



Universidad de Concepción

BURBUJAS, MÁS QUE UN JUEGO DE NIÑOS

Jorge H. Saavedra / Pedro G. Toledo / Paola D. Bustos
Gonzalo R. Quezada / Gladys Vidal / Sandra Orvalho



Serie Comunicacional CRHIAM

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

Versión impresa ISSN 0718-6460

Versión en línea ISSN 0719-3009

Directora:

Gladys Vidal Sáez

Comité editorial:

Sujey Hormazábal Méndez

María Belén Bascur Ruiz

Serie:

Burbujas, más que un juego de niños.

Jorge H. Saavedra, Pedro G. Toledo, Paola D. Bustos,

Gonzalo R. Quezada, Gladys Vidal y Sandra Orvalho.

Enero 2023.

Agradecimientos:

Centro de Recursos Hídricos
para la Agricultura y la Minería
(CRHIAM)

ANID/FONDAP/15130015

Victoria 1295, Barrio Universitario,

Concepción, Chile

Teléfono +56-41-2661570

www.crhiam.cl



Universidad de Concepción

BURBUJAS, MÁS QUE UN JUEGO DE NIÑOS

Jorge H. Saavedra / Pedro G. Toledo / Paola D. Bustos
Gonzalo R. Quezada / Gladys Vidal / Sandra Orvalho

SERIE COMUNICACIONAL CHRIAM

PRESENTACIÓN

El Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería -Centro Fondap CRHIAM- está trabajando en el tema de "Seguridad Hídrica", entendida como la "capacidad de una población para resguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para el sustento, bienestar y desarrollo socioeconómico sostenibles; para asegurar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con ella, y para preservar los ecosistemas, en un clima de paz y estabilidad política" (ONU- Agua, 2013).

La "Serie Comunicacional CRHIAM" tiene como objetivo potenciar temas desde una mirada interdisciplinaria, con la finalidad de difundirlos a los tomadores de decisiones públicos, privados y a la comunidad general. Estos textos surgen como un espacio de colaboración colectiva entre diversos investigadores ligados al CRHIAM como un medio para informar y transmitir las evidencias de la investigación relacionada a la gestión del recurso hídrico.

Con palabras sencillas, esta serie busca ser un relato entendible por todos y todas, en el que se exponen los estudios, conocimiento y experiencias más recientes para aportar a la seguridad hídrica de los ecosistemas, comunidades y sectores productivos. Agradecemos el esfuerzo realizado por nuestras y nuestros investigadores, quienes han trabajado de forma mancomunada y han puesto al servicio de la comunidad sus investigaciones para aportar de forma activa en la búsqueda de soluciones para contribuir a la generación de una política hídrica acorde a las necesidades del país.

Dra. Gladys Vidal
Directora de CRHIAM

DATOS DE INVESTIGADORES



Jorge H. Saavedra

Ingeniero Civil Químico, Universidad de Concepción.
Doctor en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Química, Universidad de Concepción.
Profesor Asistente del Departamento de Ingeniería en Maderas, Universidad del Bío Bío.
Colaborador CRHIAM.



Pedro G. Toledo

Ingeniero Civil Químico, Universidad de Concepción.
Doctor of Philosophy in Chemical Engineering, University of Minnesota, Estados Unidos.
Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Concepción.
Investigador Principal y Sub-Director CRHIAM.



Paola D. Bustos

Ingeniero Civil Químico, Universidad de Concepción.
Doctor en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Química, Universidad de Concepción.
Profesora Asistente del Departamento de Ingeniería en Maderas, Universidad del Bío Bío.



Gonzalo R. Quezada

Ingeniero Civil Químico, Universidad de Concepción.
Doctor en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Química, Universidad de Concepción.
Profesor Asistente del Departamento de Ingeniería en Maderas, Universidad del Bío Bío.
Investigador postdoctoral ANID y CRHIAM.



Gladys Vidal

Doctor en Ciencias Químicas.
Programa en Biotecnología Ambiental,
Universidad Santiago de Compostela, España.
Profesora Titular Facultad de Ciencias Ambientales,
Universidad de Concepción.
Directora CRHIAM.



Sandra Orvalho

Chemical Engineering, Instituto Superior Técnico,
Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.
PhD in Chemical Engineering,
Instituto Superior Técnico,
Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.
Researcher, Academy of Sciences of the
Czech Republic, Dept. of Multiphase Reactors,
República Checa.

RESUMEN

Las burbujas y espumas están presentes en una diversidad de procesos industriales en donde juegan un papel predominante, ya sea favoreciéndolos o afectándolos. El estudio de sus propiedades y conocimiento de su campo de aplicaciones, se hace relevante sobre todo cuando los procesos utilizan recursos hídricos cada vez más escasos. En esta Serie Comunicacional se revisan los conceptos necesarios para comprender el comportamiento de burbujas y espumas en agua, tales como las propiedades que usualmente se utilizan para caracterizarlas, las propiedades a nivel molecular y los mecanismos que explican su estabilidad, y las propiedades de las sustancias que determinan su formación y estabilidad. Luego, se revisan algunas de las principales aplicaciones donde las burbujas son determinantes en las separaciones de ciertos componentes, tales como la flotación de minerales, la flotación de plásticos y otros componentes de aguas residuales. También se revisan aplicaciones de biorreactores donde las burbujas permiten la incorporación de gases disueltos para favorecer el crecimiento de ciertos microorganismos. Finalmente, se revisan las investigaciones sobre burbujas en agua que se desarrollan en CRHIAM y que aportan una nueva mirada a la comprensión del comportamiento de burbujas. En particular se revisan experimentos que capturan fenómenos aislados y experimentos que emulan el comportamiento de burbujas en sistemas dinámicos realistas y su interpretación mediante algoritmos de inteligencia artificial.

INTRODUCCIÓN

¿Quién no se ha fascinado jugando con burbujas de jabón cuándo niño? La experiencia (Figura 1) nos muestra que en algún punto las burbujas flotando en el aire terminan rompiéndose, algunas se juntan y generan una película de líquido entre ellas, otras tocan superficies y rebotan o se rompen. Los más observadores habrán notado una acumulación de líquido en la región inferior de las burbujas. Otros incluso habrán visto la iridiscencia en la superficie de las burbujas.



Figura 1.

Niños jugando con burbujas. Fuente: SeventyFour, (2022).

Desde un punto de vista industrial, las burbujas son un aporte clave a un proceso o producto, o bien un problema que se debe controlar o eliminar. Las burbujas y espumas se utilizan como medios para separar sustancias, tal como sucede en los procesos de flotación de minerales y plásticos. También tienen aplicaciones como extintores de fuego, en la producción de materiales aislantes y estructurales, en la producción de cremas para productos de belleza, explosivos y en la producción de alimentos. Las burbujas también se usan como medio para disolver gases en líquidos para favorecer el crecimiento de microorganismos en biorreactores, tal como sucede en la producción de microalgas; y al mismo tiempo pueden ser un gran problema si la formación de espuma se descontrola. En general, en el tratamiento de aguas residuales, la formación de espuma puede ser un problema. La presencia de burbujas puede generar imperfecciones en aplicaciones de recubrimientos, tales como cerámicos o de pinturas (Myers, 1999).

