

Empleo de microorganismos en aplicaciones de la ingeniería bioquímica

Use of microorganisms in biochemical engineering

Carlos ROLZ¹, 

¹ Investigador Emérito, Universidad del Valle de Guatemala, Ciudad de Guatemala, GUATEMALA

Correspondencia: Carlos Rolz (carlosrolz@uvg.edu.gt)

Recibido: 05/III/2026; Aceptado: 31/III/2026

Resumen: Los resultados de cinco tipos de experimentos se ilustran con resultados presentados en forma gráfica. Estos son: a) producción de etanol del sorgo dulce b) producción de compost del bagazo de caña y su evaluación como abono orgánico c) enriquecimiento del compost con microorganismos d) proceso de dos etapas para producir etanol y aceite microbiano, y e) modificación del aroma del café por medio de levaduras. Finalmente, se ofrecen sugerencias para una fortificación de la biotecnología en la Universidad del Valle de Guatemala.

Palabras clave: aceite microbiano, aroma café, biotecnología, compost, etanol, levaduras, milpa, *rhizobia*, sorgo dulce.

Abstract: Experimental results are presented for the following topics: a) ethanol production from sweet sorghum varieties, b) compost production from sugarcane byproducts and its evaluation as an organic soil amendment, c) compost enrichment with *rhizobia* for milpa production, d) two-step sequential fermentations for ethanol and microbial oil production from sweet sorghum juice, and e) coffee aroma modification through yeast addition during traditional coffee fermentation. Finally, recommendations are provided to strengthen future biotechnology research at the Universidad del Valle de Guatemala.

Key words: biotechnology, coffee aroma, compost, ethanol, microbial oil, milpa, *rhizobia*, sweet sorghum, yeasts.

INTRODUCCIÓN

En este artículo se presentan en forma breve los resultados de algunos proyectos de investigación llevados a cabo en el entonces activo Centro de Ingeniería Bioquímica del Instituto de Investigaciones, en colaboración con investigadores de otros centros del Instituto. Los proyectos seleccionados fueron en temas de interés nacional, y en ciertos de ellos, el conocimiento adquirido ha dado lugar a la planificación de nuevas actividades y líneas de trabajo. Sin embargo, y con el fin de enviar una visión más completa del tema, a continuación, se presenta, en forma condensada, el estado actual de las aplicaciones de la ingeniería bioquímica en un entorno general.

Los bioprocesos industriales actuales emplean una amplia diversidad de microorganismos, bacterias, levaduras, hongos filamentosos, algas, células animales y humanas, quienes llevan a cabo una red compleja de síntesis química, con la eventual acumulación de productos metabólicos, tanto internos como extracelulares. Cada uno de estos tipos de microorganismos tiene diferentes capacidades genéticas, con sus respectivas ventajas y desventajas. El crecimiento de la biomasa celular se lleva a cabo en biorreactores bajo un estricto control de diferentes variables operacionales, utilizando medios de cultivo cuya composición química se ha optimizado para cada caso, ya sean líquidos o sólidos. El biorreactor, en una antonimia, se mantiene bajo una constante aireación, o, en una ausencia total de ella, y su funcionamiento puede ser por lotes, por lotes alimentados, o en operación continua, según el objetivo del proceso. Por otro lado, en la mayoría de bioproductos, por su baja concentración al salir del biorreactor, es indispensable su recuperación y purificación en operaciones unitarias, tanto clásicas, como novedosas (Bhatia 2014).

La industria de biotecnología está dominada por productos tradicionales como etanol, antibióticos, ácidos orgánicos, enzimas, vacunas y polímeros, mejorados recientemente por técnicas de la ingeniería genética. Además, la biotecnología se aplica en el tratamiento de efluentes municipales, industriales y agrícolas. Recientemente, se ha desarrollado una nueva generación de productos, en biofarmacéutica, bioagricultura, biocombustibles, y biomateriales. Algunos de estos productos ya están plena producción comercial mientras otros se encuentran en un desarrollo activo, avanzando desde los laboratorios hasta plantas piloto demostrativas y, al ser exitosas, hasta plantas industriales (Davison & Lievense 2016). Sin embargo, es necesario reemplazar las materias primas por materiales renovables. Por lo tanto, la futura investigación debe centrarse en procesos biocinéticos y fotosintéticos, así como en operaciones de conversión, purificación y biodegradación. Por ejemplo, una fracción substancial de los fármacos empleados actualmente en

tratamientos clínicos son productos naturales, y una parte apreciable de ellos es producida por microorganismos (Wohlgemuth 2009). Ahora bien, también existen barreras y retos que impiden una operación óptima de los procesos industriales, específicamente aspectos relacionados con las herramientas disponibles de ingeniería en la optimización, simulación y control. Esto es especialmente relevante en el caso de los hongos filamentosos que poseen un amplio portafolio de aplicaciones (Formenti *et al.* 2014; Mears *et al.* 2017).

La misión de la ingeniería bioquímica es proporcionar productos de calidad deseados por la humanidad, mediante bioprocesos en donde microorganismos, enzimas y células seleccionadas transforman materias primas renovables, o intermediarios derivados de ellas, en productos a través de una cadena de operaciones que agregan valor (Noorman & Heijnen 2017). Varias clases de productos biológicos han crecido espectacularmente, y el futuro crecimiento de la industria está asociado tanto a esas moléculas como a candidatos de fármacos que están en el proceso de desarrollo clínico, entre los que se incluyen anticuerpos monoclonales, factores de crecimiento, hormonas, vacunas recombinantes, anticoagulantes, ácidos nucleídos, entre otros (Aggarwal 2008). Pero, también existe un crecimiento notable en la llamada “biotecnología blanca”, dedicada a la fabricación de productos químicos e intermediarios, tanto de especialidad, como básicos. Entre estos se incluyen biopolímeros, aditivos y suplementos alimenticios, sabores y aromas, solventes, bioetanol, biodiésel, metano e hidrógeno (Soetaert & Vandamme 2006; Philp *et al.* 2013; Nielsen *et al.* 2022).

