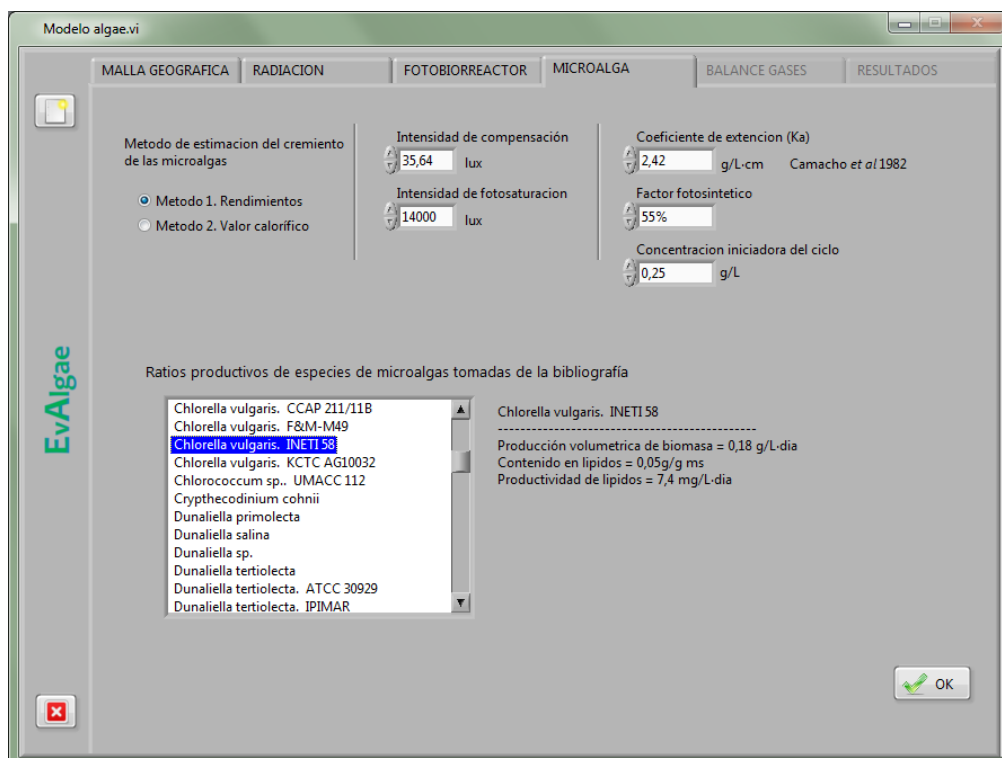


Figura 14. Método 1 por rendimientos, seleccionar la especie de la lista.



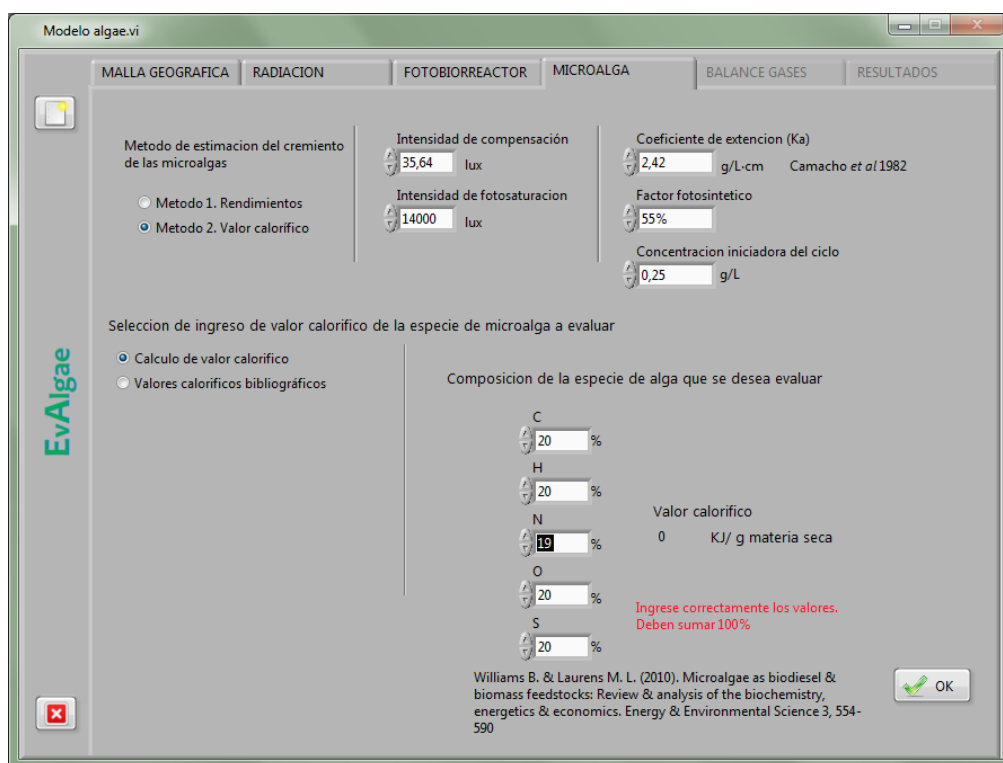


Figura 15. Calculo de valor calorífico. Método 2.