Muchos de los procesos que involucran burbujas o espumas tienen como fluido principal al agua. En el contexto de escasez hídrica se hace relevante una mejor comprensión de los fenómenos y las variables involucradas en la estabilidad de burbujas, para de este modo lograr optimizar los recursos hídricos o buscar nuevas fuentes de agua, tales como aguas salinas, de fuentes subterráneas y de recirculación en los mismos procesos, todas con contenidos de sales. Los efectos de estas sales o electrolitos sobre las propiedades superficiales de burbujas, aditivos y partículas presentes en estos procesos son motivo de estudio e interés a nivel industrial.

Este documento está enfocado en entregar los conceptos generales que permiten comprender el comportamiento de burbujas y espumas, así como también dar a conocer las principales aplicaciones a nivel industrial donde las burbujas son un factor importante en procesos de separación en los que el agua está presente.

CONCEPTOS GENERALES SOBRE BURBUJAS

Configuraciones de burbujas

Cuando hablamos de burbujas es importante reconocer que hay diferentes configuraciones en las que se pueden encontrar (Figura 2). Por una parte, están las burbujas aisladas dentro de un líquido, usualmente con forma esférica o similar y, por otra parte, las burbujas que coexisten con otras, separadas por una delgada película líquida, dando origen a formas poliédricas, como se pueden ver en espumas. Adicionalmente, las burbujas pueden estar en contacto con una fase sólida.

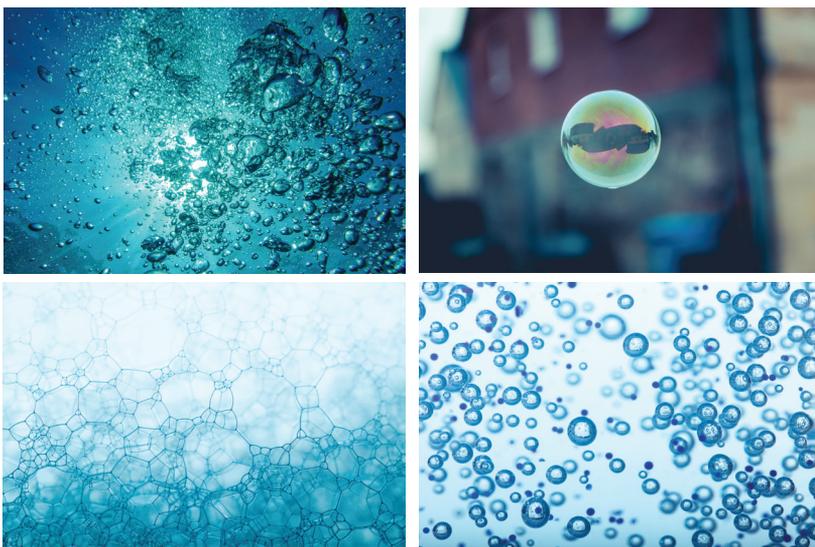


Figura 2.

Burbujas en diferentes configuraciones. Inmersas en agua. Flotando en el aire. Formando espuma. Interactuando con sólidos suspendidos.
Fuente: Pixabay, (2016a); Spiske, (2017); AlexZaitsev, (2022); Ninell, (2022).

Las burbujas pueden ser generadas por burbujeo de gas mediante un capilar hacia una fase líquida; en este caso el tamaño de la burbuja queda determinado por las fuerzas debido a la tensión superficial y el tamaño del capilar. Otra forma es la introducción de un gas hacia un líquido a través de un medio poroso; pero aquí el proceso es menos controlable, tanto en los tamaños de burbuja generados, como en la posibilidad de que las burbujas interactúen entre sí y se produzca el fenómeno de coalescencia. También es posible generar burbujas en un líquido mediante agitación. Otros medios de generar burbujas incluyen el calentamiento y la reducción de presión. En algunos casos se utiliza un gas disuelto que, bajo ciertas condiciones de presión, calentamiento o perturbación, genera burbujas y posiblemente una fase de espuma; un ejemplo de esto son las burbujas y espuma presentes en la cerveza.

Las delgadas películas de líquido que se forman entre burbujas y, en general, en la fase de espuma, son sistemas naturalmente inestables. Sin embargo, la presencia de ciertas sustancias con tendencia a ubicarse en las interfaces, tales como surfactantes, iones, polímeros e incluso partículas cambian la estabilidad de estos sistemas. La estabilidad estará también influenciada por el área de contacto, temperatura, pH, agitación, entre otros. Los mecanismos que permiten la estabilidad de burbujas y espumas son diversos y pueden estar combinados. Un líquido con alta viscosidad fluye más lento, retardando el drenaje entre las burbujas. Una alta viscosidad superficial retarda la pérdida de líquido y amortigua la deformación de las interfaces.

Surfactantes

Los surfactantes o tensoactivos merecen especial atención puesto que son los principales agentes que contribuyen a la estabilidad de burbujas y espumas. Los surfactantes son moléculas que cuentan con un grupo polar y otro apolar, esto les permite tener doble afinidad; de modo que la parte polar tiene gran afinidad por grupos cargados o moléculas polares como el agua y la parte apolar tiene gran afinidad por moléculas no polares, tales como los hidrocarburos, o por el aire. La parte polar de los surfactantes tiene carácter hidrofílico (tiene afinidad por el agua), mientras que la parte apolar tiene carácter hidrofóbico (repele el agua).

Los surfactantes tienen diversos usos tales como detergentes, colectores, emulsificantes, espumantes, entre otros. Dentro de estos, los espumantes son sustancias surfactantes débiles con afinidad por las interfaces gas-líquido, que evitan la coalescencia de burbujas y mantienen una espuma

estable. Dentro de los espumantes más utilizados a nivel industrial se encuentran los alcoholes como el metil isobutil carbinol (MIBC) y los poliglicoles, tales como los espumantes de la serie Dowfroth.

Las propiedades de las burbujas quedan determinadas en gran medida por sus propiedades superficiales. Dentro de estas propiedades están la tensión superficial estática y dinámica, concentración micelar crítica (CMC), la densidad de exceso superficial, y las propiedades reológicas superficiales como la elasticidad y la viscosidad superficial. Adicionalmente, las burbujas son estudiadas de forma directa para caracterizar su tamaño, forma, y velocidad. Las espumas se estudian mediante propiedades como el tiempo de retención y el índice de espumabilidad dinámico (DFI). Todas estas propiedades se suelen estudiar para distintas concentraciones de espumante o surfactante, y también se estudian otros parámetros que influyen en las propiedades tales como temperatura, pH, salinidad, presencia de partículas, presencia de otros aditivos, entre otras.

