

# SEGURIDAD HÍDRICA



JOAQUÍN MELGAREJO MORENO  
M<sup>a</sup> INMACULADA LÓPEZ ORTIZ  
PATRICIA FERNÁNDEZ ARACIL



# SEGURIDAD HÍDRICA



© los autores, 2023  
© de esta edición: Universitat d'Alacant  
ISBN: 978-84-1302-234-5

Reservados todos los derechos. No se permite reproducir, almacenar en sistemas de recuperación de la información, ni transmitir alguna parte de esta publicación, cualquiera que sea el medio empleado -electrónico, mecánico, fotocopia, grabación, etcétera-, sin el permiso previo de los titulares de la propiedad intelectual.

# TABLA DE CONTENIDO

## BLOQUE I - PLANIFICACIÓN

<b>Consideraciones ambientales con relación a la aprobación del Plan Hidrológico del Tajo de Tercer Ciclo 2022-2027 y el Traspase Tajo-Segura</b> José Navarro Pedreño.....	19
<b>Planificación Hidrológica: información, participación y evaluación ambiental estratégica</b> Ángel Ruiz de Apodaca Espinosa .....	39
<b>Representación espacio-temporal del riesgo de inundación a partir de las indemnizaciones del seguro de riesgos extraordinarios</b> Francisco Espejo Gil, Urko Elozegi Gurmendi.....	59
<b>La desalación en la estrategia de seguridad hídrica. Implicaciones económicas y ambientales</b> Alberto del Villar García.....	73
<b>La desalación en la provincia de Almería: garantía para el abastecimiento y el regadío</b> Francisco Javier Alcántara Pérez .....	93
<b>Mejorar la resiliencia ante las inundaciones en la Vega Baja (España). Propuesta didáctica en bachillerato</b> Ángela del Carmen Zaragoza, Álvaro-Francisco Morote, María Hernández Hernández.....	105
<b>Resignificando la ciudad como biotopo humano</b> Javier Eduardo Parada Rodríguez, Liliana Romero Guzmán, Jesús Enrique De Hoyos Martínez .....	117
<b>Gestión del agua y saneamiento básico en una reserva de desarrollo sostenible: comunidad de Nossa Senhora do Livramento do Tupé, Brasil</b> Antonio Jorge Barbosa da Silva Maria Claudia da Silva Antunes de Souza .....	133
<b>Proposición de una metodología para estimar la erosión del suelo en viticultura mediante ISUM (Improved Stock Unearthing Method). Un caso en el viñedo leonés</b> Antonio Jódar-Abellán, Marta García-Fernández, Susana García-Pisabarro, Jesús Rodrigo-Comino .....	141
<b>Estimación de la disponibilidad y seguridad hídrica bajo escenarios de cambio climático en una cuenca hidrológica agro-forestal del sureste de España</b> Antonio Jódar-Abellán, Dámaris Núñez-Gómez, Efraín Carrillo-López, Ryan T. Bailey, Pablo Melgarejo .....	151
<b>Determinación del umbral de escorrentía y disponibilidad hídrica de la cuenca hidrográfica del río Jubones, Ecuador</b> Paolo Brazales Cervantes, Seyed Babak Haji Seyed Asadollah, Antonio Jódar-Abellán.....	163
<b>Análisis del umbral de escorrentía de la cuenca del río Obispo, en la provincia del Carchi (Ecuador)</b> Pablo David Viera Ríos, Derdour Abdessamed, Antonio Jódar-Abellán.....	175
<b>El acuífero del Peñón (Alicante): un pequeño acuífero kárstico</b> Víctor Sala Sala, José Miguel Andreu Rodes, Miguel Fernández Mejuto, Ernesto García Sánchez.....	185

**¿Se observan cambios en la precipitación que afecten al Acuífero del Ventós (provincia de Alicante)?**

José Miguel Andreu Rodes, Igor Gómez Domenech, Miguel Fernández-Mejuto, Juan Bellot Abad .....197

**Revisión de las políticas de modernización de regadíos en la Comunidad Valenciana. La estrategia valenciana de regadíos 2020-2040**

David Sancho-Vila, Marta García-Mollá .....207

**El impacto del proyecto europeo ARSINOE en la gestión del acuífero de la isla de El Hierro (Canarias)**

Juan C. Santamarta, Noelia Cruz-Pérez, Joselin S. Rodríguez-Alcántara, Alejandro García-Gil, Miguel Á. Marazuela, Carlos Baquedano, Jesica Rodríguez Martín, Luis Fernando Martín Rodríguez ..... 219

**BLOQUE II - INFRAESTRUCTURAS**

**Reutilización de aguas regeneradas en la cuenca del segura. Adaptación al reglamento (UE) 2020/741: retos y oportunidades**

Sonia M. Hernández López, José Carlos González Martínez .....231

**Caracterización hidrológica de los caudales ecológicos mínimos en España**

Luis Garrote de Marcos ..... 249

**Sobrevvertido en presas de hormigón. Evaluación de las acciones hidrodinámicas**

Luis G. Castillo Elsitdié, José M. Carrillo Sánchez, Juan T. García Bermejo ..... 269

**Consideraciones sobre la estimación de hidrogramas de rotura de presas**

Luis Altarejos García ..... 295

**La seguridad de las infraestructuras hidráulicas**

Francisco Javier Flores Montoya .....315

**La ordenación del territorio y la planificación hidrológica al servicio de la seguridad hidráulica y energética**

Francisco Javier Flores Montoya .....325

**La evolución de los servicios urbanos del agua en Madrid: un servicio de alta calidad**

Ignacio Lozano Colmenarejo .....345

**BALTEN: el agua regenerada como garantía de suministro de agua de riego en Tenerife**

Ana Sánchez Espadas, Jesús Rodríguez Martí .....363

**El sector del agua urbana frente a las nuevas exigencias legislativas para mantener la seguridad hídrica**

Carmen Hernández de Vega, Alicia Ayuso Solís .....381

**El abastecimiento de la ciudad de Ávila: retos y soluciones científico-técnicas**

José Luis Molina González, Jorge Mongil Manso ..... 399

**El Consorcio de Aguas de la Marina Baja: un ejemplo de economía circular en la garantía del abastecimiento urbano ante el reto continuo de las sequías**

Jaime Berenguer Ponsoda .....409

**Gestión activa de sistemas de abastecimiento mediante el empleo de sistemas multiagente (MAS) para la sostenibilidad**

Carlos Calatayud Asensi, José Vicente Berná Martínez, Vicente Javier Macián Cervera, Lucía Arnau Muñoz .....439

**La gestión municipal del ciclo urbano del agua digitalizado**

Rosa Rozas Torrente, M<sup>a</sup> José Moya Llamas, Arturo Trapote Jaume .....451

<b>Microsectorización dinámica redes de distribución de agua</b> Arturo Albaladejo Ruiz.....	463
<b>Uso de compuertas en redes de drenaje para reducir inundaciones</b> Leonardo Bayas-Jiménez .....	477
<b>Detección y monitoreo de aguas superficiales en la región semiárida brasileña a partir de datos orbitales de sensores remotos</b> Izaias de Souza Silva.....	487

