

DEL BAGAZO AL DULZOR

La Revolución de Xilitol y la Levadura que lo Crea

Una aventura científica que transforma los residuos de la caña de azúcar en un edulcorante del futuro

XILITOL

Ulda Campos Felix
Jose Figueroa Ramirez
Henry Briceño Yen
Alex Campos Felix



HN

HoNexus
EDITORIAL

Primera Edición Digital

DEL BAGAZO AL DULZOR

La Revolución de Xilitol y la Levadura que lo Crea

Una aventura científica que transforma los residuos de la caña de azúcar en un edulcorante del futuro

Ulda Campos Felix
Jose Figueroa Ramirez
Henry Briceño Yen
Alex Campos Felix



HN

Flo Nexus
EDITORIAL

Primera Edición Digital

**DEL BAGAZO AL DULZOR: LA REVOLUCIÓN DEL
XILITOL Y LA LEVADURA QUE LO CREA**
**Una aventura científica que transforma los residuos de la caña de
azúcar en un edulcorante del futuro**

© Ulda Campos Felix.
© Jose Figueroa Ramirez.
© Henry Briceño Yen.
© Alex Campos Felix.

Editor de contenido: Natalia Beltran Choque
Diseño de cubierta: Ho Nexus

1ª edición digital, noviembre 2025

Editado por:

© HO NEXUS E.I.R.L.
Dirección legal: Urb. Paseo del Mar Mz I4, Lt 33
Nuevo Chimbote, Santa, Ancash - Perú
Correo electrónico; ed.honexus@gmail.com
teléfono: 978 653 152
<https://books.honexus.org>
DOI: <https://doi.org//10.70504/978-612-99189-6-9>

Reservados todos los derechos de publicación en cualquier idioma; siendo su contenido protegido por la Ley vigente que establece penas de prisión y/o multas a quienes intencionadamente reprodujeran o plagiaran, en todo o en parte, una obra literaria, artística o científica.

Depósito Legal: 2025-12906
ISBN: 978-612-99189-6-9

Revisión por pares:

Este libro (o monografía) fue sometido a evaluación de pares mediante el sistema de doble ciego (doubleblinded review), garantizando la calidad, pertinencia, ética y rigor académico de la obra, conforme a los estándares internacionales de revisión científica y las políticas editoriales de Ho Nexus.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	6
PRÓLOGO	8
INTRODUCCIÓN	9
PARTE I: EL ESCENARIO Y LOS PROTAGONISTAS	10
Capítulo 1 - Una Revolución Dulce y Sostenible.....	10
Capítulo 2 - Los Ingenieros Microscópicos: La Levadura <i>Candida sp</i>	14
PARTE II: PREPARANDO EL BANQUETE PARA LA LEVADURA ..	20
Capítulo 3 - De la Fibra al Azúcar: La Alquimia del Hidrolizado.....	20
Capítulo 4 - La Gran Limpieza: Detoxificación del Medio	24
PARTE III: EL CORAZÓN DEL PROCESO: LA FERMENTACIÓN ..	27
Capítulo 5 - El Menú Perfecto: Diseñando el Medio Fermentativo	27
Capítulo 6 - La Gran Transformación: Del Azúcar al Edulcorante	32
PARTE IV: LOS RESULTADOS Y SU IMPACTO	35
Capítulo 7 - Lo que los Números Nos Dicen.....	35
Capítulo 8 - Dialogando con la Ciencia: Interpretando el Descubrimiento	46
Capítulo 9 - Conclusiones y el Futuro de la Biorrefinería.....	49
REFERENCIAS	52
ANEXOS	55

RESUMEN

¿Y si los desechos de la caña de azúcar fueran capaces de convertirse en un edulcorante beneficioso ypreciado?

Este libro te propone embarcarte en una increíble expedición científica donde lo que algunos consideran simple "basura" agrícola, para otros se transforma en la materia esencial de una revolución dulce y sustentable. "Del Bagazo al Dulzor" narra el recorrido de una investigación innovadora que transforma el bagazo de caña de azúcar —un desecho común y poco aprovechado— en xilitol, un edulcorante natural que ofrece destacados beneficios para la salud.

A lo largo del texto, encontrarás la narración de tres personajes sorprendentes:

- El Residuo: el bagazo, que tiene en su composición un tipo de azúcar conocido como xilosa.
- El Producto: el xilitol, un endulzante que sabe a azúcar pero tiene menos calorías y ayuda a evitar las caries.
- La Ingeniera Microscópica: la levadura *Candida* sp. , un pequeño organismo que puede hacer magia a través de la transformación.

Imagina que puedes ser parte de un proceso increíble, y te lo vamos a explicar de la forma más simple posible. Tu recorrido empieza en el laboratorio, donde tu misión es encontrar la levadura ideal. Después, verás de cerca la "metamorfosis" necesaria para preparar su alimento: cómo liberamos la xilosa del bagazo y limpiamos cualquier impureza en un proceso que llamamos detoxificación.

La parte más emocionante de esta historia es la fermentación. Aquí descubriremos cómo crear el "ambiente perfecto": la mezcla precisa de nutrientes y condiciones para que nuestra levadura rinda al máximo, transformando la xilosa en xilitol con la mayor efectividad. Para cerrar, evaluaremos el éxito de esta conversión y su impacto real en el desarrollo de una industria más sostenible y responsable.

Esto va mucho más allá de un informe técnico; es un relato sobre el potencial que yace en lo inesperado, sobre la economía circular en acción, y sobre cómo la biotecnología está creando respuestas ingeniosas a los problemas actuales. "Del Bagazo al Dulzor" es una invitación a un mundo donde la ciencia, la naturaleza y la innovación se dan la mano para endulzar nuestro futuro de un modo inteligente y respetuoso con la Tierra.

PRÓLOGO

Imagina que los restos de la caña de azúcar, que siempre han sido un problema para las fábricas, pudieran convertirse en algo valioso. ¿Y si en lugar de verlos como basura, pudiéramos transformarlos en un endulzante natural, bueno para la salud y amigable con el planeta? Esto no es ciencia ficción; es justo lo que se está investigando hoy en día.

Este libro cuenta el proceso detrás de una pregunta fascinante: ¿podemos usar levaduras —esos mismos organismos que ayudan a hacer pan o cerveza— para convertir el “bagacillo”, un residuo de la caña de azúcar, en xilitol? El xilitol es un edulcorante especial: no solo endulza, sino que ayuda a prevenir caries y es apto para personas con diabetes, ya que no eleva rápidamente el azúcar en la sangre.

A lo largo de estas páginas, vamos a simplificar conceptos que suenan complicados —como la biotecnología y la fermentación— para que cualquier persona pueda entenderlos. Acompañaremos a la levadura *Candida* sp. en su viaje: desde que es aislada en el laboratorio hasta que, dentro de un biorreactor, convierte azúcares simples en un producto con gran potencial.

Pero esto no es solo un informe técnico. Es una historia sobre darle valor a lo que otros desechan, sobre trabajar con microorganismos para lograr algo extraordinario, y sobre cómo la ciencia puede cerrar ciclos y promover una economía circular. Es, en el fondo, una invitación a conocer cómo pequeños organismos pueden ayudarnos a construir un futuro más dulce y sostenible.

INTRODUCCIÓN

Nuestro mundo nos está llamando a reconsiderar cómo producimos. La producción de azúcar crea grandes cantidades de un residuo fibroso conocido como bagazo. De este, se origina un material más fino, llamado bagacillo. Durante muchos años, quemarlo o dejarlo descomponer fue un desafío para el medio ambiente. Pero ¿qué pasaría si pudiéramos ver este "residuo" no como un final, sino como el inicio de algo diferente?

Este libro explora una idea poderosa: la biorrefinería. Un concepto donde los residuos se convierten en una mina de recursos. En este caso, el bagacillo de caña de azúcar es rico en un azúcar llamado xilosa. Y aquí entra nuestro segundo protagonista: el xilitol. Conocido como "el edulcorante de los diabéticos", el xilitol tiene la misma dulzura que el azúcar común, pero con un 40% menos de calorías y beneficios comprobados para la salud dental (Escobar Noboa, 2025).

El puente mágico entre la xilosa del bagacillo y el xilitol es un tercer protagonista, invisible a simple vista: una levadura del género *Candida* sp. Estos pequeños seres vivos son capaces de "comerse" la xilosa y "producir" xilitol como subproducto. Este proceso se llama fermentación, y es tan antiguo como el pan y el vino, pero aplicado con una precisión moderna.

La pregunta central de esta investigación, y el hilo conductor de este libro, es: ¿cómo podemos optimizar el "medio de fermentación" —la "casa" y la "comida" de la levadura— para que esta transformación sea lo más eficiente posible?

Acompáñanos en un recorrido que va desde la recolección de muestras en el campo hasta el análisis con tecnología de punta en el laboratorio. Descubriremos juntos cómo se aísla y selecciona a la levadura perfecta para el trabajo, cómo se prepara el hidrolizado de bagacillo (su "comida principal"), y cómo, en el corazón del proceso fermentativo, la ciencia y la naturaleza colaboran para crear un producto que beneficia a la salud, la industria y el medio ambiente.

PARTE I: EL ESCENARIO Y LOS PROTAGONISTAS

Capítulo 1 - Una Revolución Dulce y Sostenible

Los destinos más habituales de los restos vegetales lignocelulósicos de cosecha y poda son comúnmente la reincorporación directa al suelo (Steponavičienė et al., 2023), la alimentación animal y la quema (controlada o no) o el abandono a la intemperie. Uno de los usos para el bagazo de la caña de azúcar —entendido como residuo lignocelulósico del tallo de la caña tras el exprimido— es su empleo como componente de la alimentación de rumiantes (Roba et al., 2022). Por otro lado, la exposición del bagazo a la intemperie facilita su degradación mediante levaduras y hongos (incluidos actinomicetos y mesofílicos) en función de la temperatura. Mientras tanto, la quema del bagazo constituye un problema ambiental, ya que contribuye a incrementar los niveles de GEI- gases de efecto invernadero (Manzini Poli et al., 2022).

Imagina un mundo donde uno de los mayores desafíos ambientales —la gestión de residuos agrícolas (Contreras Franco, 2024) — se convierta en la fuente de un producto revolucionario para la salud. Un mundo donde lo que antes se quemaba, contaminando el aire, ahora se transforme en un edulcorante natural que combate las caries y es apto para personas con diabetes. Esta no es una fantasía futurista; es la promesa tangible que encierra la historia que este libro te va a contar. Es la revolución dulce y sostenible que nace de la unión entre un residuo, el bagacillo de caña de azúcar, y un tesoro, el xilitol.

El Problema: Una Montaña de Residuos con un Costo Ambiental

Cada año, la industria azucarera genera cantidades inmensas de bagazo, el residuo fibroso que queda después de exprimir la caña. De este bagazo, se desprende un material más fino: el bagacillo. Tradicionalmente, los destinos de estos residuos lignocelulósicos han sido limitados y problemáticos. Se han usado como alimento para rumiantes, se han reincorporado al suelo o, en el peor de los casos, se han abandonado

a la intemperie o se han quemado de manera controlada o incontrolada (Aguilar Novillo et al., 2022).

La quema, una práctica común, es especialmente preocupante. Libera grandes volúmenes de gases de efecto invernadero a la atmósfera, contribuyendo directamente al calentamiento global y a la contaminación del aire que respiramos (Cunuay Lopez, 2023). Tenemos, por tanto, una montaña de "desperdicio" que, lejos de ser un recurso, se convierte en un pasivo ambiental.

La Oportunidad: El Tesoro Oculto en la Fibra

Pero ¿y si pudiéramos ver este bagacillo no como un desecho, sino como una mina de oro sin explotar? La respuesta está en su composición química. Esta fibra vegetal está compuesta principalmente por tres elementos: celulosa, hemicelulosa y lignina, que forman una red tridimensional resistente.

El verdadero tesoro está en la hemicelulosa. Mediante un proceso llamado hidrólisis, podemos descomponer esta hemicelulosa y liberar un azúcar simple que contiene: la xilosa. Y es aquí donde la magia de la biotecnología entra en escena, porque la xilosa es la materia prima perfecta para fabricar xilitol (Zambrano Zambrano et al., 2021).

¿Por Qué el Xilitol? El Edulcorante del Futuro, Hoy

El xilitol no es un edulcorante artificial más. Es un polialcohol de cinco carbonos que se encuentra de forma natural en muchas frutas y verduras (Cevallos Álvarez, 2024), y que nuestro propio organismo produce en pequeñas cantidades. Sus beneficios lo han catapultado a una demanda global en constante crecimiento:

- **Dulzura sin las desventajas:** Tiene el mismo poder edulcorante que el azúcar común (sacarosa), pero con un 40% menos de calorías.