APLICACIONES DE BURBUJAS

Flotación de minerales

Chile es un país minero que posee grandes yacimientos de cobre que aportan alrededor de un 10% del producto interno bruto del país. Sin embargo, los minerales de interés están en bajas concentraciones en las rocas (concentraciones o leyes menores a 1%). Uno de los principales métodos para concentrar minerales es por medio de la flotación selectiva de minerales (Jameson, 1992). Una vez que los minerales son extraídos de los yacimientos y pasan por el proceso de molienda, ingresan al proceso de flotación con tamaños entre 5 a 500 micrones (Yarar, 2000). Tras una serie de procesos de concentración terminan en la etapa de fundición antes de ser comercializados (Figura 3).



Figura 3.

Etapas del procesamiento de minerales sulfurados de cobre, considerando extracción, molienda, flotación y fundición. Fuente: Chetan,(2019); Pixabay, (2016b); Nordroden, (2022); Djelen, (2022).

La flotación comprende un proceso de separación en medio acuoso basado en las propiedades superficiales de los minerales, en particular su carácter hidrofóbico-hidrofilico. Una partícula hidrofóbica tiene una baja afinidad por el agua y por ende no la moja, mientras que una partícula hidrofílica si es mojada o absorbida por el agua (Figura 4).



Figura 4.

Configuración de burbujas inmersas en agua en superficies con distinta hidrofobicidad. Fuente: Elaboración propia.

La separación de partículas hidrofóbicas de las hidrofílicas se logra mediante burbujas de aire. Estas burbujas son esencialmente hidrofóbicas también, por ende las partículas hidrofóbicas son capturadas por las burbujas de aire. El proceso de flotación ocurre en equipos llamados celdas de flotación en los que se inyecta aire de manera homogénea para que se genere el mayor contacto posible con el mineral alimentado y se produzca la separación entre minerales natural o artificialmente hidrofóbicos, de los hidrofílicos. Estos equipos por lo general se colocan en bancos en serie para mejorar el proceso de flotación (Figura 5).



Figura 5.

Celdas de flotación de minerales. Fuente: Atkinson, (2020).

Como se indicó, el principio de flotación se basa en la hidrofobicidad que tienen los minerales, sin embargo, no todos los minerales que interesa flotar son hidrófobos, o al contrario, algunos minerales no valiosos si flotan de manera natural (Figura 6). Otra consideración es sobre las burbujas, su eficiencia para recolectar minerales se relaciona principalmente con su estabilidad y su área superficial, en aguas no tratadas las burbujas son muy deformables y su recolección es deficiente.

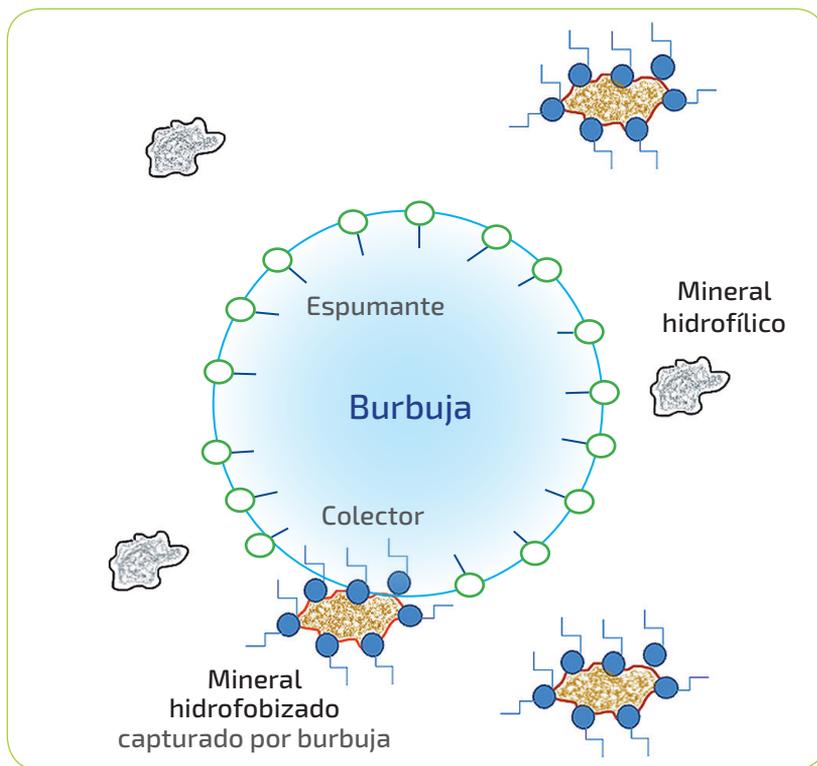


Figura 6.

Esquema de una burbuja inmersa en solución acuosa con moléculas de espumante, que captura a un sólido recubierto con moléculas de colectores en presencia de partículas hidrofílicas. Fuente: Elaboración propia.

Es por ello que se requiere utilizar aditivos para acondicionar las celdas de flotación. Estos se clasifican como:

- **Espumantes:** estabilizan las burbujas y aumentan el área superficial para actuar sobre los minerales.
- **Colectores:** se adhieren a los minerales de interés confiriéndoles hidrofobicidad superficial.
- **Depresores:** se adhieren a los minerales no valiosos para inducir un carácter hidrofílico en su superficie o evitar que se adhieran los colectores.
- **Modificadores:** estos incluyen a los reguladores de pH para mantener una condición óptima en el proceso de flotación, los activadores para mejorar la adhesión de colectores y dispersantes para evitar aglomeraciones indeseadas.

En la actualidad el proceso de flotación es el proceso principal para recuperar minerales en la industria minera lo que demuestra la importancia de comprender correctamente el comportamiento de burbujas en suspensiones de partículas sólidas.

Flotación de microplásticos

Si bien la flotación se inició en procesos de separación de minerales, la comprensión de los fenómenos que ocurren en celdas de flotación ha dado la oportunidad de aplicar estos principios en otros sistemas también relevantes en la actualidad, como es la contaminación de cuerpos de agua por la presencia de microplásticos. Estos comprenden partículas que no pueden ser colectadas por redes o filtros convencionales y que pueden ser absorbidos por peces y finalmente por humanos.



Figura 7.

Ciclo del microplástico. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente, dpa, (2022).

Una característica particular de la superficie de los plásticos, en comparación a las partículas presentes en flotación de minerales, es su hidrofobicidad, la cual dependerá de propiedades como su composición química, grado de polimerización, cristalinidad, estructura superficial. Aunque en general estas propiedades se conocen, también pueden ser afectadas por cambios mecánicos o el contacto con otros materiales. Así, para lograr una flotación selectiva de plásticos, se requiere procesos previos de lavado, trituración y tratamientos superficiales. Al realizar la trituración se generan nuevas superficies con características distintas a las de las superficies originales, por ejemplo, disminuyendo la hidrofobicidad de las nuevas superficies debido a procesos de oxidación en las áreas cortadas. Es importante, por tanto, evaluar propiedades como ángulos de contacto y energía superficial para evaluar los cambios en las superficies (Wang *et al.*, 2015).