### **BLOQUE III - EVALUACIÓN SOCIOECONÓMICA Y JURÍDICA**

<b>La inseguridad hídrica del informe del Consejo Nacional del Agua sobre el recorte del travase Tajo-Segura</b> Miguel Ángel Blanes Climent.....	499
<b>El necesario impulso a las centrales hidroeléctricas reversibles como contribución a la seguridad energética nacional: algunas cuestiones jurídicas</b> Estanislao Arana García .....	511
<b>Políticas públicas para la mitigación del impacto del cambio climático sobre los aprovechamientos energéticos</b> Jesús Conde Antequera .....	529
<b>La legislación contra el cambio climático y la transición a una economía descarbonizada desde una doble perspectiva: ambiental y social</b> José Esteve Pardo.....	549
<b>Huella hídrica y financiación sostenible</b> Domingo Zarzo Martínez, Mercedes Calzada Garzón, Patricia Terrero Rodríguez.....	559
<b>¿Estamos sobreestimando los recursos de agua regenerada? Una ducha fría con la realidad hidro-económica</b> Julio Berbel, Esther Díaz-Cano, Alfonso Expósito .....	577
<b>Taxonomía de los instrumentos económicos aplicados para la gestión sostenible del agua</b> Nazaret M <sup>a</sup> Montilla López, Esther Díaz-Cano y Julio Berbel.....	597
<b>Seguridad hídrica y objetivos del PNIEC desde una perspectiva jurídica</b> José Antonio Blanco Moa .....	613
<b>SIAGES: un innovador sistema integrado de apoyo a la gestión del agua</b> Alberto Esteban Barrera García, Álvaro Rodríguez García, Ramón Bella Piñeiro, Jose Pablo Ormaechea, Luis José Ruiz Aznar, Abel Solera Solera et al., Manuel Argamasilla Ruiz, Lupicino García Ortiz.....	631
<b>Crisis energética y equilibrio económico financiero en la contratación pública</b> Esteban Arimany Lamoglia .....	643
<b>Garantía del abastecimiento en el Sureste español: la Mancomunidad de los Canales del Taibilla</b> Patricia Fernández Aracil, M <sup>a</sup> Inmaculada López Ortiz, Joaquín Melgarejo Moreno.....	655
<b>La evaluación de impacto ambiental de proyectos hidráulicos ¿lo estamos haciendo bien?</b> Carlos Martín Cantarino.....	677



<b>La seguridad energética y el autoconsumo fotovoltaico como herramienta para la seguridad hídrica</b>	
Marcos García-López, Joaquín Melgarejo .....	695
<b>Seguridad hídrica y equilibrio ecológico en el parque natural «El Hondo»: visión histórico-jurídica</b>	
Francisco José Abellán Contreras .....	709
<b>Los trasvases en tiempos de seguridad hídrica</b>	
Paul Villegas Vega .....	723
<b>Vulnerabilidad e incidencia de la pobreza hídrica en Alicante</b>	
Ricardo Abad Coloma .....	735
<b>Asequibilidad al agua urbana y pobreza hídrica en ciudades del Norte global: el caso de Alicante</b>	
Luis E. Zapana Churata, Rubén A. Villar Navascués, María Hernández Hernández, Antonio M. Rico Amorós .....	745
<b>Políticas públicas de ayudas para la mejora, modernización e innovación en el regadío de la Región de Murcia</b>	
Ramón Martínez Medina, Encarnación Gil Meseguer, José María Gómez-Gil, José María Gómez Espín .....	759
<b>O reflexo das <i>fake news</i> frente a crise ambiental: uma reflexão necessária nos dias atuais</b>	
Aline Hoffmann, Liton Lanes Pilau Sobrinho .....	773
<b>Apontamentos sobre o pagamento por serviços ambientais</b>	
André Luiz Anrain Trentini .....	783
<b>Constitucionalismo das águas – o “aguar” das constituições</b>	
Luciana Pelisser Gottardi Trentini .....	795
<b>Uso sustentável da água: uma definição a partir dos conceitos de segurança hídrica, de eficiência e de sustentabilidade</b>	
Ana Luisa Schmidt Ramos, Alexandre Morais da Rosa .....	805
<b>O regime de responsabilidade penal pela poluição hídrica no Brasil</b>	
Jefferson Zanini, Luiz Antônio Zanini Fornerolli .....	815
<b>Segurança hídrica e seu tratamento jurídico no o regime de responsabilidade penal pela poluição hídrica no Brasil e na Espanha</b>	
Leandro Katscharowski Aguiar .....	827
<b>Debatendo os ODS com base na sustentabilidade e no desenvolvimento sustentável.....</b>	
Denise Schmitt Siqueira Garcia, Heloise Siqueira Garcia .....	837
<b>A falta de efetividade no planejamento da segurança hídrica do Brasil</b>	
Denise Schmitt Siqueira Garcia, Alexandre Waltrick Rates .....	851
<b>Do constitucionalismo ao constitucionalismo global: por uma constituição mundial em defesa de bens fundamentais</b>	
Vanessa Ramos Casagrande .....	863
<b>A dessalinização da água como instrumento de segurança hídrica</b>	
Anaxágora Alves Machado Rates .....	875
<b>A canção dos oceanos</b>	
Paola Fava Saikoski .....	885

<b>Análise da lei de recursos hídricos à luz da responsabilidade do Brasil para com a sustentabilidade e a conscientização ambiental</b>	
Adilor Danieli .....	895
<b>Investigación sobre el río Amarillo en las dinastías Ming y Qing. Comentario sobre la Ley de protección del río Amarillo</b>	
Yang Yang.....	907
<b>Propuesta metodológica para la recolección del etnoconocimiento en la gestión del riesgo de desastre</b>	
Isaleimi Quiguapumbo Valencia, Antonio Aledo Tur.....	919

## **BLOQUE IV - TECNOLOGÍAS**

<b>Nuevo sistema de riego con recuperación de agua y nutrientes</b>	
Pablo Melgarejo, Dámaris Núñez-Gómez, Pilar Legua, Vicente Lidón, Agustín Conesa, Antonio Marhuenda, Juan José Martínez-Nicolás.....	933
<b>Dinapsis: transformación digital para la gestión sostenible del agua y la salud ambiental</b>	
María Tuesta San Miguel.....	953
<b>Los contaminantes emergentes en la reforma de la directiva de aguas residuales</b>	
Daniel Prats Rico.....	959
<b>Fertirrigación y nuevas estrategias como garantía de seguridad hídrica en el regadío</b>	
Alejandro Pérez Pastor y Elisa Pagán Rubio.....	985
<b>La desalación y el hidrógeno</b>	
Alejandro Zarzuela López.....	1005
<b>Análisis regional de la reducción de boro en agua marina desalinizada para el riego agrícola en el sureste español</b>	
Alberto Imbernón Mulero, José Francisco Maestre Valero, Saker Ben Abdallah, Victoriano Martínez Álvarez, Belén Gallego Elvira.....	1021
<b>Impacto ambiental de la reducción del boro del agua de mar desalinizada para el riego en parcela</b>	
Saker Ben Abdallah, Belén Gallego-Elvira, Alberto Imbernón-Mulero, Victoriano Martínez-Alvarez, José Francisco Maestre Valero.....	1031
<b>Modelado cinético del consumo de CO<sub>2</sub> para la cepa Spirulina platensis</b>	
Antonio F. Marcilla Gomis, Inmaculada Blasco López.....	1041
<b>Empleo de filtro verde construido con residuos para reducir el contenido en fósforo en aguas de riego</b>	
Teresa Rodríguez Espinosa, María Belén Almendro Candel, Ana Pérez Gimeno, Iliana Papamichael.....	1055
<b>Tecnologías de oxidación avanzada para la degradación del fármaco carbamazepina: la ozonización</b>	
María José Moya-Llamas, Marta Ferre Martínez, Elizabetha Domínguez Chabaliná, Arturo Trapote Jaime, Daniel Prats Rico.....	1067
<b>Aprendizaje basado en proyectos colaborativos globales en formación profesional: banco de ensayos hidráulicos para la digitalización del agua</b>	
Albert Canut Montalvà, Joaquín Martínez López, Maties Roma mayor, Antonio Oliva Sánchez.....	1079

<b>Reutilización de agua para riego en la ciudad de Murcia. Proyecto LIFE CONQUER</b> Eva Mena Gil, Simón Nevado Santos, Elena de Vicente Aguilar, Adriana Romero Lestido Benoît Fabien Claude Lefèvre.....	1091
<b>Eliminación de microcontaminantes emergentes en lodos de depuradora mediante procesos de oxidación avanzada: peróxido de hidrógeno y ozono</b> Clara Calvo Barahona, Adrián Rodríguez Montoya, María José Moya-Llamas, Arturo Trapote Jaume, Daniel Prats Rico.....	1103
<b>Vigilancia y protección de las aguas superficiales mediante el proyecto WQeMS y los servicios del Copernicus</b> Pablo Cascales de Paz, Eva Mena Gil, Isabel Hurtado Melgar, Laurent Pouget.....	1115
<b>Tratamiento ecológico para la eutrofización y la anoxia en las masas de agua</b> Ricardo Mateos-Aparicio Baixauli.....	1125
<b>Modelado de descarga submarina de salmuera antes y después de la instalación de un difusor</b> Silvano Porto Pereira, José Luís Sánchez-Lizaso, Paulo César Colonna Rosman. Ángel Loya, Iran Eduardo Lima Neto.....	1137
<b>Las sequías en España en el siglo XXI: su influencia en la disminución y cierre de transferencias de agua del acueducto Tajo-Segura y de la conexión Negratín-Almanzora</b> Encarnación Gil Meseguer, Ramón Martínez Medina, José María Gómez-Gil, José María Gómez Espín.....	1147