Producción de etanol del sorgo dulce

El sorgo o maicillo dulce o sacarífero es un sorgo especial, ya que tiene la capacidad de acumular carbohidratos en su tallo, como la caña de azúcar, además de producir un grano nutritivo y fibra contenida en el bagazo. Posee muchas cualidades agronómicas: ciclo corto de crecimiento, posibilidad de una cosecha adicional por retoño, bajos requisitos de agua y nutrientes, buena adaptabilidad al clima y tolerancia al estrés abiótico y biótico (Zegada-Lizarazu & Monti 2015; Barcelos *et al.* 2016; Appiah-Nkansah *et al.* 2019). Formamos en la Universidad del Valle de Guatemala (UVG) un equipo financiado con fondos externos, liderado por Rolando Cifuentes en Agricultura, Ricardo Bressani en Nutrición, y el que escribe en Ingeniería Bioquímica. Sabiendo que el sorgo dulce es un cultivo multipropósito con potencial para la producción de biocombustibles, alimentos para consumo humano y animal, se evaluaron seis variedades de sorgo dulce, cultivadas en nuestro campo externo en Santa Lucia Cotzumalguapa (SLC). El objetivo fue determinar cuál variedad mostraba mayor productividad de etanol a partir de los azúcares solubles del tallo, así como un alto valor nutritivo del grano. Se logró



Figura 1. Vista del grano en la panoja del tallo.
Figure 1. View of the grain on the panicle of the stem.



Figura 2. Extracción y fermentación simultáneas de partículas de tallo molido en frascos agitados.
Figure 2. Simultaneous extraction and fermentation of ground stem particles in shake flasks.

demostrar que la variedad *Top 76-6* era la que mejor cumplía con los requisitos establecidos. La productividad promedio fue de 42.15 Mg de tallo fresco por ha y 2.36 Mg de grano por ha. La productividad promedio del etanol fue de aproximadamente 220 g por kg de tallo seco, cifra equivalente a 2,465 litros de etanol por h. En cuanto al grano, mostró la menor concentración de polifenoles y una calidad adecuada de la proteína, sustentada por un valor de eficiencia proteico de 1.07 y una digestibilidad proteica del 83.2 % de (Cifuentes *et al.* 2014). La cosecha del sorgo dulce se logró tras 12-14 semanas de desarrollo y crecimiento. Gracias al uso del retoño, fue posible una segunda cosecha, alcanzando una productividad de 4,800 litros de etanol por ha. Esta cifra es comparable a la obtenida con la caña de azúcar en la costa sur, pero en un periodo de 7-8 meses. La Figura 1 muestra que el sorgo dulce, además de acumular carbohidratos en su tallo, produce un grano nutritivo dentro de la panoja.

La Figura 2 muestra la extracción de los carbohidratos de partículas molidas del tallo de sorgo dulce y su conversión simultánea a etanol por acción de la levadura.

Posteriormente, en conjunto con Rolando Cifuentes de la UVG, llevamos a cabo experimentos con las variedades de sorgo dulce sembradas en dos sitios de la costa sur: (1) una finca privada en Suchitepéquez y (2) en SLC. Se evaluó la primera cosecha en la época seca, y dos retoños consecutivos en la época lluviosa. La productividad del tallo fresco fue igual en la primera cosecha y en retoño, aunque dependió de la variedad

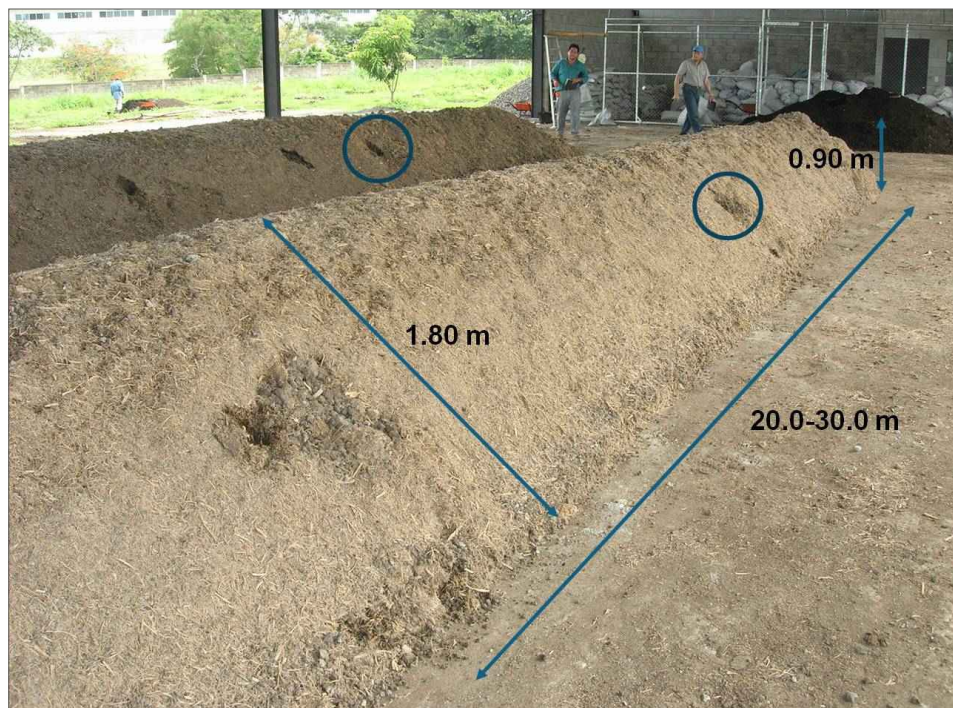


Figura 3. Distribución y dimensiones de las pilas de compost en la galera con techo y sin paredes laterales.
Figure 3. Distribution and dimensions of the compost piles in the shed with a roof and no side walls.