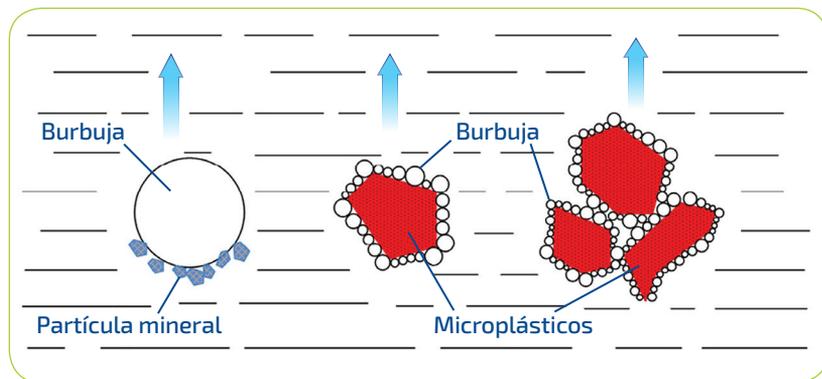


Figura 8.

Diferencia entre flotación de minerales y flotación de microplásticos.

Fuente: Wang *et al.*, (2015).

Si bien los equipos a utilizar para efectuar la flotación de microplásticos son iguales a los utilizados en la industria de minerales (columnas o celdas de flotación), el tratamiento o mecanismo que debe utilizarse para procurar una flotación efectiva tiene diferencias. En general se puede clasificar los tipos de flotación de microplásticos en los siguientes:

- **Flotación gamma:** esta flotación se basa en la modificación de tensión superficial donde a través de aditivos se disminuye la tensión superficial del líquido a un valor crítico de los plásticos, con ello el plástico se adhiere a las burbujas con mayor facilidad.

- **Adición de colectores y depresantes:** la adición de aditivos, tal como en minería, puede ser selectiva para poder separar selectivamente plásticos de otros.
- **Modificación de superficie:** en vez de utilizar aditivos para colectar o depresar un plástico, también están los métodos donde los plásticos son tratados para que su superficie se le confiera hidrofobicidad.
- **Regulación física:** en este caso los métodos para conferir hidrofobicidad son basados en propiedades físicas sin generar reacciones químicas en la superficie. Estos métodos incluyen el tratamiento por ebullición, diferencia de adsorción de agua y separación por gravedad.

Sin duda que resolver este problema es una gran meta ambiental, debido al gran uso que se le da al plástico y que puede perjudicar a todo el ciclo de vida. Por ende, nuevamente las burbujas cumplen un gran rol en la remediación ambiental.

Biorreactores

El uso de microorganismos para la obtención de diversos productos es algo que se remonta más allá del año 7000 aC, cuando en una lejana aldea neolítica se llevaron a cabo las primeras fermentaciones de granos de cereales para producir una bebida alcohólica (Ostos-Ortiz *et al.*, 2019). Hoy en día, la aplicación de microorganismos es común en la industria de alimentos, productos agrícolas, compuestos químicos, combustibles, farmacología e incluso materiales para aplicaciones particulares. Es más, la investigación de nuevos microorganismos y sus potencialidades es un área prometedora, especialmente en lo que se refiere a especies no convencionales dentro del dominio de arqueas (Pfeifer *et al.*, 2021) y protistas (Gupta *et al.*, 2021).

Para el adecuado desarrollo de los microorganismos, independiente del dominio o reino al que pertenezcan, es indispensable contar con un biorreactor, entendiéndolo como tal el dispositivo o recipiente en el cual se llevan a cabo conversiones biológicas, sean éstas realizadas por los mismos microorganismos, enzimas, células vegetales o animales. Lo que busca el biorreactor es mantener las condiciones ambientales adecuadas que permitan conservar las funciones físico-biológicas de los biosistemas, razón por la cual pueden adoptar diversas configuraciones geométricas y contar con una amplia variedad de sistemas de control (Trujillo y Valdez, 2009).

Existen un conjunto de variables necesarias para la supervivencia y adecuado desarrollo de los microorganismos, partiendo por el sustrato o medio de cultivo (Ferdes *et al.*, 2020; Selo *et al.*, 2021), así como también el

aseguramiento de las condiciones adecuadas de temperatura (Alisawi, 2020), pH (Jia *et al.*, 2022), oxígeno (Liu *et al.*, 2021) y, en el caso de microorganismos fotosintéticos, luz (Elisabeth *et al.*, 2021).

Dentro de todas las variables anteriormente mencionadas, la concentración de oxígeno dentro del biorreactor es una variable crítica para aquellos microorganismos aerobios y microaerobios, convirtiéndose en la condición limitante para su crecimiento a pesar de que todas las demás condiciones estén satisfechas. Este problema surge en primera instancia porque la solubilidad del oxígeno en líquidos es baja, en efecto, en agua fresca a una temperatura de 15°C es de 10,1 mg/L y disminuye con la temperatura hasta alcanzar 7,6 mg/L a 30°C.

Por otro lado, durante el cultivo, intervienen factores como la geometría del biorreactor, tipo de agitador, condiciones de cultivo, composición y viscosidad del medio de cultivo, etapa de crecimiento y morfología del microorganismo (Dandrev *et al.*, 2016; Hua *et al.*, 2019; Jamshidzadeh *et al.*, 2021). De forma adicional, la sensibilidad de algunos microorganismos a los esfuerzos de corte y/o los costos de operación asociados al consumo de potencia de los dispositivos mecánicos de agitación, impiden hacer uso de altas velocidades y/o elementos sofisticados para lograr una buena homogeneización.

En virtud de lo anterior, la incorporación de un burbujeo directo de aire u oxígeno a los biorreactores se convierte en una alternativa viable y económica que permite, por un lado favorecer la transferencia de oxígeno hacia los microorganismos y, por otro lado, disminuir la velocidad de agitación, e incluso prescindir de un agitador del tipo mecánico, disminuyendo los costos asociados en el periodo que dura el cultivo de los microorganismos.

De forma general, los equipos que cuentan con sistemas de burbujas son conocidos como biorreactores de columna de burbujeo (Ferre, 2017) o biorreactores *airlift*. La diferencia entre ambos radica en que los primeros consisten en una columna cilíndrica con un distribuidor de gas en el fondo de la misma, mientras que los *airlift* consisten de dos secciones interconectadas y la aireación se realiza en la parte inferior de solo una de las secciones. El *airlift* tiene circulación de líquido impulsada por la diferencia de densidades en las dos secciones: aireada (baja densidad) y no aireada (alta densidad), lo que favorece la transferencia de oxígeno y la eficiencia global del equipo (Bannari *et al.*, 2011).

