OM EDITORIAL

BIOTECNOLOGÍA DE LA FERMENTACIÓN DE FRUTAS AMAZÓNICAS

Investigación y Desarrollo de Procesos



Autores

López-Vinatea, Luis Alberto
Chang-Gómez, Mario Andrew
Malca-Salas, Gustavo Adolfo
Souza-Najar, Rosa Isabel
Wong-Ramírez, Jandira del Pilar
Vásquez Gil, Oscar Alberto
Carrasco-Montañez, Daniel Diomedes
Vela Meléndez, Miguel Angel
Gómez-Tuesta, Luis
Valer-Ortiz, Zarahi Ninfa

Biotecnología de la Fermentación de Frutas Amazónicas:

Investigación y Desarrollo de Procesos

Autor/es:

Lopez-Vinatea, Luis Alberto

Universidad Nacional De La Amazonia Peruana

Chang-Gomez, Mario Andrew

Universidad Nacional De La Amazonia Peruana

Malca-Salas, Gustavo Adolfo

Universidad Nacional De La Amazonia Peruana

Souza-Najar, Rosa Isabel

Universidad Nacional De La Amazonia Peruana

Wong-Ramirez, Jandira Del Pilar

Universidad Nacional De La Amazonia Peruana

Vásquez-Gil, Oscar Alberto

Universidad Nacional De La Amazonia Peruana

Carrasco-Montañez, Daniel Diomedes

Universidad Nacional De La Amazonia Peruana

Vela-Melendez, Miguel Angel

Universidad Nacional De La Amazonia Peruana

Gómez-Tuesta, Luis

Universidad Nacional De La Amazonia Peruana

Valer-Ortiz, Zarahi Ninfa

Universidad Tecnológica del Perú

Datos de Catalogación Bibliográfica

Lopez-Vinatea, L. A.
Chang-Gomez, M. A.
Malca-Salas, G. A.
Souza-Najar, R. I.
Wong-Ramirez, J. Del P.
Vásquez-Gil, O.A.
Carrasco-Montañez, D. D.
Vela-Melendez, M. A.
Gómez-Tuesta, L.
Valer-Ortiz, Z. N.

Biotecnología de la Fermentación de Frutas Amazónicas: Investigación y Desarrollo de Procesos
Oriente-Manabi Editorial, Ecuador, 2026
ISBN: 978-9907-9620-4-8
Formato: 210 mm X 270 mm 156 págs.

Publicado por Oriente-Manabí Editorial
Ecuador, Manabi, Cod. Post. 130101.
Contacto: +593 959 723 343
Email: info@omeditorial.com
www.books.omeditorial.com

Director General:	*Dr. Guerrero Bermúdez Ángel Enrique*
Editor en Jefe:	*Dr. Guerrero Bermúdez Ángel Enrique*
Editor Académico:	*Lcdo. Oltramonti Roberto, Mg*
Supervisor de Producción:	*Ing. Barragán Monrroy Roberto Johan, Mg.*
Diseño:	*OM Editorial*
Consejo Editorial	*OM Editorial*

© Noviembre, 2026
Libro Digital, Primera Edición, 2026
Editado, Diseñado, Diagramado y Publicado por Comité OM Editorial
Manabi, Ecuador, 2026
D.R. © 2026 por Autores y OM Editorial Ecuador.
Cámara Ecuatoriana del Libro con Radicación editorial 182865

Disponible para su descarga gratuita en www.books.omeditorial.com

Los contenidos de este libro pueden ser descargados, reproducidos, difundidos e impresos con fines de estudio, investigación y docencia o para su utilización en productos o servicios no comerciales, siempre que se reconozca adecuadamente a los autores como fuente y titulares de los derechos de propiedad intelectual, sin que ello implique en modo alguno que aprueban las opiniones, productos o servicios resultantes. En el caso de contenidos que indiquen expresamente que proceden de terceros, deberán dirigirse a la fuente original indicada para gestionar los permisos.

Título del libro:
Biotecnología de la Fermentación de Frutas Amazónicas: Investigación y Desarrollo de Procesos

© Lopez-Vinatea, Luis Alberto; Chang-Gomez, Mario Andrew; Malca-Salas, Gustavo Adolfo; Souza-Najar, Rosa Isabel; Wong-Ramirez, Jandira Del Pilar; Vásquez-Gil, Oscar Alberto; Carrasco-Montañez, Daniel Diomedes; Vela-Melendez, Miguel Angel; Gómez-Tuesta, Luis; Valer-Ortiz, Zarahi Ninfa.

ISBN: 978-9907-9620-4-8

https://doi.org/10.63618/omeditorial/l41

Como citar (APA 7ma Edición):
Lopez-Vinatea, L. A., Chang-Gomez, M. A., Malca-Salas, G. A., Souza-Najar, R. I., Wong-Ramírez, J. D. P., Vásquez-Gil, O. A., Carrasco-Montañez, D. D., Vela-Melendez, M. A., Gómez-Tuesta, L., & Valer-Ortiz, Z. N. (2026). *Biotecnología de la Fermentación de Frutas Amazónicas: Investigación y Desarrollo de Procesos*. Oriente-Manabí Editorial. https://doi.org/10.63618/omeditorial/l41

Cada uno de los textos de OM Editorial han sido sometido a un proceso de evaluación por pares doble ciego externos (double-blind paper review) con base en la normativa del editorial.

Revisores:

Dra. C. Jéssica Jessenia Morán Morán	Universidad Estatal del Sur de Manabí– Ecuador
Ing. Enma Leonor Morán Villacreses, Mg.	Universidad Estatal del Sur de Manabí– Ecuador

Los libros publicados por **"OM Editorial"** cuentan con varias indexaciones y repositorios internacionales, lo que respalda la calidad de las obras. Lo puede revisar en los siguientes apartados:

Aviso Legal:

La información presentada, así como el contenido, fotografías, gráficos, cuadros, tablas y referencias de este manuscrito es de exclusiva responsabilidad del/los autores/es y no necesariamente reflejan el pensamiento de la OM Editorial.

Derechos de autor ©

Este documento se publica bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).



El “copyright” y todos los derechos de propiedad intelectual y/o industrial sobre el contenido de esta edición son propiedad de la OM Editorial y sus Autores. Se prohíbe rigurosamente, bajo las sanciones en las leyes, la producción o almacenamiento total y/o parcial de esta obra, ni su tratamiento informático de la presente publicación, incluyendo el diseño de la portada, así como la transmisión de la misma de ninguna forma o por cualquier medio, tanto si es electrónico, como químico, mecánico, óptico, de grabación o bien de fotocopia, sin la autorización de los titulares del copyright, salvo cuando se realice con fines académicos o científicos y estrictamente no comerciales y gratuitos, debiendo citar en todo caso a la editorial. Las opiniones expresadas en los capítulos son responsabilidad de los autores.

Reseña de Autores

Lopez-Vinatea, Luis Alberto

Universidad Nacional De La Amazonia Peruana

luisalberto.lopez@unapiquitos.edu.pe

https://orcid.org/0009-0004-3333-6464



Ingeniero Químico egresado de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), con Maestría en Ecología y Desarrollo Sostenible por la misma institución. Cuenta además con estudios concluidos en la Maestría en Química de Productos Naturales por la Universidade Federal do Pará (UFPA, Brasil) y formación doctoral en Ambiente y Desarrollo Sostenible en la UNAP. Su trayectoria académica se orienta a la integración de la ingeniería química con el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales y la conservación ambiental. Su enfoque multidisciplinario le permite contribuir con una visión que articula innovación, tecnología y sostenibilidad, aportando al análisis y desarrollo de soluciones frente a los desafíos ambientales contemporáneos, especialmente en contextos amazónicos.

Chang-Gomez, Mario Andrew

Universidad Nacional De La Amazonia Peruana

mario.chang@unapiquitos.edu.pe

https://orcid.org/0009-0003-4287-5868



Ingeniero Químico egresado de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), con Maestría en Ciencias y Tecnologías Ambientales, mención en Industria del Petróleo y Medio Ambiente, y candidato a Doctor en Ciencias Ambientales por la misma casa de estudios. Se desempeña como docente en la Facultad de Ingeniería Química de la UNAP, donde desarrolla labores de enseñanza e investigación orientadas al desarrollo sostenible y a la incorporación de tecnologías digitales en la gestión de la seguridad y salud en el trabajo. Su producción académica y científica busca contribuir al desarrollo de la Amazonía mediante propuestas que integran ciencia, ingeniería, transformación digital y responsabilidad ambiental, promoviendo entornos laborales más seguros, eficientes y sostenibles.

Malca-Salas, Gustavo Adolfo

Universidad Nacional De La Amazonía Peruana

gustavo.malca@unapiquitos.edu.pe

https://orcid.org/0000-0002-1272-7667



Ingeniero Químico con Maestría en Ciencias con mención en Ecología y Desarrollo, Doctor en Educación por la Universidad Alas Peruanas, candidato a Doctor en Ingeniería Química Ambiental por la Universidad Nacional de Trujillo, docente principal por la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana en la Facultad de ingeniería Química, a cargo de cursos relacionados con: aspectos ambientales, Seguridad y Salud en el Trabajo y Factores de Riesgo en la Industria. Autor de trabajos de investigación en Uso de las energías alternativas para reducir las emisiones de CO2, calidad del aire, huella de carbono, residuos sólidos.

Souza-Najar, Rosa Isabel

Universidad Nacional De La Amazonía Peruana

rosa.souza@unapiquitos.edu.pe

https://orcid.org/0000-0002-7359-3332



Ingeniera Química por la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), con Maestría y Doctorado en Ingeniería Química Ambiental por la Universidad Nacional de Trujillo (UNT). Docente de Química Analítica en la Facultad de Ingeniería Química de la UNAP, con experiencia en el estudio de compuestos bioactivos de plantas con potencial hipoglucemiante y en el asesoramiento de tesis en temas ambientales. Su trabajo integra la química aplicada, la analítica de datos y los enfoques sostenibles orientados a la prevención de riesgos y a los desafíos ambientales contemporáneos.

Wong-Ramírez, Jandira Del Pilar

Universidad Nacional De La Amazonía Peruana

jandira.wong@unapiquitos.edu.pe

https://orcid.org/0009-0001-3685-8231



Ingeniero Químico (UNAP) Titulado, Colegiado y con Maestría, con habilidades de Liderazgo y Trabajo en Equipo, con capacidad para asumir retos y orientarse a resultados. Me motiva la transferencia de conocimientos desde el área de química orgánica hacia las diferentes facultades de la UNAP. Con experiencia de 20 años en Minería Subterránea, Especialista en Gestión de Aguas: Implementación de Sistemas de Tratamiento de Agua de Mina, Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas, Sistemas de Tratamiento de Agua Potable. He participado en auditorias de Sistemas de Gestión Integrado ISO 450001 y 90001, fiscalizaciones por parte de OEFA, OSINERGMIN, ANA/ALA/AAA, Dirección de Monitoreos Participativos, Manejo de Documentación Legal Ambiental.

Vásquez-Gil, Oscar Alberto

Universidad Nacional De La Amazonía Peruana

oscar.vasquez@unapiquitos.edu.pe

https://orcid.org/0000-0001-7513-1441



Ingeniero Químico y Magíster con mención en Planificación y Manejo de Áreas Naturales Protegidas por la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), y candidato a Doctor en Administración por la Universidad San Ignacio de Loyola (USIL). Cuenta con más de 20 años de experiencia en procesos industriales, hidrocarburos y sistemas integrados de gestión; además de una amplia trayectoria como docente universitario a nivel de pregrado y postgrado en la UNAP. Asimismo, es especialista en diversos entornos informáticos, abarcando el procesamiento de bases de datos, diseño asistido por computadora, Power BI, soporte técnico y redes.

Carrasco-Montañez, Daniel Diomedes

Universidad Nacional De La Amazonía Peruana

dcarrasco@unapiquitos.edu.pe

https://orcid.org/0000-0002-2317-3911



Ingeniero químico formado en la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), con estudios de maestría en Ciencias en Ecología y Desarrollo Sostenible por la misma institución. Su trayectoria académica y profesional se caracteriza por la integración de la ingeniería con enfoques ambientales, orientados a la gestión sostenible de los recursos naturales. Ha desarrollado un perfil comprometido con la investigación y la aplicación de soluciones tecnológicas frente a los desafíos ecológicos contemporáneos, especialmente en contextos amazónicos. Su labor se enfoca en promover prácticas responsables que articulen el desarrollo productivo con la conservación del entorno. Asimismo, destaca por su interés en la innovación y en la formación de profesionales conscientes del impacto ambiental de la ingeniería, contribuyendo al fortalecimiento de una visión sostenible en el ámbito científico y técnico.

Vela-Melendez, Miguel Angel

Universidad Nacional De La Amazonía Peruana

velamelendezmiguelangel@gmail.com

https://orcid.org/0009-0004-1798-3055



Ingeniero Químico y maestrando en Ciencias y Tecnologías Ambientales con dos décadas de trayectoria en la industria del petróleo, la gestión ambiental y el procesamiento de plásticos en la Amazonía. Especializado en el desarrollo de proyectos de tratamiento químico a nivel de planta para la separación de fluidos y disposición de efluentes, aportando soluciones técnicas sostenibles que optimizan la eficiencia y garantizan el cumplimiento de estándares internacionales.

Gómez-Tuesta, Luis

Universidad Nacional De La Amazonía Peruana

luis.gomez@unapiquitos.edu.pe

https://orcid.org/0000-0002-3860-9714



Ingeniero Químico con Maestría en Gestión Empresarial, Doctorado en Ciencias Empresariales y actualmente candidato a Doctor en Ciencias Ambientales por la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP). Se desempeña como docente universitario en las áreas de física y biofísica, orientadas a carreras de ingeniería y ciencias biomédicas. Ha dirigido diversas tesis de pregrado en ingeniería química, abarcando temáticas como la determinación de macronutrientes en sedimentos acuícolas, sistemas de bombeo y fermentaciones alcohólicas. Su formación multidisciplinaria, que integra la gestión empresarial, las ciencias ambientales y la ingeniería de procesos, le permite aportar a la presente obra una visión integral sobre la viabilidad técnica, económica y social de las soluciones energéticas sostenibles en entornos rurales.

Valer-Ortiz, Zarahi Ninfa

Universidad Tecnológica del Perú

C33959@utp.edu.pe

https://orcid.org/0009-0009-6836-8294



Ingeniera Ambiental con experiencia en gestión ambiental, sostenibilidad y cumplimiento normativo, con énfasis en los sectores de hidrocarburos y energía. Ha liderado y participado en proyectos vinculados a la gestión de permisos, evaluación de impactos, fiscalización ambiental y gestión de riesgos, asegurando el cumplimiento de la legislación vigente. Se desempeña además como docente universitaria, contribuyendo a la formación de profesionales con enfoque en responsabilidad ambiental y mejora continua. Su trayectoria integra la práctica técnica con la gestión sostenible, promoviendo la aplicación de soluciones innovadoras frente a los desafíos del sector. En la presente obra, aporta una visión orientada a la sostenibilidad, la innovación y la gestión eficiente de los recursos, destacando el rol de la ingeniería ambiental en la generación de soluciones para los retos del siglo XXI.