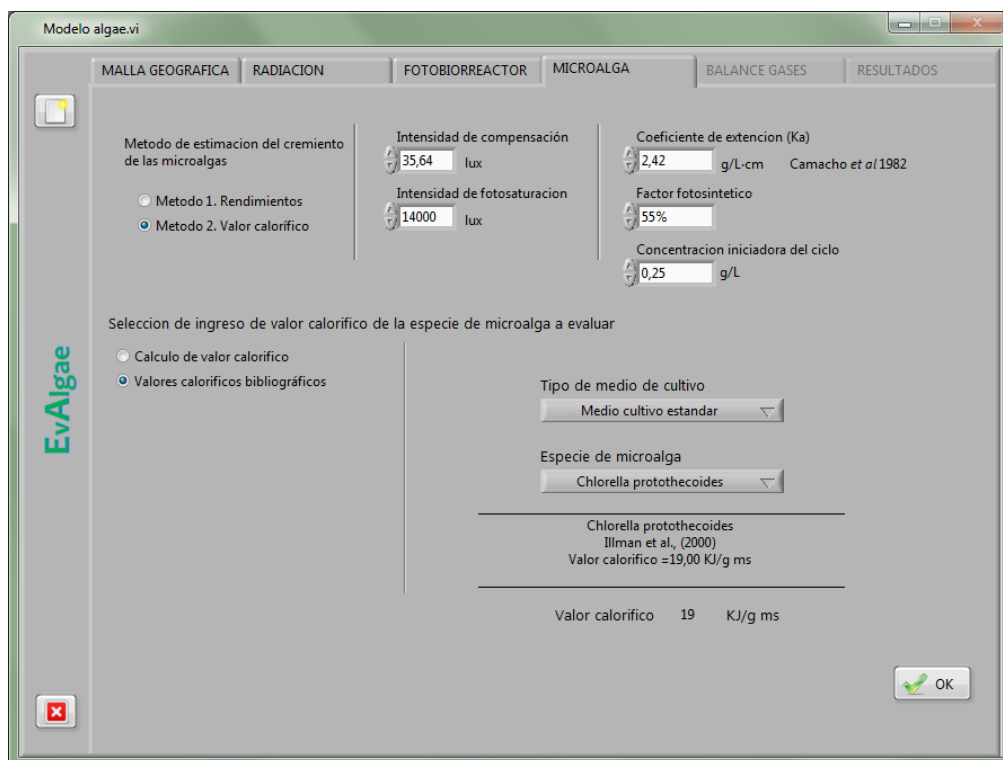


Figura 16. Valor calorífico de trabajos científicos.

En la Figura 17 se nos permite seleccionar el metodo para estimar el balance de gases. Dentro de esta existen tres formas de estimar estos como se explica en el panel inferior de la selección, y como se ha documentado en el apartado 2.3.2