y del sitio. Se encontró una correlación inversa entre el contenido de carbohidratos y el cociente de hexosas sobre sacarosa; es decir, mientras menor era este cociente, mayor era el contenido de carbohidratos. La producción de etanol fue mayor en las variedades *Top 76-6*, *Sugar Drip* y *Umbrella*. La cifra anterior disminuyó en el primer retoño para todas las variedades en ambos sitios (Rolz *et al.* 2014).

Producción de compost del bagazo de caña y su evaluación como abono orgánico

La mayoría de las plantas obtiene el nitrógeno necesario para su crecimiento por medio de una simbiosis con bacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico y la descomposición natural del material orgánico presente en el suelo. Para acelerar el crecimiento y aumentar la productividad, la agricultura moderna emplea fertilizantes químicos. Sin embargo, su uso excesivo ha causado una pérdida progresiva de la proporción de materia orgánica en el suelo y ha generado serios problemas ambientales. Una alternativa sostenible ha sido la incorporación de enmiendas de suelo, destacando especialmente el compost (Diacono & Montemurro 2010). El compost posee una baja concentración de nitrógeno, entre 0.5 y 2.0%, pero presenta características altamente beneficiosas para el suelo. Mejora la estabilidad de las partículas de suelo, la retención de la humedad, la aireación, así como la porosidad y densidad del suelo, y fomenta la diversidad microbiana, que puede mantenerse

durante varios años, y exhibe propiedades para inhibir enfermedades de las plantas (Diacono & Montemurro 2010; Martínez-Blanco *et al.* 2013).

En conjunto con Rolando Cifuentes, UVG, diseñamos, construimos y operamos una planta piloto comercial en SLC. Como materias primas empleamos una mezcla de bagazo de la caña de azúcar, o, caña de azúcar entera recogida en las carreteras en donde se transporta la caña a los ingenios, y la cachaza producida en el proceso. Los ensayos se llevaron a cabo en filas volteadas y humidificadas mecánicamente en forma periódica. El proceso tardó alrededor de 40 días generando un producto estable y maduro. Las pérdidas de materia orgánica estuvieron entre 64 y 72% y el producto final mostró una relación C/N entre 10 y 20%. No se encontraron señales de citotoxicidad en semillas de frijol negro, las cuales germinaron en un 95 al 100%. En un ensayo en invernadero con semillas de tomate, el compost se mezcló con suelo en proporciones de 50-60%, cifra en donde tanto la altura como el peso de las plantas alcanzaron valores máximos (Rolz *et al.* 2010; Cifuentes *et al.* 2013). La Figura 3 ilustra la forma en que se preparaba la mezcla de caña de azúcar rechazada y la cachaza de los ingenios en promontorios o pilas que luego se mezclaban y humedecían periódicamente.

La Figura 4 indica claramente el tiempo requerido para preparar un compost estable y maduro. También muestra la tendencia de los cambios de la temperatura promedio dentro de la pila

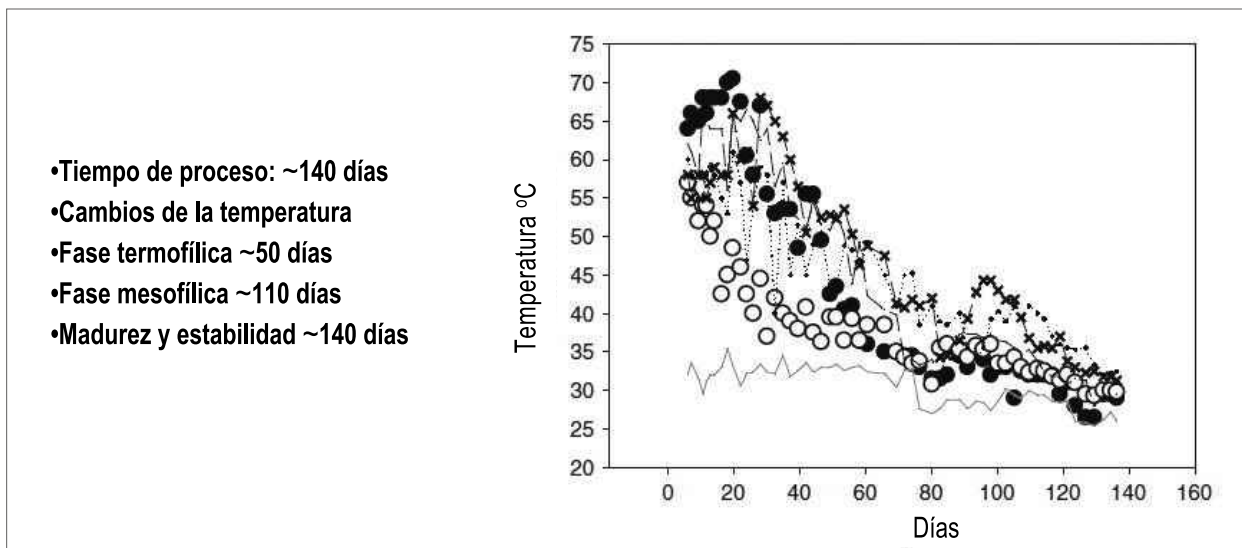


Figura 4. Variación de la temperatura promedio dentro de la pila con respecto al tiempo de proceso.