# Modelado cinético del consumo de CO<sub>2</sub> para la cepa *Spirulina platensis*

**Antonio F. Marcilla Gomis**

[antonio.marcilla@ua.es](mailto:antonio.marcilla@ua.es)

<https://orcid.org/0000-0003-2042-4671>

**Inmaculada Blasco López**

[inma.blasco@ua.es](mailto:inma.blasco@ua.es)

<https://orcid.org/0009-0003-4689-3203>

Instituto Universitario de los Procesos Químicos,  
Universidad de Alicante, España

## RESUMEN

La eutrofización es el proceso de contaminación más importante de las aguas en ríos, lagos, embalses y mares. Este proceso, inducido principalmente por la actividad del hombre (vertidos domésticos e industriales), provoca un exceso de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, en las aguas. Las microalgas se presentan como una alternativa eficaz para la eliminación de estos nutrientes con un bajo coste con respecto a otras tecnologías que se utilizan para tratar aguas residuales. La actividad fotosintética y la productividad son parámetros clave que deben controlarse para una producción exitosa de microalgas. Es por ello que, en este trabajo se plantea un modelo cinético para la cepa *Spirulina platensis* que permite conocer los valores de concentración microalgal mediante el control continuo del pH y la temperatura del reactor. El modelo cinético desarrollado ha permitido conocer con éxito la concentración de biomasa en el reactor.

## 1. INTRODUCCIÓN

El concepto de eutrofización está definido como “enriquecimiento excesivo de la concentración de nutrientes en las aguas” según el Real Decreto 47/2022 de 18 de enero (Ministerio de la Presidencia Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática, 2020) y representa uno de los principales problemas en la gestión de las aguas superficiales y una amenaza grave para la salud y los ecosistemas hídricos de todo el mundo. Esta directiva establece niveles de vertido de nitrógeno y fósforo muy estrictos cuando se vierte en zona sensible. La reducción en el uso de compuestos nitrogenados y fosforados, seguido de la disminución de la concentración de éstos en efluentes de depuradoras de aguas residuales mediante tratamientos adecuados son medidas para frenar la eutrofización de los sistemas acuáticos a nivel global. Mientras tanto, la tecnología de microalgas para la eliminación de nitrógeno y fósforo es una alternativa potencial que comienza a dar buenos resultados (Ruiz et al., 2011).

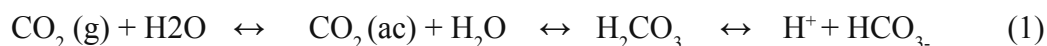
## 1.1. Microalgas

El cultivo de microalgas tiene aplicaciones prácticas significativas a corto plazo ya que permite eliminar nutrientes como nitrógeno y fósforo de manera eficiente y por tanto podría considerarse un método efectivo para el tratamiento terciario de aguas residuales. En la bibliografía aparecen numerosos ejemplos donde el uso de microalgas en fotobiorreactores ha permitido reducir nitrógeno y/o fósforo con valores superiores al 90% (Bandara et al., 2022; Sánchez-Zurano et al., 2021). En comparación con los actuales procesos convencionales, con el cultivo de microalgas se genera biomasa susceptible de convertirse en materia prima para la producción de una elevada variedad de combustibles biológicos, tales como biogás, biodiesel o biohidrógeno (Chandrasekhar et al., 2022; Zhou et al., 2022). Esta tecnología también permitiría el reciclaje de los nutrientes como fertilizantes con importantes beneficios ambientales y económicos. Sin embargo, todavía requiere un esfuerzo considerable en investigación que facilite el avance científico y tecnológico, para pasar de las plantas piloto a escala comercial.

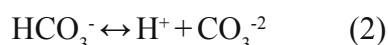
## 1.2. Modelos cinéticos

Los modelos cinéticos son una herramienta muy útil para el estudio de la productividad de microalgas, ya que proporcionan una base para el diseño de reactores y permiten mejorar los procesos y determinar las condiciones óptimas para el desarrollo de las microalgas.

Durante la fase luminosa de la fotosíntesis las microalgas asimilan el CO<sub>2</sub>. El dióxido de carbono al disolverse en agua forma moléculas de ácido carbónico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Este ácido se encuentra en una fracción 1000 veces menor que el CO<sub>2</sub> disuelto debido a que en el agua se disocia con gran facilidad en protones (H<sup>+</sup>) e iones bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), como se muestra en la ecuación 1 (García-Gozalbes et al., 2015):



A su vez, el ion bicarbonato en presencia de agua se disocia en protones (H<sup>+</sup>) e iones carbonato (CO<sub>3</sub><sup>-2</sup>), según la ecuación 2:



De este modo, cuando un cultivo de microalgas se encuentra en fase exponencial de crecimiento el consumo de carbono inorgánico disuelto (CID), bien en forma de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> o CO<sub>3</sub><sup>-2</sup> provoca un desplazamiento de los equilibrios indicados en las ecuaciones (1) y (2) hacia una reducción de protones (H<sup>+</sup>) y, en consecuencia, un aumento del pH. La mayoría de las especies de microalgas presentan un pH óptimo alrededor de la neutralidad, sin embargo, *Spirulina platensis* lo tiene alrededor de nueve.

En un cultivo discontinuo la curva de crecimiento de microorganismos más frecuente se muestra en la Figura 1, donde se contemplan 4 etapas principales: una etapa de adaptación del cultivo (o fase de latencia), una etapa de crecimiento exponencial, una fase estacionaria y una fase de muerte del cultivo.

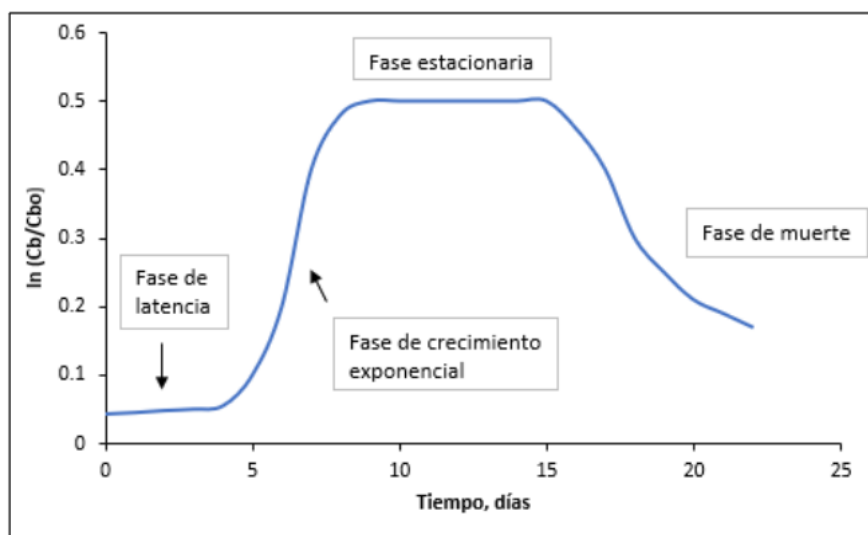


Figura 1. Crecimiento celular en discontinuo. Fuente: Bustamante (2018).