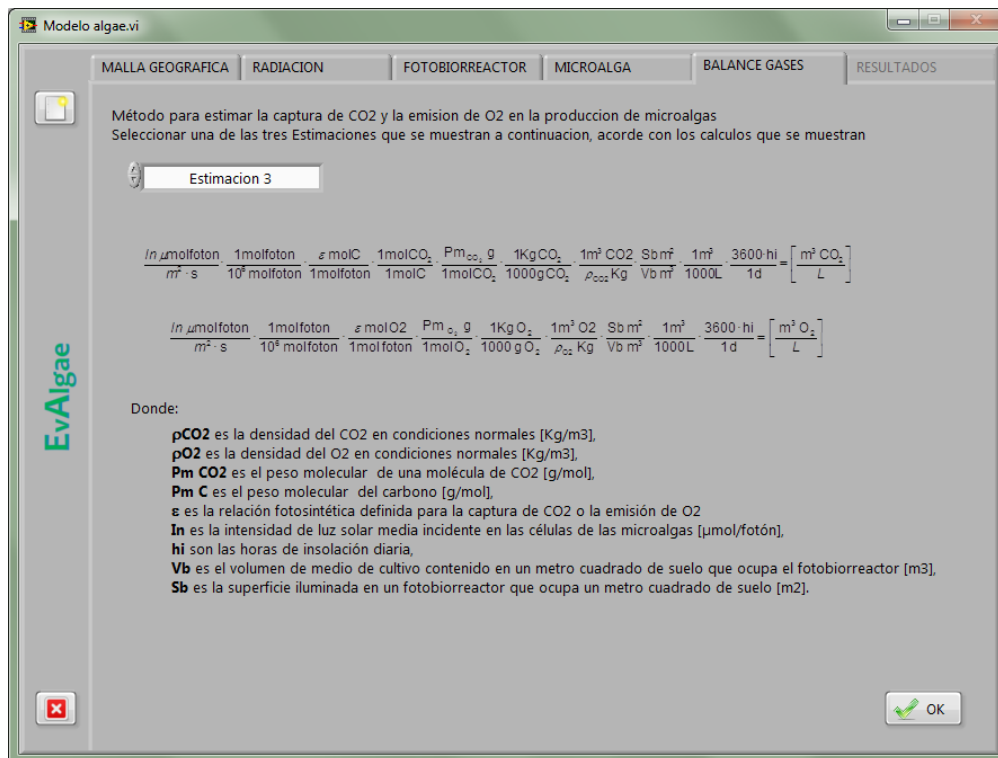


Figura 17. Selección de modelo estimativo del balance de gases: captura de CO<sub>2</sub>, emisión de O<sub>2</sub>.

Finalmente los resultados son presentados de dos formas diferentes. En la Figura 18 se muestra que estos resultados se pueden presentar de forma discreta donde seleccionado la fuente emisora se nos detalla la superficie necesaria para capturar todo el CO<sub>2</sub> que emite, así como la producción de biomasa seca que supone, la emisión de O<sub>2</sub>, y el volumen de medio de cultivo necesario.

También los resultados se pueden visualizar en forma de gráficos (Figura 19) para la fuente emisora concreta y para una selección de variables diarias como producción de biomasa seca, emisión de O<sub>2</sub>, captura de CO<sub>2</sub>, radiación y horas de insolación

Todos los cálculos generados en el escenario planteado pueden ser exportados a una carpeta (Figura 20).

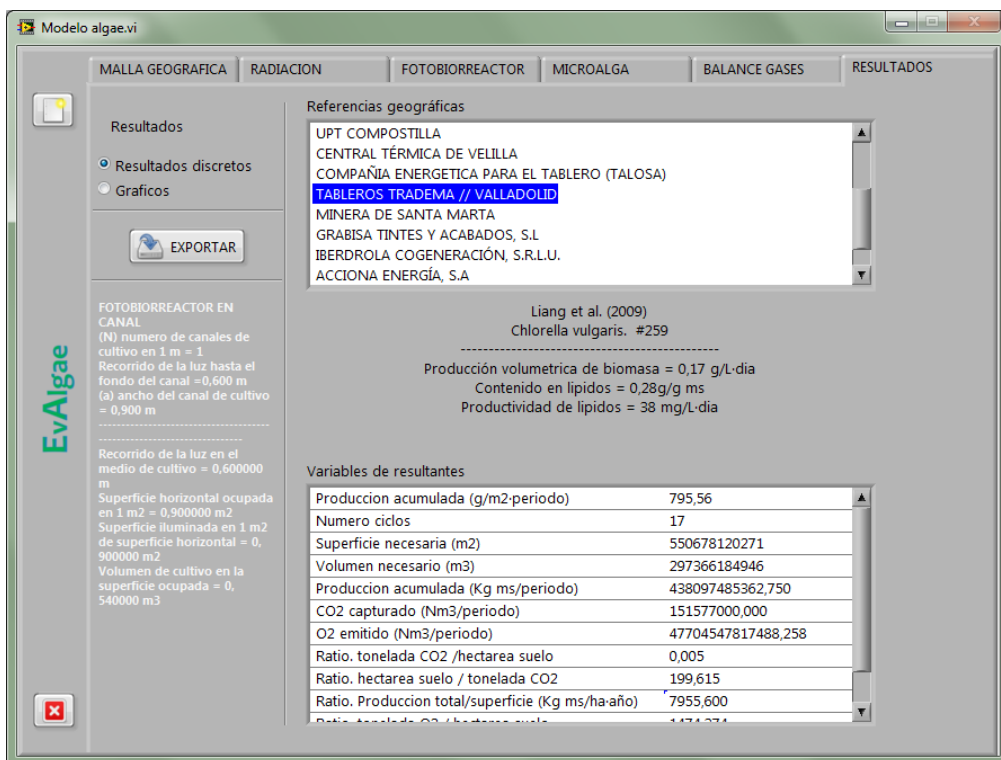


Figura 18. Primero por medio de resultados discretos.