Figure 4. Variation of the average temperature inside the pile over the course of the process.



Figura 5. De izquierda a derecha, colocación manual de semilla con una porción de compost enriquecido, vista de la semilla en el hoyo del suelo, recubrimiento manual con tierra del sitio.

Figure 5. From left to right: manual placement of the seed with a portion of enriched compost, view of the seed in the soil hole, manual covering with soil from the site.

con respecto al tiempo de las seis pruebas realizadas identificadas con los diferentes símbolos mostrados. La línea punteada en la parte inferior de la gráfica indica la variación con el tiempo de la temperatura ambiente.

Enriquecimiento del compost con microorganismos

En conjunto con Rolando Cifuentes de la UVG, se realizaron experimentos para explorar la sinergia entre bacterias fijadoras de nitrógeno, *rhizobia*, y el frijol negro cuando se cultivaba en asociación con maíz, es decir, en el tradicional sistema de milpa. Las parcelas se establecieron en tres sitios en el departamento de Sololá: nuestro campo externo Altiplano a 2,340 msnm y dos sitios en San Andrés Semetabaj, a 2,061 y 2,189 msnm, respectivamente. Se emplearon dos cepas de *rhizobium* previamente aisladas en el sitio A, dos variedades de frijol arbustivo Texel y Altense proporcionados por el ICTA, y maíz nativo de grano blanco utilizado por los agricultores de esa región del altiplano. Los resultados mostraron que la

asociación del frijol con maíz produjo aspectos positivos: se mantuvo la máxima productividad del frijol y del maíz al reemplazar la mitad del fertilizante químico con compost enriquecido con *rhizobia*, aplicando directamente a la semilla durante la siembra (Cifuentes *et al.* 2017). En colaboración con Gamaliel Zambrano de la UVG, se adaptó un mezclador piloto con tornillo giratorio de listón a un sistema de aspersión de la suspensión de *rhizobia*, cultivadas bajo condiciones controladas en biorreactores de tanque agitado en el laboratorio. El beneficio de sembrar cereales, como el maíz, en asocio con leguminosas, como el frijol, es la transferencia de nitrógeno fijado del aire por las leguminosas al cereal. Experimentos publicados en la literatura similares respaldan los resultados obtenidos en este trabajo (Mukhala *et al.* 1999; Alemayeju *et al.* 2017; Nkhata *et al.* 2021; Diédhiou *et al.* 2022; Mota-Cruz *et al.* 2025; Rojas-Sánchez *et al.* 2025). La Figura 5 es una agrupación de fotos que ilustran la manera de sembrar manualmente por los agricultores las semillas de frijol luego de mezclarlas con el compost enriquecido.

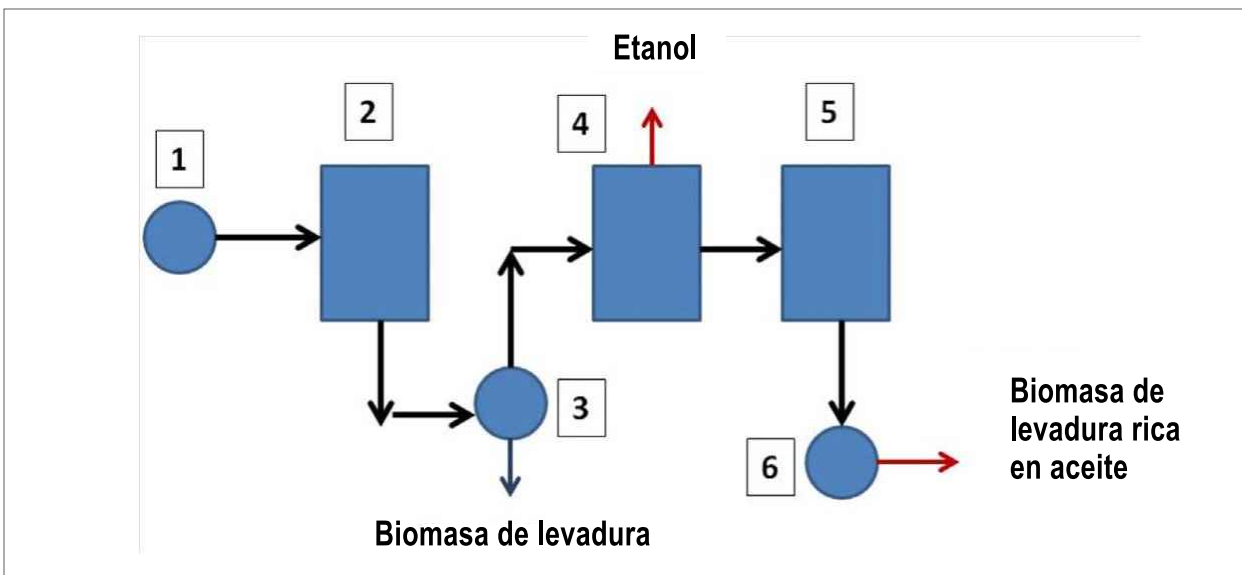


Figura 6. Proceso de dos etapas consecutivas para producir etanol y aceite microbiano empleando el jugo del sorgo dulce. 1. Extracción y almacenamiento del jugo, 2. Fermentación etanólica, 3. Separación de la levadura, 4. Destilación del etanol, 5. Producción de la levadura oleaginosa, 6. Separación de la biomasa microbiana rica en aceite (Rolz 2016).

Figure 6. Two-stage consecutive process to produce ethanol and microbial oil using sweet sorghum juice: (1) juice extraction and storage, (2) ethanol fermentation, (3) yeast separation, (4) ethanol distillation, (5) oleaginous yeast production, and (6) separation of oil-rich microbial biomass (Rolz 2016).