Índice

Reseña de Autores vii
Índice xvii
Índice de Tablas xxvii
Índice de Figuras xxix
Introducción xxxii
Capítulo I: Las frutas de la Amazonía peruana como materia prima fermentable 1
1.1. La oferta frutícola de Loreto 2
1.1.1. Diversidad en el mercado y en la chacra 2
1.1.2. Perecibilidad: el argumento a favor de fermentar 2
1.2. El camu camu como caso de referencia 3
1.2.1. Distribución y abastecimiento 3
1.2.2. Composición y acidez 3
1.3. Otras frutas con potencial fermentativo 4
1.3.1. Cocona 4
1.3.2. Aguaje 5
1.3.3. Arazá, ungurahui, uvilla y otras 5
1.3.4. Pijuayo, copoazú y huasaí 6
1.4. Criterios para elegir una fruta como sustrato 8
1.4.1. Azúcares fermentables 8
1.4.2. Acidez y pH 8
1.4.3. Rendimiento de jugo y estacionalidad 8
1.4.4. Compuestos que conviene preservar 10
1.5. Fermentación y bioeconomía amazónica 10
1.5.1. Del fruto al producto 10

1.5.2. Límites que conviene reconocer 10
Capítulo II: Microbiología de la fermentación de frutas 12
2.1. Quién fermenta un mosto de fruta 13
2.2. *Saccharomyces cerevisiae*, la levadura de trabajo 14
2.2.1. Por qué casi todos los trabajos la usan 14
2.2.2. Levadura de panificación frente a levadura vínica 15
2.3. Levaduras no-*Saccharomyces* 15
2.3.1. Qué aportan 15
2.3.2. Levaduras nativas del camu camu 16
2.4. Bacterias ácido-lácticas 17
2.4.1. Características generales 17
2.4.2. BAL en fermentaciones tradicionales amazónicas 18
2.4.3. Fermentación láctica de camu camu 18
2.5. Bacterias acéticas 18
2.5.1. Géneros y metabolismo 18
2.5.2. Vinagre de frutas 19
2.6. Consorcios simbióticos: la kombucha 19
2.6.1. Qué es un SCOBY 19
2.6.2. Datos de referencia 20
2.7. Fermentaciones espontáneas del cacao y afines 20
2.8. Bioprospección de microorganismos nativos 21
2.8.1. Por qué aislar cepas locales 21
2.8.2. Protocolo propuesto 21
2.9. Manejo de cepas en el laboratorio 23
2.9.1. Conservación y trazabilidad 23
2.9.2. Pureza e identidad antes de cada ensayo 24
2.9.3. Calibración de la biomasa 24

2.9.4. Bioseguridad 24
2.10. Síntesis del capítulo 25
Capítulo III: Bioquímica y estequiometría de las fermentaciones 26
3.1. Los azúcares de la fruta 27
3.1.1. Glucosa, fructosa y sacarosa 27
3.1.2. Pectinas y otros componentes 27
3.2. Glucólisis y fermentación alcohólica 28
3.2.1. La ruta 28
3.2.2. La ecuación de Gay-Lussac 29
3.2.3. Por qué el rendimiento real es menor 29
3.3. Fermentación láctica 30
3.4. Fermentación acética 31
3.5. Fermentación maloláctica 31
3.6. Compuestos volátiles y aroma 32
3.6.1. Alcoholes superiores 32
3.6.2. Ésteres y acetaldehído 32
3.7. Cálculos aplicados 32
3.7.1. Etanol potencial a partir del azúcar 32
3.7.2. Chaptalización 33
3.7.3. Seguimiento por densidad 34
3.8. Regulación del metabolismo: efectos Pasteur y Crabtree 35
3.8.1. Respirar o fermentar 35
3.8.2. Consecuencias prácticas 35
3.9. Los ácidos orgánicos de la fruta durante la fermentación 36
3.9.1. Qué pasa con cada ácido 36
3.9.2. Por qué el pH baja menos de lo que se espera 36
3.10. Balance de carbono y de energía 37

Capítulo IV: Cinética y modelado matemático de la fermentación 38
4.1. Para qué sirve un modelo cinético 39
4.2. Variables y definiciones básicas 39
4.2.1. Las tres concentraciones 39
4.2.2. Velocidades y velocidades específicas 40
4.2.3. Rendimientos y productividad 40
4.3. Las fases del cultivo en lote 42
4.4. El modelo de Monod 43
4.4.1. La ecuación 43
4.4.2. Qué dice y qué no dice 44
4.5. Inhibición por sustrato y por producto 45
4.5.1. Inhibición por sustrato: el modelo de Andrews 45
4.5.2. Inhibición por producto: el modelo de Levenspiel 46
4.5.3. Combinación de términos 47
4.6. Formación de producto: el modelo de Luedeking y Piret 47
4.7. Un modelo completo y su simulación 48
4.7.1. El sistema de ecuaciones 48
4.7.2. Simulación ilustrativa 48
4.7.3. Sensibilidad a los parámetros 50
4.8. Modelos sigmoideos: logístico y Gompertz 50
4.8.1. Por qué usarlos 50
4.8.2. Gompertz modificado 51
4.9. Estimación de parámetros a partir de datos 52
4.9.1. Diseño del muestreo 52
4.9.2. Estimación gráfica de la velocidad específica máxima 53
4.9.3. Ajuste no lineal 53
4.9.4. Cómo reportar los parámetros 54

4.10. Cinética en fermentaciones lácticas y acéticas 54
4.10.1. Bacterias ácido-lácticas 54
4.10.2. Bacterias acéticas 54
4.11. Datos regionales aprovechables para modelado 55
4.12. Ejercicios propuestos 56
4.13. Síntesis del capítulo 56
Capítulo V: Operaciones unitarias y tecnología de procesos 58
5.1. Del fruto al mosto 59
5.1.1. Un proceso definido por la materia prima 59
5.1.2. Recepción, selección y lavado 60
5.1.3. Escaldado 61
5.1.4. Despulpado y refinado 61
5.1.5. Tratamiento enzimático 62
5.2. Formulación del mosto 62
5.2.1. Dilución 62
5.2.2. Corrección de azúcar 63
5.2.3. Acidez y pH 63
5.2.4. Nutrientes nitrogenados 64
5.3. Sulfitado 64
5.3.1. Función y formas químicas 64
5.3.2. Implicaciones para las frutas amazónicas 65
5.4. Inoculación y conducción de la fermentación 66
5.4.1. Preparación del inóculo 66
5.4.2. Temperatura 66
5.4.3. Seguimiento 67
5.5. Modos de operación 67
5.5.1. Lote, lote alimentado y continuo 67

5.5.2. El caso de la planta piloto de la FIQ-UNAP 68
5.5.3. El fermentador 69
5.6. Operaciones posteriores a la fermentación 70
5.6.1. Trasiego y clarificación 70
5.6.2. Estabilización y maduración 70
5.6.3. Pasteurización 70
5.7. Vinagre de fruta 71
5.7.1. Dos etapas 71
5.7.2. Métodos de acetificación 72
5.7.3. Datos disponibles 73
5.8. Destilación 74
5.8.1. Principio 74
5.8.2. Cabezas, corazón y colas 74
5.8.3. Destilados de fruta 75
5.9. Hidrólisis de sustratos amiláceos 76
5.10. Balance de materia de un lote 76
5.11. Problemas resueltos de proceso 77
5.11.1. Dosis de sulfito 77
5.11.2. Volumen de inóculo 77
5.11.3. Rendimiento de destilado 78
5.11.4. Acidez esperada de un vinagre 78
5.12. Síntesis del capítulo 78
Capítulo VI: Productos fermentados de frutas amazónicas: estado del conocimiento 79
6.1. Un inventario necesario 80
6.2. Vinos de fruta 82
6.2.1. Camu camu 82

6.2.2. Pijuayo 83
6.2.3. Guanábana 83
6.2.4. Otros vinos 84
6.3. Destilados y licores 84
6.3.1. Vodkas de sustratos amiláceos 84
6.3.2. Licores de fruta 84
6.4. Cervezas con frutas y tubérculos amazónicos 84
6.5. Vinagres 85
6.6. Kombuchas y bebidas con consorcios simbióticos 85
6.7. Bebidas lácticas y probióticas 86
6.7.1. Con base de fruta 86
6.7.2. Con base láctea 89
6.8. Fermentaciones tradicionales 89
6.8.1. Masato y chichas amiláceas 89
6.8.2. Chichas de fruta 90
6.9. Fermentación de semillas: cacao, macambo y copoazú 92
6.10. Tabla maestra 93
6.11. Síntesis del capítulo 94
Capítulo VII: Calidad, compuestos bioactivos y métodos de análisis 95
7.1. Qué significa calidad en un fermentado de fruta 96
7.2. Análisis fisicoquímicos de rutina 97
7.2.1. Sólidos solubles, pH y acidez 97
7.2.2. Grado alcohólico 98
7.2.3. Azúcares 99
7.2.4. Acidez volátil 99
7.3. Compuestos bioactivos 99
7.3.1. Vitamina C 99

7.3.2. Compuestos fenólicos 101
7.3.3. Antocianinas, carotenoides y tocoferoles 102
7.3.4. Perfil lipídico y mineral 102
7.4. Capacidad antioxidante 104
7.4.1. Tres métodos, tres mecanismos 104
7.4.2. Qué pasa con la capacidad antioxidante al fermentar 105
7.5. Inocuidad 106
7.5.1. Microbiología 106
7.5.2. Metanol 106
7.5.3. Marco normativo 106
7.6. Evaluación sensorial 107
7.6.1. Pruebas afectivas 107
7.6.2. Pruebas descriptivas 108
7.7. Un protocolo mínimo de caracterización 108
7.8. Síntesis del capítulo 109
Capítulo VIII: Diseño experimental y optimización de procesos fermentativos 110
8.1. El experimento antes que la estadística 111
8.2. Principios básicos 111
8.2.1. Factores, niveles y respuestas 111
8.2.2. Réplica, aleatorización y bloques 111
8.2.3. Réplicas verdaderas y falsas 112
8.3. Diseños usados en los trabajos regionales 112
8.4. Diseños para comparar tratamientos 113
8.4.1. Diseño completamente al azar 113
8.4.2. Bloques completos al azar 114
8.5. Diseños factoriales 114

8.5.1. El factorial 2^k 114
8.5.2. Puntos centrales 115
8.5.3. El factorial 3^k 115
8.6. Metodología de superficie de respuesta 115
8.6.1. Origen y lógica 115
8.6.2. El diseño de Box-Behnken 116
8.6.3. Superficie y contorno 116
8.7. Propuesta: optimización de un vino de camu camu 117
8.7.1. Pregunta y factores 117
8.7.2. Matriz del diseño 118
8.7.3. Análisis 119
8.8. Tamaño de muestra y potencia 119
8.9. Errores frecuentes 120
8.10. Síntesis del capítulo 120
Capítulo IX: Escalamiento, factibilidad económica y economía circular 122
9.1. Del matraz a la planta 123
9.2. Criterios de escalamiento 124
9.2.1. Semejanza geométrica y sus límites 124
9.2.2. Criterios según el tipo de proceso 124
9.2.3. El inóculo a escala 125
9.3. Abastecimiento de materia prima 125
9.3.1. Volumen 125
9.3.2. Estacionalidad y almacenamiento 126
9.3.3. Localización 126
9.4. Factibilidad económica 126
9.4.1. Los indicadores publicados 126
9.4.2. Una lectura crítica 127

9.4.3. El contexto de mercado 129
9.5. Residuos y economía circular 130
9.5.1. Qué residuos genera una planta de fermentados 130
9.5.2. Opciones de valorización 130
9.5.3. Valor económico de la valorización 132
9.6. Transferencia a productores 132
9.7. Síntesis del capítulo 132
Capítulo X: Brechas de conocimiento y agenda de investigación 134
10.1. Lo que sabemos y lo que no 135
10.2. Brechas prioritarias 136
10.2.1. Criterios de priorización 136
10.2.2. La vitamina C como primera prioridad 137
10.2.3. Cinética y cepas 137
10.3. Un protocolo mínimo para estudios cinéticos 138
10.3.1. Por qué un protocolo común 138
10.3.2. Sobre la publicación de datos 139
10.4. Líneas de investigación y temas de tesis 139
10.5. Capacidades necesarias 141
10.5.1. Equipamiento 141
10.5.2. Colaboración 141
10.6. Consideraciones éticas y de soberanía 142
10.7. Conclusiones del libro 142
10.8. Glosario 143
Referencias Bibliográficas 148

Índice de Tablas

Tabla 1. Frutas amazónicas de Loreto y evidencia verificada para su uso en fermentación 6
Tabla 2. Criterios técnicos de selección y su efecto en el diseño del proceso ... 9
Tabla 3. Desempeño fermentativo de Meyerozyma caribbica CC003 aislada de frutos de camu camu 16
Tabla 4. Medios y condiciones para el aislamiento selectivo de microorganismos fermentativos 22
Tabla 5. Grupos microbianos, productos y estado de la evidencia en frutas amazónicas 25
Tabla 6. Rendimientos teóricos de las principales fermentaciones de interés . 30
Tabla 7. Resumen de relaciones útiles para el control de fermentaciones alcohólicas 34
Tabla 8. Productividades volumétricas de etanol calculadas a partir de datos publicados 41
Tabla 9. Parámetros usados en la simulación ilustrativa del lote 49
Tabla 10. Resumen de los modelos cinéticos presentados 52
Tabla 11. Información regional útil para construir o validar modelos cinéticos . 55
Tabla 12. Balance de materia orientativo para un lote de vino de camu camu 76
Tabla 13. Protocolos de bebidas fermentadas con bacterias ácido-lácticas a base de frutas amazónicas 88
Tabla 14. Productos fermentados de frutas y sustratos amazónicos con datos publicados 93
Tabla 15. Instrumentos normativos peruanos aplicables a productos fermentados de fruta 107
Tabla 16. Protocolo mínimo de caracterización para fermentados de fruta amazónica 108
Tabla 17. Diseños experimentales empleados en trabajos regionales sobre fermentación y procesamiento de frutas y sustratos amazónicos 112
Tabla 18. Factores y niveles propuestos para la optimización de un vino de camu camu 117
Tabla 19. Matriz de Box-Behnken para tres factores con tres puntos centrales 118

Tabla 20. Criterios de escalamiento y su pertinencia para los fermentados de fruta 124
Tabla 21. Indicadores técnico-económicos del estudio de prefactibilidad de vino de camu camu 127
Tabla 22. Residuos de una planta de fermentados de fruta y alternativas de valorización 131
Tabla 23. Brechas de conocimiento priorizadas para la fermentación de frutas amazónicas 136
Tabla 24. Elementos del protocolo mínimo para estudios cinéticos 139
Tabla 25. Temas de tesis sugeridos 140

Índice de Figuras

Figura 1. Criterios para seleccionar una fruta amazónica como sustrato de fermentación 9
Figura 2. Grupos microbianos que intervienen en la fermentación de mostos de fruta y productos asociados 14
Figura 3. Etanol producido por M. caribbica CC003 frente al máximo estequiométrico 17
Figura 4. Acidez titulable de kombuchas preparadas con tres bases vegetales 20
Figura 5. Protocolo propuesto para la bioprospección de levaduras y bacterias en frutos de Loreto 22
Figura 6. Rutas metabólicas principales en la fermentación de mostos de fruta 28
Figura 7. Rendimientos teóricos de producto en las fermentaciones alcohólica, láctica y acética 30
Figura 8. Etanol esperado en función de los azúcares fermentables del mosto 33
Figura 9. Fases de un cultivo microbiano en lote 42
Figura 10. Velocidad específica de crecimiento según el modelo de Monod para tres valores de la constante de saturación 44
Figura 11. Efecto de la constante de inhibición en el modelo de Andrews 45
Figura 12. Factor de inhibición por etanol en el modelo de Levenspiel 46
Figura 13. Perfiles de biomasa y producto según el modelo de Luedeking y Piret 47
Figura 14. Simulación de una fermentación alcohólica en lote con el modelo combinado 49
Figura 15. Producción de etanol descrita con los modelos de Gompertz y logístico modificados 51
Figura 16. Diagrama de flujo para la elaboración de vino de fruta amazónica 60
Figura 17. Fracción de SO_2 molecular en función del pH 65
Figura 18. Evolución del volumen y de las concentraciones en los tres modos de operación 67

Figura 19. Esquema del proceso de fermentación en la planta piloto de alcohol de la FIQ-UNAP 68
Figura 20. Elementos básicos de un fermentador para vino de fruta 69
Figura 21. Diagrama de flujo para la elaboración de vinagre de fruta 72
Figura 22. Fracción de ácido acético no disociado en función del pH 73
Figura 23. Diagrama de flujo para destilados de sustratos amiláceos amazónicos 75
Figura 24. Contenido alcohólico de vinos y otros fermentados de sustratos amazónicos con datos publicados 81
Figura 25. pH de pulpas y productos fermentados o acidificados de frutas amazónicas 81
Figura 26. Acidez titulable de kombuchas de distintas bases y fenoles totales de kombuchas con pulpa de fruta amazónica 86
Figura 27. Capacidad antioxidante ORAC y proteína de la pulpa de huasaí antes y después de la fermentación láctica 87
Figura 28. Fenoles totales de la bebida de taperibá antes y después de la fermentación con L. 88
Figura 29. Elaboración tradicional y estandarizada del masato de yuca 90
Figura 30. Recuentos microbianos en la chicha de bacaba al final de la fermentación 91
Figura 31. Sucesión microbiana en la fermentación de semillas de cacao 92
Figura 32. Organización de los análisis de control de calidad para mostos y productos fermentados de fruta 97
Figura 33. Alcohol estimado a partir de la densidad relativa final para un mosto de densidad inicial 1,090 98
Figura 34. Contenido de ácido ascórbico de pulpas de frutas tropicales 100
Figura 35. Fenoles totales de pulpas de frutas amazónicas 101
Figura 36. Perfil de ácidos grasos principales de pulpas de frutas amazónicas 103
Figura 37. Contenido de minerales en pulpas de aguaje y copoazú 104
Figura 38. Fundamento de los ensayos de capacidad antioxidante más usados 105
Figura 39. Geometría de los diseños factorial 2^2 con punto central, factorial 3^2 y Box-Behnken para tres factores 115

Figura 40. Superficie de respuesta y gráfico de contorno de un modelo cuadrático de dos factores 117
Figura 41. Etapas del escalamiento de un proceso fermentativo 123
Figura 42. Indicadores económicos del estudio de prefactibilidad de una planta de vino de camu camu en Loreto 127
Figura 43. Tamaño proyectado del mercado mundial de bebidas fermentadas 129
Figura 44. Corrientes de residuos de una planta de fermentados de fruta y opciones de valorización 130
Figura 45. Matriz de evidencia disponible sobre fermentación de frutas y sustratos amazónicos 135
Figura 46. Protocolo mínimo propuesto para estudios cinéticos de fermentación de frutas amazónicas 138
Figura 47. Horizontes de la agenda de investigación propuesta 140

Introducción

En los mercados de Iquitos se venden a diario frutos que en otras regiones del país apenas se conocen: camu camu, cocona, aguaje, ungurahui, arazá, copoazú, pijuayo, huasaí. Buena parte de esa oferta llega al puesto de venta en canoa o en camión, madura en pocos días y se pierde con la misma rapidez. El camu camu se cosecha en las orillas inundables de las cochas; el aguaje baja en sacos desde los aguajales; la cocona se ablanda en la caja antes de llegar a la ciudad. Quien ha trabajado con estas frutas en el laboratorio sabe que el problema no es la falta de materia prima, sino el tiempo que se tiene para transformarla.

La fermentación es una de las respuestas más antiguas a ese problema. Convierte un jugo perecible en un producto estable (vino, vinagre, bebida láctica, destilado) y, si el proceso está bien diseñado, añade valor económico sin exigir una infraestructura costosa. En la Amazonía peruana la fermentación tampoco es una novedad: el masato de yuca se prepara en las comunidades desde mucho antes de que existiera una facultad de ingeniería en Iquitos. Lo que sí es reciente es el intento de estudiar estas fermentaciones con las herramientas de la biotecnología de procesos, es decir, midiendo, modelando y escalando.