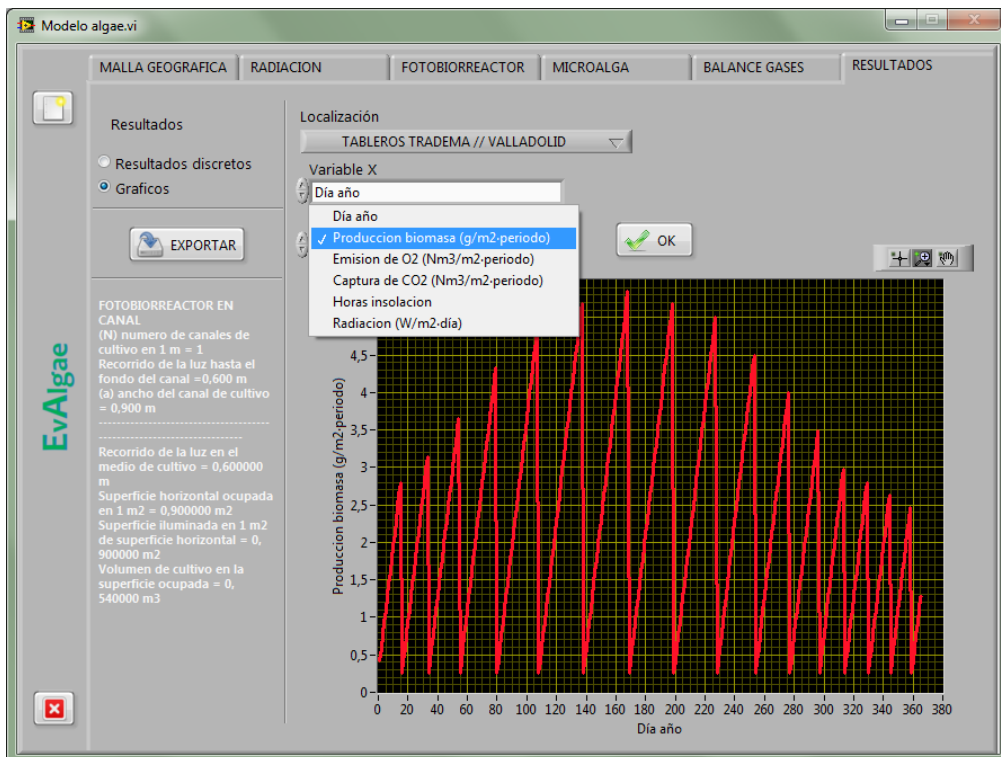


Figura 19. Los resultados se pueden visualizar en forma de gráficos.

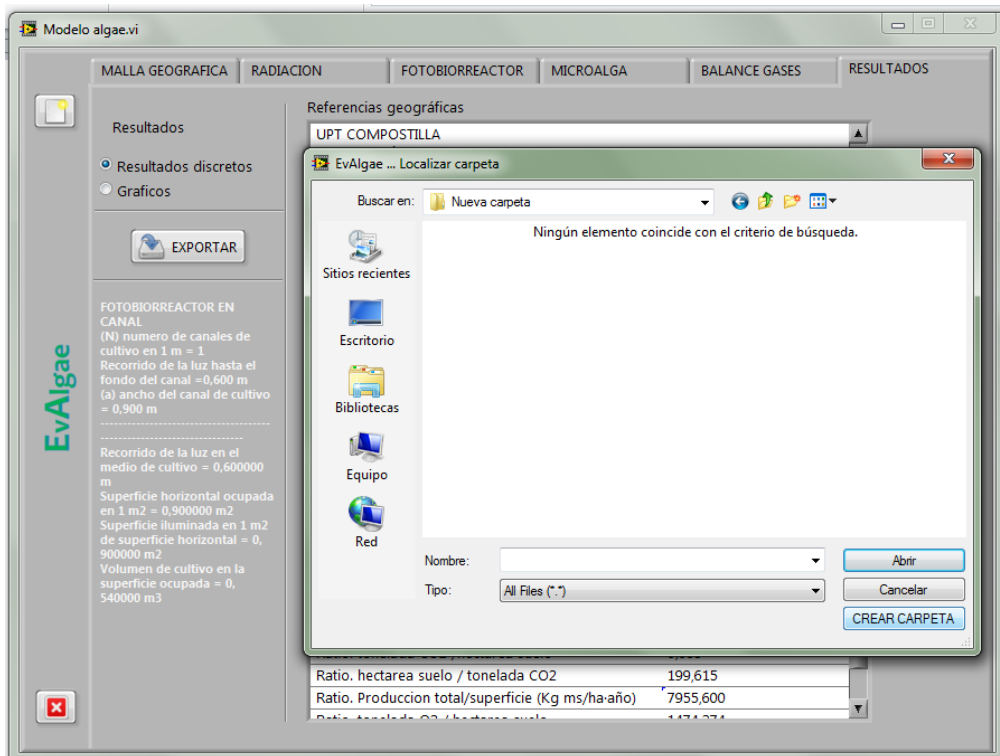


Figura 20. Exportar resultados a un archivo .csv

El programa EvAlgae, permite también hacer nuevos cálculos por medio de clicar en el botón superior izquierdo a fin de restaurar el sistema para introducir nuevas variables (Figura 21).