- Aliado de la salud: Es ampliamente conocido por su papel en la prevención de caries, ya que las bacterias dañinas de la boca no pueden metabolizarlo (Escobar Noboa, 2025).
- Ideal para diabéticos: El cuerpo lo metaboliza sin necesidad de insulina, por lo que no causa picos en los niveles de glucosa en sangre (Roldán García, 2021).
- Mercado en auge: Se estima que la producción mundial superará las 260,000 toneladas métricas, con un valor de mercado que sobrepasa los mil millones de dólares. Su demanda crece alrededor de un 6% anual.

El Dilema de la Producción y una Solución Natural

La pregunta obvia es: si el xilitol es tan bueno, ¿por qué no lo producimos más? La producción industrial tradicional nos da la respuesta. El método químico convencional requiere de xilosa pura y utiliza catalizadores de níquel a altas temperaturas y presiones (Edgar Ledezma-Orozco et al., 2018). Aunque es eficiente, este proceso es extremadamente costoso, consume mucha energía y tiene una huella ambiental significativa.

Afortunadamente, existe una alternativa más elegante y sostenible: la fermentación microbiana (Mateo Casas et al., 2024). Así como la levadura transforma los azúcares del jugo de uva en vino, ciertos microorganismos, como las levaduras del género *Candida* sp., pueden actuar como "fábricas biológicas" microscópicas (González Martínez, 2024). Son capaces de "consumir" la xilosa del hidrolizado de bagacillo y, en su metabolismo, "fabricar" xilitol.

La Pregunta Clave: ¿Cómo Potenciar esta Transformación?

Sin embargo, no basta con juntar el hidrolizado de bagacillo con la levadura. El éxito de toda esta revolución depende de un factor crucial: el medio fermentativo. Este es el "hogar" y la "dieta" de la levadura. Su composición —los nutrientes, el pH,

la temperatura— influye directamente en qué tan eficientemente la levadura *Candida* sp. puede realizar su trabajo de transformar xilosa en xilitol (Campos-Felix, 2021).

Por ello, la investigación que da vida a este libro se centró en una pregunta fundamental: ¿Cómo influye la composición del medio fermentativo en la producción de xilitol a partir de hidrolizados de bagacillo de caña de azúcar usando *Candida* sp.?

Acompañarnos en las siguientes páginas es adentrarse en la búsqueda de esta respuesta. Es un viaje que recorrerá desde el aislamiento de la levadura perfecta hasta la optimización del proceso que puede cambiar nuestra forma de ver los residuos y los edulcorantes para siempre (Águila Consuegra et al., 2022).

Capítulo 2 - Los Ingenieros Microscópicos: La Levadura *Candida sp*

Todo gran proyecto necesita un equipo de ingenieros talentosos. En nuestra revolución del xilitol, estos ingenieros no usan batas blancas ni planos, sino que son organismos microscópicos con una habilidad extraordinaria: transformar un tipo de azúcar en otro. Este capítulo narra la fascinante búsqueda y selección de nuestro protagonista microbiano: la levadura *Candida sp*.

¿Quién es Nuestra Levadura? Un Reciclador Natural

El género *Candida* incluye a un grupo diverso de levaduras que se encuentran por doquier en la naturaleza. A diferencia de su prima más famosa, *Saccharomyces cerevisiae* (la levadura del pan y la cerveza), muchas especies de *Candida* tienen una habilidad especial: pueden metabolizar la xilosa, el azúcar de cinco carbonos que abunda en el bagacillo (Umai et al., 2022). Son, en esencia, recicladores naturales especializados en azúcares complejos. Nuestra misión no era crear un organismo nuevo, sino encontrar uno silvestre que ya tuviera este talento innato y cultivarlo para que trabajara con la máxima eficiencia en nuestra fábrica biotecnológica.

La Gran Búsqueda: Donde las Flores y las Abejas Guardan el Secreto

Para encontrar a nuestro ingeniero microscópico, iniciamos una "cacería" en los jardines de la ciudad universitaria. ¿Por qué aquí? Porque los ambientes naturales ricos en azúcares, como las flores y los frutos, son el hogar ideal para las levaduras.

- **Muestreo:** Recolectamos muestras de forma estéril de: Flores de *Hibiscus rosa-sinensis* (cucarda), cuyos néctares son un banquete para los microorganismos. De la abeja *Apis mellifera*, cuyos cuerpos están cubiertos de levaduras que recolectan durante su polinización. Residuos de árboles frutales, donde los azúcares en descomposición crean un caldo de cultivo perfecto.

Estas muestras fueron transportadas en cadena de frío al laboratorio de Investigación de Tecnologías Limpias y Emergentes- Ingeniería Ambiental.



Preparación de muestras colectadas de levaduras.

- **El Aislamiento:** Dando Casa y Comida a lo Desconocido

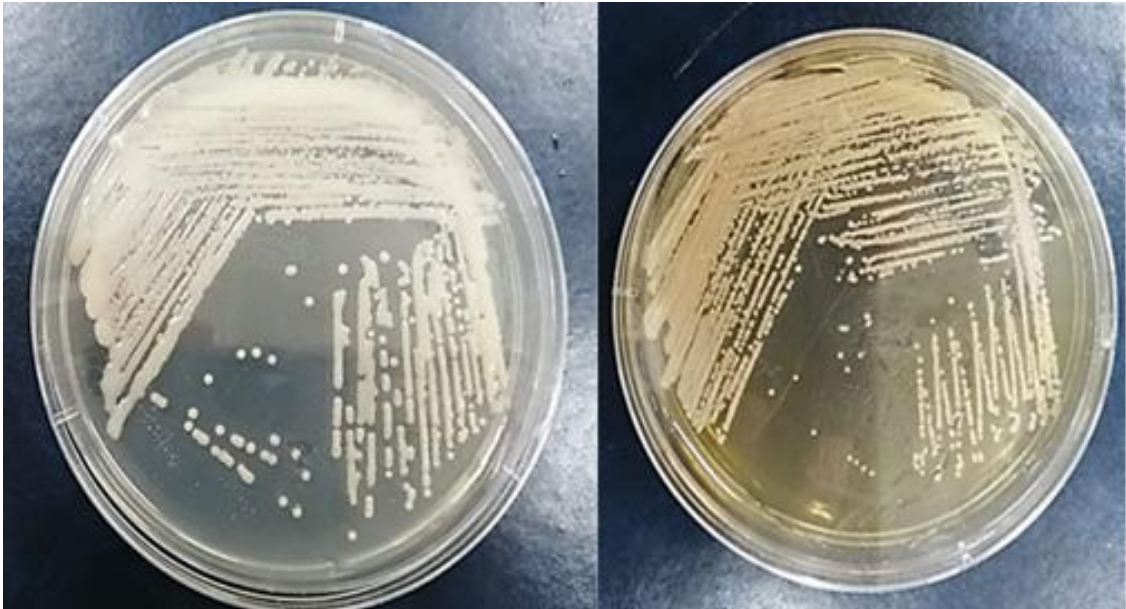
En el laboratorio, trituramos y homogeneizamos las muestras para liberar a los microorganismos que contenían. Luego, les ofrecimos un "hogar" nutritivo: un caldo de cultivo especial llamado medio YMC, enriquecido con xilosa. La idea era simple: si en la muestra había una levadura capaz de alimentarse de xilosa, encontraría aquí las condiciones perfectas para crecer y multiplicarse. Se dejó en incubación a 30°C y se mantuvo en observación por una semana. A partir de las colonias que crecieron, se purificaron hasta obtener colonias aisladas.

Después de dicha semana, era el momento de la verdad. Diluimos las muestras y las esparcimos en placas de Petri con agar. El objetivo era separar los miles de microorganismos hasta que pudiéramos aislar colonias individuales, cada una presumiblemente descendiente de una sola célula de levadura. Tras varios intentos de purificación, ¡lo logramos! Habíamos aislado varias cepas candidatas.

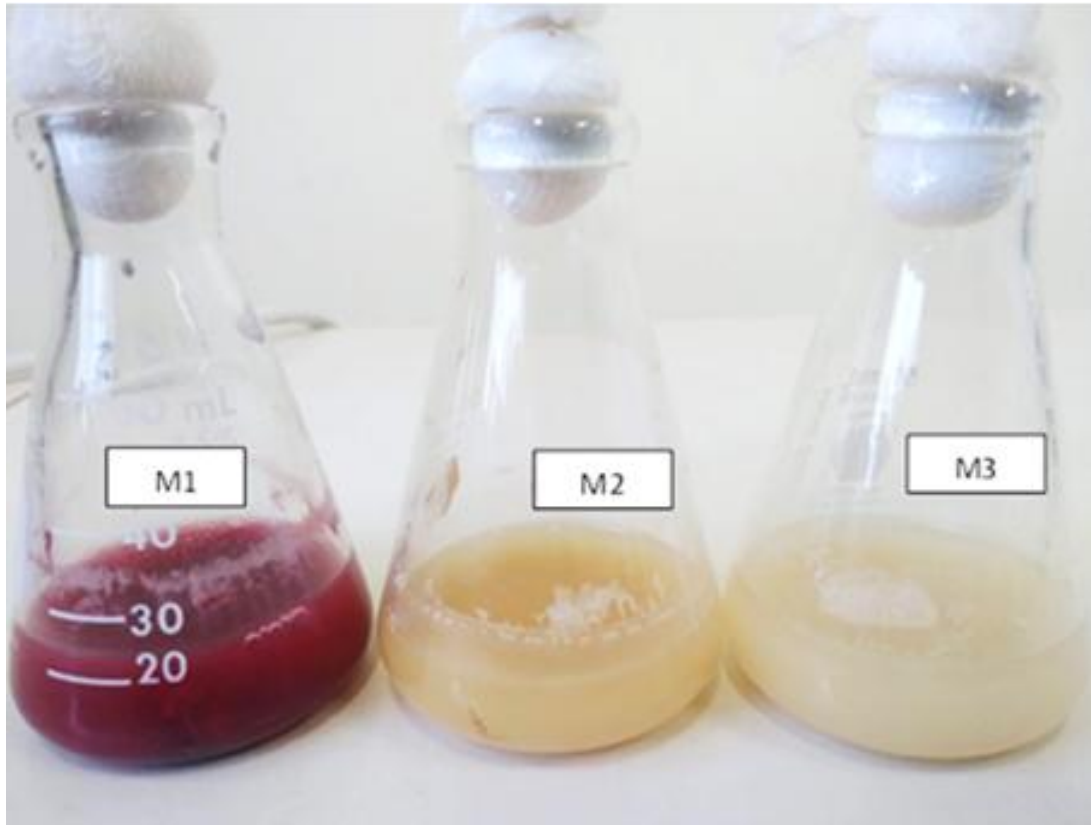
La cepa aislada se le realizó tinción Gram y observación en fresco con azul de lactofenol, y finalmente se sembró en medio Chromoagar Candida.



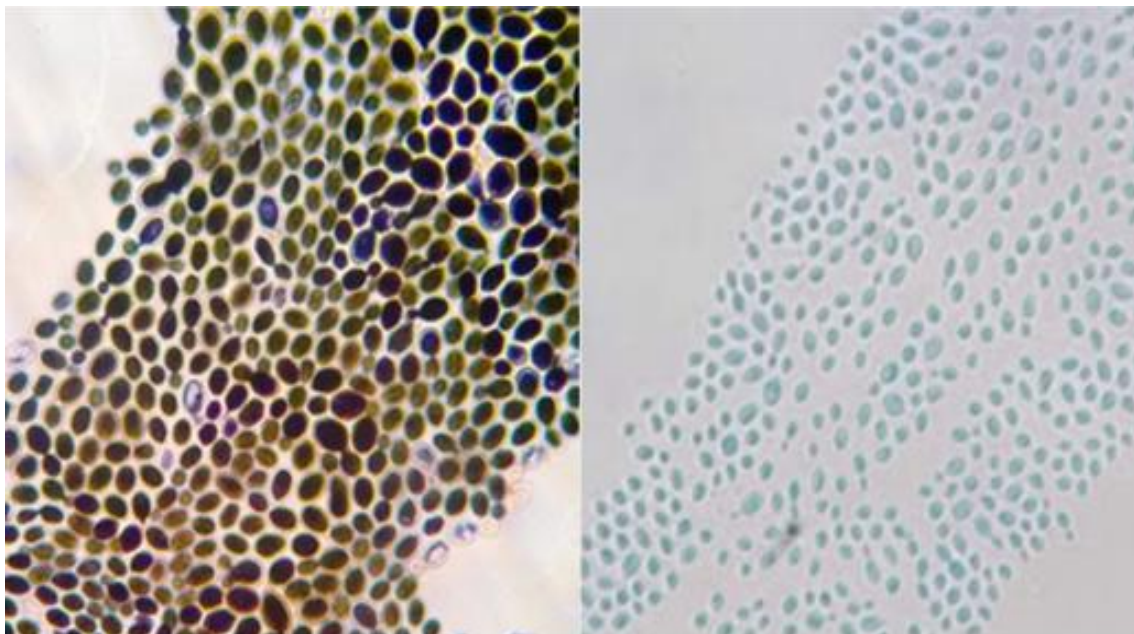
Homogenizado de muestra en mortero.