Este libro nació de una pregunta concreta: ¿qué se sabe, con datos verificables, sobre la fermentación de frutas amazónicas, y qué falta por investigar? Para responderla revisamos el Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), tesis de la Universidad Nacional de Ucayali (UNU) y de otras universidades peruanas, y literatura indexada con DOI. El resultado fue menos cómodo de lo esperado. De treinta registros de la UNAP que pudimos ubicar y verificar, apenas ocho corresponden a trabajos de fermentación o destilación, y la mayoría de ellos usa caña de azúcar, yuca, sachapapa o papa pituca como sustrato, no frutas nativas. No encontramos en ese repositorio una tesis experimental que documente un vino, un vinagre o una kombucha de fruta amazónica con su cinética completa. El único trabajo de la UNAP sobre vino de camu camu que ubicamos es un estudio de prefactibilidad (Dávila López et al., 2015), valioso para la discusión económica, pero sin datos de proceso.

Preferimos decirlo desde la primera página. Un libro de investigación que ocultara ese vacío tendría que rellenarlo con generalidades, y eso es justamente lo que queremos evitar. Por eso el texto combina tres tipos de información, que el lector podrá distinguir con facilidad. La primera es la evidencia local: tesis de la UNAP y de la UNU con autoría y título verificados, con sus condiciones de operación y resultados tal como fueron reportados. La segunda es la evidencia regional e internacional sobre frutas amazónicas, en especial la revisión de Batista et al. (2025) sobre bebidas fermentadas de frutos de la Amazonía y el trabajo de Matos et al. (2021), que aisló levaduras con capacidad fermentativa a partir de frutos de camu camu en el norte de Brasil. La tercera es la base teórica de la ingeniería de bioprocesos (estequiometría, cinética, diseño de experimentos, escalamiento), que no depende de la fruta y que se presenta con ejemplos numéricos. Cuando una figura o una tabla proviene de una simulación y no de mediciones, se indica de forma explícita.

El libro está organizado en diez capítulos. El capítulo I describe las frutas de Loreto como materia prima fermentable y propone criterios para elegir un sustrato. El capítulo II trata la microbiología: Saccharomyces cerevisiae, las levaduras no-Saccharomyces, las bacterias ácido-lácticas, las bacterias acéticas y los consorcios del tipo kombucha, y cierra con un protocolo de bioprospección de cepas nativas. El capítulo III reúne la bioquímica y la estequiometría, con cálculos que el lector puede reproducir en una hoja de cálculo. El capítulo IV está dedicado a la cinética y al modelado matemático; ahí se explica cómo estimar parámetros como μmax, Yx/s o Yp/s a partir de datos de laboratorio. El capítulo V recorre las operaciones del proceso, desde la recepción de la fruta hasta la pasteurización o la destilación. El capítulo VI presenta el estado del arte por producto. El capítulo VII aborda la calidad, los compuestos bioactivos, los métodos analíticos y la normativa peruana. El capítulo VIII se ocupa del diseño experimental y la optimización, el IX del escalamiento, la evaluación económica y el aprovechamiento de residuos, y el X ordena las brechas de conocimiento en una agenda de investigación.

Dos advertencias de lectura. Los datos numéricos se transcriben como los reportan sus fuentes, con sus unidades originales, aun cuando algunos merecen una revisión (lo señalamos en cada caso). Y solo se citan trabajos cuyo autor y

título pudieron verificarse; los registros de repositorio sin autoría identificable se dejaron fuera, aunque sus datos fueran de interés, para que cada afirmación del libro pueda rastrearse hasta una fuente completa.

El texto está pensado para estudiantes de Ingeniería Química, Industrias Alimentarias, Biología y Agronomía, para tesistas que buscan un punto de partida con referencias reales y para docentes que necesitan material de apoyo con ejemplos de la región. Si al terminar la lectura alguien decide medir la cinética de un vino de cocona o aislar levaduras de un aguajal, el libro habrá cumplido su propósito.



Capítulo I: Las frutas de la Amazonía peruana como materia prima fermentable

Las frutas de la Amazonía peruana como materia prima fermentable

1.1. La oferta frutícola de Loreto

1.1.1. Diversidad en el mercado y en la chacra

La región Loreto ocupa cerca de un tercio del territorio peruano y concentra una diversidad de frutales nativos que todavía no tiene correlato en la industria. La escala de esa diversidad se entiende mejor si se mira la cuenca completa. Según las cifras que reúne la revisión de Batista et al. (2025), la Amazonía abarca unos 7,4 millones de km², cerca del 4,9 % de la superficie continental del planeta, y alberga alrededor de 40 000 especies de plantas, entre ellas más de 13 000 especies de árboles, de las cuales unas 2 956 son endémicas. Solo una fracción de esas especies da frutos comestibles, y una fracción todavía menor llega a los mercados urbanos.

En los mercados de Iquitos, cualquier visitante puede comprobarlo: camu camu, cocona, aguaje, ungurahui, arazá, copoazú, pijuayo, huasaí y uvilla se venden con regularidad, pero muchas otras especies se consumen solo en la chacra o en la comunidad, sea porque su volumen es pequeño, porque se deterioran en el transporte o porque no tienen demanda fuera de su lugar de origen. Para un ingeniero de procesos esto tiene una lectura práctica: las frutas que el agricultor ya siembra y que el mercado ya conoce son las que pueden abastecer una planta de transformación sin que haya que convencer a nadie de cambiar de cultivo.

1.1.2. Perecibilidad: el argumento a favor de fermentar

Casi todas las frutas amazónicas de interés tienen una vida útil corta a temperatura ambiente. Con temperaturas en Iquitos que rara vez bajan de 22 °C y una cadena de frío casi inexistente fuera de la ciudad, una semana es poco tiempo para acopiar, transportar, vender y consumir fruta fresca, y buena parte de la cosecha se pierde entre la chacra y el mercado.

Fermentar no resuelve la postcosecha de la fruta fresca, pero cambia el problema. Un vino, un vinagre o una bebida acidificada por bacterias lácticas pueden almacenarse durante meses si se cuidan la higiene y el envasado,

porque su pH bajo, su contenido de etanol o de ácidos orgánicos y la ausencia de azúcares residuales limitan el crecimiento de microorganismos alterantes. Además, la fermentación admite fruta con calibre irregular o con defectos de apariencia que no se venden como fruta de mesa, siempre que no esté podrida. Esa flexibilidad en la materia prima es, a nuestro juicio, el argumento económico más sólido a favor de fermentar frutas en Loreto.

1.2. El camu camu como caso de referencia

1.2.1. Distribución y abastecimiento

El camu camu (*Myrciaria dubia* [Kunth] McVaugh) es la fruta amazónica con más información disponible y la que más atención ha recibido de la investigación peruana. Crece de forma natural en orillas y cochas que se inundan en creciente, y en las últimas décadas se ha instalado también en plantaciones. La mayor población natural del país se encuentra en Loreto, en las cuencas de los ríos Nanay, Itaya, Marañón, Napo, Yavarí, Curaray, Tigre, Amazonas y Putumayo (Picon y Acosta, 2000, citados en Vasquez Shuña, 2020), y esa concentración tiene dos lecturas. La favorable: cualquier proyecto de transformación en Iquitos tendría la materia prima cerca. La menos favorable: una mala campaña en Loreto afecta a toda la oferta del país. Antes de cualquier evaluación económica seria conviene consultar las series oficiales de producción regional del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, que permiten estimar la variabilidad entre campañas.

El estudio de prefactibilidad para una planta de vino de camu camu elaborado en la Facultad de Ingeniería Química (FIQ) de la UNAP comparó localizaciones posibles y asignó a Loreto la mayor calificación (10) por volumen de fruto y número de productores, con Yurimaguas y Nauta como alternativas (Dávila López et al., 2015). El mismo estudio estimó que una planta con capacidad de 90 254,51 L de vino al año necesitaría 37,58 t de fruto, una cantidad modesta que, como se discute en el capítulo IX, no plantea un problema de volumen sino de estacionalidad y logística.

1.2.2. Composición y acidez

El rasgo que define al camu camu es su acidez. Batista et al. (2025) reportan valores de pH de 2,51 a 2,54 para la pulpa y contenidos de ácido ascórbico entre

0,96 y 2,99 g por 100 g. En Pucallpa, la pulpa usada para elaborar vino dulce tuvo pH 2,71, 5,5 °Brix, acidez titulable de 2,62 % y densidad de 1,0243 g/mL (Vasquez Shuña, 2020). Las revisiones de Akter et al. (2011), Langley et al. (2015) y García-Chacón et al. (2023) coinciden en ubicar al camu camu entre las fuentes naturales más ricas en ácido ascórbico y en describir su capacidad antioxidante, atribuida a la vitamina C y a compuestos fenólicos.

Para quien diseña una fermentación, esa composición tiene consecuencias directas. Un pH cercano a 2,5 está por debajo del intervalo en que *Saccharomyces cerevisiae* fermenta con comodidad, de modo que la pulpa no puede fermentarse pura: hay que diluirla. Vasquez Shuña (2020) comparó diluciones pulpa:agua de 1:1, 1:2 y 1:3, y la más aceptada fue la de 1:3, con un vino de pH 3,32 (capítulo VI). La dilución reduce también los azúcares, que ya son bajos en la fruta: con 5,5 °Brix en la pulpa, los mostos diluidos quedaron entre 1,5 y 3,5 °Brix y hubo que añadir entre 237 y 263 g/L de azúcar para llevarlos a 22 °Brix. En otras palabras, en el camu camu el azúcar que fermenta viene casi todo del saco, y lo que la fruta aporta es acidez, aroma y color. No es un defecto: es la razón de ser del producto, pero conviene tenerlo claro al calcular costos.

1.3. Otras frutas con potencial fermentativo

1.3.1. Cocona

La cocona (*Solanum sessiliflorum* Dunal) es una solanácea de fruto amarillo anaranjado, ácido y muy aromático, que en Loreto se consume en refrescos, ajíes y dulces. Vargas-Arana et al. (2021) estudiaron cinco ecotipos de cocona nativos del Perú, evaluaron su valor nutricional y su capacidad antioxidante, y detectaron por cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas setenta compuestos bioactivos, entre ellos ácidos fenólicos, aminoácidos, flavonoides, espermidinas y carotenoides. En ratas hipercolesterolémicas, la pulpa de dos de los ecotipos redujo el colesterol y los triglicéridos, y los autores concluyen que la fruta es una buena fuente de antioxidantes naturales.

Para la fermentación, la cocona se parece al camu camu en un aspecto y se diferencia en otro. Como aquel, es ácida y pobre en azúcares, de modo que

requiere corrección de azúcar. A diferencia de aquel, su aroma es intenso y resiste bien la dilución, lo que la hace atractiva como fruta aromática en bebidas mixtas. Esa es precisamente la forma en que se ha usado en la UNAP: como extracto en una cerveza artesanal con sachapapa (Pereira Ramírez y Ríos Pérez, 2023), cuyos resultados se revisan en el capítulo VI.

1.3.2. Aguaje

El aguaje (*Mauritia flexuosa* L. f.) tiene enorme importancia económica y cultural en Loreto, pero su pulpa es oleosa y rica en carotenoides, muy distinta de la pulpa ácida y acuosa del camu camu o la cocona. Según los datos reunidos por Batista et al. (2025), la pulpa tiene alrededor de 50,5 g de agua y 19,0 g de grasa por 100 g, y es una fuente notable de tocoferoles (1 169 µg/g, con 37,2 % de α-tocoferol). En la Amazonía ecuatoriana y en los llanos de Colombia y Venezuela se fermenta para preparar la chicha de morete, y en Brasil se ha usado en leches fermentadas (capítulo VI). Su contenido de lípidos plantea un reto técnico: los aceites pueden oxidarse durante una fermentación prolongada y generar sabores rancios, de modo que un vino de aguaje probablemente requeriría una separación previa de la fracción grasa. Es una hipótesis que no hemos visto evaluada en la literatura revisada.

1.3.3. Arazá, ungurahui, uvilla y otras

El arazá (*Eugenia stipitata*), el ungurahui (*Oenocarpus bataua*) y la uvilla (*Pourouma cecropiifolia*) se venden en los mercados de Iquitos, pero no encontramos estudios de fermentación con datos publicados para ninguna de ellas. Del arazá, la revisión de Batista et al. (2025) ofrece datos de composición que se comentan en la sección siguiente. La Tabla 1 ordena la evidencia verificada para cada fruta.

Tabla 1.

Frutas amazónicas de Loreto y evidencia verificada para su uso en fermentación

Fruta (especie)	Dato de composición verificado	Trabajos de fermentación ubicados	Fuente principal
Camu camu (*Myrciaria dubia*)	pH de pulpa 2,51–2,71; ácido ascórbico 0,96–2,99 g/100 g; 5,5 °Brix	Vino dulce; vino con pulpa escaldada; levaduras nativas; fermentación láctica	Batista et al. (2025); Vasquez Shuña (2020); Matos et al. (2021); Fujita et al. (2017)
Cocona (*Solanum sessiliflorum*)	Setenta compuestos bioactivos en cinco ecotipos peruanos	Extracto en cerveza artesanal	Vargas-Arana et al. (2021); Pereira Ramírez y Ríos Pérez (2023)
Aguaje (*Mauritia flexuosa*)	Grasa 19,0 g/100 g; tocoferoles 1 169 µg/g	Chicha de morete; leche fermentada	Batista et al. (2025)
Pijuayo (*Bactris gasipaes*)	Carbohidratos 86,35 g/100 g de materia seca	Vino de 12,74 %; chicha	Batista et al. (2025)
Copoazú (*Theobroma grandiflorum*)	pH 3,4–3,7; pulpa y semillas ≈ 57 % del fruto	Bebida probiótica; kombucha	Batista et al. (2025)
Huasaí (*Euterpe* spp.)	*E. precatoria* con ≈ 50 % más antocianinas que *E. oleracea*	Bebida láctica fermentada; licor	Batista et al. (2025)
Arazá (*Eugenia stipitata*)	Proteína 0,6–1,0 g/100 g; potasio 215,3 mg/100 g	Ninguno ubicado	Batista et al. (2025)
Ungurahui y uvilla	Sin datos verificados para este libro	Ninguno ubicado	–

Nota. Los datos se transcriben con las unidades de la fuente.

La tabla deja ver un desequilibrio. El camu camu acumula trabajos en casi todas las columnas, mientras que para varias frutas de venta diaria en Iquitos no hay un solo estudio fermentativo publicado. Eso no significa que no existan; significa que no los encontramos con los datos mínimos para citarlos. Sospechamos que hay informes de curso, prácticas de laboratorio y proyectos de extensión que nunca se depositaron en un repositorio, y buena parte de ese conocimiento se pierde cuando el estudiante egresa.

1.3.4. Pijuayo, copoazú y huasaí

Tres frutas frecuentes en Loreto tienen poca presencia en los repositorios peruanos y bastante en la literatura brasileña, donde se conocen como pupunha, cupuaçu y açaí. La revisión de Batista et al. (2025) reúne datos de composición que conviene tener a mano antes de diseñar una fermentación con ellas.

El pijuayo (*Bactris gasipaes*) es, ante todo, una fruta amilácea. Su pulpa tiene en promedio 86,35 g de carbohidratos por 100 g de materia seca, además de lípidos, proteínas y fibra, y aporta 2,11 mg de fenoles totales, expresados como ácido gálico, por gramo de materia seca (Batista et al., 2025). Tiene además una restricción que condiciona cualquier proceso: no debe consumirse cruda, porque contiene cristales de oxalato de calcio, lectinas, saponinas e inhibidores de amilasa y tripsina, y la práctica habitual es cocerla en agua con sal entre 30 y 60 minutos. Para el tecnólogo, esto significa que el pijuayo se parece más a la yuca que a la uva: la cocción es obligatoria y, si se busca etanol a partir del almidón, hace falta una etapa de sacarificación. La cocción tiene un efecto colateral favorable, porque en la pulpa cocida aparecen carotenoides que no están en la cruda, y el contenido total llega a 115,6 µg de β-caroteno por gramo de peso fresco (Batista et al., 2025).

El copoazú (*Theobroma grandiflorum*) es pariente del cacao. Su pulpa, blanco amarillenta y muy aromática, tiene un pH entre 3,4 y 3,7 y, junto con las semillas, representa alrededor del 57 % del peso del fruto (Batista et al., 2025). Entre sus aminoácidos esenciales predominan la leucina, la valina y la treonina (8,44, 7,26 y 5,92 g por 100 g de proteína), y contiene un almidón nativo con 71 % de amilosa. Los lípidos llegan a 12,7 % en base seca. Para una fermentación, el dato más interesante es el aroma: el copoazú se usa en Brasil como saborizante de bebidas lácteas precisamente porque su aroma resiste la dilución, y es esa misma propiedad la que lo hace atractivo para un vino o una bebida fermentada.

El huasaí que crece en la Amazonía peruana es sobre todo *Euterpe precatoria*, especie distinta de *E. oleracea*, la que domina el mercado brasileño de açaí. La diferencia no es solo botánica. Según la comparación reunida por Batista et al. (2025), *E. precatoria* tiene alrededor de 50 % más antocianinas totales y contiene pelargonidina-3-glucósido (319 mg/kg), mientras que *E. oleracea* contiene peonidina-3-rutinósido (44 mg/kg). En ambas predominan la cianidina-3-glucósido y la cianidina-3-rutinósido. La pulpa liofilizada de *E. oleracea* es rica en ácido oleico (52,7 %) y palmítico (25,56 %). Como el color de un vino o licor de huasaí depende de sus antocianinas, la especie local podría dar productos más intensos que los elaborados con açaí brasileño.