La temperatura, la disponibilidad de luz y concentración de nutrientes son parámetros críticos de producción de microalgas que deben dominarse para optimizar la actividad fotosintética y la productividad de los cultivos de microalgas. Una de las principales preocupaciones a la hora de modelar datos experimentales concurre en elegir el modelo teórico que mejor se ajusta ya que, dependiendo de la cepa seleccionada, así como los parámetros que afecten a la velocidad de crecimiento de la biomasa un modelo será más eficiente frente a otro.

## 2. CONDICIONES EXPERIMENTALES

Los experimentos se han llevado a cabo en el interior de una sala cerrada en un ambiente controlado para evitar la contaminación externa. La sala dispone de un equipo de refrigeración/calefacción que permite regular la temperatura de la misma. Los fotobiorreactores (FBR, Figura 2) son de diseño propio, tienen una capacidad volumétrica de 5 L, están fabricados con metacrilato y tienen un sistema de burbujeo (tubo de caucho microporoso por el que se inyecta aire del exterior filtrado por un filtro HEPA) que permite la agitación continua de la biomasa. Este sistema tiene dos objetivos principales: eliminar el oxígeno generado durante el proceso de fotosíntesis de las microalgas y mejorar la exposición lumínica y evitar el proceso de fotoinhibición. Los FBR están monitorizados con una sonda tipo Pt100 y permiten el registro continuo de temperatura y pH. Cada reactor está rodeado por 4 tubos de luz tipo LED (T8 8 W, 60 cm, PLANT GROW Full Spectrum) con un fotoperiodo de luz/oscuridad 16/8 horas.

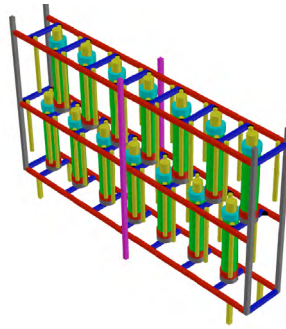


Figura 2. Estructura de los FBR en el interior de la sala. Fuente: elaboración propia.

### 3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1. Química de equilibrio de carbonatos y balance de carbono inorgánico disuelto

El burbujeo aplicado al FBR hace que el cultivo está bien mezclado y que los perfiles de pH obtenidos con la sonda de pH sean los correspondientes a todo el cultivo de microalgas. El aire inyectado procede del exterior y por tanto contiene la concentración de  $\text{CO}_2$  propia del aire, que podrá estar o no en equilibrio con el medio dependiendo de la concentración de carbonatos y bicarbonatos del mismo. Si la concentración en el interior del reactor es mayor que la del  $\text{CO}_2$  en equilibrio, se estaría eliminando del medio, mientras que si fuese inferior se estaría aportando.

Teniendo en cuenta la química de equilibrio de carbonatos, es posible correlacionar los perfiles de pH con el carbono inorgánico presente en los medios de cultivo y, por lo tanto, utilizar este método para monitorear la tasa de absorción de carbono inorgánico por las microalgas. El equilibrio utilizado para este estudio y los valores de las constantes de equilibrio son los mismos que los utilizados por Brune y Novak (Brune & Novak, 1981) y Camacho Rubio (Camacho et al., 1999).

Los equilibrios que relacionan el ácido carbónico, dióxido de carbono, y los iones carbonato y bicarbonato se han descrito en la introducción. Estos equilibrios están regidos por las siguientes ecuaciones:

$$K_{\text{CO}_2} = \frac{[\text{CO}_2]}{f_{\text{CO}_2}} = 10^{-(0,0125T+1,1384)} \quad (3)$$

$$K_1 = \frac{[\text{HCO}_3^-][\text{H}^+]}{[\text{CO}_2]} = 10^{-(0,000139T^2-0,012595T+6,577891)} \quad (4)$$

$$K_2 = \frac{[\text{CO}_3^{2-}][\text{H}^+]}{[\text{HCO}_3^-]} = 10^{-(0,000119T^2-0,014808T+10,626251)} \quad (5)$$

En la Tabla 1 se muestran los valores de las constantes anteriores (pK) para un rango de temperaturas de 0 a 45 °C.

T (°C)	pKCO <sub>2</sub>	pK <sub>1</sub>	pK <sub>2</sub>
0	1,11	6,58	10,63
5	1,19	6,52	10,55
10	1,27	6,46	10,49
15	1,34	6,42	10,43
20	1,41	6,38	10,38
25	1,47	6,35	10,33
30	1,52	6,33	10,29
45	1,67	6,29	10,20

Tabla 1. Valores de pK de los equilibrios del CO<sub>2</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> de 0 a 45 °C. Fuente: Virtual, Agua, & Módulo (n.d.) bicarbonato.

Estos valores se han ajustado a las correspondientes ecuaciones con un coeficiente de correlación superior a 0,999:

$$pK_{CO_2} = 0,0125 t + 1,1384 \quad (6)$$

$$pK_1 = 0,000139 t^2 - 0,012595t + 6,577891 \quad (7)$$

$$pK_2 = 0,000119 t^2 - 0,0114808t + 10, \quad (8)$$

Lo mismo ocurre con el equilibrio químico del agua (Tabla 2).

T (°C)	pK <sub>w</sub>
0	14,80
10	14,40
20	14,05
30	13,70
40	13,45

Tabla 2. Valores de pK<sub>w</sub> para el equilibrio del agua de 0 a 40°C. Fuente: Johnstone (2007).

$$pK_w = 0,000214T^2 - 0,042571T + 14,802857 \quad (9)$$

El carbono inorgánico presente en el cultivo de microalgas se puede expresar como:

$$[C_{Total}] = [CO_2] + [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}] \quad (10)$$



Despejando la concentración del  $CO_2$  de (4) y la concentración del  $CO_3^{-2}$  (5) y sustituyendo (10) se obtiene que:

$$C_{Total} = HCO_3^- \left[ 1 + \frac{H^+}{K_1} + \frac{K_2}{H^+} \right] = HCO_3^- \alpha_1 \quad (11)$$

Despejando el  $HCO_3^-$  de (11) y sustituyéndolo en (5) se obtiene:

$$C_{Total} = CO_3^{-2} \left[ 1 + \frac{H^+}{K_2} + \frac{H^2}{K_1 K_2} \right] = CO_3^{-2} \alpha_2 \quad (12)$$

Teniendo en cuenta la definición de alcalinidad para el medio de cultivo, se puede escribir:

$$[Alcalinidad] = [HCO_3^-] + 2[CO_3^{=}] + [OH^-] - [H^+] \quad (13)$$

Despejando el  $[HCO_3^-]$  de la ecuación 9 y  $[CO_3^{-2}]$  de la (10) y sustituyendo en (11):

$$[C_{Total}] = \frac{[Alcalinidad] - [OH^-] + [H^+]}{(\alpha_1 + 2\alpha_2)} \quad (14)$$

Donde  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  vienen dados por las siguientes ecuaciones:

$$\alpha_1 = \left( 1 + \frac{K_2}{[H^+]} + \frac{[H^+]}{K_1} \right)^{-1} \quad (15)$$

$$\alpha_2 = \left( 1 + \frac{[H^+]^2}{K_2 K_1} + \frac{[H^+]}{K_2} \right)^{-1} \quad (16)$$

Estas expresiones permiten obtener la evolución del carbono inorgánico en el cultivo conociendo la alcalinidad y los perfiles de pH. En nuestro caso, la alcalinidad en los medios de cultivo no cambia como resultado de la inyección de  $CO_2$  o el consumo del mismo por las microalgas o la extracción por el aire inyectado en el fotobiorreactor (Wolf-Gladrow et al., 2007).

La evolución del carbono inorgánico disuelto en los medios de cultivo durante la elevación del pH observada en el perfil de pH puede asociarse al consumo fotosintético de  $CO_2$  y al posible arrastre de  $CO_2$ , por lo que se puede escribir la siguiente expresión (Valdés et al., 2012):

$$\frac{d[C_{Total}]}{dt} = K_L a ([CO_2^*] - [CO_2]) + R_{fotosíntesis} \quad (17)$$

donde  $K_L a$  ( $h^{-1}$ ) es el coeficiente volumétrico global de transferencia de masa para el  $CO_2$ ;  $[CO_2^*]$  ( $mol \cdot L^{-1}$ ) representa la concentración de saturación de  $CO_2$  en la fase líquida y  $R_{fotó-síntesis}$  ( $mol CO_2 \cdot L^{-1} \cdot h^{-1}$ ) representa la tasa de consumo de  $CO_2$  por la actividad fotosintética de las microalgas.