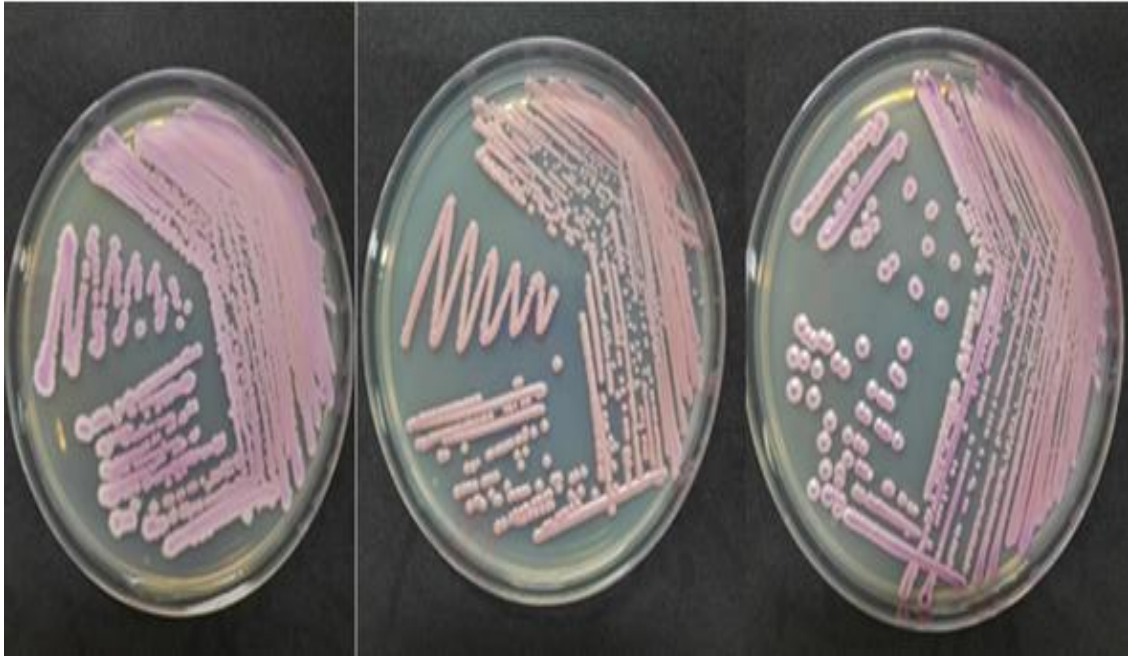
Crecimiento de *Candida* sp. en medio Agar Sabouraud y Agar YMC.



Aislamiento primario de levaduras productoras de xilitol.



Observación de tinción Gram a 1000x y observación en fresco con azul de lactofenol.



Cepas de levaduras (C1, C2 y C3) sembradas en medio Chromoagar Candida.

La Selección: En Busca de la Cepa Perfecta

Tener varias levaduras no era suficiente; necesitábamos encontrar la mejor para el trabajo. No todas las *Candida* convierten xilosa en xilitol con la misma eficiencia. Para ello, diseñamos una prueba de rendimiento.

- **La Prueba de Fuego Fermentativo:** Inoculamos cada una de nuestras cepas purificadas en un nuevo medio de cultivo, diseñado específicamente para promover la producción de xilitol. Este medio contenía xilosa como fuente principal de alimento y se mantuvo en condiciones controladas de temperatura y agitación en una incubadora durante 72 horas.
- **El Veredicto:** Midiendo el Consumo y la Producción. Pasado el tiempo, centrifugamos los cultivos para separar las levaduras del líquido (sobrenadante). La clave estaba en ese líquido: si nuestra levadura había sido eficaz, habría consumido xilosa y producido xilitol. Para medir este consumo, utilizamos el método del DNS. Este reactivo cambia de color (de amarillo a rojo anaranjado) en presencia de azúcares reductores, como la xilosa. Al medir la intensidad del color con un

espectrofotómetro, pudimos cuantificar cuánta xilosa había "desaparecido" del medio, lo que indicaba cuán hambrienta y activa había sido nuestra levadura (Nwamba et al., 2021).

- **La Identificación Final:** Conociendo al Ingeniero por su Nombre. Para estar completamente seguros de con quién estábamos trabajando, enviamos una muestra de nuestra mejor cepa candidata a un laboratorio especializado para su identificación molecular mediante la técnica de Reacción en Cadena de la Polimerasa (PCR). Esta técnica, considerada el estándar de oro en identificación microbiana, nos permitió leer el "DNI" genético de la levadura y confirmar que se trataba de una especie del género *Candida* sp. (Augusto et al., 2022).

De esta manera, luego de una cuidadosa exploración en el entorno natural y un estricto proceso de selección en el laboratorio, habíamos descubierto y elegido a nuestro ingeniero microscópico. La fase de preparación había terminado. Ahora llegaba el momento de alistar su área de trabajo: el hidrolizado de bagacillo.

PARTE II: PREPARANDO EL BANQUETE PARA LA LEVADURA

Capítulo 3 - De la Fibra al Azúcar: La Alquimia del Hidrolizado

En el capítulo anterior, conocimos a nuestro pequeño ingeniero: la levadura *Candida sp.* Pero, como cualquier buen trabajador, necesita alimento para hacer su trabajo. Esta levadura se alimenta de xilosa, un tipo de azúcar simple. El problema es que en el bagazo de caña este azúcar no está suelta y disponible, sino atrapada dentro de una estructura fibrosa llamada hemicelulosa, como si estuviera encerrada en una caja fuerte.

En este capítulo, vamos a explicar cómo abrir esa “caja”. Veremos el proceso clave para liberar el azúcar atrapada: una verdadera transformación que convierte una fibra dura y seca en un banquete listo para ser fermentado.

El Reto: Liberar el Azúcar Atrapado

Pensemos en el bagacillo como si fuera un castillo medieval. Sus paredes, fuertes y resistentes, están hechas de lignina y celulosa, y dentro guarda un tesoro muy valioso: la xilosa. Pero para llegar a ella, hay que superar una barrera protectora llamada hemicelulosa. No podemos darle el castillo entero a la levadura y esperar que lo rompa sola; es una tarea demasiado grande para ella. Nuestro objetivo era más preciso: debíamos desarmar esa barrera de hemicelulosa para liberar el azúcar que buscábamos.

Para lograrlo, utilizamos un método eficaz y ampliamente conocido: la hidrólisis ácida. "Hidrólisis" significa "romper con agua", y en este caso, el ácido es nuestra herramienta principal. En la práctica, esto significa que tratamos el bagacillo con ácido sulfúrico (H_2SO_4) y lo sometemos a temperaturas altas. ¿Por qué? Porque

el ácido debilita las uniones químicas de la hemicelulosa, y el calor acelera todo el proceso. Juntos, logran que esta estructura se desmorone y suelte los azúcares en el agua que la rodea.

La Búsqueda de la Receta Perfecta: Optimizando la Hidrólisis

Como un buen alquimista, simplemente mezclar elementos al azar no era suficiente. Teníamos que descubrir la receta ideal: la mezcla correcta de ácido, agua y calor que aumentara la liberación de xilosa sin descomponerla en subproductos no deseados. Con este propósito, planificamos y realizamos un experimento pequeño pero muy importante, donde probamos tres condiciones distintas.

La siguiente tabla presenta las tres "formulas" que evaluamos, modificando la cantidad de agua y ácido, pero conservando el mismo peso de bagazo (30 gramos) y la misma temperatura y duración (115°C por 17 minutos).

Tabla 1. Pruebas para la optimización del hidrolizado

Prueba	Materia Seca (g)	Agua Destilada (mL)	Ácido Sulfúrico (mL)
1	30	720	6
2	30	720	3
3	30	500	3

Cada una de estas combinaciones crea un ambiente único:

- **Prueba 1:** Alta concentración de ácido. Muy agresiva, podría liberar mucho azúcar, pero también podría descomponerlo.
- **Prueba 2:** Menos ácido y mucho agua (medio diluido). Más suave, pero quizás insuficiente para romper bien la fibra.
- **Prueba 3:** Menos ácido y menos agua. Un punto intermedio que crea un medio más concentrado, potencialmente más eficiente.

El Proceso: De la Teoría a la Realidad

Tras examinar los resultados de estas pruebas (los cuales se explicarán en capítulos más adelante), se eligió la condición más efectiva para generar el hidrolizado en grandes cantidades. El procedimiento final fue el siguiente:

- **Mezcla:** En un frasco resistente al calor, combinamos 30 gramos de bagacillo con 500 mL de agua destilada y 3 mL de ácido sulfúrico concentrado. Esta era nuestra "poción" base.
- **La "Cocción" a Alta Presión:** El recipiente fue cerrado y colocado en una autoclave, que es un aparato similar a una gran olla a presión. En este lugar, la mezcla fue expuesta a 115°C por un tiempo de 17 minutos. En estas condiciones extremas de presión y calor, la hidrólisis se realizó de forma rápida y controlada.
- **Filtración:** Separando el Líquido del Sólido: Una vez finalizada la "cocción" y enfriado el contenido, era el momento de separar el oro líquido de los restos del castillo derruido. Filtramos la mezcla a través de una tela de nailon, reteniendo la lignina y la celulosa sólidas que ya no nos servían. El líquido ámbar que obtuvimos, el filtrado, era nuestro hidrolizado de bagacillo, ahora rico en xilosa y otros azúcares liberados.
- **Almacenamiento:** Este hidrolizado, nuestro preciado caldo de cultivo se almacenó en refrigeración a 4°C para preservarlo hasta el siguiente y crucial paso: la gran limpieza.

De esta manera, a través de un método que une el calor y la química, habíamos conseguido la primera transformación significativa: transformar un desecho agrícola con fibra en un líquido dulce listo para nutrir a nuestra levadura. Sin embargo, este caldo de cultivo aún contenía "trampas" que podían sabotear toda la operación, como veremos en el próximo capítulo.



Hidrolizado después de salir de la autoclave.



Concentración del hidrolizado usando rotavapor.

Capítulo 4 - La Gran Limpieza: Detoxificación del Medio

En el capítulo anterior, celebramos el éxito de nuestra alquimia: habíamos transformado con éxito la fibra del bagacillo en un caldo rico en xilosa. Sin embargo, ese líquido ámbar, nuestra prometedora solución, guardaba un secreto peligroso. Durante la violenta hidrólisis ácida, no solo se liberaron los azúcares deseados, sino que también se generaron compuestos químicos tóxicos que podían envenenar a nuestra levadura. Este capítulo trata de la fundamental "limpieza" de ese medio, un proceso de detoxificación que era tan crucial como preparar el alimento mismo.

El Problema Oculto: Los Saboteadores en el Banquete

Imagina que has preparado un delicioso banquete, pero sin querer, has rociado veneno sobre algunos de los platos. Nuestro hidrolizado se encontraba en una situación similar. Los mismos procesos de alta temperatura y acidez que rompieron la hemicelulosa también degradaron ligeramente la lignina y los propios azúcares, dando lugar a "inhibidores" como:

- **Compuestos Fenólicos:** Fragmentos de la lignina que actúan como un veneno de amplio espectro, dañando las membranas celulares de la levadura.
- **Ácido Acético:** Liberado de la hemicelulosa, acidifica aún más el medio interno de la levadura, interrumpiendo su metabolismo.
- **Furanos (como el HMF):** Productos de la degradación de los azúcares que interfieren con las enzimas clave de la levadura.