Otras dos especies aparecen en la revisión con datos útiles. El arazá tiene entre 0,6 y 1,0 g de proteína por 100 g, 215,3 mg de potasio por 100 g y valores muy variables de vitamina C (0,2 a 101,1 mg/100 g) y de fenoles (0,6 a 274,12 mg/100 g), variación que probablemente refleja diferencias de madurez y de método analítico entre estudios. El tucumã (*Astrocaryum aculeatum*), menos conocido en Loreto, tiene una pulpa con alrededor de 30 % de aceite, 63,5 % del cual es ácido oleico (Batista et al., 2025). Ninguna de estas frutas tiene todavía un estudio de fermentación publicado en el Perú.

1.4. Criterios para elegir una fruta como sustrato

1.4.1. Azúcares fermentables

El primer criterio es obvio, pero conviene cuantificarlo. Por cada gramo de hexosa, la estequiometría de Gay-Lussac permite un máximo de 0,511 g de etanol (capítulo III). Un mosto con 180 g/L de azúcares fermentables puede dar, como máximo, unos 92 g/L de etanol, equivalentes a 11,7 % v/v. Una fruta con 5 °Brix, como la cocona, aporta menos de 50 g/L de sólidos solubles, y no todos son azúcares fermentables. Con esa fruta sin corrección se obtendría una bebida de 2 % a 3 % v/v, más cercana a una sidra ligera que a un vino.

1.4.2. Acidez y pH

El segundo criterio es la acidez. Las levaduras vínicas toleran bien valores de pH entre 3,0 y 4,0; por debajo de 3,0 la fermentación se vuelve lenta y aumenta el riesgo de paradas (Ribéreau-Gayon et al., 2006). Con pH de 2,5, el camu camu necesita dilución. La cocona, con acidez titulable alta, también. El aguaje, en cambio, es menos ácido y plantea el problema inverso: un mosto con pH cercano o superior a 4,0 es más vulnerable a bacterias contaminantes y exige más cuidado con el sulfitado.

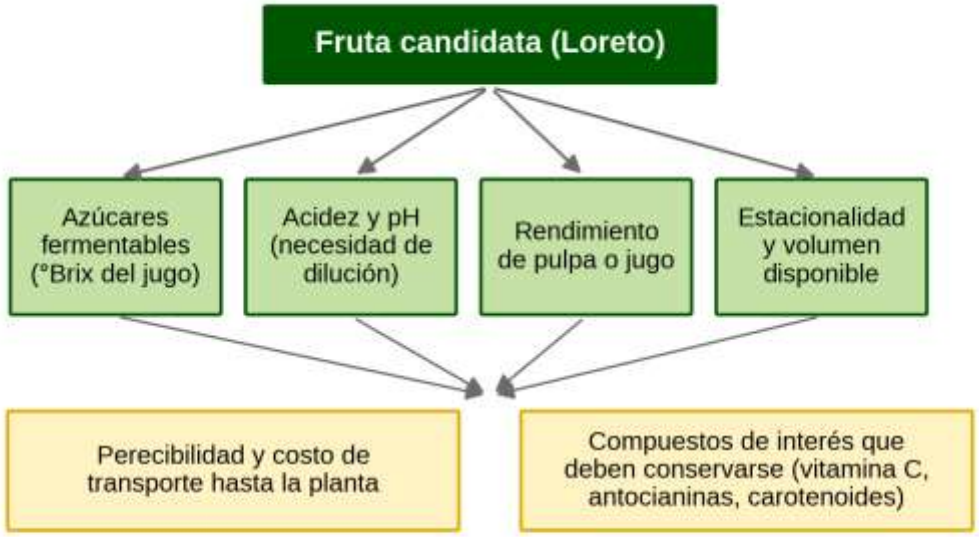
1.4.3. Rendimiento de jugo y estacionalidad

El tercer criterio es el rendimiento de pulpa o jugo por kilogramo de fruta, que define cuánto se paga por litro de mosto. El cuarto es la estacionalidad: una planta que trabaja solo tres meses al año necesita otra fruta para el resto de la temporada o un sistema de conservación de pulpa congelada. Los estudios de

prefactibilidad de la FIQ-UNAP suelen dimensionar la planta por turnos de ocho horas con un flujo de fruta constante (Dávila López et al., 2015); en la práctica ese flujo depende de la cosecha. La Figura 1 resume estos criterios.

Figura 1.

Criterios para seleccionar una fruta amazónica como sustrato de fermentación



Decisión: tipo de producto (vino, vinagre, bebida láctica, destilado) y esquema de proceso

Tabla 2.

Criterios técnicos de selección y su efecto en el diseño del proceso

Criterio	Cómo se mide	Consecuencia para el proceso
Azúcares fermentables	Refractometría (°Brix); azúcares reductores por DNS o HPLC	Define la necesidad de chaptalización y el grado alcohólico alcanzable
Acidez y pH	Potenciómetro; acidez titulable con NaOH 0,1 N	Define la dilución, la corrección de acidez y la dosis de SO_2
Rendimiento de pulpa o jugo	Balance de masa en despulpado	Define el costo de materia prima por litro de producto
Estacionalidad	Registros de cosecha y acopio	Define la capacidad de la planta y la necesidad de almacenar pulpa
Compuestos de interés	Vitamina C, fenoles, carotenoides, antocianinas	Define temperaturas máximas, exposición al oxígeno y tiempo de proceso
Perecibilidad	Pérdida de peso y deterioro en almacenamiento	Define la distancia máxima entre acopio y planta

1.4.4. Compuestos que conviene preservar

El quinto criterio es menos evidente. Si una fruta se vende por su vitamina C, como el camu camu, el proceso debe proteger ese compuesto, que se oxida con el calor, el oxígeno y la luz. El escaldado a 90 °C durante siete minutos, recomendado para reducir el amargor del camu camu (Batista et al., 2025), y la pasteurización final a 70 °C durante quince minutos son puntos de pérdida posible. No encontramos en la literatura revisada una medición de vitamina C antes y después de fermentar un vino de camu camu, y ese es uno de los vacíos que el capítulo X propone atender primero.

1.5. Fermentación y bioeconomía amazónica

1.5.1. Del fruto al producto

En el Perú se habla con frecuencia de bioeconomía amazónica, a veces sin precisar qué se quiere decir. Desde la ingeniería de procesos la definición puede ser concreta: se trata de convertir biomasa de la región en productos con mayor valor por kilogramo, de manera que el transporte hasta los mercados de destino sea rentable. Un kilogramo de camu camu fresco viaja mal; un litro de vino o de vinagre de camu camu viaja bien. Un saco de cocona se malogra en una semana; una bebida fermentada envasada no.

La fermentación encaja en esa lógica por tres motivos. Requiere equipos relativamente simples (tanques, bombas, intercambiadores de calor y, si se quiere destilar, un alambique), usa microorganismos que pueden obtenerse de forma comercial o aislarse de la propia fruta y admite escalas pequeñas. La planta piloto de alcohol de la FIQ-UNAP, con cuatro fermentadores de 2 000 L (Barrera Vela y Reyes Muro, 2015), es un ejemplo de infraestructura que ya existe en Iquitos y que podría adaptarse a mostos de fruta.

1.5.2. Límites que conviene reconocer

Hay límites. El primero es el mercado: el vino de frutas compite con vinos de uva importados y con cervezas industriales de precio bajo, y la prefactibilidad de la UNAP trabajó con supuestos de demanda de 2015 que deberían actualizarse (capítulo IX). El segundo es la regulación: cualquier bebida alcohólica requiere

registro sanitario y cumplir normas técnicas como la NTP 212.014 para vinos (Instituto Nacional de Calidad [INACAL], 2016). El tercero, y quizá el más serio, es la falta de datos de proceso para las frutas nativas. Sin cinéticas, rendimientos y balances de masa medidos en Iquitos, cualquier escalamiento se apoya en supuestos.

Este capítulo ha mostrado que la materia prima existe y que su composición plantea retos claros, sobre todo acidez alta y azúcar bajo. Los capítulos siguientes se ocupan de los microorganismos que pueden transformarla y de la bioquímica que gobierna esa transformación.

Capítulo II: Microbiología de la fermentación de frutas

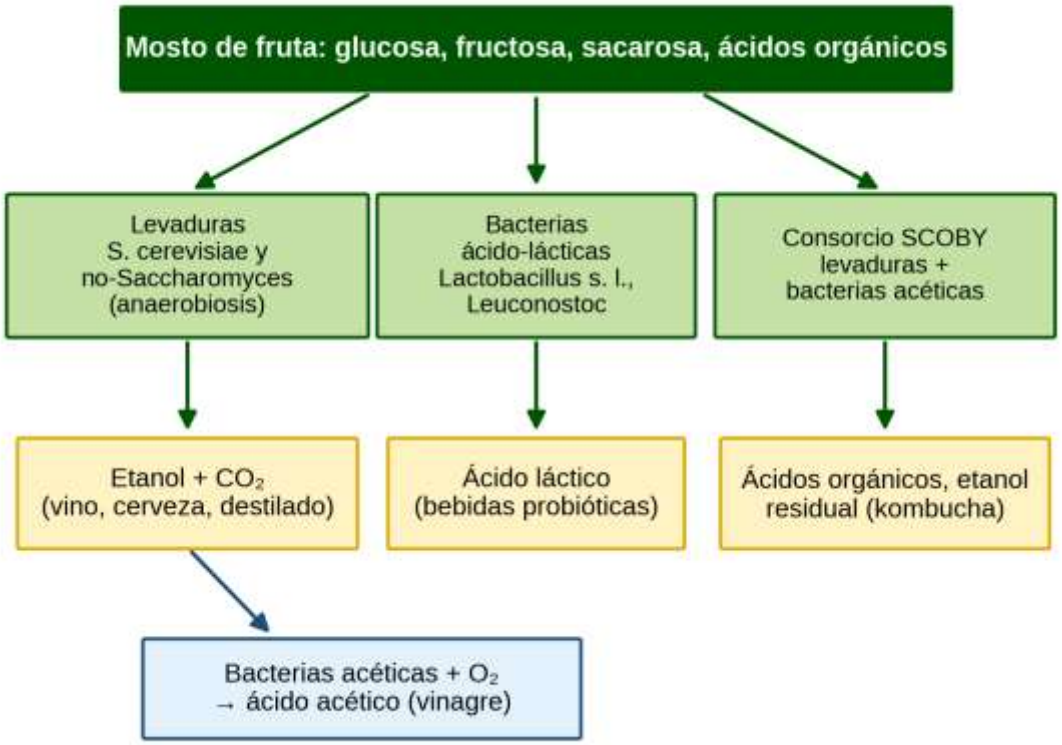
2.1. Quién fermenta un mosto de fruta

Un mosto de fruta recién preparado nunca es estéril. La cáscara trae levaduras, bacterias y mohos del campo; el agua, los utensilios y las manos del operario añaden otros. Lo que ocurre después depende de las condiciones que el proceso impone: si hay oxígeno o no, cuánto azúcar y cuánta acidez tiene el mosto, a qué temperatura se trabaja y si se añade un inóculo seleccionado. En una fermentación bien conducida, esas condiciones favorecen a un grupo de microorganismos y frenan al resto.

Para las frutas amazónicas interesan cuatro grupos, que la Figura 2 ordena según el producto al que dan lugar. Las levaduras convierten los azúcares en etanol y CO_2 en ausencia de oxígeno. Las bacterias ácido-lácticas (BAL) producen ácido láctico y están detrás de las bebidas probióticas y de parte de la acidez del masato. Las bacterias acéticas oxidan el etanol a ácido acético en presencia de oxígeno y son la base del vinagre. Los consorcios simbióticos de levaduras y bacterias, como el de la kombucha, combinan varias de estas actividades en un mismo recipiente.

Figura 2.

Grupos microbianos que intervienen en la fermentación de mostos de fruta y productos asociados



Nota. Esquema conceptual de elaborado por los autores.

2.2. *Saccharomyces cerevisiae*, la levadura de trabajo

2.2.1. Por qué casi todos los trabajos la usan

En todas las tesis peruanas revisadas para este libro, el agente de la fermentación alcohólica fue *S. cerevisiae*. Barrera Vela y Reyes Muro (2015) emplearon levadura seca activa de panificación (marca Fleischmann) en la planta piloto de alcohol de la FIQ; el vodka de sachapapa se fermentó con *S. cerevisiae* durante siete días (Ramírez Trujillo y Urrutia Vílchez, s. f.), y el vino dulce de camu camu de la Universidad Nacional de Ucayali se elaboró con la cepa vínica Montrachet, a razón de 0,15 g por litro de mosto (Vasquez Shuña, 2020). La preferencia tiene razones sólidas. *S. cerevisiae* fermenta con rapidez, tolera concentraciones de etanol que inhiben a la mayoría de competidores, se consigue en cualquier mercado y su comportamiento está descrito con detalle en la literatura (Pretorius, 2000; Bai et al., 2008).

La tolerancia al etanol merece un comentario. Casey e Ingledew (1986), en una revisión que sigue siendo referencia, mostraron que esa tolerancia no es una constante de la especie: depende de la cepa, de la temperatura, de la disponibilidad de nutrientes y de la velocidad con que se acumula el etanol. Una misma levadura puede terminar sin problemas un mosto a 25 °C y detenerse a 32 °C. En Iquitos, donde la temperatura ambiente supera con frecuencia los 30 °C, esa observación tiene consecuencias prácticas para el diseño del enfriamiento (capítulo V).

2.2.2. Levadura de panificación frente a levadura vínica

La levadura de panificación está seleccionada para producir CO_2 rápidamente en masas de harina, no para dar un vino limpio. En mostos de fruta suele funcionar, pero puede generar más compuestos azufrados y aromas menos definidos que una cepa vínica. Las cepas comerciales para vino, en cambio, se seleccionan por su tolerancia al etanol y al SO_2, su baja producción de H_2S y de acidez volátil y su contribución aromática (Pretorius, 2000). Para un laboratorio universitario la levadura de panificación es una opción razonable en ensayos preliminares, por costo y disponibilidad. Para un producto comercial conviene evaluar cepas vínicas o, mejor aún, cepas aisladas de la propia fruta.

2.3. Levaduras no-*Saccharomyces*

2.3.1. Qué aportan

Durante décadas las levaduras distintas de *Saccharomyces* se consideraron contaminantes. Hoy se reconoce que géneros como *Hanseniaspora*, *Pichia*, *Candida*, *Metschnikowia*, *Torulaspora* o *Starmerella* participan en las primeras etapas de las fermentaciones espontáneas y contribuyen al aroma con ésteres, alcoholes superiores y otros metabolitos (Fleet, 2003; Jolly et al., 2014). La mayoría tiene poca tolerancia al etanol y desaparece cuando la concentración supera unos pocos grados, pero en ese intervalo inicial puede modificar el perfil sensorial del producto.

Thivijan et al. (2024) ilustran ese efecto en vinos elaborados con cepas autóctonas no-*Saccharomyces*. Obtuvieron 8,16 % v/v de etanol con *Hanseniaspora uvarum* y 8,04 % v/v con *Starmerella bacillaris*, y el acetato de

etilo fue el volátil dominante, con el 43,4 % del área cromatográfica. Estos valores no provienen de frutas amazónicas, pero muestran que una levadura no convencional puede llegar a grados alcohólicos útiles.

2.3.2. Levaduras nativas del camu camu

El trabajo más cercano a nuestra región es el de Matos et al. (2021), que aislaron quince levaduras de frutos de camu camu colectados en el norte de la Amazonía brasileña. Tres de ellas mostraron buen desempeño fermentativo: *Candida orthopsilosis*, *Pichia kudriavzevii* y *Meyerozyma caribbica*. La cepa *M. caribbica* CC003, cultivada en un medio con 180 g/L de glucosa, produjo 84,4 g/L de etanol, con un rendimiento Yp/s de 0,4688 g/g y una productividad de 0,781 $g \cdot L^{-1} \cdot h^{-1}$; la fase estacionaria se alcanzó hacia las 108 h. Los autores la consideran prometedora para bebidas alcohólicas por su osmotolerancia. La Tabla 3 y la Figura 3 resumen esos resultados.

Tabla 3.

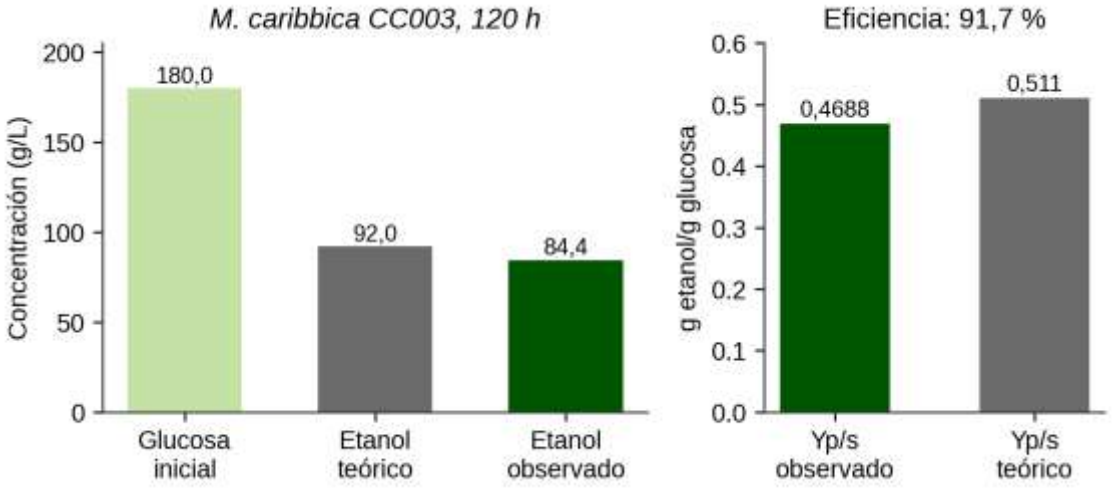
Desempeño fermentativo de Meyerozyma caribbica *CC003 aislada de frutos de camu camu*

Parámetro	Valor reportado	Observación
Concentración inicial de glucosa	180 g/L	Medio sintético
Etanol máximo	84,4 g/L	Equivale a unos 10,7 % v/v
Rendimiento Yp/s	0,4688 g/g	91,7 % del valor teórico (0,511 g/g)
Productividad volumétrica	0,781 $g \cdot L^{-1} \cdot h^{-1}$	Calculada por los autores
Inicio de fase estacionaria	108 h	Duración total del ensayo: 120 h

Nota. Datos de Matos et al. (2021). La equivalencia en % v/v se calculó con una densidad del etanol de 0,789 g/mL; el porcentaje del teórico, como 0,4688/0,511.