La se puede calcular utilizando la solubilidad en  $CO_2$  de la constante de Henry (H) en agua y la presión parcial de  $CO_2$  en el aire inyectado en el reactor:

$$\boxed{[CO_2^*] = \frac{P_{CO_2}}{H}} \quad (18)$$

La constante de Henry para la solubilidad del  $CO_2$  en agua de mar se puede calcular en función de la salinidad y la temperatura (Millero, 1995). Las diferentes expresiones obtenidas revelan que los perfiles de pH monitorizados durante el crecimiento de microalgas podrían utilizarse para evaluar el consumo de  $CO_2$  en el fotobiorreactor de columna de burbujas.

### 3.2. Medición del coeficiente volumétrico global de transferencia de masa para el $CO_2$

Como se ha comentado anteriormente para obtener información sobre las relaciones de arrastre de  $CO_2$  y consumo fotosintético de  $CO_2$ , es necesario estimar el coeficiente de transferencia de masa volumétrica global para  $CO_2$ . Esta estimación se puede obtener utilizando la información de los perfiles de pH en el fotobiorreactor. De hecho, Hill (2006) desarrolló un método que utiliza el perfil de pH y los perfiles de dióxido de carbono medidos experimentalmente para calcular los coeficientes volumétricos generales de transferencia de masa en un reactor de mezcla completa (Hill, 2006). En este caso, se está burbujando un caudal constante de aire comprimido (entre 0,5 y 1 L/min dependiendo de la cepa utilizada) con la concentración de dióxido de carbono del aire, del orden del 0,035% en volumen. Dependiendo del medio de cultivo utilizado se pueden presentar distintos comportamientos, como se describen a continuación.

En el caso de utilizar el medio Zarrouk (medio característico para el crecimiento de *Spirulina platensis*), al disponer de una concentración elevada de iones bicarbonato y carbonato, el medio está fuertemente tamponado. Por ello, al analizar los resultados de un blanco donde se ha puesto en funcionamiento un reactor con el medio de cultivo, sin siembra y el mismo caudal de burbujeo, se ha obtenido la siguiente evolución del pH y la temperatura en función del tiempo y de los ciclos de luz. La Figura 3 muestra los datos de pH y T en función del tiempo, para un experimento con medio Zarrouk que duró 7 días, donde se han resaltado los días 2 y 3. Las zonas amarillas corresponde con la franja horaria en la que las luces están encendidas y las grises cuando están apagadas.

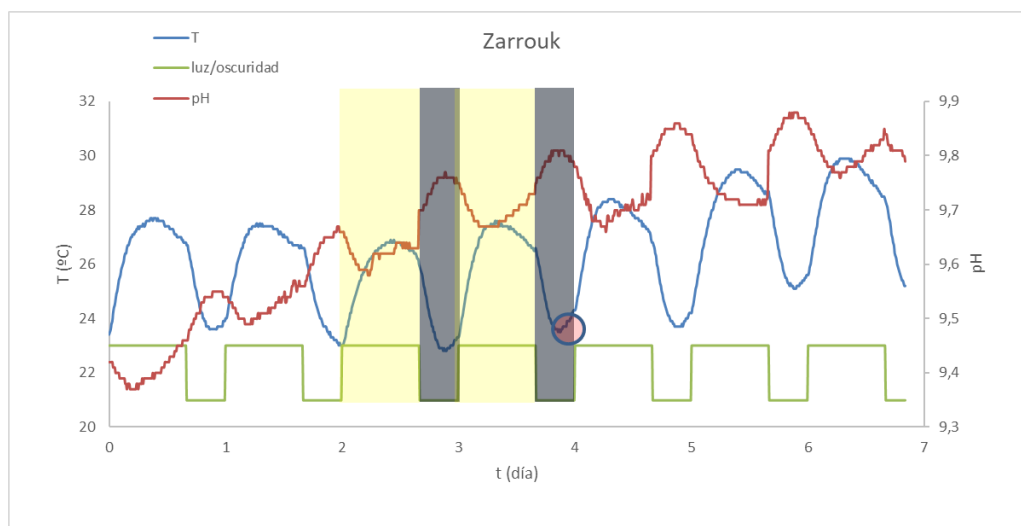


Figura 3. Evolución del pH, temperatura y ciclos de luz/oscuridad para el medio de cultivo Zarrouk sin microalga. Fuente: elaboración propia.

La evolución de la temperatura responde a varios procesos superpuestos. Los reactores se encuentran en una sala acondicionada con un cierto control de temperatura, de modo que cuando esta sube o baja de unos determinados valores se activa el sistema de control añadiendo aire frío o caliente para equilibrar. Estas fluctuaciones se deben a los ciclos de temperatura diarios, así como al aumento de temperatura provocado por la iluminación de los reactores. En los dos ciclos mostrados en la Figura 3 se puede observar un aumento de temperatura debido a la iluminación durante el primer periodo de luz. Se observa que una vez superado el valor de consigna actúa el sistema de refrigeración de la cámara, provocando un descenso de la temperatura en el periodo de iluminación. Cuando se interrumpe la iluminación se produce un descenso de la temperatura, pero la temperatura ambiente provoca de nuevo el aumento a partir de aproximadamente las 12 h (todavía en el periodo de oscuridad, que se ha señalado con el círculo en rojo al final del tercer día). Evidentemente, cuando se conectan las luces se produce un aumento de temperatura mucho más marcado, debido al aumento de temperatura ambiente y al calor desprendido por la iluminación.

Respecto al pH, se puede observar, en general un incremento del pH con el tiempo. Este incremento se debe a la eliminación de  $\text{CO}_2$  por la corriente de aire, ya que la disolución contiene una concentración en exceso a la del equilibrio con el aire que se está utilizando. Ahora bien, sobre esta evolución global, se observan unos ciclos sincronizados con la temperatura del medio. La temperatura afecta a todos los parámetros implicados en el proceso, tanto las constantes de los equilibrios implicados como a la solubilidad del  $\text{CO}_2$  en el medio. Por ello, para la simulación de estas evoluciones se han ajustado las constantes con la temperatura, como se mostrará posteriormente, y se ha comentado en el apartado anterior. Además, las sondas de pH proporcionan valores del mismo que dependen de la temperatura, lo que también afecta a los perfiles determinados, debiendo calibrar las sondas para corregir el pH medido. En la Figura 4 se muestra la representación gráfica del calibrado utilizando un tampón de pH 10 que es el más próximo al del medio de cultivo utilizado. Se puede observar que el pH registrado por la sonda disminuye con la temperatura.

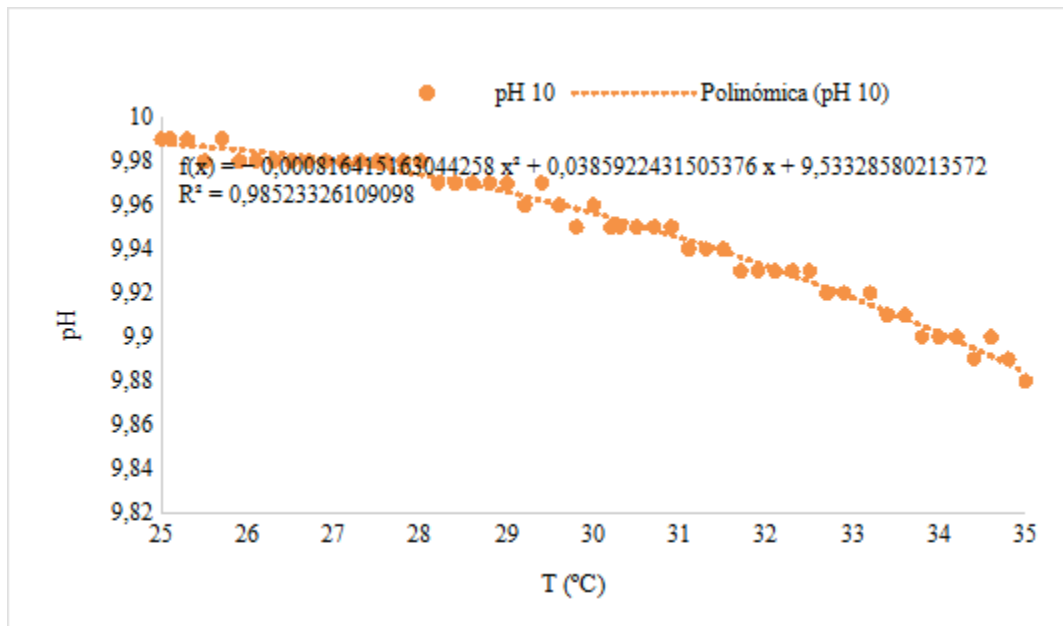


Figura 4. Calibrado de la sonda de pH. Fuente: elaboración propia.