Si presentábamos este hidrolizado sin tratar a nuestra *Candida* sp., estos compuestos podrían debilitarla gravemente o, directamente, matarla, arruinando todo el proceso de fermentación antes de que comenzara. Era imperativo desintoxicar el medio.

La Solución: Un Baño Alcalino con Hidróxido de Sodio

Para neutralizar a estos saboteadores, elegimos un método eficaz y directo: la neutralización y precipitación con hidróxido de sodio (NaOH). El NaOH, también conocido como sosa cáustica, es una base fuerte, el antagonista químico perfecto para el ácido que usamos en la hidrólisis. El procedimiento fue el siguiente:

- **Ajuste del pH:** El resultado de la hidrólisis ácida era un líquido muy ácido, como un jugo agrio. Para suavizarlo, añadimos lentamente una solución de NaOH (una sustancia alcalina) mientras lo removíamos constantemente. Pero no solo buscábamos quitar acidez: nuestro objetivo era llevarlo a un punto ligeramente alcalino, como un agua con un toque de jabón suave (generalmente entre pH 9 y 10). Este cambio drástico era clave para lo que venía después.
- **La Magia de la Precipitación:** Al subir el pH, ocurre algo casi mágico. Compuestos tóxicos, llamados fenoles —que antes estaban disueltos e invisibles en el medio ácido— de repente se vuelven sólidos y dejan de estar disueltos. Es como cuando revuelves azúcar en agua caliente y se disuelve, pero al enfriarse forma cristales que ves en el fondo. Aquí, estos compuestos no deseados "precipitan": se separan del agua, dejando el medio mucho más limpio y seguro para nuestra levadura.
- **La Segunda Filtración:** De la misma manera que después de la hidrólisis, se necesitó filtrar el hidrolizado otra vez. Sin embargo, en esta ocasión, no era para separar la fibra sólida, sino para quitar los flóculos (pequeños grumos) de los compuestos fenólicos que se habían depositado. Lo que se obtuvo era un líquido más limpio y seguro.

El Resultado: Un Hogar Seguro para la Levadura

Tras este "baño alcalino" y la posterior filtración, habíamos logrado nuestro objetivo:

- **pH Neutralizado:** El medio ahora tenía un pH cercano al neutro, ideal para el crecimiento de *Candida sp.*, que prefiere condiciones ligeramente ácidas pero no la extrema acidez del hidrolizado crudo.
- **Toxinas Eliminadas:** La concentración de los inhibidores más dañinos, especialmente los fenoles, se redujo drásticamente.
- **Xilosa Preservada:** El procedimiento de desintoxicación, cuando se lleva a cabo con precaución, no influye de manera importante en la xilosa, que es nuestra materia prima principal. El tesoro seguía siendo el mismo, pero ahora estaba guardado en un baúl seguro.

Con este importante paso de purificación, nuestro hidrolizado de bagacillo dejó de ser un líquido que podría ser tóxico para transformarse en un medio de fermentación confiable y nutritivo. Habíamos creado las condiciones adecuadas y garantizado la salud de nuestro protagonista. Ahora, todo estaba preparado para el evento principal de nuestra revolución dulce: el proceso de fermentación, donde la levadura *Candida sp.*, finalmente, ocuparía el centro de atención para llevar a cabo su transformación mágica.

PARTE III: EL CORAZÓN DEL PROCESO: LA FERMENTACIÓN

Capítulo 5 - El Menú Perfecto: Diseñando el Medio Fermentativo

Llegamos al núcleo de nuestra investigación. Contamos con nuestro ingeniero microscópico, la levadura *Candida sp.*, y hemos preparado y limpiado su "comida principal": el hidrolizado de bagacillo que es rico en xilosa. Pero ¿es esto suficiente para que funcione de la mejor manera posible? La respuesta es un no contundente.

Pensemos en nuestra levadura como un atleta de élite. Así como un corredor no puede ganar una maratón solo con agua, nuestro pequeño organismo necesita más que su alimento básico (la xilosa) para rendir al máximo. Necesita un "plan de nutrición" completo y equilibrado: una combinación precisa de nutrientes que le permita crecer con vigor, mantenerse saludable y, lo más crucial, enfocar toda su energía en la misión que nos importa: convertir la xilosa en xilitol.

En este capítulo, te contamos la receta de este menú ideal. Te mostraremos cómo preparamos este banquete, donde cada ingrediente que añadimos tiene una función específica y esencial.

La Base del Banquete: El Hidrolizado Detoxificado

El plato fuerte de nuestro menú de fermentación es, sin duda, el hidrolizado de bagacillo. Este líquido, que hemos preparado y purificado en los capítulos anteriores, es mucho más que solo la fuente de xilosa (la materia prima para hacer xilitol). También contiene otros azúcares y componentes que actúan como nutrientes adicionales, enriqueciendo la "dieta" de nuestra levadura. Podría decirse que es el ingrediente estrella de todo el menú.

Los Suplementos Esenciales: El Equipo de Apoyo

Para maximizar el potencial de nuestra levadura, añadimos al hidrolizado varios nutrientes importantes. Cada uno desempeña un papel esencial en el "grupo de apoyo":

- **La Fuente de Nitrógeno:** Los "Elementos Fundamentales". Para multiplicarse y producir proteínas y enzimas, la levadura necesita nitrógeno. Usamos sulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) como la fuente principal de este elemento. Podemos imaginarlo como los ladrillos que la levadura emplea para construir su propia célula.
- **Las Sales Minerales:** Las "Utensilios" Específicos. Algunos minerales son esenciales para el adecuado funcionamiento de las enzimas en la levadura.
 - Fosfato de Potasio (KH_2PO_4): Funciona como un regulador, ayudando a que el pH del entorno se mantenga constante durante la fermentación, previniendo alteraciones repentinas que podrían afectar negativamente a la levadura.
 - Sulfato de Magnesio ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$): Es un "impulsor" clave. El magnesio actúa como un cofactor que ayuda a que varias enzimas que participan en el metabolismo operen rápidamente. Sin su presencia, el proceso bioquímico se vuelve más lento.

Preparando al Ejército: El Inóculo

No introducimos nuestra levadura directamente en el gran volumen de medio de fermentación. Sería como lanzar a un solo soldado a un campo de batalla enorme. En su lugar, preparamos un inóculo: un cultivo pequeño y concentrado de levaduras en su fase de crecimiento más vigorosa.

Para ello, tomamos una muestra de nuestra cepa pura de *Candida* sp. y la inoculamos en un matraz con un medio de cultivo fresco y nutritivo. Este matraz se incubó a 30°C bajo agitación constante durante aproximadamente 18 horas. Este paso asegura que, cuando estemos listos para comenzar la fermentación, dispondremos de

Del Bagazo al Dulzor: La Revolución del Xilitol y la Levadura que lo Crea

un ejército joven, sano y activo de millones de levaduras, listas para invadir el biorreactor y comenzar a trabajar de inmediato.



Preparación de medio de cultivo.



Hidrolizado de bagacillo de caña de azúcar.

La Síntesis: Creando el Medio Fermentativo Definitivo

El momento de la verdad llega cuando combinamos todos los elementos. En el biorreactor (el recipiente donde ocurrirá la fermentación), mezclamos el hidrolizado detoxificado con las sales minerales y la fuente de nitrógeno en proporciones cuidadosamente establecidas. Luego, ajustamos el pH a un valor óptimo para *Candida* sp., generalmente alrededor de 4.5-5.5, creando un ambiente cómodo y ligeramente ácido.

Finalmente, inoculamos: transferimos el contenido de nuestro matraz, ahora turbio por la alta densidad de células de levadura, al biorreactor.

¿Por qué este "menú" es el núcleo de la investigación?

Porque la composición exacta de este medio fermentativo —las concentraciones de cada sal, el pH inicial, la relación de los distintos azúcares— es lo que influye directamente en el rendimiento final. Una pequeña variación en la "receta" puede significar la diferencia entre una levadura estresada que apenas produce xilitol y una levadura feliz y eficiente que convierte la mayor parte de la xilosa en nuestro producto deseado.

Al crear cuidadosamente este entorno, no solo estamos proporcionando nutrientes a un microorganismo; estamos estableciendo las circunstancias perfectas para que el increíble proceso de biotransformación suceda de la manera más efectiva. Con el ambiente ideal listo, estamos preparados para observar el momento clave: la notable transformación.



Filtrado del hidrolizado de bagacillo de caña de azúcar, con tela de nailon.



Cálculo del pH, empleando pH-metro.

Capítulo 6 - La Gran Transformación: Del Azúcar al Edulcorante

El momento más importante de nuestra exploración ha llegado. Con el entorno listo y nuestras levaduras preparadas para comenzar, empezamos el acto principal: la fermentación. Este es el proceso en el que la levadura *Candida sp.*, nuestro pequeño agente, transforma la xilosa en xilitol. En esta sección contamos esa interacción química y explicamos cómo monitoreamos el proceso para medir su efectividad.

Una Estrategia en Dos Tiempos: Oxígeno, el Interruptor Maestro

Entendíamos que para aumentar la producción, no era suficiente con juntar todo y esperar resultados. La clave estaba en gestionar un elemento fundamental: el oxígeno. Nuestra estrategia se dividió en dos fases distintas, como una coreografía precisa:

- **Fase 1: Creando un Ejército (Aerobiosis).** Durante el primer día, le dimos a nuestra levadura todas las condiciones para que se multiplicara. Al agitar el matraz rápidamente, aseguramos que tuviera abundante oxígeno. Piensa en esto como la etapa de entrenamiento y reclutamiento: con esta "respiración" completa, la levadura se dedicó a crecer con fuerza, formando un equipo numeroso y listo para trabajar.
- **Fase 2: Cambio de Modo: Producción (Microaerobiosis).** Al segundo día, redujimos deliberadamente la agitación, limitando así el oxígeno disponible. Este cambio fue clave, pues le envió una señal clara a la levadura: "Es hora de cambiar el plan". Al no poder seguir creciendo con normalidad, la levadura activó su mecanismo para convertir la xilosa en xilitol, obteniendo energía de otra forma. Durante las siguientes 72 horas, dejó de multiplicarse y se concentró totalmente en lo importante: producir.

El Gran Experimento: Buscando la Combinación Perfecta

Pero ¿cuáles son las condiciones ideales para esta producción? ¿La levadura prefiere un ambiente más cálido o fresco? ¿Un medio más ácido o neutro? Para responder esto, no realizamos una sola fermentación, sino nueve a la vez, probando todas las combinaciones posibles de tres temperaturas y tres niveles de pH.

La siguiente tabla muestra el diseño de este ambicioso experimento, donde cada celda representa un biorreactor independiente con su propia condición única

Tabla 2. Diseño experimental producción de xilitol por fermentación

pH	Temperatura: 24°C	Temperatura: 28°C	Temperatura: 32°C
5	T24 / pH5	T28 / pH5	T32 / pH5
6	T24 / pH6	T28 / pH6	T32 / pH6
7	T24 / pH7	T28 / pH7	T32 / pH7

Cada 12 horas, tomábamos una pequeña muestra de cada uno para espiar su progreso, como quien mira por la ventana de una cocina para ver cómo va un guiso.

La Máquina Detective: El Cromatógrafo HPLC

Para saber exactamente qué estaba pasando en cada muestra, necesitábamos una herramienta capaz de distinguir y cuantificar moléculas específicas en una sopa compleja. Esa herramienta fue el Cromatógrafo Líquido de Alta Resolución (HPLC).

Imaginen el HPLC como una carrera de obstáculos extremadamente precisa para las moléculas:

- **Preparación de los Corredores:** Primero, centrifugamos las muestras para eliminar cualquier célula de levadura. Luego, filtramos el líquido resultante (el sobrenadante) para asegurarnos de que solo quedaran las moléculas disueltas más pequeñas: los azúcares y el xilitol.
- **La Carrera:** Inyectamos una minúscula cantidad de esta muestra purificada en el equipo. Allí, es arrastrada por un líquido llamado "fase móvil" (una mezcla de

agua y acetonitrilo) a través de una larga y delgada columna rellena con un material especial.

- **La Separación:** Dentro de la columna, las diferentes moléculas interactúan de forma distinta con el material de relleno. Algunas, como la xilosa, se entretienen más; otras, como el xilitol, avanzan más rápido. Esto hace que cada tipo de molécula salga de la columna en un momento exacto y diferente, ¡separándose de las demás!
- **La Detección y el Veredicto:** Al salir de la columna, un detector (en este caso, de luz ultravioleta) "ve" cada molécula y envía una señal. Esta señal se traduce en un gráfico llamado cromatograma, donde cada pico representa una molécula diferente. Al comparar la altura y el área de estos picos con estándares conocidos, el software del HPLC nos dice con precisión cuánta xilosa se ha consumido y cuánto xilitol se ha producido en cada muestra y en cada momento.