Figura 3.

Etanol producido por M. caribbica *CC003 frente al máximo estequiométrico*



Nota. Elaborado con datos de Matos et al. (2021). El etanol teórico se calculó como 180 × 0,511 g/L.

Un rendimiento del 91,7 % del teórico está en el rango de lo que se espera de una buena levadura fermentativa. Lo interesante es que se trata de una especie no convencional aislada de una fruta amazónica ácida. Si una levadura de ese tipo tolera el ambiente del camu camu, cabe preguntarse si un aislado de frutos de Loreto no fermentaría mejor un mosto de camu camu que una levadura de panificación. No hay datos para responder, y el protocolo de la sección 2.7 está pensado para generarlos.

2.4. Bacterias ácido-lácticas

2.4.1. Características generales

Las BAL son bacterias grampositivas, no esporuladas, que obtienen energía fermentando azúcares hasta ácido láctico. Se dividen en homofermentativas, que producen casi solo ácido láctico, y heterofermentativas, que producen además etanol o acetato y CO_2 (capítulo III). En alimentos tienen dos papeles opuestos. En productos lácteos, encurtidos o bebidas probióticas son deseables; en un vino, salvo en la fermentación maloláctica controlada, suelen ser alterantes (Lonvaud-Funel, 1999).

2.4.2. BAL en fermentaciones tradicionales amazónicas

El masato es la fuente más estudiada de BAL en la Amazonía. Rebaza-Cárdenas et al. (2023) aislaron bacterias con potencial probiótico del masato de yuca y de la chicha de siete semillas, dos bebidas fermentadas tradicionales del Perú, y evaluaron propiedades como la tolerancia a condiciones gastrointestinales. Colehour et al. (2014), trabajando con cerveza de yuca en comunidades shuar del Ecuador, propusieron que las BAL de esas bebidas han pasado por una suerte de domesticación local, porque las comunidades reutilizan recipientes y restos de fermentaciones anteriores. Ambos trabajos sugieren que las bebidas tradicionales son reservorios de cepas adaptadas a sustratos amazónicos.

Swain et al. (2014) revisaron las frutas y hortalizas fermentadas de Asia como fuente de probióticos, y su marco sirve para las frutas de la Amazonía: sustratos ricos en azúcares y fibra, con microbiota nativa diversa, que pueden fermentarse de forma espontánea o dirigida.

2.4.3. Fermentación láctica de camu camu

Fujita et al. (2017) fermentaron camu camu en una base de leche de soya con *Lactobacillus helveticus* y *Lactobacillus plantarum* y evaluaron sus propiedades antihiperglucémicas y antihipertensivas mediante ensayos de inhibición enzimática. Es uno de los pocos trabajos que combina una fruta amazónica con BAL seleccionadas y mide un efecto funcional. En Brasil hay además bebidas lácteas fermentadas con pulpa de camu camu, en las que la fruta se añade después de la fermentación como saborizante y las BAL son las del cultivo lácteo (Batista et al., 2025).

2.5. Bacterias acéticas

2.5.1. Géneros y metabolismo

Las bacterias acéticas son aerobias estrictas y oxidan el etanol a ácido acético mediante dos enzimas unidas a la membrana, un alcohol deshidrogenasa y un aldehído deshidrogenasa. Los géneros de interés industrial son *Acetobacter*, *Gluconobacter* y *Gluconacetobacter*, que la monografía de Guriz Panaifo (2018), de la Facultad de Industrias Alimentarias de la UNAP, describe junto con otros

microorganismos de uso industrial. *Gluconobacter* oxida con preferencia la glucosa a ácido glucónico y tolera menos el etanol, mientras que *Acetobacter* y *Gluconacetobacter* son los productores de vinagre por excelencia (Mas et al., 2014).

2.5.2. Vinagre de frutas

Gullo y Giudici (2008) estudiaron las bacterias acéticas del vinagre balsámico tradicional y mostraron que las comunidades de cada batería de barriles son estables y características, algo parecido a lo que Colehour et al. (2014) describen para las BAL del masato. Mas et al. (2014) revisaron la relación entre las especies acéticas y la calidad del vinagre de vino, y señalan que la acidez final, la eficiencia de conversión y el perfil aromático dependen tanto de la cepa como del sistema de fermentación (superficial o sumergido).

Para frutas amazónicas el vinagre es una opción atractiva por una razón sencilla: tolera mejor que el vino una materia prima variable. Un vino de camu camu con defectos menores de aroma puede convertirse en vinagre sin pérdida de valor. No encontramos, sin embargo, un vinagre de fruta amazónica caracterizado en los repositorios consultados. La referencia peruana más próxima es un vinagre de alcohol etílico producido por fermentación sumergida en Lambayeque (capítulo VI).

2.6. Consorcios simbióticos: la kombucha

2.6.1. Qué es un SCOBY

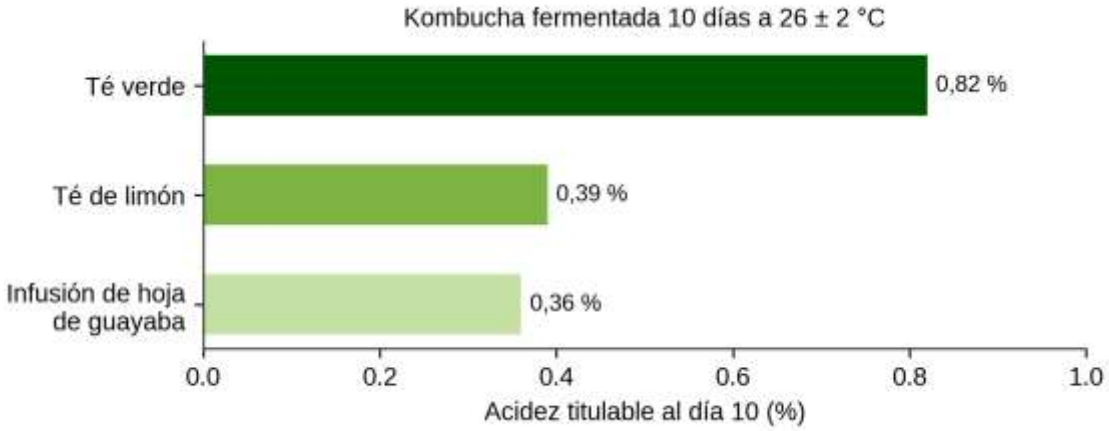
La kombucha se prepara fermentando té azucarado con un consorcio de levaduras y bacterias acéticas que forma una película de celulosa en la superficie, conocida como SCOBY (*symbiotic culture of bacteria and yeast*). Las levaduras hidrolizan la sacarosa y producen etanol; las bacterias oxidan ese etanol a ácido acético y parte de la glucosa a ácido glucónico, y sintetizan la celulosa de la película (Jayabalan et al., 2014). El resultado es una bebida ácida, ligeramente gasificada, con poco etanol.

2.6.2. Datos de referencia

López Zazueta et al. (2022) estandarizaron químicamente kombuchas preparadas con té verde, té de limón e infusión de hojas de guayaba, fermentadas durante 10 días a 26 ± 2 °C con un consorcio de *Acetobacter*/*Gluconobacter* y *Saccharomyces*. La acidez titulable al final fue de 0,82 % con té verde, 0,39 % con té de limón y 0,36 % con hoja de guayaba (Figura 4). La diferencia entre el té verde y las infusiones herbales es grande y probablemente se relaciona con el contenido de nitrógeno y compuestos del té de *Camellia sinensis*, que favorecen al consorcio.

Figura 4.

Acidez titulable de kombuchas preparadas con tres bases vegetales



Nota. Elaborado con datos de López Zazueta et al. (2022).

En Brasil se han elaborado kombuchas con pulpa de bacuri, taperibá y copoazú, añadida después de la primera fermentación del té (Batista et al., 2025; capítulo VI). Esos trabajos abren una posibilidad para Loreto: usar jugos de frutas ácidas o subproductos azucarados como parte de la base de la kombucha. Con camu camu, la acidez inicial sería alta, lo que podría ayudar a proteger la bebida de contaminantes en los primeros días, aunque también podría frenar a las levaduras. Es otra hipótesis por evaluar.

2.7. Fermentaciones espontáneas del cacao y afines

La fermentación del cacao es la fermentación espontánea mejor estudiada en frutos tropicales. Schwan y Wheals (2004) describieron una sucesión bastante constante: primero dominan las levaduras, que consumen los azúcares de la

pulpa y producen etanol; luego las BAL; y cuando la pulpa drena y entra oxígeno, las bacterias acéticas oxidan el etanol, la temperatura sube y el ácido acético penetra en el cotiledón. Esa sucesión es la que forma los precursores del sabor a chocolate.

El macambo (*Theobroma bicolor*) y el copoazú (*T. grandiflorum*), parientes amazónicos del cacao, tienen semillas que podrían fermentarse de manera similar para desarrollar precursores de aroma, pero no encontramos trabajos peruanos con datos publicados de ese proceso.

2.8. Bioprospección de microorganismos nativos

2.8.1. Por qué aislar cepas locales

El vacío más evidente de este capítulo es la ausencia de aislamientos de levaduras o BAL a partir de frutos de Loreto en el repositorio de la UNAP. El trabajo de Matos et al. (2021) en Brasil demuestra que el procedimiento es viable con recursos de un laboratorio universitario y que puede dar cepas con rendimientos competitivos. Una colección de cepas nativas tendría además valor estratégico: permitiría ofrecer inóculos adaptados a mostos ácidos y registrar el origen amazónico de un producto, algo que el mercado valora cada vez más.

2.8.2. Protocolo propuesto

La Figura 5 propone una secuencia de trabajo en siete etapas. La identificación molecular se apoya en métodos estándar: para levaduras, la amplificación de la región ITS con cebadores universales (White et al., 1990) y del dominio D1/D2 del ADN ribosomal 26S, cuya base de datos de referencia es amplia (Kurtzman y Robnett, 1998); para bacterias, el gen del ARN ribosomal 16S.

Figura 5.

Protocolo propuesto para la bioprospección de levaduras y bacterias en frutos de Loreto



Nota. Elaboración propia a partir de Matos et al. (2021), White et al. (1990) y Kurtzman y Robnett (1998). YPD = extracto de levadura, peptona y dextrosa; WL = medio nutritivo de Wallerstein; MRS = medio de De Man, Rogosa y Sharpe; GYC = glucosa, extracto de levadura y carbonato de calcio.

Tabla 4.

Medios y condiciones para el aislamiento selectivo de microorganismos fermentativos

Grupo objetivo	Medio sugerido	Agente selectivo	Incubación	Criterio de reconocimiento
Levaduras	Agar YPD o WL	Cloranfenicol (inhibe bacterias)	28–30 °C, 48–72 h, aerobiosis	Colonias cremosas; morfología celular al microscopio
Bacterias ácido-lácticas	Agar MRS	Cicloheximida o natamicina (inhibe levaduras)	30–37 °C, 48–72 h, microaerofilia	Colonias pequeñas; catalasa negativa, grampositivas
Bacterias acéticas	Agar GYC con $CaCO_3$	Etanol en el medio; antifúngico	28–30 °C, 3–5 días, aerobiosis	Halo claro por disolución del $CaCO_3$

Nota. Elaboración propia. Las concentraciones de los agentes selectivos deben ajustarse a la ficha técnica del proveedor y validarse con cepas control.

El tamizaje tecnológico (etapa 6) es donde se decide si una cepa merece ir a escala. Los ensayos más útiles son baratos: producción de gas en tubos con campana de Durham, crecimiento en medios con concentraciones crecientes de etanol y de glucosa, producción de H_2S en agar con sales de bismuto o de plomo, y una fermentación corta en mosto de la fruta objetivo con medición de °Brix, etanol y pH. Solo las cepas que pasan ese filtro justifican la secuenciación y los ensayos cinéticos completos del capítulo IV.

Buenas prácticas para una colección de cepas

- Registrar para cada aislado la fruta, el lugar de colecta (con coordenadas), la fecha y el medio de aislamiento.
- Conservar al menos dos copias: una en glicerol al 20–25 % a −80 °C y otra liofilizada o en tubo inclinado para uso frecuente.
- Verificar la pureza por microscopía y estría antes de cada ensayo, y volver a identificar la cepa si cambia su comportamiento.
- Depositar las cepas de interés en una colección reconocida y citar el número de acceso en tesis y artículos.

2.9. Manejo de cepas en el laboratorio

2.9.1. Conservación y trazabilidad

Una cepa aislada vale lo que valga su registro. Si un tesista aísla una levadura prometedora de camu camu, la identifica y la usa en su tesis, pero no la conserva de forma adecuada, el siguiente investigador tendrá que empezar de cero. La práctica mínima en un laboratorio universitario es mantener cada cepa por duplicado: una copia de trabajo en tubo inclinado con agar, refrigerada y repicada cada poco mes, y una copia de reserva en caldo con glicerol congelada a la temperatura más baja disponible. Cada tubo debe llevar un código único, y ese código debe remitir a una ficha con la fruta de origen, el lugar y la fecha de muestreo, el medio de aislamiento, el resultado de la identificación y los ensayos en que se usó.

El repique sucesivo tiene un riesgo que suele pasarse por alto: la cepa puede cambiar. Cada transferencia selecciona a las células que mejor crecen en el

medio de laboratorio, que no son necesariamente las que mejor fermentan un mosto de fruta. Por eso la copia de reserva congelada debe tocarse lo menos posible, y los ensayos importantes deben partir de ella y no de un tubo repicado muchas veces.

2.9.2. Pureza e identidad antes de cada ensayo

Antes de inocular un mosto con una cepa nativa conviene verificar dos cosas. La primera es la pureza: una siembra por estría en placa debe mostrar colonias de un solo tipo, y una observación al microscopio, células de una sola morfología. La segunda es la identidad, que en la práctica se confirma por la morfología de colonia y célula cuando la cepa ya fue identificada molecularmente, y por una nueva secuenciación cuando hay dudas. En un experimento que compare una cepa nativa con *S. cerevisiae* comercial, una contaminación cruzada entre ambas invalida todo el ensayo.

2.9.3. Calibración de la biomasa

La biomasa es la variable más difícil de medir bien en una fermentación de fruta, como se explicó en el capítulo IV. Cada laboratorio debería construir, para cada cepa, una curva de calibración entre densidad óptica y peso seco, preparada con células cultivadas en un medio sin sólidos en suspensión. Con esa curva, la densidad óptica se convierte en gramos por litro, y los parámetros cinéticos se vuelven comparables entre trabajos. Sin ella, la biomasa queda en unidades de absorbancia, que dependen del espectrofotómetro y de la longitud de onda elegida.

2.9.4. Bioseguridad

El trabajo con microorganismos aislados del ambiente exige precauciones que no son necesarias con una levadura comercial. Una cepa desconocida no puede suponerse inocua hasta que se identifica. El propio trabajo de Matos et al. (2021) lo ilustra: una de las tres levaduras fermentativas aisladas del camu camu fue *Candida orthopsilosis*, especie que la mayoría de las referencias describen como patógena humana, y los autores destacan su hallazgo como endófita precisamente por lo inusual. Una cepa de esa especie puede tener interés científico, pero no debería usarse en un alimento. La regla práctica es sencilla:

los aislados se manipulan con técnica aséptica y cabina de flujo hasta su identificación, y solo las especies con historial de uso seguro en alimentos pasan a los ensayos de elaboración de bebidas destinadas a evaluación sensorial.

2.10. Síntesis del capítulo

Tabla 5.

Grupos microbianos, productos y estado de la evidencia en frutas amazónicas

Grupo	Producto principal	Condición clave	Evidencia con frutas amazónicas
S. cerevisiae	Etanol y CO_2	Anaerobiosis, pH 3–4	Vinos de camu camu (UNU); fermentaciones de la FIQ-UNAP con otros sustratos
No-*Saccharomyces*	Etanol, ésteres, glicerol	Etapas iniciales, menor tolerancia al etanol	*M. caribbica*, *P. kudriavzevii* y *C. orthopsilosis* de camu camu (Brasil)
Bacterias ácido-lácticas	Ácido láctico	Microaerofilia, nutrientes	Camu camu con leche de soya; masato y chicha
Bacterias acéticas	Ácido acético	Oxígeno, etanol como sustrato	Sin vinagres de fruta amazónica caracterizados
SCOBY	Ácidos orgánicos, celulosa	Superficie aireada, té azucarado	Kombuchas con pulpa de bacuri, taperibá y copoazú (Brasil)

Nota. Elaboración propia a partir de las fuentes citadas en el capítulo.