Los datos experimentales para el ensayo que no contiene biomasa muestran que el pH aumenta ligeramente a lo largo del experimento y que además tiene comportamiento sinusoidal como se comentaba anteriormente. Sin embargo, se ha preferido simplificar los cálculos y calcular el  $\text{CO}_2$  de saturación utilizando la regresión polinómica obtenida para la curva de pH (línea punteada naranja de la Figura 5).

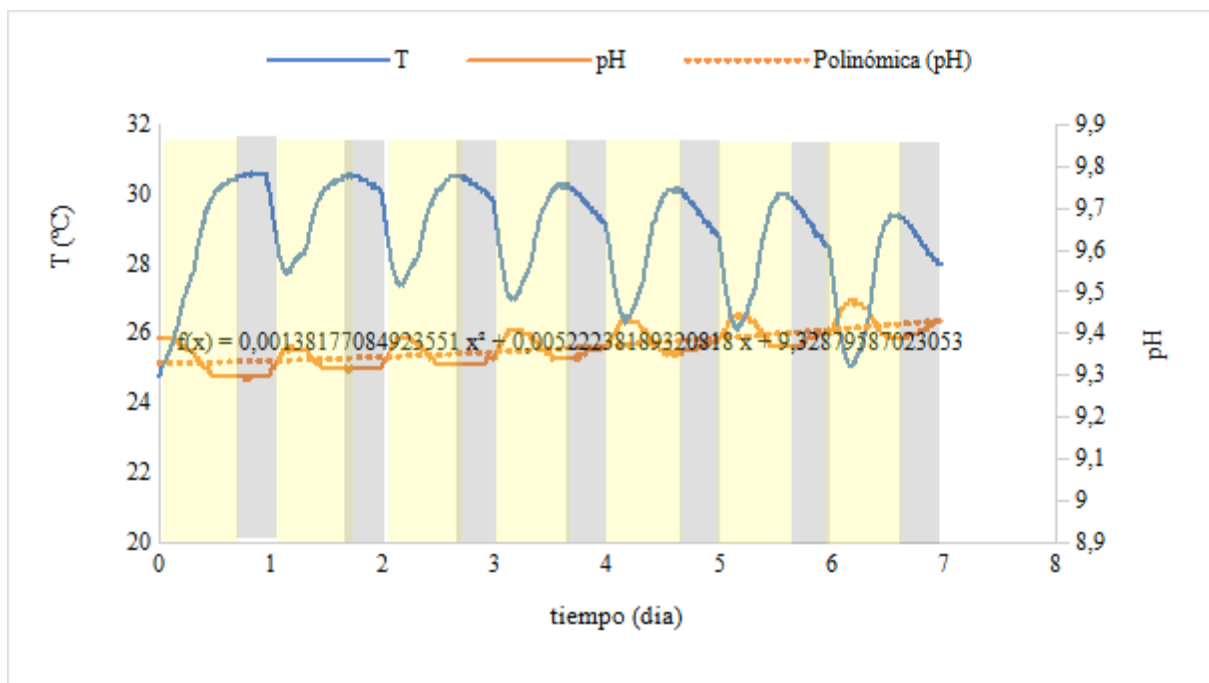


Figura 5. Evolución de los datos experimentales registrados para la T y pH del medio Zarrouk. Fuente: elaboración propia.

El cálculo de las constantes  $K_{CO_2}$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  y  $K_w$  se ha realizado utilizando las ecuaciones 3, 4, 5 y 6 expuestas anteriormente. La concentración de  $H^+$  se ha calculado a partir del pH experimental registrado. La concentración de  $OH^-$  se ha calculado a partir del pH y la  $K_w$ . Los valores de  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  se han calculado a partir de las ecuaciones 15 y 16. El carbono inorgánico total (Ctotal) se ha calculado con la ecuación 14. Las concentraciones de  $HCO_3^-$ ,  $CO_3^{2-}$  y  $CO_2$  se han calculado a partir de las ecuaciones 11, 5 y 4 respectivamente. Resolviendo la ecuación 17, manteniendo el valor de  $K_L$  a constante y haciendo cero el término  $R_{fotósis}$ , porque no hay biomasa presente, se puede calcular la concentración de carbono inorgánico total que mejor se ajusta a los datos experimentales.

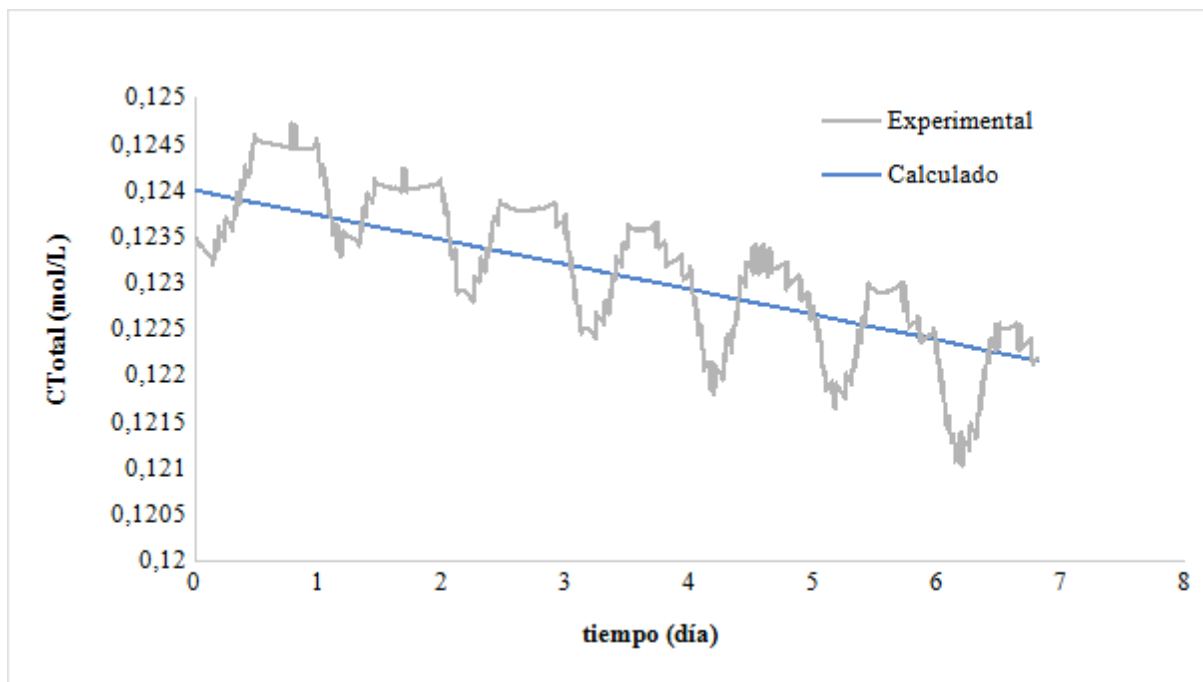


Figura 6. Comparación del carbono inorgánico total experimental y calculado. Fuente: elaboración propia.