Por lo tanto, al juntar la danza de la fermentación con la mirada analítica del HPLC, conseguimos no solo visualizar la significativa transformación, sino también entender con precisión qué parámetros de temperatura y pH llevaban a nuestra levadura a alcanzar su mejor desempeño. Los hallazgos de este interesante experimento son lo que daremos a conocer en el siguiente capítulo.

PARTE IV: LOS RESULTADOS Y SU IMPACTO

Capítulo 7 - Lo que los Números Nos Dicen

Después de todo un proceso de preparación y fermentación controlada llegó el momento de la verdad: analizar los resultados. En este capítulo, te contamos qué descubrimos al examinar los datos recopilados.

Aquí, los números dejan de ser simples cifras para contarnos una historia. Una historia que nos revela cómo nuestra levadura, la *Candida intermedia*, se comportó bajo diferentes condiciones y, lo más importante, cómo el entorno que creamos para ella influyó directamente en su capacidad para producir xilitol.

1. Encontrando a la Superlevadura: La Selección de la Cepa

Nuestra tarea inicial consistió en encontrar a la candidata más adecuada entre las levaduras que habíamos aislado. De las tres cepas originales (C1, C2 y C3), los resultados fueron claros.

Tabla 3. Producción y consumo de xilosa de las 3 cepas del género *Candida* sp

Cepa	Xilosa Inicial (g/L)	Xilosa Final (g/L)	% Consumo de Xilosa
C1	12.37	12.22	1.21%
C2	12.37	11.38	8.00%
C3	12.37	5.94	51.98%

¿Qué nos dicen estos números?

La cepa C3 fue, con diferencia, la más hambrienta y activa. Consumió más de la mitad de la xilosa disponible, mientras que las otras dos apenas la probaron. Esta voracidad era un indicador prometedor de su potencial como buena productora fue confirmada de manera definitiva mediante un Informe de Identificación Molecular

(Anexo 1), que utilizó la técnica de PCR para certificar que se trataba de *Candida intermedia*. ¡Habíamos encontrado a nuestra ingeniera microscópica ideal!

- Obtención de hidrolizado: En cada frasco se obtuvo 500 ml de hidrolizado con una concentración de 8 g/l aproximadamente, por lo tanto, se realizaron 3 bloques con 12 frascos de hidrolizados en cada bloque, con el objetivo de obtener la cantidad necesaria incluso después de realizar una concentración cercana a los 24 g/l de azúcares para ser empleada en la fermentación posterior.

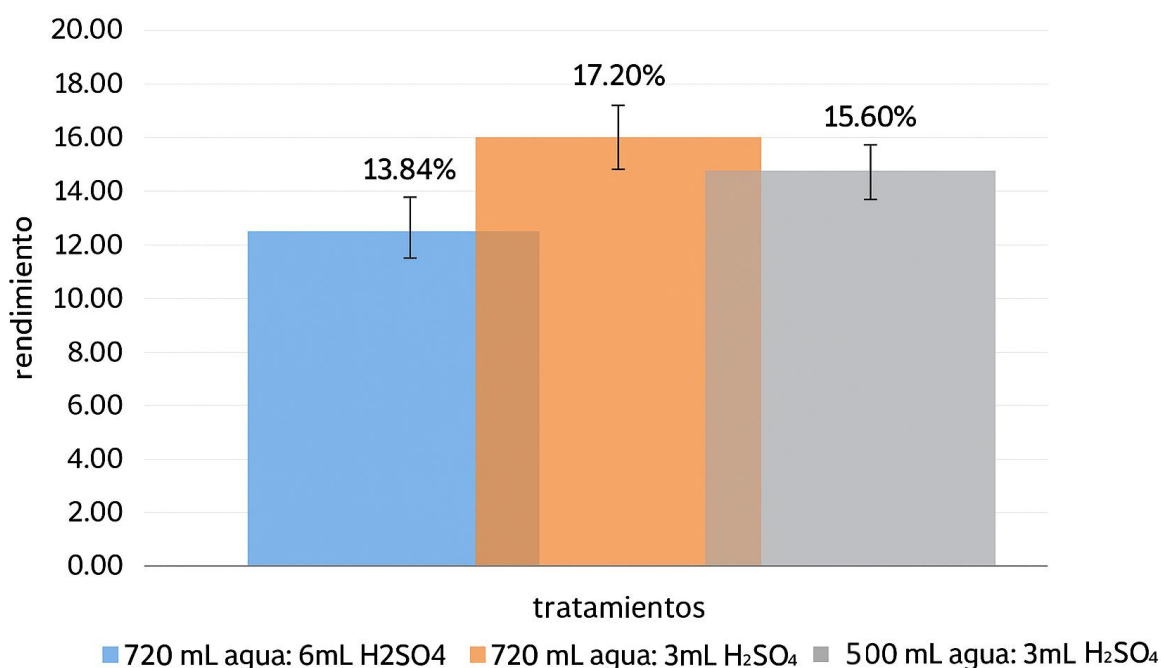


Figura 1. Rendimiento (5), para la optimización del hidrolizado de bagacillo de caña de azúcar.

2. El Escenario Clave: pH y Temperatura

Con *Candida intermedia* como protagonista, exploramos nueve escenarios diferentes, combinando tres niveles de pH y tres temperaturas. La Tabla 4 muestra los resultados clave de esta exhaustiva búsqueda, midiendo la producción de xilitol (P), la productividad (Q_p , qué tan rápido se produce) y el rendimiento (Y_p/s , cuán eficiente es la conversión).

Tabla 4. Diseño experimental y producción de xilitol a partir del hidrolizado de bagacillo de caña de azúcar por *Candida intermedia*

Tratamiento	pH	T	Xilosa (S) g/L		Xilosa(P) g/L		Qp (g/l*h)	Yp/s (g/g)
			1	2	1	2		
1	5	24	20,35	0,88	0,00	0,00	0,0000	0,0000
2	6	24	1,64	0,59	6,47	0,17	0,0674	0,2483
3	7	24	4,41	0,16	4,59	0,02	0,0478	0,2088
4	5	28	18,26	0,23	0,00	0,00	0,0000	0,0000
5	6	28	3,74	0,21	5,34	0,27	0,0556	0,2230
6	7	28	6,72	0,10	3,54	0,01	0,0369	0,1799
7	5	32	18,98	1,65	0,00	0,00	0,0000	0,0000
8	6	32	8,37	0,13	5,17	0,04	0,0539	0,2677
9	7	32	9,31	0,18	3,53	0,29	0,0367	0,2065

El veredicto es claro:

- El pH es Rey: El Tratamiento 2 (pH 6 y 24°C) fue el campeón indiscutible, logrando la mayor producción de xilitol (6.47 g/L). Un hallazgo crucial fue que a pH 5, la producción fue CERO en todas las temperaturas. La levadura simplemente no puede trabajar en un ambiente tan ácido.
- La Temperatura Acompaña: Mientras que el pH 6 fue claramente el mejor, la temperatura también jugó un papel. La producción más alta se obtuvo a 24°C, sugiriendo que a nuestra cepa le gusta un ambiente fresco para producir.

3. Visualizando el Éxito y el Fracaso

Los gráficos nos permiten ver estas tendencias de un vistazo.

La Danza entre el Consumo y la Producción

Las Figuras 2 y 3 nos permiten observar en tiempo real la "coreografía" entre el consumo de xilosa y la producción de xilitol. Son como una ventana al biorreactor que nos muestra cómo trabaja nuestra levadura, *Candida intermedia*, bajo diferentes condiciones.

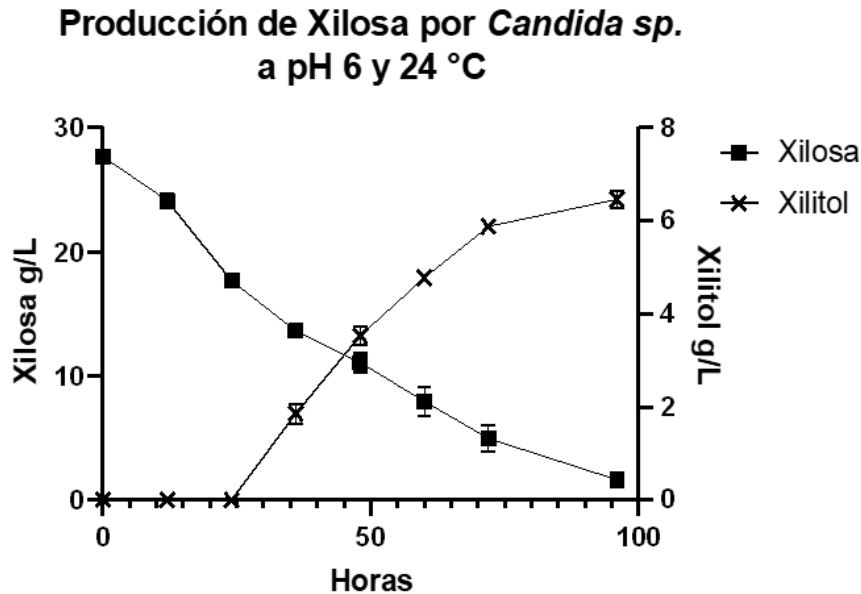


Figura 2. Consumo de xilosa y producción de xilitol a pH 6 y a una temperatura de 24,°C a partir de hidrolizado de bagacillo de caña de azúcar por *Candida intermedia*.

La Figura 2: El Escenario Ganador – pH 6 y 24°C.

Esta gráfica representa el proceso ideal, donde se alcanzó la máxima producción de xilitol. Podemos observar dos líneas que cuentan una historia de transformación exitosa:

- Línea de Consumo de Xilosa (Descendente): Esta línea muestra cómo la concentración de xilosa en el medio disminuye con el tiempo de manera constante y pronunciada. Esto indica que la levadura está activamente "comiéndose" su alimento principal. La caída rápida y sostenida es una señal de un metabolismo saludable y eficiente.
- Línea de Producción de Xilitol (Ascendente): Al mismo tiempo que la xilosa desaparece, vemos nacer el xilitol. Esta línea asciende de forma paralela e inversa al consumo de xilosa. Esto nos dice que la levadura no solo está consumiendo el azúcar para crecer, sino que está dedicando una parte significativa de su energía a convertirlo directamente en nuestro producto deseado, el xilitol.

En el escenario de pH 6 y 24°C, *Candida intermedia* encuentra su "zona de confort" ideal. El pH le permite activar las enzimas correctas para la conversión, y la

temperatura favorece un metabolismo estable y dirigido hacia la producción, en lugar de solo hacia el crecimiento. Es la condición donde la levadura es más eficiente como "fábrica de xilitol".

La Figura 3: El Efecto Dramático del pH y la Temperatura.

Este conjunto de gráficos es aún más revelador, ya que nos permite comparar directamente el desempeño de la levadura en los nueve escenarios diferentes.