Proceso de dos etapas para producir etanol y aceite microbiano

Los aceites vegetales para freír alimentos en el país consisten en mezclas de aceites de colza, girasol y soya, los cuales son importados. A nivel mundial ha surgido un creciente interés en la posibilidad de emplear levaduras que, al crecer bajo ciertas limitaciones nutricionales, son capaces de acumular en su célula apreciables cantidades de aceite, el cual muestra una distribución de ácidos grasos similar al de los aceites vegetales (Ageitos *et al.* 2011; Sitepu *et al.* 2014; Chopra *et al.* 2022; Gallego-García *et al.* 2022; Sun *et al.* 2023; Petropoulos *et al.* 2025). De esta manera, emprendimos un proyecto de investigación en el cual se utilizó jugo de sorgo dulce como materia prima para producir etanol y aceite microbiano, empleando la levadura oleaginosa *Trichosporon oleaginosus* DSM 11815. En la primera fermentación, una levadura industrial convirtió la glucosa y sacarosa en etanol. Posteriormente, en el segundo paso, la levadura oleaginosa utilizó la fructosa y el nitrógeno remanente como fuente de carbón y energía, lo que permitió la acumulación intracelular de aceite. La Figura 6 muestra un diagrama de flujo simplificado de las operaciones unitarias principales para producir en dos etapas de fermentación consecutivas etanol y una levadura con un contenido intracelular de aceite arriba del 20% en base seca.

Para optimizar la producción de etanol, se utilizó un diseño factorial fraccionado de 14 pruebas, incluyendo seis repeticiones del punto central. Los factores evaluados fueron: a) la cepa de levadura, b) la concentración de sólidos totales iniciales, oBrix,

del jugo de sorgo dulce, y c) la concentración de fosfato de amonio añadido al medio. La variable de respuesta fue la cantidad de etanol producida por peso de sustrato consumido. Los resultados indicaron que la cepa de levadura y la concentración inicial de sólidos totales fueron los dos factores significativos para la producción de etanol. En la segunda etapa del proceso, se empleó el jugo residual previamente agotado de etanol y libre de la biomasa de levadura generada en la primera etapa. La relación C/N del medio fue de 86, y el crecimiento de la levadura oleaginosa se prolongó durante 168 horas bajo agitación y aireación constantes. La Figura 7 muestra los cambios de la biomasa de levadura y de los tres carbohidratos en función del tiempo. Luego de un breve periodo de adaptación, se observó un crecimiento continuo, aunque con una tasa de crecimiento lenta, lo cual era de esperarse con este tipo de levaduras. La glucosa y la fructosa no solo fueron asimiladas por la levadura, sino que también se produjeron mediante hidrólisis enzimática de la sacarosa, lo que estableció una condición dinámica en el sistema. La glucosa mostró la tasa mayor de consumo, mientras que la sacarosa empezó a utilizarse cuando la concentración de glucosa se volvió muy baja. En cambio, la fructosa mostró la menor tasa de consumo, quedando en el medio un residuo significativo de este azúcar. La biomasa final de la levadura fue de 21.23 g.L⁻¹ con un contenido de aceite de 28.33 % en base seca. El coeficiente de rendimiento del aceite, en términos de los carbohidratos consumidos, fue de 0.13 g de aceite por g de carbohidrato consumido (rendimiento equivalente a 0.47 en base al sustrato disponible). Finalmente, la productividad del aceite fue de 0.86 g.L⁻¹. día⁻¹.

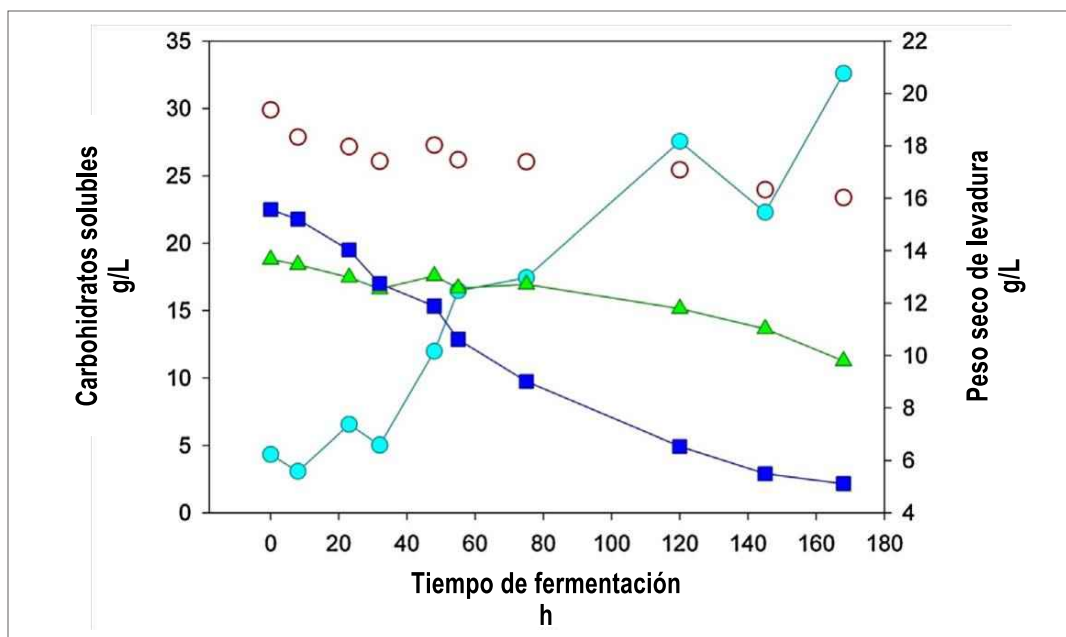


Figura 7. Cambios de las concentraciones en función del tiempo: biomasa de levadura, círculos celestes; glucosa, cuadrados azules; sacarosa, triángulos verdes; fructosa, círculos vacíos de periferia roja (Rolz 2016).