De acuerdo con Ferre (2017) un aspecto clave en todo biorreactor de contacto gas-líquido es la forma en la cual se introduce el gas, ya que de ello depende

la distribución del gas en el biorreactor, la hidrodinámica de las dos fases, el tamaño de las burbujas y su coalescencia. En este sentido, existen diversos elementos que permiten realizar esta tarea, como el plato perforado, la placa porosa, el tubo simple, los capilares y los inyectores de tipo Venturi, cada uno de los cuales varía en cuanto a rendimiento, costo, distribución de la fase gaseosa y tamaño de burbujas que entrega.

La eficiencia de los biorreactores de columna de burbujeo o airlift queda determinada mayormente por dos parámetros, la fracción de gas y el tamaño de burbuja. Por definición, el primer parámetro se refiere a la relación entre el volumen de gas y el volumen que ocupa toda la mezcla gas-líquido, siendo por tanto un parámetro adimensional que depende de variables de operación tales, como las dimensiones del biorreactor y propiedades tanto del líquido como del gas (Gupta *et al.*, 2009). La Figura 9 muestra diferentes regímenes hidrodinámicos observados en una columna de burbujeo según la fracción de gas.

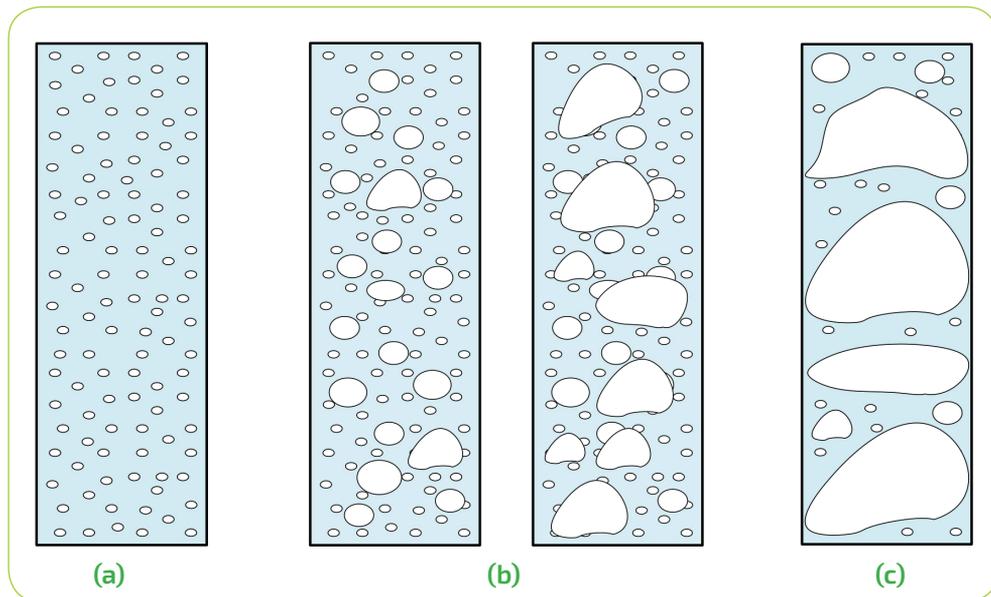


Figura 9.

Regímenes hidrodinámicos en una columna de burbujeo. (a) Régimen homogéneo (b) Régimen heterogéneo (c) Régimen intermitente.

Fuente: Ferre, (2017).

El tamaño de las burbujas, por otro lado, determina el área de contacto del gas con el líquido y también la velocidad de ascenso de las propias burbujas dentro del sistema. Se ha encontrado que, a menor tamaño de burbujas mayor es la superficie de contacto entre las dos fases y, por tanto, hace posible una mejor transferencia de oxígeno de una fase a otra.

Las aplicaciones de estos biorreactores son múltiples y abarcan distintas áreas de interés, por ejemplo, el tratamiento de aguas residuales a través de la tecnología de lodos activados (Jamshidi y Mostoufi, 2017), producción de bio-oil (Paul *et al.*, 2020) y carotenoides (Manowattana *et al.*, 2018) a partir de biomasa rica en lípidos, producción de ectoína a partir de biogas generado a partir de sustratos de bajo costo (del Rosario Rodero *et al.*, 2022), obtención de polihidroxialcanoatos (Liu *et al.*, 2020), fibras textiles a partir de hongos (Svensson *et al.*, 2021) y también bioetanol (Restiawaty *et al.*, 2020).

APORTE DE CRHIAM

La coalescencia de burbujas de aire en una fase líquida deteriora la eficiencia de una serie de procesos industriales, como la flotación por espuma, el tratamiento de aguas residuales y el reciclaje de papel. La coalescencia de burbujas comienza con el adelgazamiento del líquido entre las burbujas hasta que se convierte en una película muy delgada que finalmente se rompe. La gran mayoría de los estudios se centran en la coalescencia de dos burbujas en ausencia de interacciones con muchas otras burbujas como ocurre en un proceso típico.

En CRHIAM tenemos como objetivo mejorar la comprensión actual de cómo los agentes espumantes, aditivos que se agregan para mejorar la estabilidad de las burbujas, modifican las propiedades superficiales de las burbujas en los procesos de flotación de minerales y otros tipos de partículas, y los efectos de los electrolitos cuando se usa agua salada en estos sistemas. A la fecha, hemos desarrollado un sistema de visión artificial, en base a algoritmos de inteligencia artificial, capaz de rastrear burbujas individuales, en una celda de burbujeo que consiste en dos placas paralelas de vidrio y que contiene soluciones acuosas de agentes espumantes y sales, desde la entrada de las burbujas a la celda hasta su salida.

Para ello, utilizamos una grabación del sistema en cámara lenta de 960 marcos por segundo, donde las imágenes recopiladas se analizan utilizando técnicas de reconocimiento de partículas (Solar, 2022). Posteriormente, esta información es procesada para el seguimiento de burbujas basado en la identificación de partículas vecinas y el uso de técnicas de aprendizaje automático (*machine learning*). Esto permite rastrear las posiciones y velocidades de las burbujas tanto en el espacio como en el tiempo, y de este modo acceder a datos sobre frecuencias de ruptura de burbujas; frecuencias de colisión; frecuencias de coalescencia; área, perímetro y factores de forma de burbujas; entre otros.

Además de estas propiedades, es posible determinar el tiempo en que dos burbujas permanecen juntas antes de que ocurra su coalescencia, lo que llamamos tiempo de coalescencia verdadero. Toda esta información, obtenida a partir de un único experimento, permite correlacionar diferentes propiedades modificadas debido al tipo y dosis del espumante utilizado.