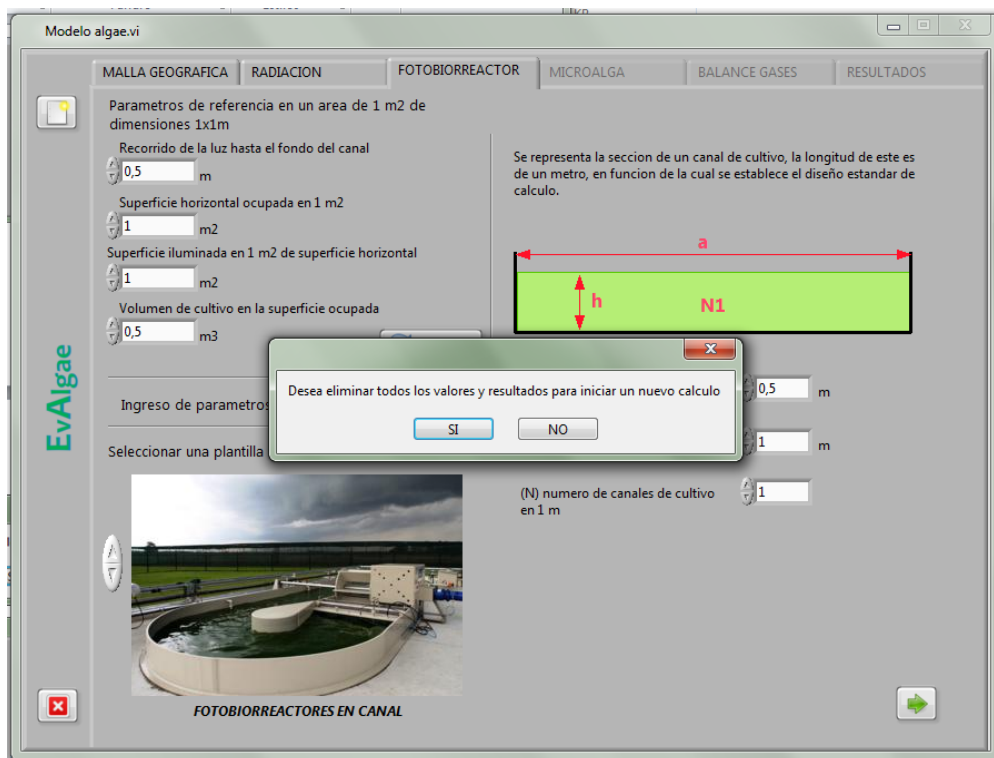
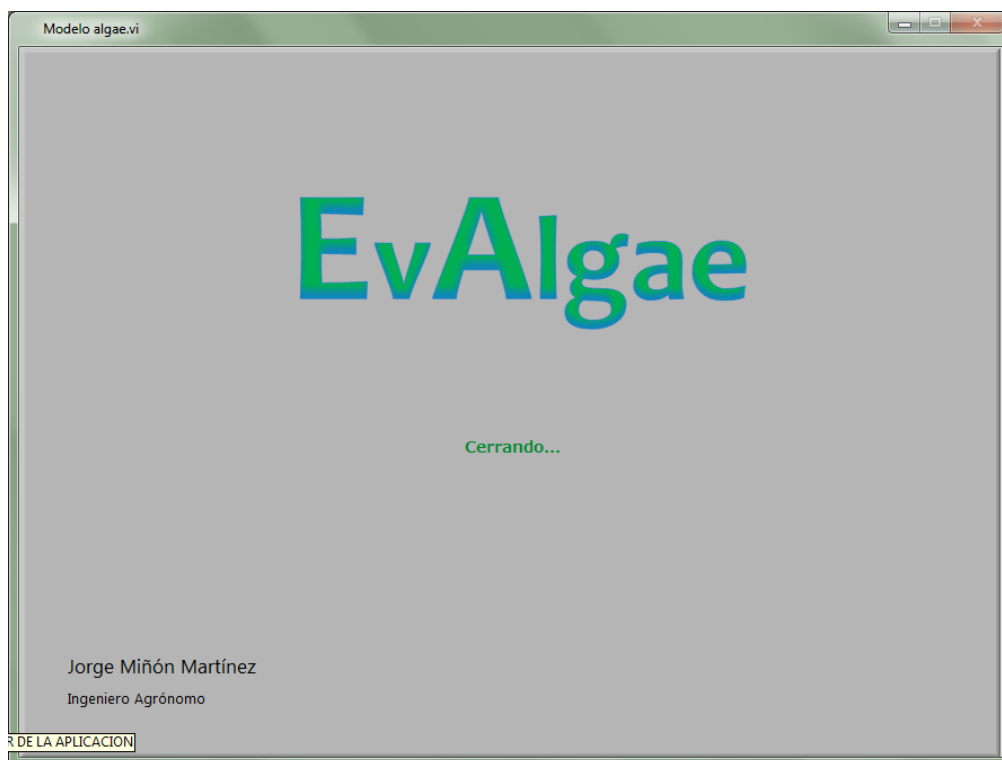


Figura 21. Reinicio de EvAlgae.