Figure 7. Changes in concentrations over time: yeast biomass, light blue circles; glucose, blue squares; sucrose, green triangles; fructose, open circles with red outlines (Rolz 2016).

En un experimento similar, se evaluaron cuatro cepas de levaduras oleaginosas, cultivados en frascos agitados y aireados por 168 horas (Rolz *et al.* 2019). Las levaduras se comportaron en forma similar, con excepción del consumo de carbohidratos. *Trichosporon oliginosus* y *Lipomyces starkeyi* consumieron alrededor de 80 % de los carbohidratos, con una asimilación prácticamente completa de la fructosa. *Rhodotorula glutinis* consumió preferentemente glucosa y fructosa, mientras que *Yarrowia lipolytica* mostró un consumo parcial los tres carbohidratos presentes en el medio.

Modificación del aroma del café por medio de levaduras

Se ha planteado la siguiente interrogante: ¿puede la fermentación durante el beneficio del café ofrecer rutas interesantes para influir en el desarrollo del aroma y el sabor de la bebida? Los resultados logrados en los ensayos pioneros de los años subsiguientes, en los cuales, se adicionaban microorganismos seleccionados para este objetivo, confirmaron las expectativas iniciales. Dichos estudios mostraron resultados prometedores, evidenciando la producción de compuestos químicos que originaron nuevas notas y acentos en el aroma de la bebida. Los ensayos se realizaron en su mayoría en Brasil, empleando los tres principales tipos de beneficio del café: seco, semiseco y húmedo. En estos procesos se

incorporaron principalmente varias especies de levaduras, entre ellas *Saccharomyces cerevisiae*, una levadura empleada comercialmente en la producción de etanol para bebidas y otros usos industriales. En el caso del beneficiado húmedo, el proceso de fermentación se realizó en los tanques de fermentación con adición de agua.

Se llevó a cabo un ensayo experimental con el objetivo de determinar la composición química del aroma de cafés guatemaltecos sometidos a fermentación con la adición de cepas de la levadura *Saccharomyces cerevisiae*. Las fermentaciones se llevaron a cabo utilizando 2 kg de café, despulpado sin agua, previa eliminación de los granos flotadores. El café se colocó en recipientes plásticos abiertos, los cuales se mantuvieron en una cámara de temperatura constante de 25 °C y una humedad relativa de 60 % controladas por 72 h. En los tratamientos con adición de microorganismos, la levadura, suspendida en agua, se aplicó mediante un atomizador manual de pulverización impulsado con aire comprimido. La suspensión de levadura se había producido en biorreactores de laboratorio. Se logró una fermentación activa (ver Fig. 6). El pH final promedio de las muestras fue: fermentación natural: 3.68 ± 0.37 ; levadura CBS381: 3.92 ± 0.14 ; levadura CBS459: 3.71 ± 0.31 . El estudio incluyó muestras de tres cafés de la región de Fraijanes y una muestra de la región de Acatenango (De León *et al.* 2016).

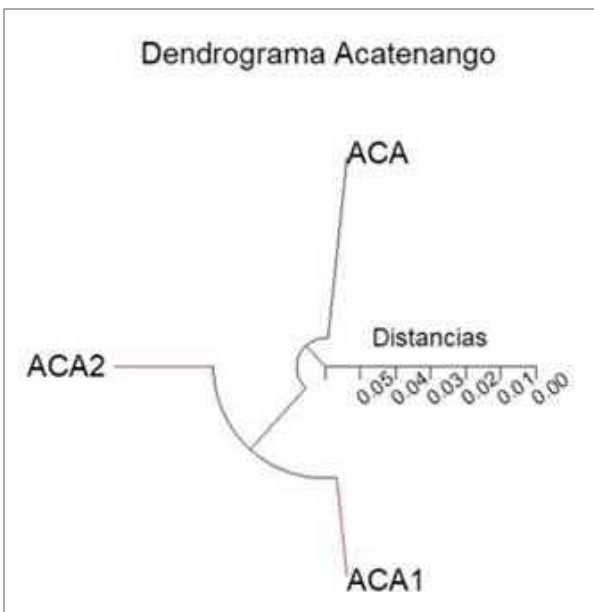


Figura 8. Dengroma de la muestra de la región de Acatenango, Guatemala. ACA1 se refiere la muestra con una adición de levaduras (*Saccharomyces cerevisiae* CBS381). ACA2 se identifica la muestra con una fermentación de levaduras (*Saccharomyces cerevisiae* CBS459). Amas difieren de ACA (fermentación natural). Los compuestos químicos del aroma adicionales producidos por la fermentación con la adición de levaduras fueron: (por ambas levaduras) 2-metil-3-pentanona, furfuryl formato y (por CBS459) 1-hidroxi-2-butanona.

Figure 8. Aroma profile of the sample from the Acatenango region. ACA1 refers to the sample with added yeast (*Saccharomyces cerevisiae* CBS381). ACA2 refers to the sample fermented with yeast (*Saccharomyces cerevisiae* CBS459). Both differ from ACA (natural fermentation). Additional aroma compounds produced by fermentation with added yeast were: (for both strains) 2-methyl-3-pentanone and furfuryl format, and (for CBS459) 1-hydroxy-2-butanone.