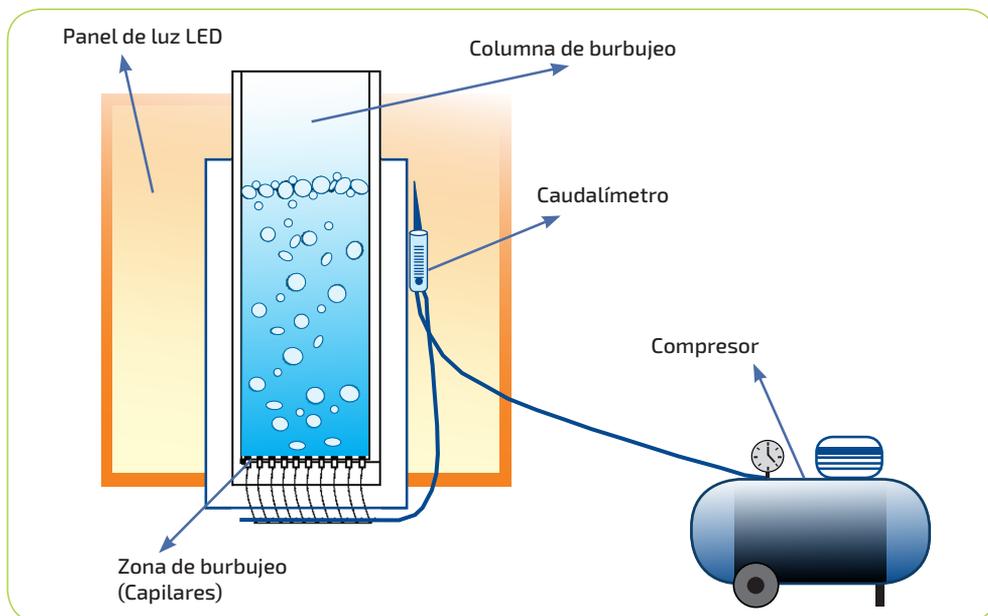


Figura 10.

Dibujo esquemático de una celda de burbujeo que consiste en dos placas paralelas de vidrio y que contiene soluciones acuosas de agentes espumantes y sales, con las burbujas ingresando por la parte inferior.

Fuente: Solar, (2022).

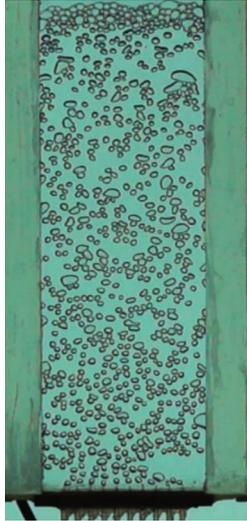


Figura 11.

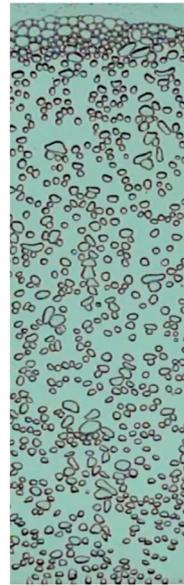
Imagen típica del burbujeo de aire en agua en presencia de 100 ppm de espumante Metil Iso-butil Carbinol (MIBC). Fuente: Solar, (2022).



Agua



MIBC 20 ppm



MIBC 100 ppm

Figura 12.

Imagen del burbujeo de aire en el soluciones de agua, agua con MIBC 20 ppm y agua con MIBC 100 ppm de MIBC. Fuente: (Solar, 2022).

Es de gran interés responder a dos preguntas: en qué medida la frecuencia de las colisiones de burbujas afecta los eventos de coalescencia y cómo la coalescencia de burbujas determina el tamaño medio de las burbujas.

Los resultados muestran que los efectos dinámicos determinan tiempos de coalescencia mucho más cortos que en condiciones estáticas, lo que sugiere que las condiciones de flotación deben ser revisadas si se basan en tiempos estáticos, porque las condiciones no óptimas conducen a un mal uso del agua (Solar, 2022; Solar *et al.*, 2022; Contreras, 2022; Ulloa, 2022). La Figura 13 muestra que cuando las burbujas se acercan a velocidades de 10 mm/s o menores en presencia de 100 ppm de MIBC los tiempos de coalescencia son del orden de 10 ms. Sin embargo, la Figura 14 muestra que el acercamiento de dos burbujas estáticas y aisladas de otras burbujas a velocidades menores a 10 mm/s no produce cambio en los tiempos de coalescencia que se mantienen cercanos a 6 s cuando el espumante se encuentra en 100 ppm, o sea tres órdenes de magnitud menores.

También estudiamos el impacto de las partículas minerales en la coalescencia de burbujas, que, como es de esperar, disminuye el tiempo de coalescencia (Lagos, 2022). Actualmente estamos estudiando el efecto de medios hipersalinos (cuya fuerza iónica es diez veces mayor que la del agua de mar) en la coalescencia de burbujas, lo que es decisivo en la elección de espumantes para la flotación de carbonato y sulfato de litio (Rojas, 2022). Y, finalmente, también estudiamos la recuperación de microplásticos desde el agua (Godoy, 2022).

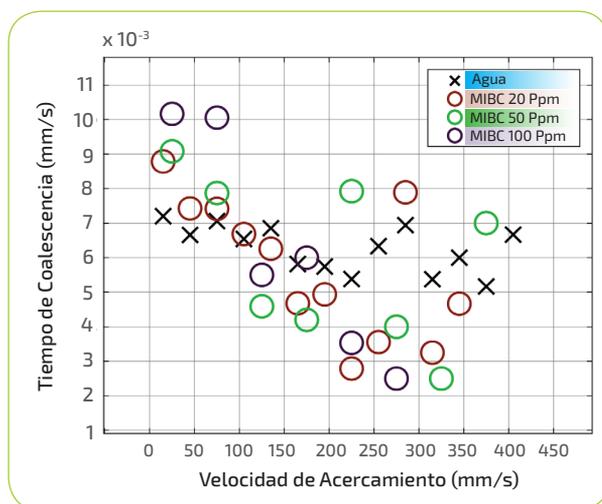


Figura 13.

Tiempos de coalescencia verdaderos, en un sistema dinámico, en función de la velocidad de acercamiento entre pares de burbujas, el espumante es MIBC.

Fuente: Solar, (2022).