Para salir del programa solo clicando en el botón inferior-izquierdo en forma de aspa se cierra EvAlgae (Figura 22).



**Figura 22.** Cerrando EvAlgae. Por medio de clicar en, se cierra el programa informático.

## vii. Abreviaturas

BEFSCI	Proyecto sobre Bioenergía y criterios e indicadores para la Seguridad Alimentaria
C	Carbono
Cb	Concentración de biomasa [g/L]
CH <sub>4</sub>	Metano
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CVC	Incremento en la concentración de microalgas en el medio de cultivo [g/L]
ε	Relación fotosintética definida para la captura de CO <sub>2</sub> o la emisión de O <sub>2</sub> [mol C/mol fotón/m <sup>2</sup> ·s] o [mol O <sub>2</sub> /mol fotón/m <sup>2</sup> ·s]
GEI	Gases de efecto invernadero
H <sub>2</sub> S	Sulfuro de hidrogeno
ha	Hectárea. 1 ha = 10000 m <sup>2</sup>
h <sub>i</sub>	Horas de insolación diaria
I	Intensidad de luz incidente dentro del medio de cultivo [lux]
I <sub>0</sub>	Intensidad de luz incidente en el fotobiorreactor [lux]
I <sub>n</sub>	Intensidad de luz solar media incidente en las células de las microalgas [μmol/fotón]
Ka	Coeficiente de extinción [g/L·cm]
L	Profundidad del fotobiorreactor o recorrido de la luz hasta las células de las microalgas [cm]
N	Nitrógeno
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrógeno
O <sub>2</sub>	Oxígeno
pH	Medida de protones libres
P <sub>mC</sub>	Peso molecular del carbono [g/mol]
P <sub>mCO<sub>2</sub></sub>	Peso molecular del CO <sub>2</sub> [g/mol]
Rn	Radiación solar acumulada en un día [KJ/m <sup>2</sup> ·día],
S	Azufre
Sb	Superficie iluminada de fotobiorreactor por metro cuadrado de suelo ocupado [m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]
SO <sub>x</sub>	Óxidos de azufre
t	Tonelada. 1 t = 1000 Kg
Vb	Volumen de medio de cultivo que tiene el fotobiorreactor por metro cuadrado de suelo ocupado [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ]
ρ <sub>CO<sub>2</sub></sub>	Densidad del CO <sub>2</sub> en condiciones normales [Kg/m <sup>3</sup> ]
ρ <sub>O<sub>2</sub></sub>	Densidad del O <sub>2</sub> en condiciones normales [Kg/m <sup>3</sup> ]