Una vez terminada la fermentación, las muestras se lavaron rigurosamente y se secaron al sol. El aroma de la bebida se analizó mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (CG-MS). La composición química del aroma se analizó por un análisis multivariado, encontrándose diferencias entre la fermentación natural y la fermentación con adición de levaduras. Un ejemplo de los resultados obtenidos se presenta en Figura 8.

Los resultados que se obtuvieron con todas las muestras, aunque de carácter preliminar, indican que la adición de levaduras puede alterar la composición química del aroma de la bebida de café. Por ello, es necesario planificarse estudios futuros tanto en laboratorio como en beneficios operados a escala piloto. En estos estudios será importante profundizar los aspectos científicos del proceso e incluir evaluaciones sensoriales especiales del producto obtenido, con el fin de identificar y caracterizar los atributos aromáticos y de sabor generados durante la fermentación.

Predecir el futuro es riesgoso, especialmente en un campo como la biotecnología, caracterizado por avances constantes y la rápida creación de empresas emergentes. Por eso, resulta más pertinente reflexionar sobre sus perspectivas en el contexto

nacional y, en particular, en la UVG. A diferencia de países como México, Guatemala aún no ha creado empresas emergentes de biotecnología, lo cual probablemente responde, en gran medida, a la ausencia de capital de riesgo para invertir. En la UVG existen tres grupos de investigadores que han incursionado en el tema relacionado con aspectos de salud, agricultura, y productos químicos y bio-combustibles. Sin embargo, deseo estimularlos a que cooperen más estrechamente para consolidar una masa crítica de conocimiento y definir un plan estratégico común. También, sería deseable que las autoridades de la UVG fortalezcan en una forma más ambiciosa, los marcos institucionales para la transferencia de tecnología, particularmente en sus aspectos económicos, de modo que se generen incentivos adecuados y beneficios compartidos tanto para la institución como para los investigadores,

AGRADECIMIENTOS

En todos los experimentos descritos anteriormente participaron activamente Roberto de León, Ana Luisa Mendizábal de Montenegro y Carlos Arias (QPD) profesionales y técnico del Centro de Ingeniería Bioquímica de la Universidad del Valle de Guatemala.

REFERENCIAS

- Ageitos, J. M., Vallejo, J. A., Veiga-Crespo, P. & Villa, T. G (2011). Oily yeasts as oleaginous cell factories. *Applied Microbiology and Biotechnology* 90: 1219-1227. [https://doi.org/10.1007/s00253-011-3200-z].
- Aggarwal, S. (2008) What's fueling the biotech engine -2007. *Nature Biotechnology* 26(11): 1227-1233. [https://doi.org/10.1038/nbt1108-1227].
- Alemayehu, A., Tamado, D., Nigussie, D., Yigzaw, D., Kinde, T. & Wortmann, C. S. (2017). Maize-common bean intercropping to optimize maize-based crop production. *Journal of Agricultural Science* 155(7): 1-13. [https://doi.org/10.1017/S0021859617000193].
- Appiah-Nkansah, N. B., Li, J., Rooney, W. & Wang, D. (2019). A review of sweet sorghum as a viable renewable bioenergy crop and its techno-economic analysis. *Renewable Energy* 143: 1121-1132. [https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.066].
- Barcelos, C. A., Maeda, R. N., Santa Anna, L. M. M. & Pereira, N. Jr. (2016). Sweet sorghum as a whole-crop feedstock for ethanol production. *Biomass and Bioenergy* 94: 46-56. [https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.08.012].
- Bhatia, S. K. (2014) Fermentation fundamentals: brewing bugs for bioengineering. *Chemical Engineering Progress* 112(1): 30-42.