La lectura de la Tabla 5 lleva a una conclusión sencilla. En levaduras la región tiene un punto de apoyo gracias al trabajo brasileño con camu camu; en bacterias acéticas y en consorcios, casi todo está por hacer. Con este panorama microbiológico, el capítulo siguiente pasa a la bioquímica que explica qué hacen estos organismos con el azúcar de la fruta.

Capítulo III: Bioquímica y estequiometría de las fermentaciones

3.1. Los azúcares de la fruta

3.1.1. Glucosa, fructosa y sacarosa

Los azúcares fermentables de un mosto de fruta son sobre todo glucosa, fructosa y sacarosa. *Saccharomyces cerevisiae* transporta la glucosa y la fructosa al interior de la célula mediante transportadores de hexosas, con una ligera preferencia por la glucosa, de modo que al final de una fermentación la fructosa tiende a quedar como azúcar residual. La sacarosa no entra como tal: la invertasa, una enzima que la levadura secreta al espacio periplásmico, la hidroliza a glucosa y fructosa antes de su transporte (Nelson y Cox, 2021).

Este detalle importa en las frutas amazónicas porque, como vimos en el capítulo I, casi todas necesitan corrección de azúcar, y la corrección se hace con sacarosa de caña. En un vino de camu camu corregido hasta 12 °GL potenciales, la mayor parte del etanol proviene de la sacarosa añadida. La invertasa trabaja rápido y no suele ser un cuello de botella, pero la hidrólisis aumenta los sólidos solubles antes de que la levadura los consuma, lo que explica por qué en las primeras horas el °Brix puede bajar menos de lo esperado.

3.1.2. Pectinas y otros componentes

Las frutas contienen también pectinas, polisacáridos de ácido galacturónico parcialmente esterificado con metanol. Las pectinas no se fermentan, pero su hidrólisis por pectinmetilesterasas, propias de la fruta o añadidas como preparados enzimáticos, libera metanol. Por esa razón los vinos y destilados de frutas pueden contener más metanol que los de uva o cereal, y las normas técnicas fijan un límite para ese compuesto (capítulo VII). En los vodkas de sachapapa elaborados en la UNAP los autores no detectaron metanol (Ramírez Trujillo y Urrutia Vílchez, s. f.), resultado coherente con un sustrato amiláceo con poca pectina.

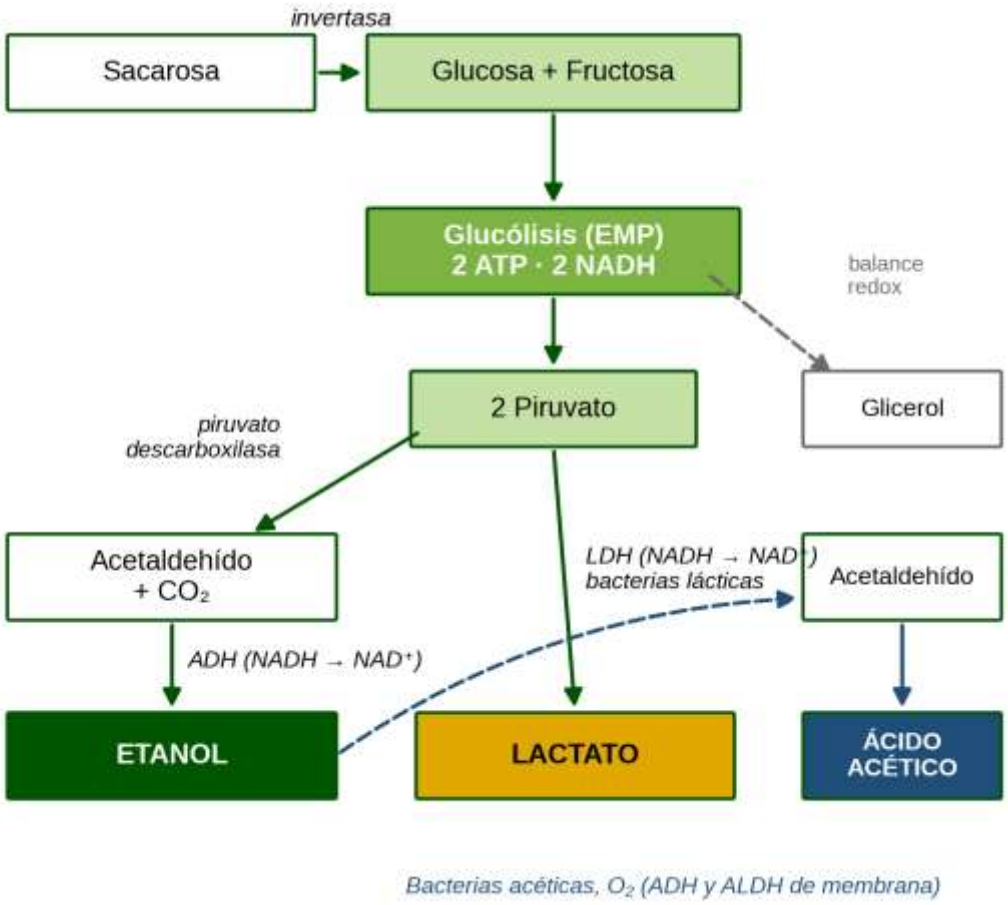
3.2. Glucólisis y fermentación alcohólica

3.2.1. La ruta

La glucólisis, o ruta de Embden-Meyerhof-Parnas, convierte una molécula de glucosa en dos de piruvato, con una ganancia neta de 2 ATP y la reducción de 2 NAD^+ a NADH. En ausencia de oxígeno la célula necesita regenerar el NAD^+ para que la glucólisis continúe, y la levadura lo hace en dos pasos: el piruvato descarboxilasa convierte el piruvato en acetaldehído y CO_2, y el alcohol deshidrogenasa reduce el acetaldehído a etanol, oxidando el NADH (Nelson y Cox, 2021). La Figura 6 muestra esa secuencia junto con las rutas láctica y acética que se discuten más adelante.

Figura 6.

Rutas metabólicas principales en la fermentación de mostos de fruta



Nota. Esquema simplificado de elaboración propia a partir de Nelson y Cox (2021). EMP = Embden-Meyerhof-Parnas; ADH = alcohol deshidrogenasa; LDH = lactato deshidrogenasa; ALDH = aldehído deshidrogenasa.

3.2.2. La ecuación de Gay-Lussac

El balance global de la fermentación alcohólica es la ecuación de Gay-Lussac:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2\,C_2H_5OH + 2\,CO_2 \quad (3.1)$$

Con masas molares de 180,16 g/mol para la glucosa, 46,07 g/mol para el etanol y 44,01 g/mol para el CO_2, el rendimiento teórico de etanol es:

$$Y_{P/S}^{\text{teór}} = \frac{2 \times 46{,}07}{180{,}16} = 0{,}511 \text{ g etanol/g glucosa} \quad (3.2)$$

y el de CO_2, 0,489 g/g. Para la sacarosa, que al hidrolizarse incorpora una molécula de agua ($C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O \rightarrow 2\,C_6H_{12}O_6$), el rendimiento teórico por gramo de sacarosa es algo mayor: 4 × 46,07/342,30 = 0,538 g/g. Este último valor se olvida con frecuencia al calcular la chaptalización, y el error lleva a sobreestimar la cantidad de azúcar necesaria en un 5 %.

3.2.3. Por qué el rendimiento real es menor

Ninguna fermentación alcanza el 100 % del teórico. Parte del azúcar se desvía hacia la formación de biomasa, glicerol, ácidos orgánicos y alcoholes superiores. El glicerol cumple una función concreta: su síntesis reoxida el NADH que se genera en reacciones de biosíntesis, cuando no hay suficiente acetaldehído disponible para hacerlo. Por eso el rendimiento observado se expresa como eficiencia fermentativa:

$$\eta = \frac{Y_{P/S}^{\text{obs}}}{0{,}511} \times 100 \quad (3.3)$$

La cepa *M. caribbica* CC003 de camu camu alcanzó η = 0,4688/0,511 × 100 = 91,7 % (Matos et al., 2021). En la industria del etanol se considera que las pérdidas por biomasa y subproductos son inevitables, y la mejora de rendimiento pasa por controlar la contaminación bacteriana y el estrés de la levadura (Bai et al., 2008).

Tabla 6.

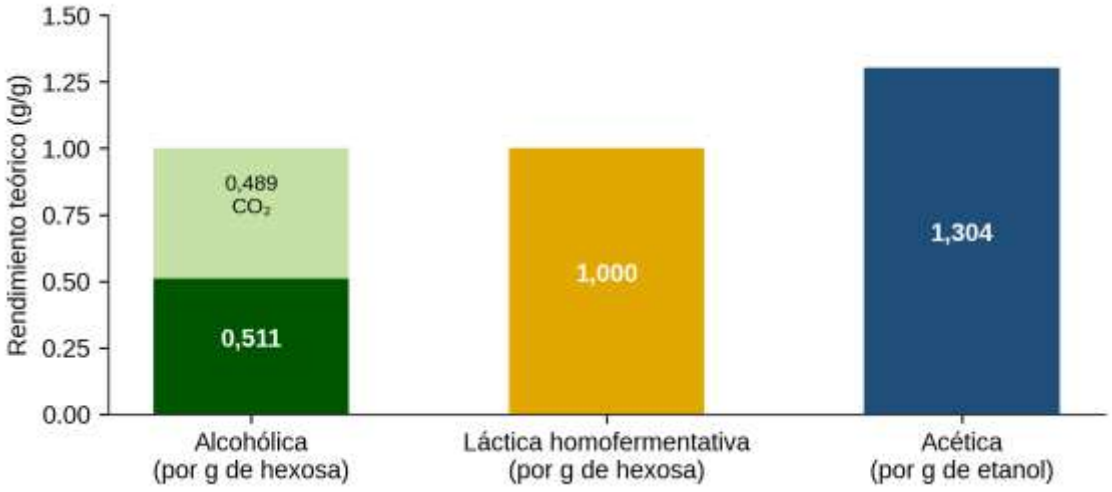
Rendimientos teóricos de las principales fermentaciones de interés

Fermentación	Reacción global	Rendimiento teórico	Referencia de cálculo
Alcohólica (glucosa)	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2\ C_2H_5OH + 2\ CO_2$	0,511 g etanol/g; 0,489 g CO_2/g	Masas molares
Alcohólica (sacarosa)	$C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O \rightarrow 4\ C_2H_5OH + 4\ CO_2$	0,538 g etanol/g sacarosa	Masas molares
Láctica homofermentativa	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2\ CH_3CHOHCOOH$	1,000 g ácido láctico/g	Masas molares
Láctica heterofermentativa	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow CH_3CHOHCOOH + C_2H_5OH + CO_2$	0,500 g láctico/g; 0,256 g etanol/g	Masas molares
Acética	$C_2H_5OH + O_2 \rightarrow CH_3COOH + H_2O$	1,304 g ácido acético/g etanol	Masas molares
Maloláctica	$C_4H_6O_5 \rightarrow C_3H_6O_3 + CO_2$	0,672 g láctico/g málico	Masas molares

Nota. Cálculos propios con masas molares de 180,16 (glucosa), 342,30 (sacarosa), 46,07 (etanol), 90,08 (ácido láctico), 60,05 (ácido acético), 134,09 (ácido málico) y 44,01 g/mol (CO_2).

Figura 7.

Rendimientos teóricos de producto en las fermentaciones alcohólica, láctica y acética



Nota. Cálculos propios a partir de las reacciones de la Tabla 6.

3.3. Fermentación láctica

Las BAL homofermentativas convierten el piruvato en lactato mediante la lactato deshidrogenasa, que regenera el NAD^+ en un solo paso:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2\ CH_3CHOHCOOH \quad (3.4)$$

El rendimiento teórico es de 1 g de ácido láctico por gramo de hexosa, porque no hay pérdida de carbono como CO_2. Las heterofermentativas usan la ruta de la fosfocetolasa y producen, por cada hexosa, una molécula de lactato, una de etanol (o acetato) y una de CO_2. En una bebida de fruta fermentada por BAL, la proporción entre ambos tipos define si el producto tendrá solo acidez láctica o también un leve gas y notas alcohólicas.

3.4. Fermentación acética

La conversión de etanol en ácido acético es una oxidación incompleta que requiere oxígeno:

$$C_2H_5OH + O_2 \rightarrow CH_3COOH + H_2O \quad (3.5)$$

El rendimiento teórico es de 60,05/46,07 = 1,304 g de ácido acético por gramo de etanol. Como la reacción consume un mol de O_2 por mol de etanol, la transferencia de oxígeno es el factor que limita la velocidad en los fermentadores sumergidos, y una interrupción breve de la aireación puede dañar a las bacterias (Mas et al., 2014). En el método superficial, más lento, el oxígeno llega por difusión a través de la película bacteriana.

Ejemplo 3.1. Acidez esperada en un vinagre de vino de fruta

Un vino de camu camu con 10 % v/v de etanol contiene 100 mL de etanol por litro, es decir, 100 × 0,789 = 78,9 g/L.

Si toda esa cantidad se oxidara, se obtendrían 78,9 × 1,304 = 102,9 g/L de ácido acético, equivalentes a 10,3 g por 100 mL.

En la práctica parte del etanol se evapora durante la aireación y otra parte queda sin convertir, de modo que la acidez real es menor. Este cálculo sirve para verificar si un resultado de laboratorio es plausible: una acidez superior al máximo teórico indica un error de medición o de unidades.

3.5. Fermentación maloláctica

En vinos de uva, la fermentación maloláctica convierte el ácido L-málico, de sabor áspero, en ácido L-láctico, más suave, con liberación de CO_2. La realizan BAL, sobre todo *Oenococcus oeni*, y reduce la acidez titulable (Lonvaud-Funel, 1999). En frutas amazónicas se desconoce la proporción de ácido málico en la acidez total de la mayoría de las especies. En el camu camu la acidez está

dominada por el ácido cítrico y el ascórbico, por lo que una fermentación maloláctica tendría un efecto limitado; es un punto que convendría confirmar con un análisis de ácidos orgánicos por HPLC.

3.6. Compuestos volátiles y aroma

3.6.1. Alcoholes superiores

Además de etanol, la levadura produce alcoholes superiores (isoamílico, isobutílico, 2-feniletanol, propanol) a partir de aminoácidos, por la ruta de Ehrlich: transaminación, descarboxilación y reducción (Hazelwood et al., 2008). En concentraciones bajas aportan complejidad; en exceso dan notas pesadas y se asocian con la resaca. Su formación aumenta con la temperatura de fermentación y con mostos pobres en nitrógeno asimilable, dos condiciones frecuentes cuando se fermenta una fruta muy diluida en un ambiente cálido.

3.6.2. Ésteres y acetaldehído

Los ésteres, como el acetato de etilo y el acetato de isoamilo, dan aromas frutales. Se forman por reacción entre alcoholes y acil-CoA dentro de la célula, y su perfil depende mucho de la cepa (Swiegers et al., 2005). El caso ya citado de Thivijan et al. (2024), en el que el acetato de etilo llegó al 43,4 % del área de volátiles con levaduras no-*Saccharomyces*, muestra que una cepa distinta puede cambiar por completo el aroma. El acetaldehído, intermediario de la ruta, se acumula cuando hay oxígeno o poca actividad del alcohol deshidrogenasa y da notas a manzana oxidada.

3.7. Cálculos aplicados

3.7.1. Etanol potencial a partir del azúcar

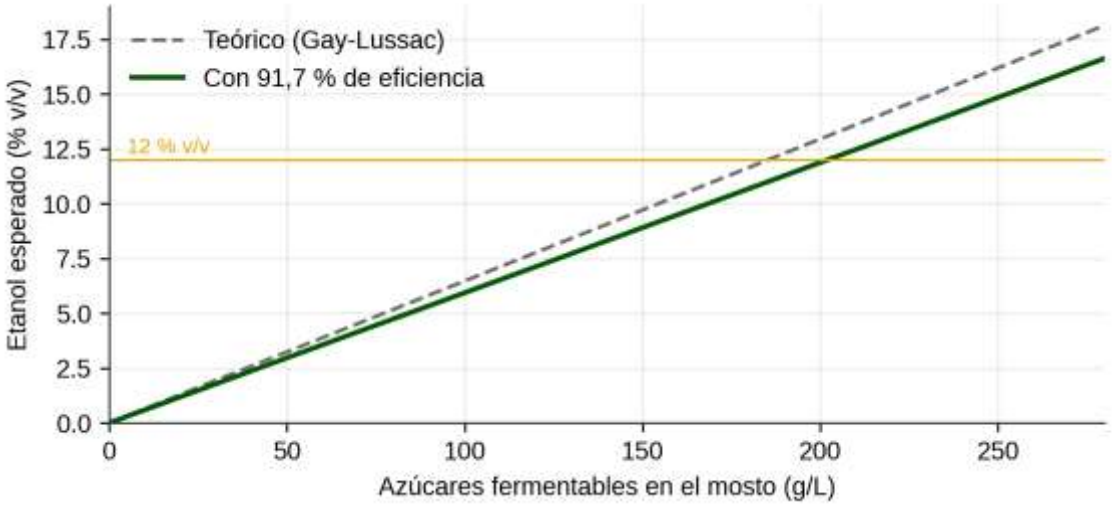
Para estimar el grado alcohólico que dará un mosto conviene trabajar con dos números: la concentración de azúcares fermentables (g/L) y la eficiencia esperada. El etanol en % v/v se obtiene dividiendo los gramos de etanol por litro entre la densidad del etanol:

$$\text{Etanol}\ (\%\ \text{v/v}) = \frac{S \times 0{,}511 \times \eta}{7{,}89} \tag{3.6}$$

donde S es la concentración de azúcares (g/L), η la eficiencia expresada como fracción y 7,89 g/L el etanol contenido en 1 % v/v. Con η = 1, se necesitan 15,4 g/L de azúcar por cada grado; con η = 0,917 (Matos et al., 2021), 16,8 g/L. La Figura 8 representa ambas rectas.