## viii. Bibliografía

- Aslan S., Kapdan I. K., (2006). Batch kinetics of nitrogen and phosphorus removal from synthetic wastewater by algae, *Ecological Engineering*, Volume 28, Issue 1, 64-70, ISSN 0925-8574
- BEFSCI, (2012). Good Environmental Practices in Bioenergy Feedstock Production Making Bioenergy Work for Climate and Food Security. Bioenergy and Food Security Criteria and Indicators project Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2012. ISBN 978-92-5-107148-9. <http://www.fao.org/docrep/015/i2596e/i2596e00.pdf>
- Behrenfeld, M., Prasil, O., Babin, M., Bruyant, F., (2004). In search of a physiological basis for covariations in light-limited and light-saturated photosynthesis. *Journal of Phycology* 40, 4–25.
- Bell M. L., Davis D. L, PlanGouveia N., Borja-Aburto V. H., Cifuentes L. A. (2005). The avoidable health effects of air pollution in three Latin American cities: Santiago, São Paulo, and Mexico City, *Environmental Research*, Volume 100, Issue 3, 431-440,
- Benemann JR. (1997). CO2 mitigation with microalgae systems. *Energy Convers. Mgmt Vol. 38, Suppl.*, pp. S475-S479.
- Bloss W. (2011). Measurement of Air Pollutants, In: Editor-in-Chief: Jerome O. Nriagu, Editor(s)-in-Chief, *Encyclopedia of Environmental Health*, Elsevier, Burlington, 2011, 635-645
- Camacho F, Padiál A, Martínez Sancho M E. (1982). Intensidad media de iluminación en cultivos de *Chlorella pyrenoidosa*. *Anales de Química*, 371-376.
- Chae S.R., Hwang E.J., Shin H.S. (2006). Single cell protein production of *Euglena gracilis* and carbon dioxide fixation in an innovative photo-bioreactor. *Bioresource Technology* 97, 322–329
- Cheng, Y., Zhou, W.G., Gao, C.F., Lan, K., Gao, Y., Wu, Q.Y., (2009). Biodiesel production from Jerusalem artichoke (*Helianthus Tuberosus* L.) tuber by heterotrophic microalgae *Chlorella protothecoides*. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 84, 777–781.
- Chinnasamy, S; Bhatnagar, A; Claxton, R; Das, KC (2010). Biomass and bioenergy production potential of microalgae consortium in open and closed bioreactors using untreated carpet industry effluent as growth medium. *Bioresource Technology*, 101, 6751–6760.
- Chisti Y. (2007) Biodiesel from microalgae, *Biotechnology Advances*, Vol. 25, 294-306
- Chojnacka K, Noworyta A. (2004). Evaluation of *Spirulina* sp. growth in photoautotrophic, heterotrophic and mixotrophic cultures. *Enzyme and Microbial Technology* 34, 461–465
- Doucha J, Straka F, Lívanský K (2005). Utilation of flue gas for cultivation of microalgae (*Chlorella* sp.) in an outdoor poen thin-layer photobioreactor. *Journal of Applied Phycology*. Vol. 17, 403-412
- EEA (2009). Greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2009. Tracking progress towards Kyoto targets. Annex: Additional information on greenhouse gas emission trends and projections. [http://www.eea.europa.eu/publications/eea\\_report\\_2009\\_9/at\\_download/file](http://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2009_9/at_download/file)
- FAO (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO riego y drenaje, nº 56. ISSN 0254-5293

- FAO (2009a). Perfil para el cambio climático. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Rome, 2009. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/012/i1323s/i1323s00.pdf>
- FAO (2009b). El estado de los mercados de productos básicos agrícolas Los precios altos de los alimentos y la crisis alimentaria: experiencias y lecciones aprendidas
- García-Ubaque J.C., García-Ubaque C.A., Vaca-Bohórquez M.L. (2011). Medical consultation in productive age population related with air pollution levels in Bogota city, *Procedia Environmental Sciences*, Volume 4, 2011, 165-169
- Gouveia, L., Oliveira, A.C., (2009). Microalgae as a raw material for biofuels production. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 36, 269–274.
- Illman A.M., Scragg A.H., Shales S.W. (2000). Increase in *Chlorella* strains calorific values when grown in low nitrogen medium. *Enzyme and Microbial Technology* 27, 631-635
- IPCC, 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs. [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr\\_sp.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf)
- Lardon L., Hlias A., Sialve B., Steyer J.-P., Bernard O. (2009) Life-Cycle Assessment of Biodiesel Production from Microalgae, *Environmental Science & Technology* Vol. 17, 6475-6481
- Lee, PG. (1995). A review of automated control systems for aquaculture and design criteria for their implementation. *Aquacultural Engineering*, 14, 3, 205-227.
- Lixian Xu, Derk W.F. (Wim) Brilman, Withag J.A.M., Brem G., Kersten S., (2011). Assessment of a dry and a wet route for the production of biofuels from microalgae: Energy balance analysis. *Bioresource Technology*, Volume 102, Issue 8, 5113-5122.
- MacIntyre H.L., Kana T.M., Anning T., Geider R. J. (2002). Photoacclimation of photosynthesis irradiance response curves and photosynthetic pigments in microalgae and cyanobacteria, *Journal of Phycology*, Vol. 38, 17–38
- Maeda I., Owadai M., N. Kimura. K. Omata, I. Karubd. (1995). CO<sub>2</sub> fixation from the flue gas on coal-fired thermal power plant by microalgae. *Energy Convers. Mgmt* Vol. 36, 717-720.
- Mandeno G., Craggs R., Tanner C., Sukias J., Webster-Brown J. (2009) Potential biogas scrubbing using a high rate pond. *Water Sci Technol.* Vol. 12, 253-6.
- Mann JE, Myers J. (1968) On pigments, growth and photosynthesis of *Phaeodactylum tricornutum*. *Journal of Phycology*, 4: 349–355
- MARM (2008). Programa de acción nacional contra la desertificación. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Agosto 2008.
- Martínez M E, Camacho F, Jiménez J M, Espinola J B. (1996). Influence of light intensity on the kinetic and yield parameters of *Chlorella pyrenoidosa* mixotrophic growth. *Process Biochemistry*, Vol. 32, No. 2, pp. 93-98, 1997
- Mata M. T, Martinsa A., y. S. Caetanob, S. (2009). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 14, Issue 1, 217-232,
- Michiki H (1995). Biological CO<sub>2</sub> Fixation and Utilization Project. *Energy Conversion. Mgmt* Vol. 36, No. 6-9. pp 701-705.
- Molina Grima E, Ación Fernández FG, García Camacho F, Camacho. Rubio F, Chisti Y. (2000) Scale-up of tubular photobioreactors. *Journal of Applied Phycology* 12: 355-368.