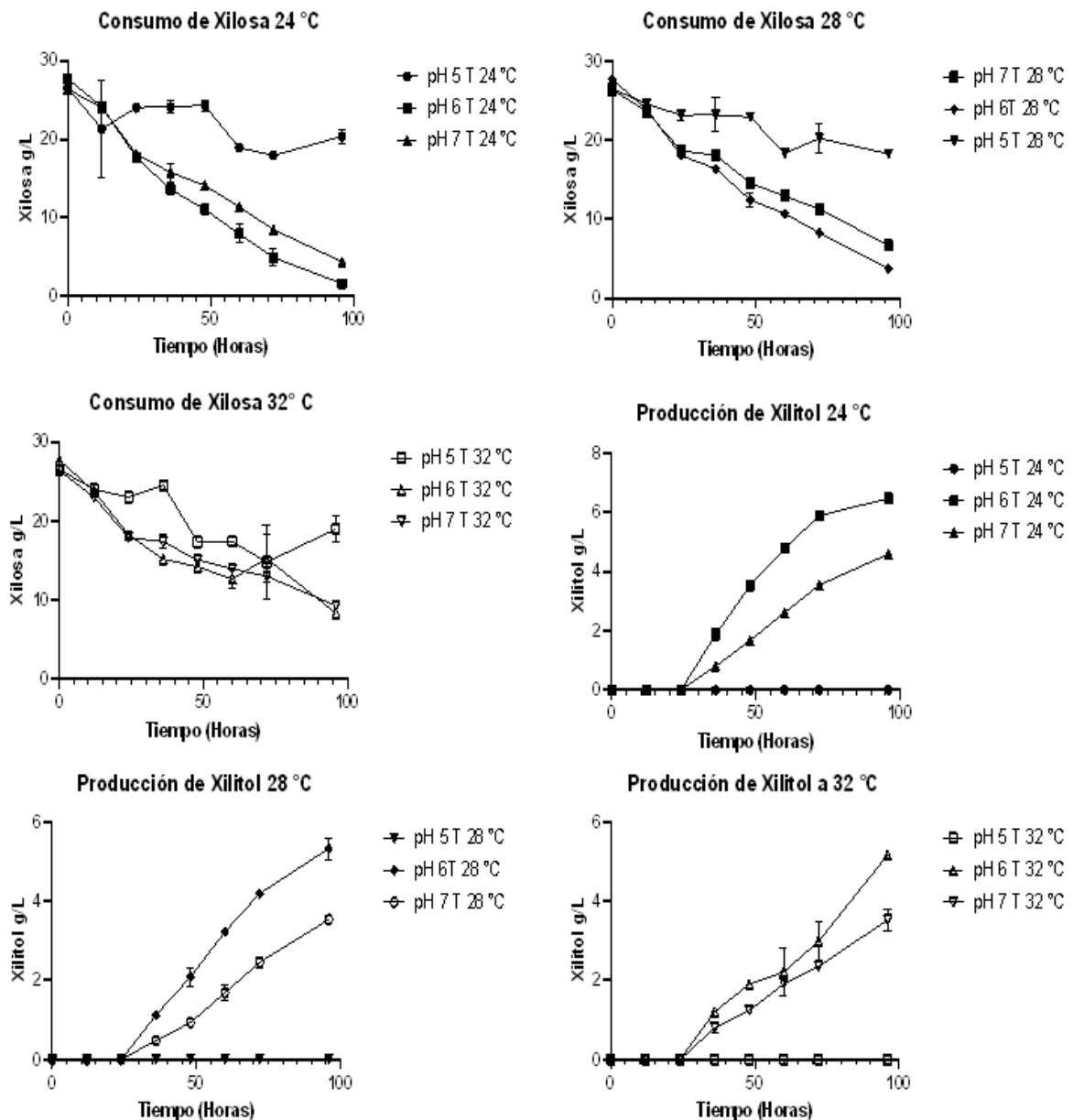


Figura 3. Consumo de xilosa y producción de xilitol a pH 5, 6 y 7 y a una temperatura de 24, 28 y 32 °C a partir de hidrolizado de bagacillo de caña de azúcar por *Candida intermedia*.

a. El pH 5: La Condición Tóxica

En todas las gráficas, la línea que representa el pH 5 (posiblemente en un color como el rojo) muestra un comportamiento claro: el consumo de xilosa es muy lento o casi nulo, y la producción de xilitol es CERO. Un medio con pH 5 es demasiado ácido para *Candida intermedia*. Este ambiente probablemente daña su maquinaria celular o inhibe por completo las enzimas necesarias para metabolizar la xilosa y producir xilitol. La levadura está tan estresada que no puede trabajar; está en "modo supervivencia".

b. El pH 7: La Condición Aceptable, pero no Óptima

Las líneas del pH 7 (posiblemente en amarillo o verde) muestran un consumo de xilosa y una producción de xilitol intermedios. La levadura funciona, pero no a su máxima capacidad. Un pH neutro es tolerable, pero no ideal. Las enzimas específicas para la ruta del xilitol no están operando en su punto de máxima eficiencia, lo que resulta en una conversión menor.

c. El pH 6: La Condición Óptima (Confirmada)

Independientemente de la temperatura, las líneas del pH 6 (posiblemente en azul o verde oscuro) son consistentemente las que muestran el mayor consumo de xilosa y la mayor producción de xilitol. Esto refuerza lo visto en la Figura 2 y en la tabla de resultados. El pH 6 es, sin duda, la clave para desbloquear el potencial de *Candida intermedia*. Crea el ambiente bioquímico perfecto para que la conversión de xilosa a xilitol ocurra de manera eficiente.

d. El Rol de la Temperatura: Un Ajuste Fino

Al comparar las columnas de la Figura 3 (24°C, 28°C, 32°C), se puede observar que, manteniendo el pH constante en 6, la producción de xilitol suele ser ligeramente mayor a 24°C. Aunque el pH funciona como un botón de encendido y apagado, la

temperatura se comporta como un regulador de volumen. Una temperatura de 24°C parece crear el equilibrio ideal: es caliente suficiente para mantener un metabolismo activo, pero no tan caliente que provoque estrés térmico o desnaturalice enzimas importantes, lo que podría suceder a temperaturas más altas.

En general, estas imágenes nos presentan una historia visual impactante:

- El nivel de pH es el aspecto más importante. Un pH de 6 es necesario para iniciar la producción.
- Una temperatura de 24°C es perfecta para obtener el mejor rendimiento en las pruebas realizadas.
- La conexión opuesta entre la curva que baja de xilosa y la curva que sube de xilitol en las condiciones ideales es un indicador visual de una fermentación exitosa, donde los residuos agrícolas se convierten de manera efectiva en un dulce valioso.

Efecto de la Variable temperatura y pH:

De acuerdo con el diseño utilizado, la producción promedio más alta de Xilitol (5,65 g/L) se logró a un pH de 6, notándose que la producción baja a pH 7 y no ocurre en absoluto a pH 5 (Figura 4). La diferencia es abrumadora. El pH 6 es el punto ideal para *Candida intermedia*. En esta condición, la levadura no solo está cómoda, sino que su maquinaria enzimática funciona a máxima capacidad para convertir xilosa en xilitol.

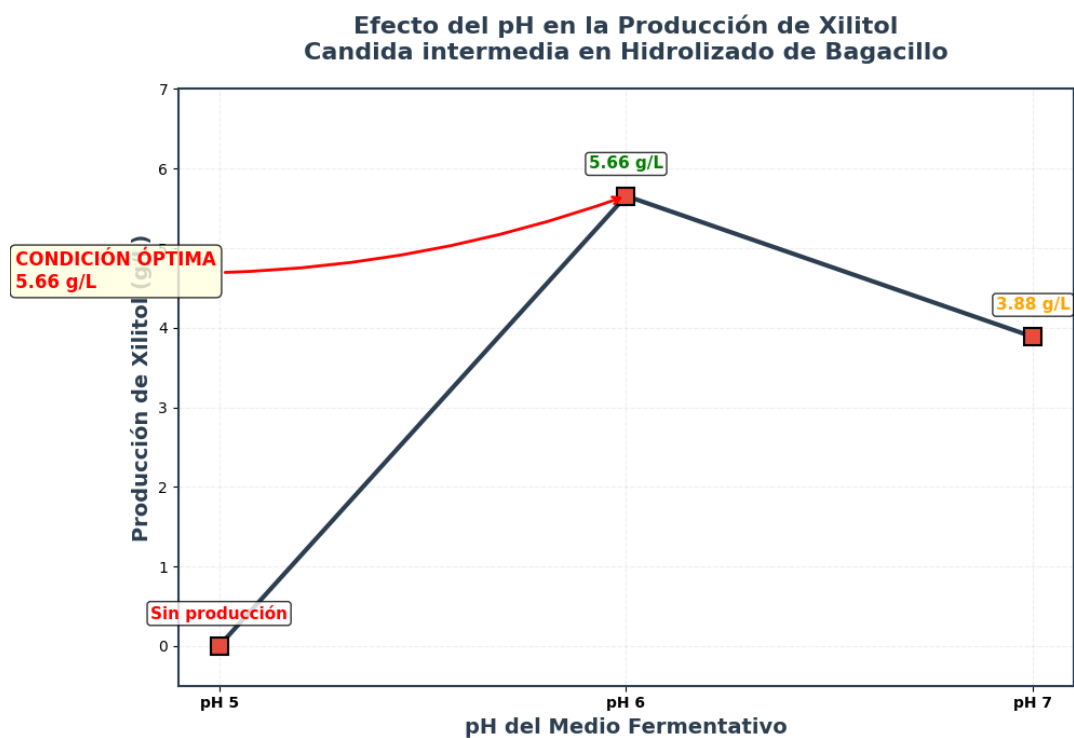


Figura 4. Efecto del pH en la producción de xilitol g/L , a partir de hidrolizado de bagacillo de caña de azúcar por *Candida intermedia*.

La Figura 5 muestra claramente que 24°C es la temperatura óptima para la producción de xilitol con *Candida intermedia*, con una tendencia decreciente a medida que aumenta la temperatura. Confirma que, dentro del rango estudiado, la temperatura de 24°C fue ligeramente mejor. Sin embargo, el efecto no es tan dramático como el del pH. Se puede resaltar lo siguiente:

- 24°C: Máxima producción (6.47 g/L) - Condición óptima
- 28°C: Producción intermedia (5.34 g/L) - 17.5% menos
- 32°C: Producción más baja (5.17 g/L) - 20.1% menos

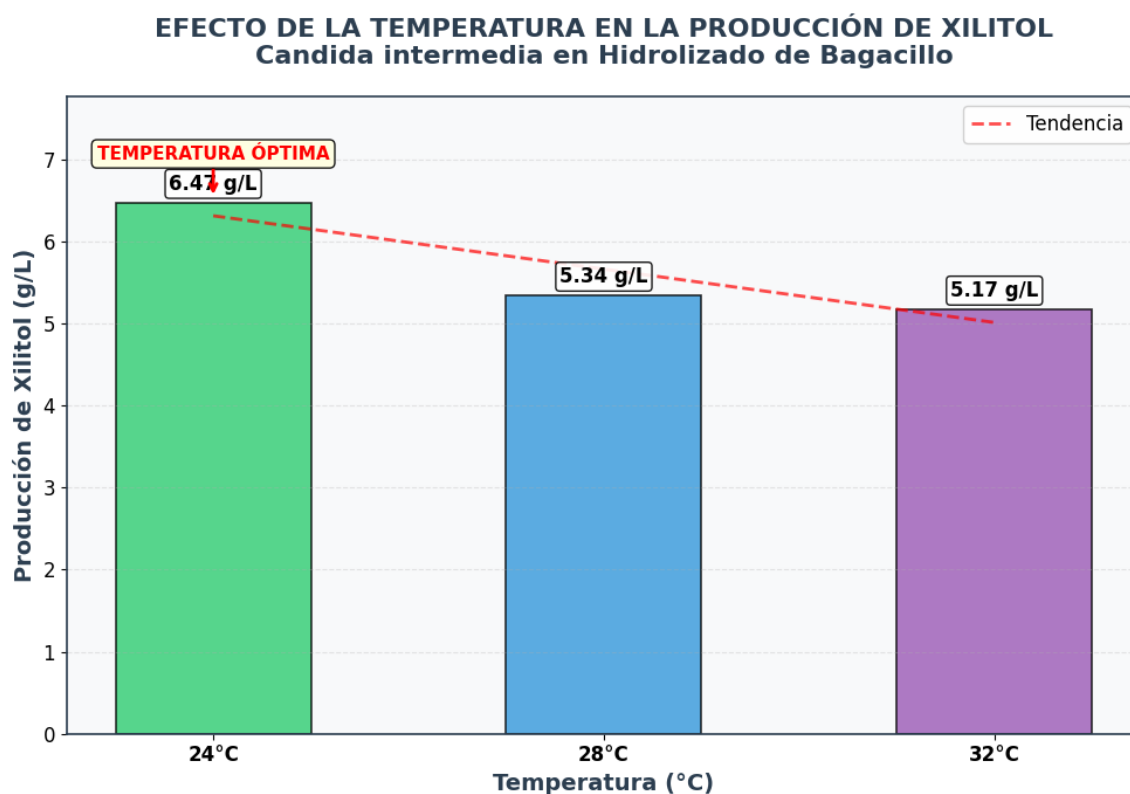


Figura 5. Efecto de la temperatura en la producción de xilitol g/L , a partir de hidrolizado de bagacillo de caña de azúcar por *Candida intermedia*.

4. La Confirmación Estadística

Efecto combinado de las variables pH y temperatura

Se examinó cómo influye el pH y la temperatura utilizando un diseño de tres niveles para ambos factores. Se observó que el pH tiene un efecto importante en la producción de xilitol. También se notó que el efecto del pH es cuadrático. Por lo tanto, es necesario encontrar un pH ideal para la producción de xilitol, que estaría cerca de 6.