Figura 8.

Etanol esperado en función de los azúcares fermentables del mosto



Nota. Cálculo propio con la (3.6). La línea continua supone la eficiencia de 91,7 % reportada por Matos et al. (2021).

3.7.2. Chaptalización

Ejemplo 3.2. Azúcar necesario para un vino de camu camu de 12 % v/v

Supóngase un mosto preparado con una parte de pulpa y tres de agua, cuyos azúcares propios suman 15 g/L (valor asumido para el ejemplo; debe medirse en cada lote).

Con η = 0,917, para 12 % v/v se requieren 12 × 16,8 = 202 g/L de azúcares fermentables. Faltan 202 − 15 = 187 g/L.

Si se añade sacarosa, cuyo rendimiento teórico es 0,538 g/g, cada gramo equivale a 0,538/0,511 = 1,053 g de hexosa. La sacarosa necesaria es 187/1,053 = 178 g por litro de mosto.

Para 100 L de mosto se añaden unos 17,8 kg de sacarosa. Como el azúcar ocupa volumen (aproximadamente 0,63 L por kilogramo disuelto), conviene preparar un jarabe y completar el volumen al final.

El factor de volumen del azúcar disuelto (0,63 L/kg) es una aproximación basada en la densidad de la sacarosa en solución; para trabajos formales conviene medir la densidad del mosto corregido con un picnómetro o un densímetro calibrado. En la práctica muchos elaboradores corrigen por etapas, añadiendo parte del

azúcar al inicio y el resto durante la fermentación, para no exponer a la levadura a una presión osmótica excesiva.

3.7.3. Seguimiento por densidad

La densidad del mosto baja durante la fermentación porque el azúcar desaparece y se forma etanol, que es menos denso que el agua. Una aproximación práctica muy usada en la elaboración artesanal estima el etanol a partir de la densidad inicial (DI) y final (DF):

$$\text{Etanol}\ (\%\ \text{v/v}) \approx (DI - DF) \times 131{,}25 \qquad (3.7)$$

La ecuación es empírica y funciona razonablemente para mostos de 1,040 a 1,110 g/mL. Para informes técnicos y tesis debe usarse la destilación del vino y la medición del destilado con picnómetro o alcoholímetro; en el vino dulce de camu camu de la Universidad Nacional de Ucayali, por ejemplo, el grado alcohólico se determinó con picnómetro sobre el destilado, según el método AOAC 982.10 (Vasquez Shuña, 2020). Esa misma tesis permite comprobar los límites de la aproximación. En el tratamiento con dilución 1:3, la densidad bajó de 1,0944 a 1,0250 g/mL, y la fermentación se detuvo con metabisulfito al llegar a 12,5 °Brix para conservar dulzor. La ecuación estima (1,0944 − 1,0250) × 131,25 = 9,1 % v/v, mientras que la destilación dio 10,19 °GL. La diferencia, de algo más de un grado, es típica de los vinos dulces, en los que el azúcar residual mantiene alta la densidad final y la ecuación subestima el alcohol.

Tabla 7.

Resumen de relaciones útiles para el control de fermentaciones alcohólicas

Magnitud	Relación	Valor o ejemplo
Etanol en 1 % v/v	10 mL/L × 0,789 g/mL	7,89 g/L
Azúcar por grado (teórico)	7,89/0,511	15,4 g/L
Azúcar por grado (η = 0,917)	15,4/0,917	16,8 g/L
Equivalencia sacarosa-hexosa	0,538/0,511	1,053 g hexosa/g sacarosa
Ácido acético máximo	Etanol (g/L) × 1,304	102,9 g/L desde 10 % v/v
Etanol por densidad	(DI − DF) × 131,25	1,090 → 1,000: 11,8 % v/v

Nota. Cálculos propios. La relación por densidad es una aproximación empírica y no sustituye la medición por destilación.

3.8. Regulación del metabolismo: efectos Pasteur y Crabtree

3.8.1. Respirar o fermentar

Saccharomyces cerevisiae puede obtener energía de la glucosa por dos caminos: la respiración, que oxida el piruvato hasta CO_2 en la mitocondria y rinde mucho ATP por molécula de azúcar, y la fermentación, que rinde solo 2 ATP pero es rápida y no necesita oxígeno. Qué camino toma depende del oxígeno y de la concentración de azúcar, y esa decisión tiene consecuencias directas para quien conduce un proceso.

El efecto Pasteur describe la inhibición de la fermentación por el oxígeno: en presencia de aire, muchas levaduras reducen la producción de etanol y dirigen el azúcar a la respiración, con más biomasa por gramo de sustrato. El efecto Crabtree describe lo contrario: en *S. cerevisiae*, cuando la glucosa está en concentración alta, la levadura fermenta, aunque haya oxígeno, porque la glucosa reprime la maquinaria respiratoria (De Deken, 1966). El punto de ramificación entre ambos destinos es el piruvato, que puede entrar a la mitocondria para su oxidación o ser descarboxilado a acetaldehído en el citosol (Pronk et al., 1996).

3.8.2. Consecuencias prácticas

En un mosto de fruta corregido con 180 a 220 g/L de azúcar, el efecto Crabtree garantiza que *S. cerevisiae* produzca etanol desde el inicio, aunque el mosto tenga oxígeno disuelto. Por eso la aireación inicial que se practica en vinificación no reduce el rendimiento alcohólico: el oxígeno se usa sobre todo en la síntesis de esteroles y ácidos grasos insaturados de la membrana, que la levadura necesita para tolerar el etanol más adelante.

La situación cambia cuando el objetivo es producir biomasa, como en la propagación de un inóculo o de una cepa nativa para escalar. En ese caso conviene lo contrario: azúcar en baja concentración, alimentado de forma gradual, y aireación intensa, para que la levadura respire y el rendimiento en biomasa sea máximo. Un prefermentador cargado con mosto concentrado y sin aireación producirá etanol y poca levadura, que es justamente lo que no se busca en esa etapa.

Las levaduras no-*Saccharomyces* no siempre comparten esta regulación. Muchas son Crabtree negativas: en presencia de oxígeno respiran el azúcar en lugar de fermentarlo. Si una cepa nativa aislada de camu camu o de aguaje produce poco etanol en un matraz agitado, antes de descartarla conviene repetir el ensayo en condiciones limitadas de oxígeno, con tapón de algodón o trampa de agua, porque el resultado puede deberse al método y no a la cepa.

3.9. Los ácidos orgánicos de la fruta durante la fermentación

3.9.1. Qué pasa con cada ácido

La acidez de las frutas amazónicas se debe a varios ácidos orgánicos no volátiles, y cada uno se comporta de manera distinta durante la fermentación. El ácido cítrico no es consumido de forma significativa por *S. cerevisiae*, de modo que permanece en el vino. El ácido málico se consume solo en una fracción limitada durante la fermentación alcohólica, variable según la cepa (Ribéreau-Gayon et al., 2006). Las bacterias ácido-lácticas, en cambio, pueden transformar el ácido málico en láctico, como se vio en la sección 3.5, y algunas metabolizan el cítrico con formación de diacetilo y acetoína, compuestos de aroma lácteo o mantecoso que en un vino de fruta pueden ser un defecto o un matiz, según su concentración (Swiegers et al., 2005). El ácido ascórbico, que en el camu camu contribuye a la acidez, no se fermenta, pero se oxida.

La levadura, por su parte, produce ácidos. El más abundante es el succínico, y en menor medida se forman acético y láctico. En la ginger beer con pulpa de taperibá, fermentada 14 días a 25 °C, los ácidos málico, cítrico, láctico, succínico, acético, fórmico y butírico estaban presentes desde el inicio, con 2,40 g/L de málico y 0,57 g/L de cítrico, y durante la fermentación aumentaron el succínico y el acético (citado en Batista et al., 2025). El patrón es el esperable: la fruta aporta los ácidos fijos y la fermentación añade succínico y acético.

3.9.2. Por qué el pH baja menos de lo que se espera

Cuando un mosto de camu camu fermenta, su acidez titulable cambia poco, porque los ácidos principales de la fruta no se consumen. El pH, sin embargo, puede subir o bajar algunas décimas según el balance entre los ácidos que se forman, el potasio que la levadura intercambia con el medio y la precipitación de

sales. En los vinos de camu camu de la Universidad Nacional de Ucayali, con una dilución 1:3, el pH final se ubicó alrededor de 3,3 (capítulo VI), bastante por encima del pH de la pulpa, entre 2,51 y 2,54 (Batista et al., 2025). La mayor parte de esa diferencia se explica por la dilución y no por la fermentación. Para verificarlo basta medir el pH del mosto diluido antes de inocular, un dato que casi ningún trabajo reporta y que permitiría separar ambos efectos.

3.10. Balance de carbono y de energía

Un último aspecto, a menudo olvidado en las tesis, es el calor. La fermentación alcohólica es exotérmica y en tanques grandes la temperatura sube si no se retira ese calor. En un recipiente de laboratorio de un litro el calor se disipa por las paredes; en un fermentador de 2 000 L como los de la planta piloto de la FIQ-UNAP, la relación entre superficie y volumen es mucho menor y la temperatura puede superar el intervalo de trabajo de la levadura. Casey e Ingledew (1986) mostraron que la tolerancia al etanol cae cuando sube la temperatura, de modo que el sobrecalentamiento no solo acelera la fermentación, también puede detenerla antes de consumir todo el azúcar. En Iquitos, donde el agua disponible para enfriar no suele estar fría y la temperatura ambiente es alta durante todo el año, el balance de energía debería formar parte de cualquier diseño a escala piloto.

Con la estequiometría resuelta, el siguiente paso es describir cómo cambian en el tiempo la biomasa, el sustrato y el producto. Ese es el tema del capítulo IV.

Capítulo IV: Cinética y modelado matemático de la fermentación

Cinética y modelado matemático de la fermentación

4.1. Para qué sirve un modelo cinético

Un vino de camu camu puede elaborarse sin una sola ecuación. Las guías de práctica que circulan en la región indican cuánta pulpa, cuánta agua, cuánto azúcar y cuántos días de reposo, y el producto sale. El problema aparece cuando alguien quiere pasar de 20 litros a 2 000, cambiar la levadura, reducir el tiempo en tanque o explicar por qué un lote se detuvo con 40 g/L de azúcar residual. Para esas preguntas hace falta saber a qué velocidad ocurre cada cosa y de qué depende esa velocidad. Eso es la cinética.

Un modelo cinético cumple tres funciones concretas en un proyecto de investigación sobre frutas amazónicas. La primera es resumir un experimento en pocos números: la velocidad específica máxima de crecimiento, los rendimientos y la productividad permiten comparar dos cepas o dos mostos sin superponer veinte gráficos. La segunda es predecir: con los parámetros ajustados se puede estimar cuánto tardará un lote con otra concentración inicial de azúcar. La tercera, menos citada, es diagnosticar: cuando los datos se apartan del modelo, la forma de la desviación indica si hay inhibición por sustrato, por producto o por falta de algún nutriente.

El capítulo presenta los modelos más usados en fermentación alcohólica y láctica, desde la ecuación de Monod hasta las funciones sigmoideas de Gompertz, y termina con un procedimiento para estimar parámetros a partir de datos de laboratorio. Los valores numéricos de las simulaciones son ilustrativos. Como se señaló en la introducción, en el repositorio de la UNAP no se encontró todavía un estudio que reporte parámetros cinéticos de fermentación de frutas nativas, y el capítulo está escrito también para que esos estudios se hagan con un método comparable.

4.2. Variables y definiciones básicas

4.2.1. Las tres concentraciones

La descripción mínima de una fermentación en lote usa tres variables de estado, todas en g/L: la biomasa (X), el sustrato limitante (S), que en un mosto de fruta

es la suma de azúcares fermentables, y el producto (P), que puede ser etanol, ácido láctico o ácido acético según el proceso. Cada variable exige un método analítico propio. La biomasa se mide por peso seco, por densidad óptica calibrada contra peso seco o por recuento en cámara de Neubauer; el sustrato, por el método del ácido dinitrosalicílico o por cromatografía líquida; el etanol, por destilación y densimetría, por cromatografía de gases o por HPLC. El capítulo VII trata esos métodos con más detalle.

Conviene advertir desde ahora una dificultad propia de los mostos de fruta: la pulpa contiene sólidos insolubles que interfieren con la densidad óptica y con el peso seco. En mostos de camu camu o de cocona con pulpa en suspensión, la biomasa por densidad óptica sobrestima la población de levaduras. Dos salidas razonables son centrifugar el mosto antes de inocular y trabajar con el sobrenadante clarificado, o medir la biomasa por recuento directo y convertir células a masa con un factor determinado en el propio laboratorio.

4.2.2. Velocidades y velocidades específicas

Las velocidades volumétricas se expresan en $g \cdot L^{-1} \cdot h^{-1}$ y las específicas se obtienen dividiéndolas entre la biomasa. La velocidad específica de crecimiento es:

$$\mu = \frac{1}{X}\frac{dX}{dt} \tag{4.1}$$

con unidades de h^{-1}. De forma análoga se definen la velocidad específica de consumo de sustrato y la de formación de producto:

$$q_S = -\frac{1}{X}\frac{dS}{dt} \quad q_P = \frac{1}{X}\frac{dP}{dt} \tag{4.2}$$

La distinción entre velocidad volumétrica y específica tiene consecuencias prácticas. Un fermentador con mucha biomasa puede producir etanol rápido aunque cada célula trabaje despacio; por eso, cuando se comparan cepas, la magnitud útil es la específica, y cuando se diseña una planta, la volumétrica.

4.2.3. Rendimientos y productividad

Los rendimientos relacionan cantidades formadas con cantidades consumidas:

$$Y_{X/S} = \frac{X - X_0}{S_0 - S} \quad Y_{P/S} = \frac{P - P_0}{S_0 - S} \tag{4.3}$$

El capítulo III mostró que el rendimiento teórico de etanol sobre glucosa es 0,511 g/g. La productividad volumétrica, en cambio, incorpora el tiempo:

$$Q_P = \frac{P_f - P_0}{t_f} \tag{4.4}$$

Con los datos publicados se pueden calcular productividades y comparar trabajos que, a primera vista, no tienen nada en común. La Tabla 8 reúne tres casos. *Meyerozyma caribbica* CC003, aislada del camu camu, llegó a 84,4 g/L de etanol a partir de 180 g/L de glucosa con una productividad de 0,781 g·L⁻¹·h⁻¹ (Matos et al., 2021); si se divide la concentración final entre la productividad se obtiene que el cálculo corresponde a unas 108 h. En la planta piloto de la FIQ-UNAP, el mosto de caña a 18,4 °Brix alcanzó 7,4 % v/v en 16 h (Barrera Vela y Reyes Muro, 2015), es decir, unos 58 g/L de etanol y una productividad cercana a 3,6 g·L⁻¹·h⁻¹. El vino dulce de camu camu de la Universidad Nacional de Ucayali llegó a 10,19 °GL después de 338 h (Vasquez Shuña, 2020), con una productividad aproximada de 0,24 g·L⁻¹·h⁻¹.

Tabla 8.

Productividades volumétricas de etanol calculadas a partir de datos publicados

Sistema	Etanol final	Tiempo	Q_P aproximada (g·L⁻¹·h⁻¹)	Fuente
Caldo sintético, 180 g/L glucosa, *M. caribbica* CC003	84,4 g/L	≈ 108 h	0,781 (reportada)	Matos et al. (2021)
Mosto de caña, 18,4 °Brix, pH 4,78, 29 °C, levadura comercial	7,4 % v/v (≈ 58 g/L)	16 h	≈ 3,6	Barrera Vela y Reyes Muro (2015)
Mosto de camu camu, pulpa:agua 1:3	10,19 °GL (≈ 80 g/L)	338 h	≈ 0,24	Vasquez Shuña (2020)

Nota. Las conversiones de % v/v a g/L usan una densidad del etanol de 0,789 g/mL. Las productividades de las dos últimas filas son cálculos de este libro a partir de los valores publicados y no fueron reportadas por los autores.

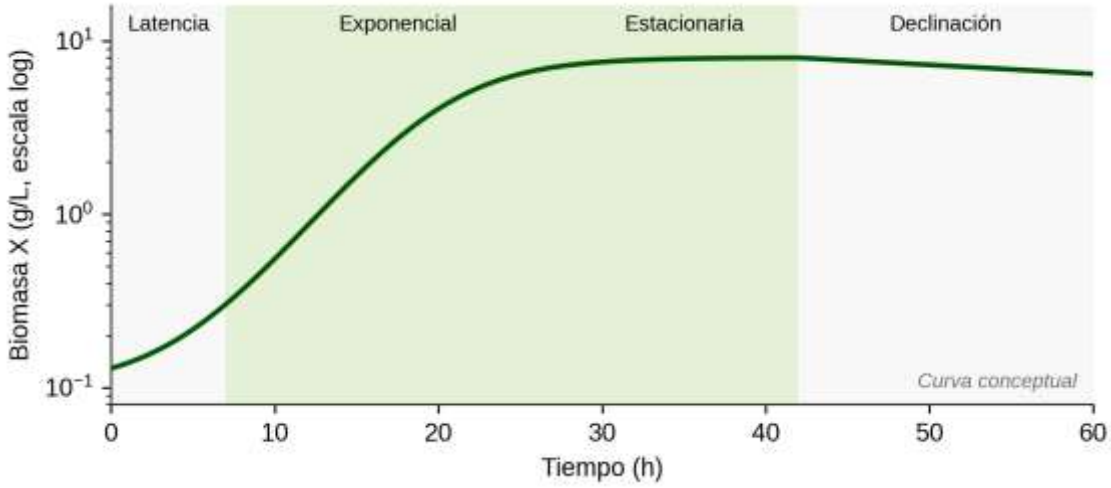
La diferencia de un orden de magnitud entre la caña y el camu camu no se debe solo a la levadura. En el mosto de caña la levadura encontró azúcares abundantes, sales de amonio y micronutrientes añadidos a propósito, y una temperatura de 29 °C; el vino de camu camu se fermenta a menor temperatura, con un mosto ácido y pobre en nitrógeno, y el objetivo no es la velocidad sino un producto que conserve aroma. Aun así, la comparación sirve para ubicar el

margen de mejora: si un vino de fruta tarda dos semanas, una parte de ese tiempo puede recortarse con nutrición y control térmico sin tocar la calidad.