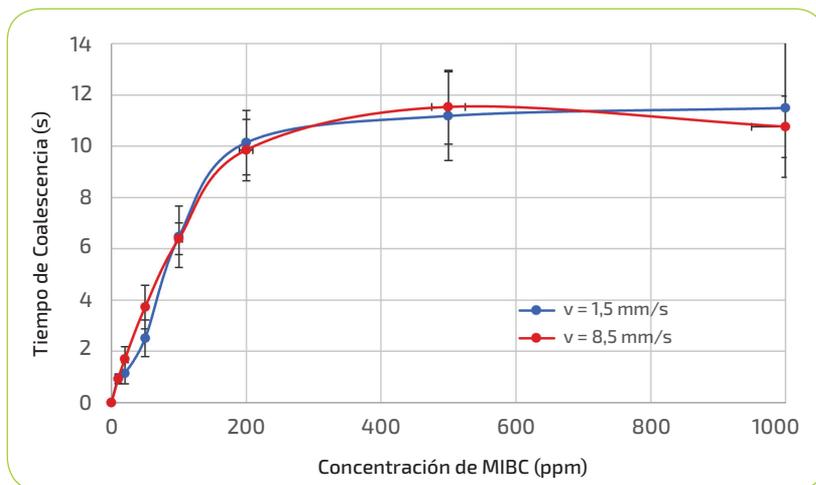


Figura 14.

Tiempos de coalescencia entre dos burbujas estáticas en función de la concentración de MIBC para dos velocidades de enfrentamiento.

Fuente: Contreras, (2022).

Recientemente, hemos establecido contacto con un grupo de investigación del Institute of Chemical Process Fundamentals de la Academia de Ciencias de República Checa, el cual es muy destacado en el estudio del papel que juegan las propiedades interfaciales en la dinámica de burbujas y gotas para diversas aplicaciones. El contacto es con la doctora Sandra Orvalho del Departamento de Reactores Multifásicos con quien postulamos un proyecto de colaboración en el marco del Concurso de Fomento a la Vinculación Internacional para Instituciones de Investigación Convocatoria 2022 de la ANID, principalmente para movilidad de estudiantes e investigadores.

CONCLUSIONES

Las burbujas de aire en agua jabonosa son más que un juego de niños. Son parte central de la producción de diversos materiales que van desde alimentos hasta explosivos, pasando por productos farmacéuticos, productos de belleza e inhibidores de fuego, entre muchos otros, y procesos de separación sólido-líquido como flotación de minerales, flotación de microplásticos y otros componentes de aguas residuales. Lo máspreciado de las burbujas es su tamaño (pequeño) y su estabilidad; en otras palabras, la coalescencia de burbujas (fusión de burbujas pequeñas para formar una más grande) generalmente socava los procesos de interés. En momentos de escasez crítica de agua, la estabilidad de las burbujas hace que los procesos sean más eficientes y sustentables porque se produce más con la misma agua.

Los productos químicos llamados tensoactivos o surfactantes se depositan en la superficie de las burbujas e impiden o retardan la coalescencia, que se evalúa según el tiempo de coalescencia. La coalescencia de burbujas se estudia mediante experimentos clásicos entre dos burbujas estáticas y, más recientemente, mediante experimentos en sistemas de flujo dinámico con muchas burbujas. Los algoritmos de inteligencia artificial pueden rastrear cada una de las burbujas y determinar su tamaño, número de eventos de coalescencia y respectivos tiempos de coalescencia. Es fundamental señalar que el tiempo de coalescencia en los sistemas estáticos es varios órdenes de magnitud mayor que en el sistema dinámico, lo que puede afectar las decisiones sobre el tipo y la dosis de surfactante agregado y la eficiencia del proceso en cuanto al uso del agua.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro CRHIAM Proyecto ANID/FONDAP/15130015. Jorge H. Saavedra agradece el financiamiento del Proyecto ANID/FONDECYT/11171092.

REFERENCIAS

- Alisawi, H. A. O. 2020. Performance of wastewater treatment during variable temperature. *Applied Water Science*, 10(4), 1-6.
- Badawi, A. K., Ismail, B., Baaloudj, O., & Abdalla, K. Z. 2022. Advanced wastewater treatment process using algal photo-bioreactor associated with dissolved-air flotation system: A pilot-scale demonstration. *Journal of Water Process Engineering*, 46, 102565.
- Bannari, R., Bannari, A., Selma, B., & Proulx, P. 2011. Mass transfer and shear in an airlift bioreactor: Using a mathematical model to improve reactor design and performance. *Chemical Engineering Science*, 66(10), 2057-2067.
- Barahoei, M., Hatamipour, M. S., & Afsharzadeh, S. 2020. CO2 capturing by chlorella vulgaris in a bubble column photo-bioreactor; Effect of bubble size on CO2 removal and growth rate. *Journal of CO2 Utilization*, 37, 9-19.
- Contreras, J. Tesis de pregrado UBB (en curso). (Supervisores: Saavedra and Toledo). Estudio de parámetros que influyen en la estabilidad de interfaces fluidas: Caso de estudio de espumantes en flotación de aguas salinas.
- Edzwald, J. K. 1995. Principles and applications of dissolved air flotation. *Water Science and Technology*, 31(3-4), 1-23.
- Elisabeth, B., Rayen, F., & Behnam, T. 2021. Microalgae culture quality indicators: a review. *Critical Reviews in Biotechnology*, 41(4), 457-473.
- Ferre Aracil, J. 2017. Diseño de reactores de burbujeo para el tratamiento de aguas residuales mediante ozono. Caracterización física, análisis cinético y optimización con redes neuronales artificiales (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- Del Castillo, L. A., Ohnishi, S., & Horn, R. G. 2011. Inhibition of bubble coalescence: Effects of salt concentration and speed of approach. *Journal of Colloid and Interface Science*, 356(1), 316-324.
- Del Refugio Castañeda-Chávez, M., de Jesús Isidoro-Pio, A., Lango-Reynoso, F., & Lizardi-Jiménez, M. A. 2022. Bubble Column Bioreactor using native non-genetically modified organisms: a remediation alternative by hydrocarbon-polluted water from the Gulf of Mexico. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*. <https://doi.org/10.1515/ijcre-2022-0022>

- Del Rosario Rodero, M., Herrero-Lobo, R., Pérez, V., & Muñoz, R. 2022. Influence of operational conditions on the performance of biogas bio-conversion into ectoines in pilot bubble column bioreactors. *Bioresource Technology*, 358, 127398.
- Drandev, S., Penev, K. I., & Karamanev, D. 2016. Study of the hydrodynamics and mass transfer in a rectangular air-lift bioreactor. *Chemical Engineering Science*, 146, 180-188.
- Ferdeş, M., Dincă, M. N., Moiceanu, G., Zăbavă, B. Ş., & Paraschiv, G. 2020. Microorganisms and enzymes used in the biological pretreatment of the substrate to enhance biogas production: A review. *Sustainability*, 12(17), 7205.
- Godoy, I. Tesis de pregrado UBB (en curso). (Supervisores: Saavedra y Toledo). Estudio de flotación de microplásticos en una columna de burbujeo.
- Gupta, P. P., Merchant, S. S., Bhat, A. U., Gandhi, A. B., Bhagwat, S. S., Joshi, J. B., ... & Kulkarni, B. D. 2009. Development of correlations for overall gas hold-up, volumetric mass transfer coefficient, and effective interfacial area in bubble column reactors using hybrid genetic algorithm-support vector regression technique: viscous Newtonian and non-Newtonian liquids. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 48(21), 9631-965.
- Gupta, A., Barrow, C. J., & Puri, M. 2021. Multiproduct biorefinery from marine thraustochytrids towards a circular bioeconomy. *Trends in Biotechnology*, 40(4), 448-462.
- Hua, X., Du, G., & Xu, Y. 2019. Cost-practical of glycolic acid bioproduction by immobilized whole-cell catalysis accompanied with compressed oxygen supplied to enhance mass transfer. *Bioresource technology*, 283, 326-331.
- Khanchezar, S., Hashemi-Najafabadi, S., Shojaosadati, S. A., & Babaeipour, V. 2019. Hydrodynamics and mass transfer in miniaturized bubble column bioreactors. *Bioprocess and biosystems engineering*, 42(2), 257-266.
- Jameson, G. J. 1992. Flotation cell development. In *The AusIMM Annual Conference, Broken Hill, New South Wales* (pp. 17-21).