Tal y como se observa en la Figura 6, la representación gráfica de los valores de Ctotal experimentales presenta un comportamiento sinusoidal (presencia de ciclos con picos y valles) mientras que el ajuste realizado tiene un comportamiento lineal. Esta diferencia no es significativa si tenemos en cuenta la multitud de factores que intervienen a la hora de realizar los ajustes teóricos y sobre todo porque se comprueba que la tendencia de ambas representaciones es muy parecida, por lo que se puede admitir el ajuste.

La diferencia entre los valores de Ctotal calculado entre el primer y último día de registro muestran el carbono inorgánico total eliminado debido al arrastre, en este caso  $1,85 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  dando lugar a una velocidad de eliminación de  $2,64 \cdot 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$ .

Cuando hay cultivos presentes, a esta evolución hay que sumar el consumo de  $CO_2$  por la actividad fotosintética, que depende de numerosos factores, como la temperatura, la concentración de nutrientes, la intensidad de la radiación y la longitud de onda, así como la concentración de biomasa y la agitación que afectan al periodo de exposición de las microalgas a la radiación, entre otros factores.

Por todo ello, la simulación de estos procesos no resulta inmediata y hay que tener en cuenta numerosos factores para conseguir resultados adecuados.

La representación gráfica del registro de temperatura y pH de un experimento cuando hay biomasa presente tiene una forma similar al obtenido con el medio de cultivo. Sin embargo, ahora además de tener en cuenta el CO<sub>2</sub> eliminado o añadido por el arrastre de aire del sistema de burbujeo, hay que tener presente que el proceso de fotosíntesis juega un rol mucho más importante (Figura 7).

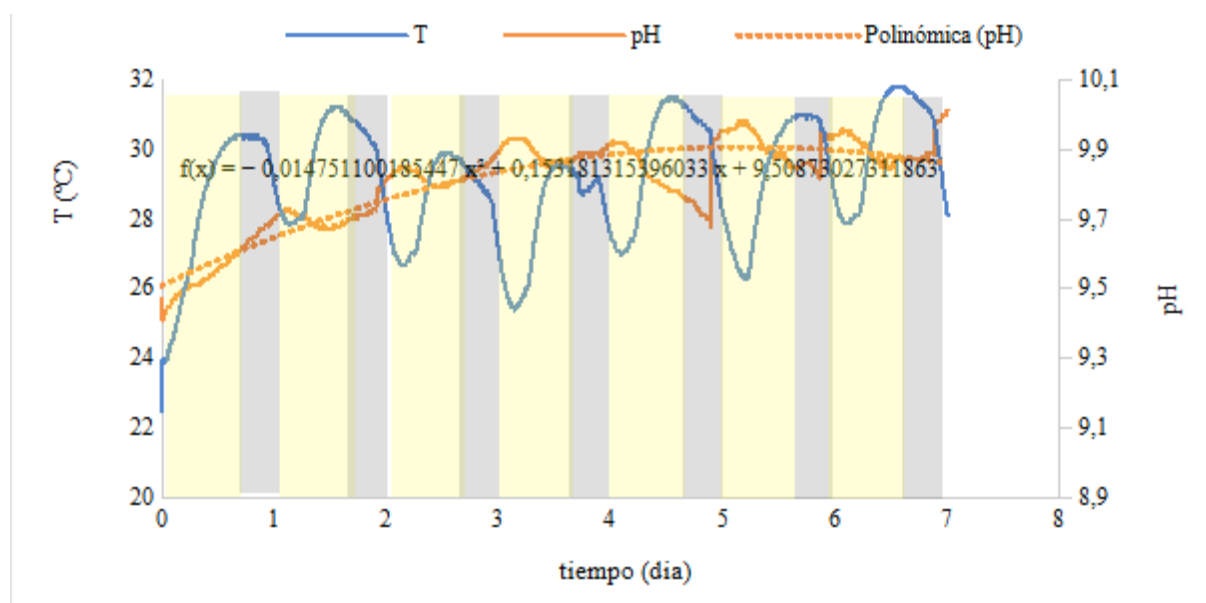


Figura 7. Evolución de los datos experimentales registrados para la T y pH para un cultivo de Spirulina Platensis. Fuente: elaboración propia.

Nuevamente, se comprueba el comportamiento tipo sinusoidal que presentan los valores de pH. Para simplificar el cálculo se ajusta la curva de pH mediante una regresión polinómica y se dan por válidos los valores medios obtenidos (Figura 7, línea naranja punteada).

El cálculo de los parámetros  $K_{CO_2}$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_w$ ,  $[H^+]$ ,  $[OH^-]$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $C_{total}$ ,  $[HCO_3^-]$ ,  $[CO_3^{2-}]$  y  $[CO_2]$  se han calculado de la misma manera que el ejemplo anterior. Ahora la integración de la ecuación 17 se complica un poco ya que el factor  $R_{fotosíntesis}$  no puede considerarse cero durante todo el cultivo. Cuando las luces están apagadas no hay proceso de fotosíntesis por lo que el término  $R_{fotosíntesis}$  es cero y nos encontraríamos en el caso anteriormente expuesto. Sin embargo, cuando las luces están encendidas las microalgas comienzan a realizar la fotosíntesis y en la ecuación 17 hay que tener en cuenta el parámetro  $R_{fotosíntesis}$  que viene determinado por la ecuación 19:

$$R_{fotosíntesis} = K_{f0} \times \exp \left[ \left( \frac{-E_a}{R_f T} \right) \times CO_2^n \times \Delta t \times \left( \frac{luz}{oscuridad} \right) \right] \quad (19)$$

Donde  $K_{f0}$  es el factor preexponencial,  $E_a$  la energía de activación y  $n$  el orden de reacción. Los valores obtenidos tras la optimización de los parámetros se muestran en la Figura 8.

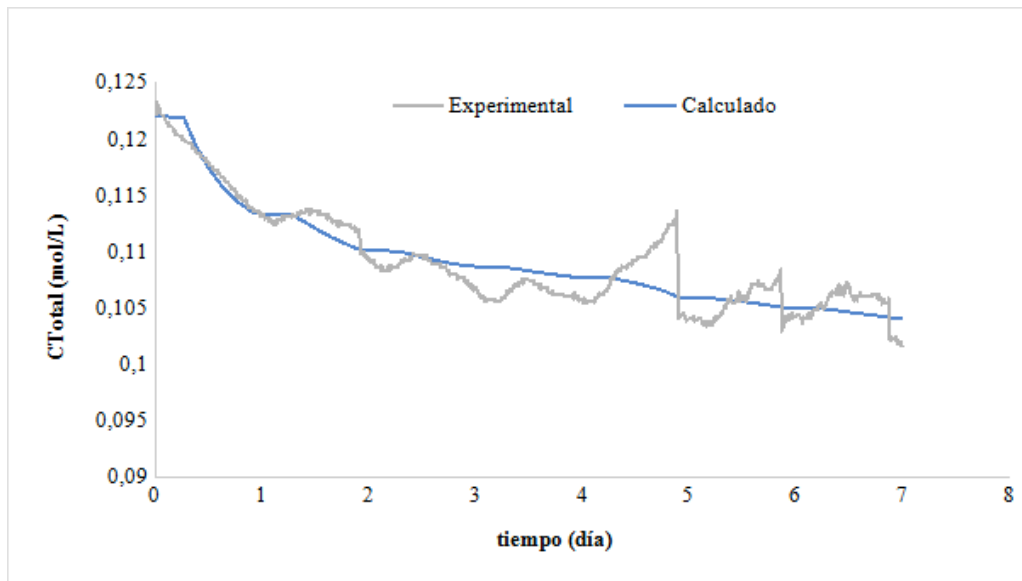


Figura 8. Comparación del carbono inorgánico total experimental y calculado para el cultivo de *Spirulina platensis*. Fuente: elaboración propia.