Respecto al impacto de la temperatura, se vio que solo hay una influencia importante de manera lineal dentro del rango investigado. Esto indica que se deberían evaluar temperaturas inferiores a 24 °C para establecer cuál sería la óptima para producir xilitol (Figuras 6 y 7).

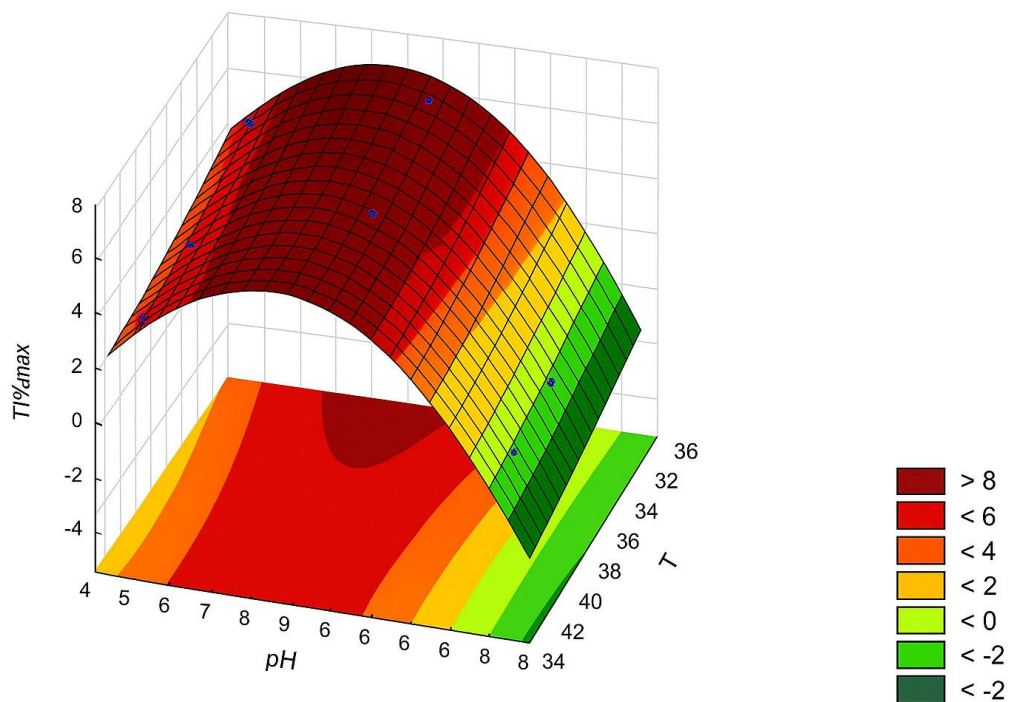


Figura 6. Efecto combinado de las variables pH y temperatura, para la variable xilitol g/L , a partir de hidrolizado de bagacillo de caña de azúcar por *Candida intermedia*.

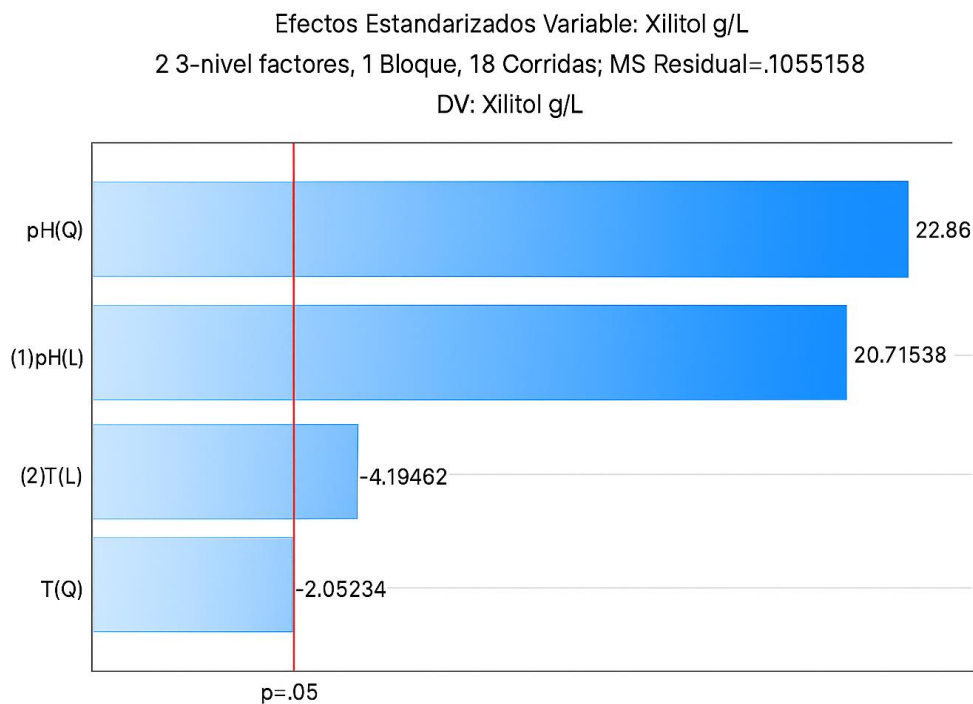


Figura 7. Efecto estimado y estandarizado para la variable xilitol g/L, a partir de hidrolizado de bagacillo de caña de azúcar por *Candida intermedia*.

Para asegurarnos de que estas diferencias no se debían al azar, realizamos un Análisis de Varianza (ANOVA) (Tabla 5) la cual presenta un resumen del análisis de varianza sobre la producción de xilitol a partir del hidrolizado de bagazo de caña de azúcar mediante *Candida intermedia*, mostrando que hay diferencias estadísticas significativas. Los resultados fueron contundentes:

- El efecto del pH fue extremadamente significativo (valores p de 0.000000). Tanto su efecto lineal como cuadrático confirman que es el factor más importante.
- La temperatura también mostró una influencia significativa en su efecto lineal ($p = 0.001050$), pero mucho menor que la del pH.

Tabla 5. Análisis de varianza para producción de xilitol a partir del hidrolizado de bagacillo de caña de azúcar por *Candida intermedia*

ANOVA; Var.:Xilitol g/L; R-sqr=.98683; Adj:.98277 (3**(2-0) diseño factorial completo 1 bloque , 9 tratamientos y 1 replica MS Residual=.1055158 DV: Xilitol g/L					
	SS	dF	MS	F	P
(1)pH (L)	45,2797	1	45,27968	429,1269	0,000000
pH (Q)	55,1801	1	55,18014	522,9561	0,000000
(2)T (L)	1,8565	1	1,85653	17,5948	0,001050
T (Q)	0,4444	1	0,44444	4,2121	0,060839
Error	1,3717	13	0,10552		
Total SS	104,1325	17			

En resumen, los números nos gritan una conclusión clara: La composición del medio fermentativo, específicamente su pH, es la llave maestra que desbloquea la producción de xilitol. Mientras que la levadura *Candida intermedia* demostró ser una trabajadora excepcional, su rendimiento dependió críticamente de que le proporcionáramos el entorno correcto. El escenario ganador, pH 6 y 24°C, es la receta que maximiza la transformación del bagacillo en un edulcorante valioso.

Capítulo 8 - Dialogando con la Ciencia: Interpretando el Descubrimiento

En los capítulos anteriores, hemos compartido nuestra propia aventura científica: cómo aislamos la levadura, preparamos el hidrolizado y descubrimos las condiciones ideales para que todo funcione.

Pero ¿sabes qué? En el mundo de la ciencia, ningún logro es una isla. Es hora de sentarnos a "conversar" con lo que otros investigadores han encontrado alrededor del mundo y ver cómo nuestros resultados encajan en este gran rompecabezas global.

¿Teníamos en Nuestras Manos una Superlevadura?

Recordemos que entre las tres candidatas, *Candida intermedia* (nuestra cepa C3) se destacó inmediatamente por su voraz apetito por la xilosa. ¿Era esto esperado? ¡Absolutamente! Estudios recientes confirman que las levaduras del género *Candida* son como "atletas de élite" cuando se trata de procesar hidrolizados lignocelulósicos (Qvirist et al., 2022). Nuestra elección no fue casualidad—estaba respaldada por la ciencia. El que consumiera más del 50% de la xilosa disponible en las pruebas preliminares nos dio una pista clave: estábamos trabajando con un microorganismo prometedor.

El Arte de Extraer el Azúcar: Ni Muy Poco, Ni Demasiado

Nuestro proceso de hidrólisis fue como cocinar una receta delicada. El Tratamiento 1 (con más ácido) resultó contraproducente. ¿Por qué? Las investigaciones modernas lo explican bien: cuando el tratamiento es muy agresivo, la xilosa no solo se libera, sino que se degrada formando compuestos tóxicos como el furfural y el HMF, que actúan como "venenos" para la levadura (Águila Consuegra et al., 2022). Era como quemar la comida que queríamos servir.

Los tratamientos T2 y T3, más suaves, demostraron que en la hidrólisis menos es más. La detoxificación con NaOH que aplicamos después es una técnica validada que actúa como un "filtro purificador", eliminando estas toxinas y preparando el terreno para que nuestra *Candida intermedia* pudiera trabajar sin obstáculos (Ledezma-Orozco et al., 2018).

Nuestro Gran Hallazgo: El "Punto Dulce" del pH y la Temperatura

Aquí es donde nuestra investigación hace su contribución más valiosa. Mientras algunos estudios con otras levaduras como *Candida shehatae* reportan óptimos alrededor de pH 4.5 y 30°C, nosotros descubrimos que nuestra cepa de *Candida intermedia* prefiere pH 6 y 24°C.

¿Qué significa esto? Que cada levadura tiene su "personalidad" única. Lo que funciona para una, no necesariamente funciona para otra. Nuestro pH 6 resultó ser el "punto dulce" donde las enzimas de *Candida intermedia* trabajan con máxima eficiencia. Por el contrario, a pH 5—una condición que otras levaduras toleran—la nuestra simplemente se "bloqueaba" y no producía nada.

En cuanto a la temperatura de 24°C, es interesante notar que es más baja que lo reportado en muchos estudios. Esto sugiere que nuestra cepa podría ser particularmente eficiente en condiciones más frescas, lo que potencialmente reduciría costos de energía en un proceso industrial (Braulio & Pinos, 2021).

¿Cómo se Compara Nuestro Rendimiento?

Cuando ponemos nuestros 6.47 g/L de xilitol sobre la mesa de comparación, la historia se vuelve fascinante:

- Ventaja sobre métodos tradicionales: Superamos ampliamente los 0.73 g/L reportados con resinas de intercambio iónico, y los aproximadamente 0.5 g/L de estudios con *Candida kefir* y *Candida tropicalis*.

- Competitividad con materias primas similares: También superamos los 0.67 g/L obtenidos de bagazo de caña de azúcar en investigaciones anteriores.
- Perspectiva realista: Es cierto que hay estudios que reportan producciones mucho más altas (hasta 83 g/L), pero estos generalmente usan xilosa pura como punto de partida—algo mucho más costoso que nuestro hidrolizado de bagacillo. La belleza de nuestro proceso está en que partimos de un residuo de bajo costo y aun así obtenemos un rendimiento respetable.

Lo que Nos Dicen los Números: La Estadística No Miente

El análisis estadístico (ANOVA) fue la prueba de fuego que confirmó lo que veíamos en el laboratorio. Los valores de significancia ($p < 0.000000$ para el pH) nos dicen con certeza matemática que las diferencias que observamos no son producto del azar. El pH y la temperatura realmente son los directores de orquesta en esta sinfonía bioquímica.

Mirando Hacia el Futuro: ¿Qué Sigue?

Nuestra indagación indica que es beneficioso considerar temperaturas que sean incluso inferiores a 24°C. ¿Podría nuestra levadura ser aún más eficiente a 20°C o 22°C? Esta es una pregunta abierta para futuras investigaciones.

El trayecto hacia una producción que sea viable desde el punto de vista económico-continua. La ingeniería genética está desarrollando levaduras "extraordinarias" que pueden transformar de manera más eficaz los azúcares del bagazo en xilitol (Pandey et al., 2025). Nuestra investigación es un granito de arena para alcanzar esta meta. Lo que hemos demostrado es que, con el enfoque adecuado, los residuos del campo pueden convertirse en los cimientos de una industria más dulce y sostenible.