- Jamshidi, N., & Mostoufi, N. 2017. Measurement of bubble size distribution in activated sludge bubble column bioreactor. *Biochemical Engineering Journal*, 125, 212-220.
- Jamshidzadeh, M., Ein-Mozaffari, F., & Lohi, A. 2021. Local Distribution of Oxygen Mass Transfer Coefficient in CMC Solutions in Bioreactors Furnished with Different Types of Coaxial Mixers. *Chemical Engineering Research and Design*, 174, 213-224.
- Jia, T., Zhang, L., Zhao, Q., & Peng, Y. 2022. The effect of biofilm growth on the sulfur oxidation pathway and the synergy of microorganisms in desulfurization reactors under different pH conditions. *Journal of Hazardous Materials*, 432, 128638.
- Kantarci, N., Borak, F., & Ulgen, K. O. 2005. Bubble column reactors. *Process biochemistry*, 40(7), 2263-2283.
- Lagos, L. Tesis de pregrado UBB (en curso). (Supervisores: Saavedra y Toledo). Efecto de partículas minerales en los eventos de coalescencia en un sistema dinámico de burbujeo.
- Liu, L. Y., Xie, G. J., Xing, D. F., Liu, B. F., Ding, J., & Ren, N. Q. 2020. Biological conversion of methane to polyhydroxyalkanoates: current advances, challenges, and perspectives. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2, 100029.
- Liu, T. T., Xiao, H., Xiao, J. H., & Zhong, J. J. 2021. Impact of oxygen supply on production of terpenoids by microorganisms: State of the art. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 30, 46-53.
- Manowattana, A., Techapun, C., Watanabe, M., & Chaiyaso, T. 2018. Bioconversion of biodiesel-derived crude glycerol into lipids and carotenoids by an oleaginous red yeast *Sporidiobolus pararoseus* KM281507 in an airlift bioreactor. *Journal of bioscience and bioengineering*, 125(1), 59-66.
- Myers, D. 1999. *Surfaces, Interfaces, and Colloids: Principles and Applications*. John Wiley & Sons.
- Ostos-Ortíz, O. L., Rosas-Arango, S. M., & González-Devia, J. L. 2019. Aplicaciones biotecnológicas de los microorganismos. *Nova*, 17(31), 129-163.

- Paul, T., Sinharoy, A., Pakshirajan, K., & Pugazhenthii, G. 2020. Lipid-rich bacterial biomass production using refinery wastewater in a bubble column bioreactor for bio-oil conversion by hydrothermal liquefaction. *Journal of Water Process Engineering*, 37, 101462.
- Pfeifer, K., Ergal, I., Koller, M., Basen, M., Schuster, B., & Simon, K. M. R. 2021. Archaea biotechnology. *Biotechnology Advances*, 47, 107668.
- Restiawaty, E., Gani, K. P., Dewi, A., Arina, L. A., Kurniawati, K. I., Budhi, Y. W., & Akhmaloka, A. 2020. Bioethanol production from sugarcane bagasse using *neurospora intermedia* in an airlift bioreactor. *International Journal of Renewable Energy Development*, 9(2), 247.
- Rojas, C. Tesis de pregrado UdeC (en curso). (Supervisores: Toledo y Saavedra). Estabilidad y coalescencia de burbujas en soluciones salinas hiperconcentradas en una columna de burbujeo: Efecto del tipo y concentración de agente espumante.
- Šelo, G., Planinić, M., Tišma, M., Tomas, S., Koceva Komlenić, D., & Bucić-Kojić, A. 2021. A comprehensive review on valorization of agro-food industrial residues by solid-state fermentation. *Foods*, 10(5), 927.
- Shu, S., Vidal, D., Bertrand, F., & Chaouki, J. 2019. Multiscale multiphase phenomena in bubble column reactors: A review. *Renewable Energy*, 141, 613-631.
- Sol, D., Laca, A., Laca, A., & Díaz, M. 2020. Approaching the environmental problem of microplastics: Importance of WWTP treatments. *Science of the Total Environment*, 740, 140016.
- Solar, C. Tesis de pregrado UBB. 2022. (Supervisores Saavedra y Toledo). Determinación de tiempos de coalescencia de burbujas en un sistema dinámico de burbujeo mediante técnicas computacionales de procesamiento de imágenes.
- Solar, C., Saavedra, J.H., Toledo, P.G. Bubble coalescence tracking in a dynamic bubbling system using computational image processing techniques. CHISA 2022, 21-25 August, Prague.
- Svensson, S. E., Ferreira, J. A., Hakkarainen, M., Adolfsson, K. H., & Zamani, A. 2021. Fungal textiles: Wet spinning of fungal microfibers to produce monofilament yarns. *Sustainable Materials and Technologies*, 28, e00256.

- Trujillo-Roldán, M. A., & Valdez-Cruz, N. A. 2009. El uso de biorreactores desechables en la industria biofarmacéutica y sus implicaciones en la ingeniería. *Dyna*, 76(158), 275-283.
- Ulloa, Y. Tesis de pregrado UBB. 2022. (Supervisores: Saavedra y Toledo). Estudio del comportamiento de burbujas en soluciones acuosas de MIBC y NaCl mediante análisis de imágenes en una sistema de burbujeo de columna de pared delgada.
- Wang, C. Q., Wang, H., Fu, J. G., & Liu, Y. N. 2015. Flotation separation of waste plastics for recycling—A review. *Waste Management*, 41, 28-38.
- Zhang, L. 2021. Advanced treatment of oilfield wastewater by a combination of DAF, yeast bioreactor, UASB, and BAF processes. *Separation Science and Technology*, 56(4), 779-788.



Universidad de Concepción

BURBUJAS, MÁS QUE UN JUEGO DE NIÑOS



UNIVERSIDAD
DE LA FRONTERA



Universidad del Desarrollo
Universidad de Excelencia



10 AÑOS
CRHIAM

CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA
ANID/FONDAP/15130015

Serie Comunicacional CRHIAM