



VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LAS FERMENTACIONES EN ESTADO SÓLIDO FRENTE A LAS CONVENCIONALES EN BIORREACTOR DE TANQUE AGITADO

Distintos tipos de Fermentación en Estado Sólido, o Solid State Fermentation (SSF), vienen utilizándose desde tiempos muy remotos por diferentes culturas y aún hoy en día siguen empleándose de manera efectiva. Este sería el caso de la fermentación del grano de café y el de cacao, así como del procesado de la hoja de té o de la curación de quesos y productos cárnicos.

DAVID BARRERAS MARTÍNEZ,
área de I+D+i y Biotecnología, Instalaciones Industriales Grau.

Aunque es preciso destacar que actualmente las aplicaciones de la SSF pueden ir mucho más allá de estas etapas mencionadas que forman parte de sencillos procesos industriales alimentarios y que no dejan de ser meramente subsidiarias.

Del mismo modo que ocurre con la SSF, el ser humano prácticamente desde “noche de los tiempos” ha venido empleando también fermentaciones en estado líquido, cuyos principios siguen utilizándose en la actualidad, aplicando en los mismos, eso sí, no poca ciencia y tecnología que los convierte en procesos repetitivos extremadamente robustos.

No obstante, todavía no podemos afirmar esto último en relación a la SSF, a pesar de que el interés por la misma no deja de crecer, dado los patentes beneficios de construcción de estos biorreactores, de operación, ambientales y económicos que puede aportar, como a continuación pondremos de manifiesto.

A *grosso modo*, podemos afirmar, en un principio, que para aquellos productos con un elevado valor añadido y

que emplean un volumen de fermentación relativamente reducido, es más apto un biorreactor de tanque agitado convencional, mientras que la SSF sería más adecuada para productos de alto volumen y bajo valor. Es decir, la SSF sería ideal para fermentar sustratos sólidos de bajo precio o incluso subproductos industriales, materiales éstos disponibles en grandes cantidades.

Comenzaremos diciendo que la SSF es más apta para cultivos fúngicos que las fermentaciones convencionales en tanque agitado, dado que en ésta se logran obtener condiciones de incubación muy similares a las existentes en el hábitat natural de los mohos.

Añadiremos que la operativa de un biorreactor de SSF es más sencilla que en un fermentador de tanque agitado convencional y que incluso su ejecución puede resultar ser menos compleja.

Dentro de esta operativa menos complicada, tienen cabida también los requerimientos de esterilidad, con tratamientos térmicos poco exhaustivos, o incluso ausentes, en los biorreactores SSF, comparando estas necesidades

con las de los fermentadores de tanque agitado convencionales. Ello se debe a que el reducido contenido en agua de los sustratos da como resultado una baja actividad del agua (a_w), provocando que la probabilidad de contaminación con otros microorganismos se vea atenuada. Del mismo modo, dado que la SSF se emplea principalmente para cultivar mohos, éstos generalmente también se contaminan poco por crecer bien a bajas temperaturas y en entornos con baja a_w , es más, los hongos filamentosos provocan, adicionalmente, un descenso rápido del pH del medio, al tiempo que excretan en éste sustancias antibióticas, lo que, así mismo, inhibe a otros microorganismos.

Continuaremos haciendo mención a los costes operativos, que en la SSF pueden ser menores a los de la fermentación en tanque agitado convencional, por varios motivos. Ya conocemos que la SSF presenta una operativa más sencilla, con lo que se reduce el consumo de material fungible, como podrían ser los reactivos para el control de pH, sondas, etc. En la SSF, además, se pueden emplear simples cámaras de fermentación, en lugar de complejos biorreactores de tanque agitado, con múltiples controles y requerimientos de esterilidad y/o asepsia. Los productos de interés obtenidos en la SSF, ya sean estos biomasa o metabolitos excretados, también se encuentran a una concentración mayor con respecto a los biorreactores de tanque agitado convencionales, debido a la alta concentración de nutrientes y a la escasa presencia de agua, lo que facilita los procesos de *downstream*. En la SSF se reduce, así mismo, la generación de residuos, por el simple hecho de que haya una escasa presencia de agua. Todo lo anterior conduce a un significativo ahorro en cuanto a operativa se refiere.