La diferencia entre los valores de  $C_{total}$  calculado entre el primer y último día de registro muestran el carbono inorgánico total eliminado, en este caso  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  dando lugar a una velocidad de eliminación de  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{día}^{-1}$ . Como se puede comprobar tanto la eliminación de carbono inorgánico como la velocidad de eliminación del mismo son un orden de magnitud mayor que para el caso del ejemplo anterior. Es evidente que el proceso de fotosíntesis está íntimamente relacionado con el consumo de carbono en el sistema y por ende nos puede permitir estimar la concentración diaria de biomasa mediante los valores de registro de pH. Teniendo en cuenta que aproximadamente la generación de biomasa es prácticamente el doble que el consumo de carbono, y conociendo la masa molar del  $\text{CO}_2$ , se puede calcular la concentración de microalgas generada en este reactor, para nuestro caso  $1,575 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ . La Figura 9 muestra las concentraciones de microalga determinadas experimentalmente los días 1, 5 y 8, junto con los valores calculados según el modelo cinético. Teniendo en cuenta la hipótesis aceptada en cuanto a la relación  $\text{CO}_2$  consumido/peso de alga generado, se puede observar una aceptable concordancia.

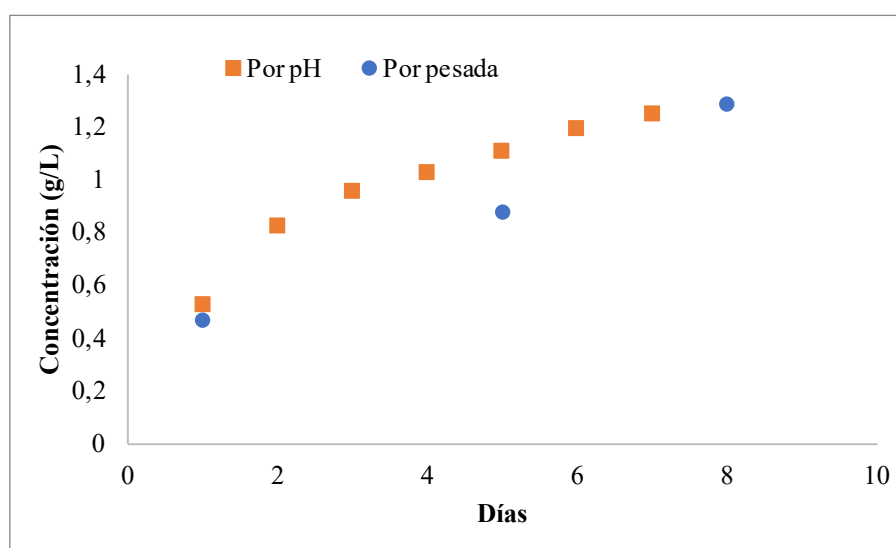


Figura 9. Valores de concentración de *Spirulina platensis*.

## 4. CONCLUSIONES

El modelo aplicado ha permitido calcular el carbono inorgánico total a partir de los valores de pH y temperatura registrados durante todo el proceso. Para un reactor que contiene la cepa *Spirulina platensis* se ha calculado un valor de velocidad de eliminación de carbono inorgánico total de  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{día}^{-1}$  que en términos de biomasa generada dan lugar a una concentración final de  $1,575\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ . Los valores obtenidos se han comparado con las medidas de concentración experimentales realizadas observándose que los resultados concuerdan de manera satisfactoria.

## AGRADECIMIENTOS

La investigación ha sido financiada por el programa Misiones Ciencia e Innovación 2021, Recuperación, Transformación y Plan de Resiliencia, NextGeneration EU, en el marco del proyecto denominado Sostenibilidad, Agua y Agricultura en el siglo XXI, “SOS AGUA-XXI” (MIG-20211026), del Centro para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación (CDTI), a través del consorcio de empresas integradas en el proyecto: Sacyr Agua, Bosonit, Valoriza Servicios Medioambientales, Föra Forest Technologies, Regenera Levante, Aqua Advise, y Aeromedia

## REFERENCIAS

- Bandara, G. L. C. L., Abeysiriwardana-Arachchige, I. S. A., Xu, X., Lin, L., Jiang, W., Zhang, Y., ... Xu, P. (2022). Impacts of seasonality and operating conditions on water quality of algal versus conventional wastewater treatment: Part 1. *Journal of Environmental Management*, 304, 114291. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114291>
- Brune, D. E., & Novak, J. T. (1981). The use of carbonate equilibrium chemistry in quantifying algal carbon uptake kinetics. *European Journal of Applied Microbiology and Biotechnology*, 13(2), 71-76. <https://doi.org/10.1007/BF00499691>
- Bustamante, J. C. (2018). *Diseño de una planta piloto para el crecimiento de microalgas heterótrofas*, 87.
- Camacho Rubio, F., Acién Fernández, F. G., Sánchez Pérez, J. A., García Camacho, F., & Molina Grima, E. (1999). Prediction of dissolved oxygen and carbon dioxide concentration profiles in tubular photobioreactors for microalgal culture. *Biotechnology and Bioengineering*, 62(1), 71–86. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0290\(19990105\)62:1<71::AID-BIT9>3.0.CO;2-T](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0290(19990105)62:1<71::AID-BIT9>3.0.CO;2-T)
- Chandrasekhar, K., Raj, T., Ramanaiah, S. V., Kumar, G., Banu, J. R., Varjani, S., ... Kim, S. H. (2022, February 10). Algae biorefinery: A promising approach to promote microalgae industry and waste utilization. *Journal of Biotechnology*. <https://doi.org/10.1016/j.jbio-tec.2021.12.008>
- García-Gozalbes, C. C. Arbib, Z. Perales-Vargas-Machuca, J. A. (2015). Cinéticas de crecimiento y consumo de nutrientes de microalgas en aguas residuales urbanas con diferentes niveles de tratamiento. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VI(1), 49-68.



- Hill, G. A. (2006). Measurement of overall volumetric mass transfer coefficients for carbon dioxide in a well-mixed reactor using a pH probe. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 45(16), 5796-5800. <https://doi.org/10.1021/ie060242t>
- Johnstone, A. H. (2007). CRC Handbook of Chemistry and Physics-69th Edition Editor in Chief R. C. Weast, CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, 1988, pp. 2400, price £57.50. ISBN 0-8493-0369-5. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 50(2), 294-295. <https://doi.org/10.1002/jctb.280500215>
- Millero, F. J. (1995). Thermodynamics of the carbon dioxide system in the oceans [  $H + I [ B ( OW ; I \sim [ B ( OH)l$ . *Science*, 59(4), 661-677.
- Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática. (2020). *Orden SND/422/2020, de 19 de mayo, por la que se regulan las condiciones para el uso obligatorio de mascarilla durante la situación de crisis sanitaria ocasionada por el COVID-19*. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2020-5142>
- Ruiz, J., Álvarez, P., Arbib, Z., Garrido, C., Barragán, J., & Perales, J. A. (2011). Effect of nitrogen and phosphorus concentration on their removal kinetic in treated urban wastewater by *Chlorella vulgaris*. *International Journal of Phytoremediation*, 13(9), 884-896. <https://doi.org/10.1080/15226514.2011.573823>
- Sánchez-Zurano, A., Ciardi, M., Lafarga, T., Fernández-Sevilla, J. M., Bermejo, R., & Molina-Grima, E. (2021). Role of microalgae in the recovery of nutrients from pig manure. *Processes*, 9(2), 1-11. <https://doi.org/10.3390/pr9020203>
- Valdés, F. J., Hernández, M. R., Catalá, L., & Marcilla, A. (2012). Estimation of CO<sub>2</sub> stripping/CO<sub>2</sub> microalgae consumption ratios in a bubble column photobioreactor using the analysis of the pH profiles. Application to *Nannochloropsis oculata* microalgae culture. *Bioresource Technology*, 119, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.120>
- Virtual, A., Agua, D. E. L., & Módulo, B. (n.d.). Unidad 2. Ácidos y Bases, 1–7.
- Wolf-Gladrow, D. A., Zeebe, R. E., Klaas, C., Körtzinger, A., & Dickson, A. G. (2007). Total alkalinity: The explicit conservative expression and its application to biogeochemical processes. *Marine Chemistry*, 106, 287-300. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2007.01.006>
- Zhou, Y., Liu, L., Li, M., & Hu, C. (2022). Algal biomass valorisation to high-value chemicals and bioproducts: Recent advances, opportunities and challenges. *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126371>