- Chopra, J., Rangarajan, V. & Sen, R. (2022). Recent developments in oleaginous yeast feedstock based biorefinery for production and life cycle assessment of biofuels and value-added products. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 53: 102621. [<https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102621>].
- Cifuentes, R., de Leon, R., Porres, C. & Rolz, C. (2013). Windrow composting of waste sugar cane and press mud mixtures. *Sugar Technology* 15(4): 406-411. [<https://doi.org/10.1007/s12355-013-0217-x>].
- Cifuentes, R., Bressani, R. & Rolz, C. (2014). The potential of sweet sorghum as a source of ethanol and protein. *Energy for Sustainable Development* 21: 13-19. [<https://doi.org/10.1016/j.esd.2014.04.002>].
- Cifuentes, R., de León, E., Gómez, S., de León, R. & Rolz, C. (2017). Parcelas demostrativas de maíz y frijol arbustivo en asocio con el empleo de *Rhizobium* como inoculante en el departamento de Sololá Guatemala. *Revista de la Universidad del Valle de Guatemala* 34: 78-81.
- Davison, B. H. Lievense, J. C. (2016). Technology challenges and opportunities in commercializing industrial biotechnology. *Chemical Engineering Progress* 112(6): 35-42.
- De León, R., Mendizábal de Montenegro, A. L. & Rolz, C. (2016). Efecto del despulpado en seco y la adición de levaduras en la fermentación sobre la composición del aroma del café tostado *Revista de la Universidad del Valle de Guatemala* 33: 75-85.
- Diacono, M. & Montemurro, F. (2010). Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. *Agronomy and Sustainable Development* 30: 401-422.
- Diédhiou, I., Ramírez-Tobias, H. M., Fortanelli-Martinez, J. & Flores-Ramírez, R. (2022). Maize intercropping in the traditional "Milpa" system. Physiological, morphological, and agronomical parameters under induced warming: Evidence of related effect of climate change in San Luis Potosí (Mexico). *Life* 12:1589. [<https://doi.org/10.3390/life12101589>].
- Formenti, L. R., Nørregaard, A., Bolic, A., Quintanilla-Hernandez, D., Hagemann, T., Heins, A. L., Larsson, H., Mears, L., Mauricio-Iglesias, M., Krühne, U. & Gernaey, K. V. (2014) Challenges in industrial fermentation technology research. *Biotechnology Journal* 9: 727-738. [<https://doi.org/10.1002/biot.201300236>].
- Gallego-García, M., Susmozas, A., Moreno, A.D. & Negro, M. J. (2022). Evaluation and identification of key economic bottlenecks for cost-effective microbial oil production from fruit and vegetable residues. *Fermentation* 8: 334. [<https://doi.org/10.3390/fermentation8070334>].
- Martínez-Blanco, J., Lazcano, C., Christensen, T. H., Muñoz, P., Rieradevall, J., Moller, J., Antón, A. & Boldrin, A. (2013). Compost benefits for agriculture evaluated by life cycle assessment. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 33: 721-732. [<https://doi.org/10.1007/s13593-013-0148-7>].
- Mears, L., Stocks, S. M., Albaek, M. O., Sin, G. & Gernaey, K. V. (2017). Mechanistic fermentation models for process design, monitoring, and control. *Trends in Biotechnology* 35(10): P914-924.
- Mota-Cruz, C., Casas, A., Ortega-Paczka, R., Perales, H., Vega-Peña, E. & Bye, R. (2025). Milpa, a long-standing polyculture for sustainable agriculture. *Agriculture* 15: 1737. [<https://doi.org/10.3390/agriculture15161737>].
- Mukhala, E., De Jager, J. M., Van Resburg, L. D. & Walker, S. (1999). Dietary nutrient deficiency in small scale farming communities in South Africa: Benefits of intercropping maize (*Zea mays* L.) and beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Nutrition Research* 19(4): 629-641. [[https://doi.org/10.1016/S0271-5317\(99\)00028-7](https://doi.org/10.1016/S0271-5317(99)00028-7)].
- Nielsen, J., Tillegreen, C. B. & Petranovic, D. (2022). Innovation trends in industrial biotechnology. *Trends in Biotechnology* 40(10): P1160-1172.
- Nkhata, W., Shimelis, H. & Chirwa, R. (2021). Productivity of newly released common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties under sole cropping and intercropping with maize (*Zea mays* L.). *Frontiers in Sustainable Food Systems* 5: 741177. [<https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.741177>].
- Noorman, H. J. & Heijnen, J. J. (2017). Biochemical engineering's grand adventure. *Chemical Engineering Science* 170: 677-693. [<https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.12.065>].
- Petropoulos, A., Giannakis, N., Ioannidou, S. M., Vlysidis, A., Koutinas, A. & Stylianou, E. (2025). Circular microbial oil production and extraction using oleaginous yeasts, post-consumer bioplastic wastes and green solvents. *Waste Management* 204: 114936. [<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114936>].
- Philp, J. C., Ritchie, R. J. & Allan, J. E. M. (2013). Biobased chemicals: the convergence of green chemistry with industrial biotechnology. *Trends in Biotechnology* 31(4): 219-222.
- Rojas-Sánchez, B., de los Santos-Villalobos S., Valdez Alarcón J. J., Chávez-Bárcenas, A. T., Orozco-Mosqueda, M. C. & Santoyo G. (2025). Optimizing milpa agrosystems with beneficial microbes and their ecological interactions: a review. *Discover Applied Sciences* 7: 104. [<https://doi.org/10.1007/s42452-025-06503-6>].
- Rolz, C. (2016). Two consecutive step processes for ethanol and microbial oil production from sweet sorghum juice. *Biochemical Engineering Journal* 112: 186-192. [<https://doi.org/10.1016/j.bej.2016.04.026>].
- Rolz, C., de León, R., Cifuentes, R. & Porres, C. (2010). Windrow composting of sugarcane and coffee byproducts. *Sugar Technology* 12(1): 15-20. [<https://doi.org/10.1007/s12355-010-0004-x>].
- Rolz, C., de León, R., Mendizabal de Montenegro, A. L. & Cifuentes, R. (2014). Ethanol from sweet sorghum in a year-round production cycle. *Biomass Conversion and Biorefinery* 4: 341-350. [<https://doi.org/10.1007/s13399-014-0118-6>].
- Rolz, C., de León, R. & Mendizabal de Montenegro, A. L. (2019). Co-production of ethanol and biodiesel from sweet sorghum juice in two consecutive fermentation steps. *Electronic Journal of Biotechnology* 41: 13-21. [<https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2019.05.002>].
- Sitepu, I., Garay, L. A., Sestric, R., Levin, D., Block, D.E., German, B. J. & Bourdy-Mills, K. L. (2014). Oleaginous yeasts for biodiesel: current and future trends in biology and production. *Biotechnology Advances* 32: 1336-1360. [<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2014.08.003>].
- Soetaert, W. & Vandamme, E. (2006). The impact of industrial biotechnology. *Biotechnology Journal* 1: 756-769. [<https://doi.org/10.1002/biot.200600066>].
- Sun, H., Gao, Z., Zhang, L., Wang, X., Gao, M. & Wang, Q. (2023). A comprehensive review on microbial lipid production from wastes: research updates and tendencies. *Environmental Science and Pollution Research* 30: 79654-79675. [<https://doi.org/10.1007/s11356-023-28123-6>].
- Wohlgemuth, R. (2009). The locks and keys to industrial biotechnology. *New Biotechnology* 25(4): 204-213. [<https://doi.org/10.1016/j.nbt.2009.01.002>].
- Zegada-Lizarazu, W. & Monti, A. (2015). An integrated approach to harvest and storage of sweet sorghum at farm scale. *Bioenergy Research* 8: 450-458. [<https://doi.org/10.1007/s12155-014-9533-6>].