Dando continuidad a nuestra disertación sobre el cultivo de mohos, debemos destacar que producirlos en un biorreactor de tanque agitado no resulta nada sencillo y puede complicarse sobremanera: el micelio invade la totalidad del interior del equipo, llega a bloquear la lectura de la sonda de pO₂, seguramente obturará también el *sparger* y, más probablemente aun, el venteo. Esto es debido a la combinación del estado líquido del medio con la alta presión de aire empleada, lo que permite al cultivo dispersarse, en ocasiones en forma de espuma, alcanzando así el micelio todos los rincones del tanque agitado.

Volviendo a la posibilidad de usar como sustratos fermentables subproductos alimentarios, debemos indicar que en SSF existe también la posibilidad de emplear ciertos sólidos que en biorreactores de tanque agitado convencional no se podrían utilizar o, cuanto menos, no serían aprovechables sin un costoso tratamiento previo (molturación, hidrólisis química o enzimática, separación de sólidos insolubles, etc.). Dentro de estos sustratos tendrían cabida los subproductos del cultivo agrario y el procesado de cereales, como la cascarilla de arroz y trigo, la paja de

trigo, la mazorca del maíz desgranada, etc.

En este amplio abanico de posibles sustratos para la SSF, quedarían incluidos también aquellos que por ser insolubles no se podrían emplear en un biorreactor de tanque agitado convencional.

Así mismo, es preciso destacar que la mayoría de los subproductos sólidos descritos no son adecuados para emplearlos como sustrato en biorreactores de tanque agitado, dado que podrían provocar en éstos, daños físicos, como, por ejemplo, la paja de cereal.

Una aplicación concreta del crecimiento de mohos en SSF es la producción de esporas, forma fúngica ésta difícil o imposible de obtener en cultivos en estado líquido. Algunas industrias, como las queserías, precisan emplear esporas fúngicas como iniciadores (*starters*), tal sería el caso de los quesos azules fabricados con *Penicillium spp.* Las esporas fúngicas, además, favorecen la conservación de mohos deshidratados, por liofilización u otra tecnología de secado, debido a su mejor resistencia a estrés frente a las formas miceliales.

Del mismo modo, pueden producirse también esporas de mohos como agentes para control biológico de plagas, utilizándose para ello, por ejemplo, hongos entomófagos. Las esporas fúngicas deshidratadas pueden conservarse fácilmente, ocupando además poco espacio (favoreciendo el transporte y el almacenamiento), facilitan la preparación de fórmulas para nebulizar, aplicables sobre el cultivo vegetal a proteger, así como mejoran la adhesión en los insectos "diana".

Otra industria que podría verse beneficiado con el uso de biorreactores para SSF sería la de la producción de enzimas, donde los hongos filamentosos cobran de nuevo protagonismo, por ser biofactorías por excelencia de estas moléculas proteicas. Tanto es así que se da la posibilidad de producir enzimas fúngicas con un bajo coste mediante SSF, ya que, al utilizarse un sustrato sólido con un bajo contenido de humedad, habrá una elevada concentración de materias fermentables, con lo que, a igual volumen de medio de cultivo, se obtiene un mayor rendimiento en biomasa y metabolitos producidos en comparación con los biorreactores de tanque agitado convencional.

Debido a lo anterior, el volumen de cultivo a procesar durante las etapas de *downstream*, será inferior al de la fermentación en fase líquida convencional. Con lo cual, el volumen de cultivo a manejar durante la cosecha es menor, al igual que la cantidad de agua a evaporar durante el secado por liofilización u otra tecnología de deshidratación.

Otra de las ventajas de la SSF sería el contacto con el aire favorecido en estos cultivos al producirse el crecimiento en superficie del microorganismo, siendo necesario un menor aporte externo de éste.

Llegados a este punto, debemos indicar que debido a la ya mencionada baja presencia de agua en los sustratos empleados para SSF, sus fuentes de carbono y otros nutrientes, como los azúcares, penetran en las células más gradualmente que en cultivos en estado líquido, con lo que se reduce la represión por catabolito, favoreciendo, por lo tanto, una mayor tasa metabólica respiratoria frente a la fermentativa. Esto, sin ningún género de duda, mejora el rendimiento en biomasa y la producción de metabolitos asociada.