- Ogbonna J C, Yada H, Tanaka H (1995). Kinetic Study on Light-Limited Batch Cultivation of Photosynthetic Cells. *Journal of fermentation and bioengineering*. Vol. 80, No. 3, 259-264.
- Olaizola M. (2003) Commercial development of microalgal biotechnology: from the test tube to the marketplace. *Biomol Eng*, Vol. 20, 459–66.
- Packer, A., Li, Y., Andersen, T., Hu, Q., Kuang, Y., Sommerfeld, M., 2010. Growth and neutral lipid synthesis in green microalgae: a mathematical model. *Bioresource Technology*. 102, 111–117.
- Platt, T., Irwin B. (1973) *Limnol. Oceanografic*. Vol.18: 306-310. Caloric content of phytoplankton
- Quinn J., Winter L., Bradley T. (2011), Microalgae bulk growth model with application to industrial scale systems, *Bioresource Technology*, Volume 102, Issue 8, 5083-5092
- Rodolfi L., Zittelli G.C., Bassi N., Padovani G., Biondi N., Bonini G. and Tredici M.R., (2009). Microalgae for oil: strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost photobioreactor, *Biotechnology*. *Bioenergy*. 100–112.
- Sada E, Katoh S, Kheirilomoon A, Hi Yokoi A. (1988). Effects of Light Intensity on the Growth Rate of the Red Alga *Porphyridium cruentum*. *Journal of Fermentation and Bioengineering*. Vol. 67, No. 2, 135-137.
- Sakshaug, E., Bricaud, A., Dandonneau, Y., Falkowski, P., Kiefer, D., Legendre, L., Morel, A., Parslow, J., Takahashi, M., (1997). Parameters of photosynthesis: definitions, theory and interpretation of results. *Journal of Plankton Research* 19, 1637–1670.
- Scragg A.H., Illman A.M., Carden A., Shales S.W. (2002). Growth of microalgae with increased caloric values in a tubular bioreactor. *Biomass and Bioenergy*, 23, 67 – 73
- Stoate C., Báldi A., Beja P., Boatman N.D., Herzon I., van Doorn A., de Snoo G.R., Rakosy L., Ramwell C.,(2009). Ecological impacts of early 21st century agricultural change in Europe – A review, *Journal of Environmental Management*, Volume 91, Issue 1, 22-46
- Talbot P. Thiébault J M, Dauta A, De La Noué J. (1991). A comparative study and mathematical modeling of temperature, light and growth of three microalgae potentially useful for wastewater treatment. *Water Resource*. Vol. 25, No. 4, pp. 465-472
- Travieso L., Benitez F., Dupeiron R. 1993. Sewage treatment using immobilized microalgae. *Bioresource Technology*, Volume 40, Issue 2,: 183-187
- Wang B., Li Y., Wu N., Lan C.Q. 2008. CO2 bio-mitigation using microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 79: 707-718.
- Williams B., Laurens M. L. (2010). Microalgae as biodiesel & biomass feedstocks: Review & analysis of the biochemistry, energetics & economics. *Energy & Environmental Science* 3, 554–590
- Xiong, W., Li, X.F., Xiang, J.Y., Wu, Q.Y., (2008). High-density fermentation of microalga *Chlorella protothecoides* in bioreactor for microbio-diesel production. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 78, 29–36.
- Xu, H., Miao, X.L., Wu, Q.Y., (2006). High quality biodiesel production from a microalga *Chlorella protothecoides* by heterotrophic growth in fermenters. *Journal Biotechnol.* 126, 499– 507.
- Yoo, C., Jun, S.Y., Lee, J.Y., Ahn, C.Y., Oh, H.M., (2010). Selection of microalgae for lipid production under high levels carbon dioxide. *Bioresource Technology*. 101, S71–S74.

- Zhang Q, Ma J., Qiu G., Li L., Geng S., Hasi E., Li C., Wang G., Li X. (2012). Potential energy production from algae on marginal land in China, *Bioresource Technology*, Volume 109, 252-260.
- Ziegler H, Ehrendorfer F, Bresinsky A. (2002). Strasburger. *Tratado de Botánica*. Ed. 33<sup>a</sup>, castellano. Pag 295-296.