Capítulo 9 - Conclusiones y el Futuro de la Biorrefinería

Después de este fascinante viaje que nos llevó desde los campos de caña de azúcar hasta el interior de un biorreactor, es momento de hacer balance. Es hora de recoger lo aprendido y preguntarnos: ¿qué nos han enseñado estos hallazgos? Y, sobre todo, ¿qué nuevos caminos se abren a partir de aquí?

El Manual de Instrucciones para un Proceso Exitoso

Nuestro estudio nos ha proporcionado respuestas precisas, como un guía para cambiar el bagazo en xilitol:

- **La Receta Ganadora:** Descubrimos que la combinación perfecta era un pH de 6 y una temperatura de 24 °C. En este entorno ideal, nuestra levadura estrella, la *Candida intermedia*, rindió al máximo y logró producir 6.47 gramos de xilitol por cada litro de cultivo.
- **El Toque Justo en la Cocción:** Como en cualquier receta, el exceso puede ser contraproducente. Al usar 6 ml de ácido sulfúrico, el resultado fue como "quemar" los azúcares que queríamos aprovechar. En lugar de obtener xilosa útil, generamos sustancias tóxicas que arruinaron el proceso.
- **La Limpieza es Fundamental:** La detoxificación no es un paso que podamos saltarnos. Sin ella, las toxinas generadas durante la hidrólisis envenenan a la levadura y detienen por completo la producción. Es como preparar alimentos en una cocina sucia: el resultado nunca será óptimo.
- **La Ventaja de la Frescura:** Descubrir que la temperatura de 24°C es la ideal es un hallazgo con un gran potencial. Al ser una temperatura cercana a la ambiental, el proceso consume mucha menos energía para calentamiento o enfriamiento, lo que lo hace más económico y sostenible desde el primer momento.

El Panorama General: Más que un Simple Proceso

Estos hallazgos individuales pintan un cuadro mucho más grande y alentador. Hemos demostrado que es técnicamente posible crear un ciclo virtuoso:

Residuo Agrícola (Bagacillo) → Hidrólisis y Detoxificación → Alimento para
Levadura → Producto Valioso (Xilitol)

Este es el corazón del concepto de biorrefinería: imitar a la naturaleza, donde no existe el concepto de "basura", y todo se transforma en un nuevo recurso.

Mirando Hacia el Futuro: La Revolución que Viene

El camino no termina aquí. Lo que hemos hecho es una prueba de concepto exitosa, pero la revolución de la biorrefinería está apenas comenzando. Estas son algunas de las rutas que se abren a futuro:

- Optimizar para Escalar: El siguiente paso lógico es llevar nuestro proceso de un matraz en el laboratorio a un biorreactor de mayor escala. ¿Funcionará igual de bien? ¿Qué ajustes necesitaremos? Esta es la etapa crucial para atraer el interés industrial.
- La Búsqueda de Levaduras aún Mejores: La biología sintética y la ingeniería genética están creando la próxima generación de microorganismos. Podemos imaginar una *Candida* intermedia 2.0, genéticamente modificada para ser aún más voraz, más resistente y eficiente en la conversión de xilosa a xilitol.
- La Biorrefinería Integral: El verdadero sueño no es solo extraer xilosa, sino aprovechar el 100% del bagacillo. Mientras la hemicelulosa se usa para xilitol, la celulosa podría convertirse en bioetanol o bioplásticos, y la lignina en compuestos de alto valor para la industria química. ¡Nada se desperdiciaría!
- Explorar Otros "Desperdicios": ¿Funcionaría igual con la paja del arroz o del trigo? ¿Con los residuos de la poda de los jardines? El principio que hemos

probado podría replicarse para valorizar muchos otros flujos de residuos agrícolas y urbanos.

Una Reflexión Final

Al inicio de este libro, les invitamos a imaginar un mundo donde los residuos fueran recursos. Ahora, esa imagen es menos una utopía y más un horizonte alcanzable. Hemos demostrado que con ciencia, paciencia y una levadura microscópica como aliada, es posible endulzar nuestro futuro de una manera que respete al planeta.

La transición de una economía lineal (extraer-usar-tirar) a una economía circular (transformar-reutilizar-valorizar) es uno de los retos más importantes de nuestro tiempo. Y resulta que una parte de la solución estaba, literalmente, bajo nuestros pies, en esos montones de bagacillo que esperaban ser descubiertos.

El mensaje final es de esperanza y acción: los recursos no se están agotando; solo están mal distribuidos y entendidos. La tarea que sigue es aprender a verlos, y con herramientas como las que hemos explorado, transformarlos. El futuro no es solo más dulce; es más inteligente.

REFERENCIAS

- Aguiar Novillo, S., Estrella, M. E., Uvidia Cabadiana, H., & Aguiar, S. (2022). Residuos agroindustriales: su impacto, manejo y aprovechamiento. *AXIOMA*, 1(27), 5–11. <https://doi.org/10.26621/RA.V1I27.803>
- Águila Consuegra, L. E., González Suárez, E., & Albernas Carvajal, Y. (2022). Determinación de las capacidades óptimas de producción de xilitol extrayendo jugo de los filtros en un central azucarero. *Revista Centro Azúcar*, ISSN-e 2223-4861, Vol. 49, N°. 2, 2022, 49(2), 8. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10077710&info=resumen&idioma=ENG>
- Augusto, C., Coorientador, R., Enrique, M., & Lozano, V. (2022). *Estudio de la respuesta de levaduras transformadoras de xilosa a condiciones de estrés en hidrolizados de bagazo de caña de azúcar*. Universidade Federal de Minas Gerais. <https://hdl.handle.net/1843/64789>
- Braulio, I. J., & Pinos, A. (2021). *Obtención de bioetanol a partir del bagazo de la caña de azúcar mediante hidrólisis enzimática*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21229>
- Campos-Felix, U. F. de C. Agrarias. U. N. H. Valdizan. Av. U. 601-607 C.-P. M. – Huánuco. (2021). *Influencia del medio fermentativo en el consumo de xilosa por Candida intermedia a partir de hidrolizados de bagacillo de caña de azúcar*.
- Cevallos Álvarez, N. M. (2024). *Obtención de cepas probióticas a partir de diferentes sustratos de origen orgánico de la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas – Ecuador*. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología. Carrera de Biotecnología. <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/40680>
- Contreras Franco, K. S. (2024). “*Gestión Sostenible de Residuos Agrícolas*.” BABAHOYO: UTB, 2024. <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/15995>
- Cunuy Lopez, A. F. (2023). *Evaluación de la calidad de aire de la emisión de gases producidos por la quema de leña para la producción de carbón, comunidad Pupana norte, cantón Saquisilí*. Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC). <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/11384>
- Edgar Ledezma-Orozco, Régulo Ruíz-Salazar, Guadalupe Bustos-Vázquez, Noé Montes-García, Viviana Roa-Cordero, & Guadalupe Rodríguez-Castillejos. (2018). *Producción de*

- xilitol a partir de hidrolizados ácidos no detoxificados de bagazo de sorgo por Debaryomyces hansenii*.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952018000801095&script=sci_arttext&utm_source=chatgpt.com
- Escobar Noboa, A. B. (2025). *Probióticos como alternativa de prevención de caries dental en pacientes pediátricos*. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/15209>
- González Martínez, M. F. (2024). *Producción a escala laboratorio de xilitol a partir de la semilla de tamarindo por medio fermentativo con Candida Tropicalis y Candida Guillermondii*. Fundación Universidad de América. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/9727>
- Ledezma-Orozco, E., Ruíz-Salazar, R., Bustos-Vázquez, G., Montes-García, N., Roa-Cordero, V., & Rodríguez-Castillejos, G. (2018). Producción de xilitol a partir de hidrolizados ácidos no detoxificados de bagazo de sorgo por Debaryomyces hansenii. *Publicado Como ARTÍCULO En Agrociencia*, 52, 1095–1106.
- Manzini Polí, F. L., Islas-Samperio, J. M., García Bustamante, C. A., Sacramento Rivero, J. C., Grande-Acosta, G. K., Gallardo-álvarez, R. M., Lagunes, R. M., Pineda, F. N., & Escobedo, C. A. (2022). Sustainability Assessment of Solid Biofuels from Agro-Industrial Residues Case of Sugarcane Bagasse in a Mexican Sugar Mill. *Sustainability (Switzerland)*, 14(3), 1711. <https://doi.org/10.3390/SU14031711/S1>
- Mateo Casas, C., Romero García, J. M., Romero Pulido, M. I., & Universidad de Jaén. Ingeniería Química, A. y de los M. (2024). *Producción de xilitol a partir de biomasa lignocelulósica*.
- Nwamba, M. C., Sun, F., Mukasekuru, M. R., Song, G., Harindintwali, J. D., Boyi, S. A., & Sun, H. (2021). Trends and hassles in the microbial production of lactic acid from lignocellulosic biomass. *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101337. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2020.101337>
- Pandey, N., Ahmad, D., Hasan, M., Choudhary, D. K., Kumar, A., Tripathi, M. K., Siddiqui, S. A., & Shah, M. A. (2025). Current trends in the production of xylitol and paving the way for metabolic engineering in microbes. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts 2025* 18:1, 18(1), 1–19. <https://doi.org/10.1186/S13068-025-02702-W>
- Qvirist, L., Mierke, F., Vazquez Juarez, R., & Andlid, T. (2022). Screening of xylose utilizing and high lipid producing yeast strains as a potential candidate for industrial application.

BMC Microbiology 2022 22:1, 22(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/S12866-022-02586-Y>

Roba, R. B., Letta, M. U., Aychiluhim, T. N., & Minneench, G. A. (2022). Intake, digestibility, growth performance and blood profile of rams fed sugarcane bagasse or rice husk treated with *Trichoderma viride* and effective microorganisms. *Heliyon*, 8(12), e11958. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2022.E11958>

Roldán García, E. A. (2021). *Diseño de investigación para la extracción a escala laboratorio de edulcorante “xilitol” como subproducto del olote de maíz cultivado en Guatemala.* <https://biblioteca.ingenieria.usac.edu.gt/>

Steponavičienė, V., Rudinskienė, A., Žiūraitis, G., & Bogužas, V. (2023). The Impact of Tillage and Crop Residue Incorporation Systems on Agrophysical Soil Properties. *Plants* 2023, Vol. 12, Page 3386, 12(19), 3386. <https://doi.org/10.3390/PLANTS12193386>

Umai, D., Kayalvizhi, R., Kumar, V., & Jacob, S. (2022). Xylitol: Bioproduction and Applications-A Review. *Frontiers in Sustainability*, 3, 826190. <https://doi.org/10.3389/FRSUS.2022.826190/FULL>

Zambrano Zambrano, G. A., García Macías, V. L., Cedeño Palacios, C. A., & Alcívar Cedeño, U. E. (2021). Aprovechamiento de la cascarilla de arroz (*Oryza sativa*) para la obtención de fibras de celulosa. *Polo Del Conocimiento: Revista Científico - Profesional*, ISSN-e 2550-682X, Vol. 6, N°. 4, 2021, Pages 415-437, 6(4), 415–437. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i4.2572>

ANEXOS

Anexo 1. Informe de Resultados de Identificación Molecular Microbiana.



Lima, 19 de marzo del 2021

PARA : ULDA CAMPOS FELIX

DE : COOPERATIVA DE TRABAJADORES BIOTECOOP

INFORME DE RESULTADOS DE IDENTIFICACIÓN MOLECULAR

DATOS DE LAS MUESTRAS

MUESTRAS : Liquidas(1)
CONSERVACIÓN : Cadena de frio
MUESTREO : No aplica

Tabla 1 Muestras recibidas y procesadas

Nº	Código de origen	Presentación	Fecha de coleccion	Fecha de Recepción	Fecha de Proceamiento	Obsv.
1	M010	Líquida	—	04/03/21	05/03/21	—

- IDENTIFICACIÓN MOLECULAR:

La identificación molecular se realizó partiendo de un proceso de extracción de ADN y confirmación de la presencia mediante migración electroforética. Posteriormente, se ha realizado un ensayo de PCR con iniciadores dirigidos a una región específica del genoma reportado como marcador específico aca.

Actualmente, el amplicón obtenido se envió a la empresa MACROGEN para la realización del secuenciamiento de ADI, se descuenta que se realizó la identificación a nivel del género y especie de la muestra evaluada la muestra con referida en la muestra.





Dirección legal: Urb. Paseo del Mar
Nuevo Chimbote, Santa, Ancash
Correo electrónico: ed.honexus@gmail.com
Teléfono: 978653152

ISBN: 978-612-99189-6-9