Sin embargo, a pesar de todos los beneficios anteriormente descritos en cuando a la SSF se refiere, debemos destacar que este tipo de biorreactor también presenta ciertos inconvenientes. En relación a esto, es necesario mencionar que la tendencia habitual a emplear biorreactores de tanque agitado en estado líquido en detrimento de la SSF, provoca que ésta constituya un terreno poco explorado y que, en consecuencia, nos encontremos con no pocas dificultades a la hora de diseñar y construir este tipo de fermentador. Debido a ello, realizar los controles pertinentes, aunque éstos sean a priori sencillos y se requieran en menor número que en un biorreactor de tanque agitado convencional, puede representar todo un desafío. Por ejemplo, puede ser complejo en SSF alcanzar la esterilidad y mantener las condiciones asépticas necesarias, aunque este tipo fermentación sea menos exigente en estos aspectos, ya que la geometría del biorreactor y los medios para conseguir esta esterilidad y asepsia son completamente diferentes y no han sido todavía sondeados.

Así mismo, existen dificultades a la hora de calentar y, sobre todo, de enfriar el cultivo de una SSF, dado que en un sólido la transmisión de calor se ve dificultada en comparación con un líquido. La transmisión de calor en el primer caso tiene lugar por conducción, siendo, por lo tanto, más lenta que en el segundo caso, por convección.

En resumen, podemos destacar que es tal el nivel de conocimiento y la experiencia que se han llegado a alcanzar en fermentadores de tanque agitado convencionales, que sus controles resultan ya sencillos y robustos, a pesar de la complejidad inicial, mientras que todavía un alto grado de incertidumbre en este aspecto está presente cuando hablamos de SSF y aún nos queda por ello un largo camino por recorrer.

En cualquier caso, el principal problema de todo este asunto, y del que seguramente derivan todos los inconvenientes descritos, radica en que hasta hoy todavía no se ha desarrollado un diseño de biorreactor SSF que se haya mostrado eficaz y, por lo tanto, se haya estandarizado, erigiéndose en arquetipo para esta técnica de fermentación, siendo así el equivalente al biorreactor de tanque agitado para el cultivo en estado líquido.



Bibliografía

- Solid-State Fermentation of food industry wastes (2020). J. Pablo López Gómez, Musalbakri Abdul Manan, Colin Webb.
- Solid State Fermentation and its applications (2007). Liping Wang, Shang-Tian Yang.
- Bioconversion of agricultural residues and waste to value added products (2023). Aafreen Sakina, Nargis Nazir, Phalisteem Sultan, Qazi Parvaiz Hassan.
- Production of native and recombinant enzymes by fungi for industrial applications (2021). Jean-Paul Ouedraogo, Adrian Tsang.
- Solid-State Fermentation strategy for microbial metabolites production: an overview (2019). Neha Srivastava, Manish Srivastava, P.W Ramteke, P.K. Mishra.
- Design of bioreactors in Solid-State Fermentation (2018). Meena Krishania, Raveendran Sindhu, Parameswaran Binod, Vivek Ahluwalia, Vinod Kumar, Rajender Singh Sangwan, Ashok Pandey.
- Industrial enzymes (2015). Reeta R. Singhanian, Anil K. Patel, Laya Thomas, Mandavi Goswami, Balendu S. Giri, Ashok Pandey.
- Advances in Solid-State Fermentation (2018). Jorge A.V. Costa, Helen Treichel, Vinod Kumar, Ashok Pandey.
- Advances in porous characteristics of the solid matrix in Solid-State Fermentation (2018). Lan Wang, Yang Liu, Hong-Zhang Chen.
- Online monitoring of Solid-State Fermentation using respirometry (2018). María T. Torres-Mancera, Arturo Figueroa-Montero, Ernesto Favela-Torres, Gabriel Rosales-Zamora, Kesavan Madhavan Nampoothiri, Gerardo Saucedo-Castañeda.