4.3. Las fases del cultivo en lote

Cuando se inocula un mosto y se sigue la biomasa en el tiempo aparecen fases reconocibles (Figura 9). En la fase de latencia la levadura se adapta al medio: sintetiza transportadores y enzimas, y en mostos ácidos como el de camu camu también ajusta su homeostasis de pH. Le sigue la fase exponencial, en la que μ es aproximadamente constante y la biomasa crece según $X = X_0 \cdot e^{(\mu t)}$. Después, el agotamiento del sustrato, la acumulación de etanol o la falta de nitrógeno frenan el crecimiento y el cultivo entra en fase estacionaria, durante la cual la levadura sigue fermentando, aunque ya no se multiplique. Finalmente, en fermentaciones largas, la viabilidad cae.

Figura 9.
Fases de un cultivo microbiano en lote



Nota. Curva conceptual de elaboración propia. El eje de biomasa está en escala logarítmica, por lo que la fase exponencial aparece como una recta.

La fase estacionaria merece atención en vinificación. Buena parte del etanol de un vino de fruta se produce cuando la población de levaduras ya dejó de crecer, porque el nitrógeno asimilable se agota antes que el azúcar. Esta observación tiene una traducción directa en los modelos: un modelo que solo asocie la formación de producto al crecimiento subestimará el etanol final. La ecuación de Luedeking y Piret, que se revisa en la sección 4.6, resuelve esa limitación.

La duración de la latencia depende sobre todo del estado del inóculo. Una levadura seca activa rehidratada según las indicaciones del fabricante, o un prefermentador en fase exponencial como los que se usan en la planta piloto de la FIQ-UNAP con un volumen del 15 al 20 % del fermentador principal (Barrera Vela y Reyes Muro, 2015), acorta la latencia a unas pocas horas. Una levadura de panificación agregada directamente a un mosto frío y muy ácido puede tardar un día en arrancar, y durante ese día el microbiota nativo de la fruta compite sin restricción.

4.4. El modelo de Monod

4.4.1. La ecuación

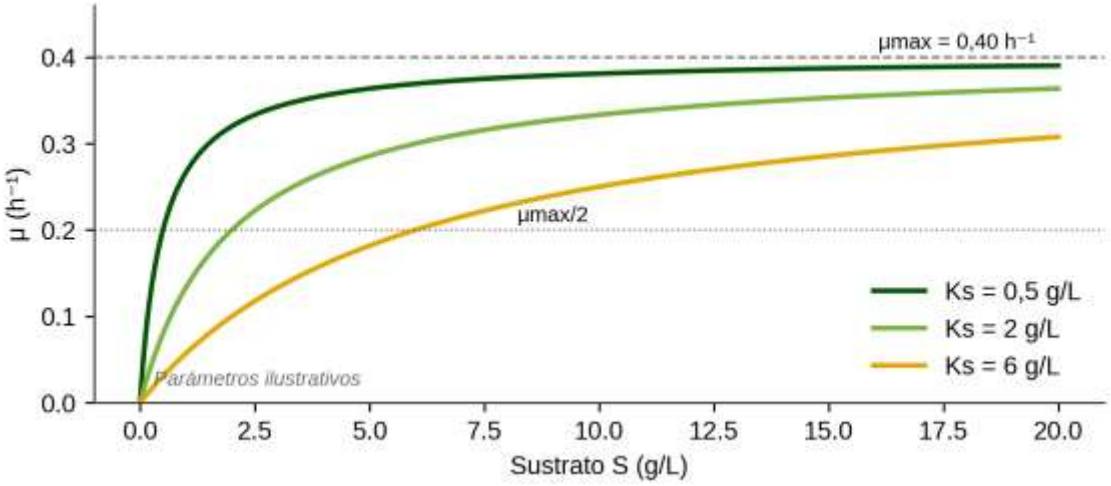
Jacques Monod propuso en 1949 que la velocidad específica de crecimiento depende de la concentración del sustrato limitante según una hipérbola:

$$\mu = \frac{\mu_{máx}\, S}{K_S + S} \tag{4.5}$$

donde $\mu_{máx}$ es la velocidad específica máxima y K_S la constante de saturación, numéricamente igual a la concentración de sustrato a la cual $\mu = \mu_{máx}/2$ (Monod, 1949). La ecuación es empírica. Tiene la misma forma que la de Michaelis-Menten, pero no se deduce de un mecanismo enzimático único, y conviene no interpretar K_S como una afinidad molecular en sentido estricto.

Figura 10.

Velocidad específica de crecimiento según el modelo de Monod para tres valores de la constante de saturación



Nota. Curvas calculadas con $\mu_{máx}$ = 0,40 h^{-1}. Parámetros ilustrativos, elegidos para mostrar el efecto de K_S.

4.4.2. Qué dice y qué no dice

La Figura 10 muestra la consecuencia más útil del modelo: cuando S es mucho mayor que K_S, μ se acerca a $\mu_{máx}$ y deja de depender del sustrato. En un mosto de fruta con 150 a 200 g/L de azúcar, y con valores de K_S para levaduras que suelen ser del orden de décimas a unidades de g/L (Shuler y Kargi, 2002), la levadura crece durante casi toda la fermentación a velocidad máxima respecto del azúcar. Lo que la frena no es la falta de sustrato sino otras cosas: el etanol, el nitrógeno, el pH, la temperatura. Por esa razón el modelo de Monod solo, sin términos de inhibición, casi nunca describe bien una fermentación vínica completa.

Monod sí resulta adecuado para cultivos con poco sustrato, como la etapa final de un vino seco o un quimiostato alimentado con mosto diluido. Y es la base sobre la que se construyen los modelos más completos, que multiplican el término de Monod por factores de inhibición.

4.5. Inhibición por sustrato y por producto

4.5.1. Inhibición por sustrato: el modelo de Andrews

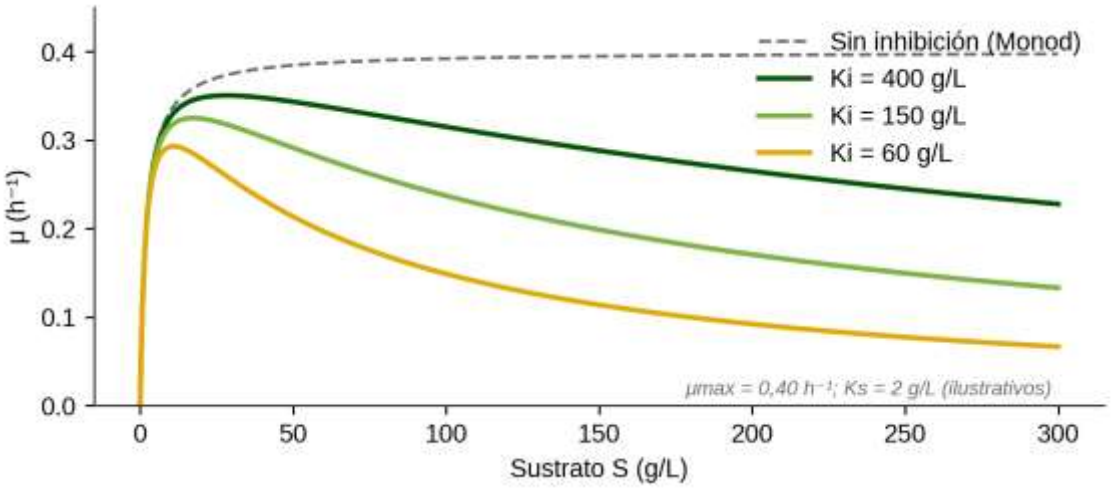
Una concentración muy alta de azúcar reduce la actividad de agua del mosto y somete a la levadura a estrés osmótico. Andrews (1968) propuso una modificación de la ecuación de Monod para sustratos inhibidores:

$$\mu = \frac{\mu_{máx}\, S}{K_S + S + S^2/K_I} \tag{4.6}$$

El término S^2/K_I solo pesa cuando S es alta. La Figura 11 muestra que, con esta forma, existe una concentración de sustrato a la que μ es máxima, igual a la raíz cuadrada del producto $K_S \cdot K_I$, y que por encima de ese valor el crecimiento se hace más lento.

Figura 11.

Efecto de la constante de inhibición en el modelo de Andrews



Nota. $\mu_{máx}$ = 0,40 h^{-1} y K_S = 2 g/L. Parámetros ilustrativos.

Para las frutas amazónicas la inhibición por sustrato no depende tanto de la fruta como de la manera de corregir el mosto. Ya se vio en el capítulo III que para llegar a 12 % v/v hacen falta más de 200 g/L de azúcar fermentable. Si toda esa sacarosa se añade al inicio, la levadura arranca en un medio concentrado; si se añade en dos o tres fracciones a medida que baja el °Brix, el estrés se reparte. Esta práctica, el lote alimentado, se describe en el capítulo V y tiene justificación cinética directa en el modelo de Andrews.

4.5.2. Inhibición por producto: el modelo de Levenspiel

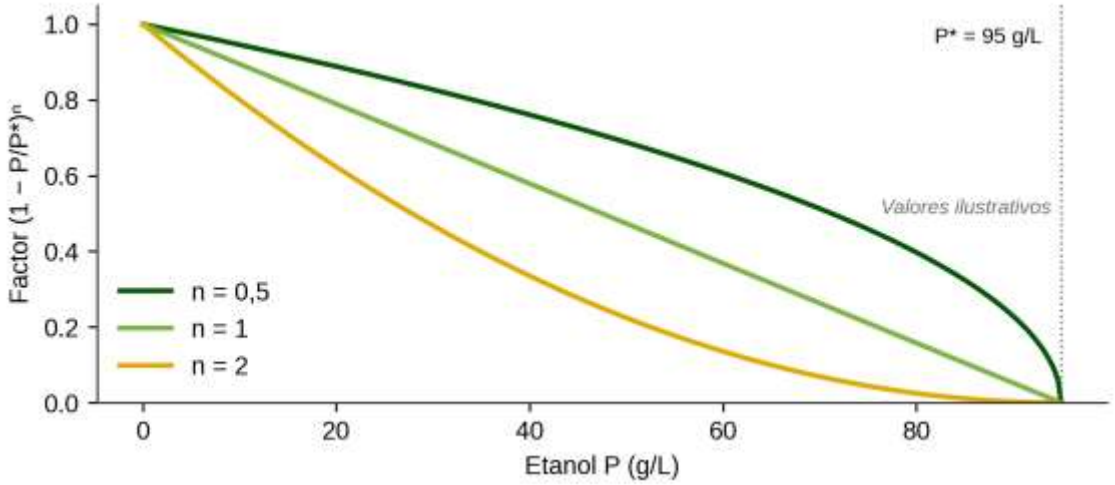
El etanol es tóxico para la propia levadura que lo produce: altera la fluidez de las membranas y afecta el transporte de azúcares. Levenspiel (1980) generalizó la ecuación de Monod para incluir una concentración crítica de producto P*, por encima de la cual el crecimiento se detiene:

$$\mu = \mu_{\text{máx}}\left(1 - \frac{P}{P^*}\right)^n \frac{S}{K_S + S} \qquad (4.7)$$

El exponente n controla la forma de la caída (Figura 12). Con n = 1 la inhibición es lineal; con n menor que 1 la levadura tolera bien concentraciones moderadas y cae bruscamente cerca de P*; con n mayor que 1 la inhibición se nota desde el principio.

Figura 12.

Factor de inhibición por etanol en el modelo de Levenspiel



Nota. P* = 95 g/L. Valores ilustrativos.

El parámetro P *tiene un significado práctico inmediato. Si una cepa tiene P* cercano a 90 g/L, un vino de 12 % v/v, equivalente a unos 95 g/L de etanol, quedará en el límite de su capacidad y es probable que la fermentación se detenga con azúcar residual. La tolerancia al etanol es, por eso, uno de los criterios de selección de cepas nativas que se discutieron en el capítulo II. *M. caribbica* CC003 alcanzó 84,4 g/L en caldo sintético (Matos et al., 2021), dato que indica una tolerancia suficiente para vinos de fruta de graduación media.

4.5.3. Combinación de términos

En la práctica los términos se multiplican. Un modelo de uso frecuente para fermentación alcohólica en lote combina Andrews y Levenspiel:

$$\mu = \mu_{\text{máx}} \frac{S}{K_S + S + S^2/K_I} \left(1 - \frac{P}{P^*}\right)^n \tag{4.8}$$

Tiene cinco parámetros solo para el crecimiento. Cuantos más parámetros tenga un modelo, mejor se ajustará a cualquier conjunto de datos, pero peor determinados quedarán sus valores. Con los datos que genera un tesista en un matraz, muestreando cada 12 horas durante una semana, rara vez hay información suficiente para estimar cinco parámetros con intervalos de confianza razonables. La sección 4.8 vuelve sobre este punto.

4.6. Formación de producto: el modelo de Luedeking y Piret

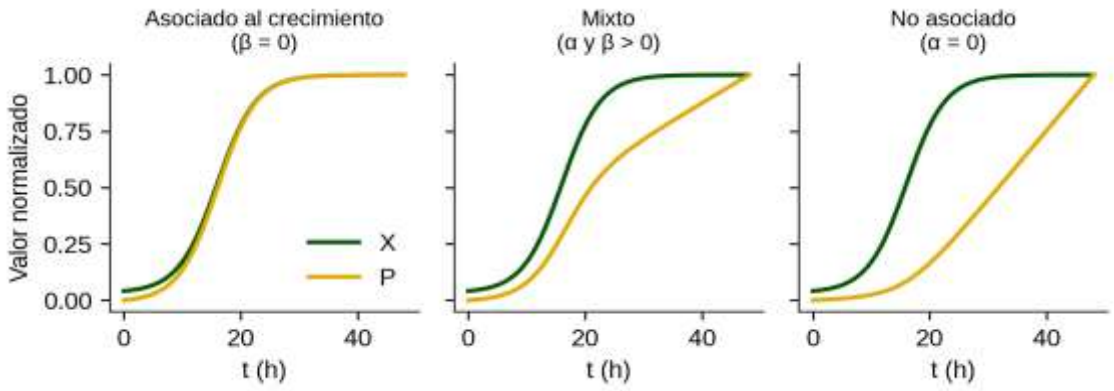
Luedeking y Piret (1959) estudiaron la fermentación láctica y observaron que el ácido se formaba en parte durante el crecimiento y en parte después, por células que ya no se dividían. Propusieron:

$$\frac{dP}{dt} = \alpha \frac{dX}{dt} + \beta X \tag{4.9}$$

El coeficiente α (g de producto por g de biomasa formada) representa la fracción asociada al crecimiento y β (g de producto por g de biomasa y por hora), la no asociada. La Figura 13 muestra los tres casos posibles.

Figura 13.

Perfiles de biomasa y producto según el modelo de Luedeking y Piret



Nota. Curvas normalizadas y parámetros ilustrativos.

Aunque nació para el ácido láctico, el modelo describe bien la producción de etanol, que en levaduras tiene un componente asociado al crecimiento y otro de mantenimiento. También sirve para la acidificación en bebidas lácticas de fruta, como las fermentadas de taperibá o de copoazú que se revisan en el capítulo VI. Estimar α y β por separado es informativo: una cepa con β alto seguirá produciendo etanol en fase estacionaria y será más robusta frente a la falta de nitrógeno.

El consumo de sustrato se escribe por balance de masa:

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{1}{Y_{X/S}}\frac{dX}{dt} - \frac{1}{Y_{P/S}}\frac{dP}{dt} \tag{4.10}$$

Esta forma supone que el sustrato se reparte entre biomasa y producto. Si se quiere representar además el mantenimiento celular, se añade un término $-m_S \cdot X$, con m_S como coeficiente de mantenimiento (Doran, 2013).

4.7. Un modelo completo y su simulación

4.7.1. El sistema de ecuaciones

Con las piezas anteriores se arma un sistema de tres ecuaciones diferenciales para un lote:

$$\frac{dX}{dt} = \mu(S,P)X \tag{4.11}$$

$$\frac{dP}{dt} = \alpha\,\mu(S,P)X + \beta X \tag{4.12}$$

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{\mu(S,P)X}{Y_{X/S}} - \frac{1}{Y_{P/S}}\frac{dP}{dt} \tag{4.13}$$

donde μ(S,P) es la expresión combinada de la ecuación (4.8). El sistema no tiene solución analítica, pero se integra en segundos con cualquier método numérico de paso variable.

4.7.2. Simulación ilustrativa

Para mostrar el comportamiento del modelo se integró el sistema con los parámetros de la Tabla 9, que no provienen de ningún experimento con fruta

amazónica. Se eligieron para reproducir la forma de una fermentación alcohólica típica de mosto de fruta corregido, con 180 g/L de azúcar inicial.

Tabla 9.

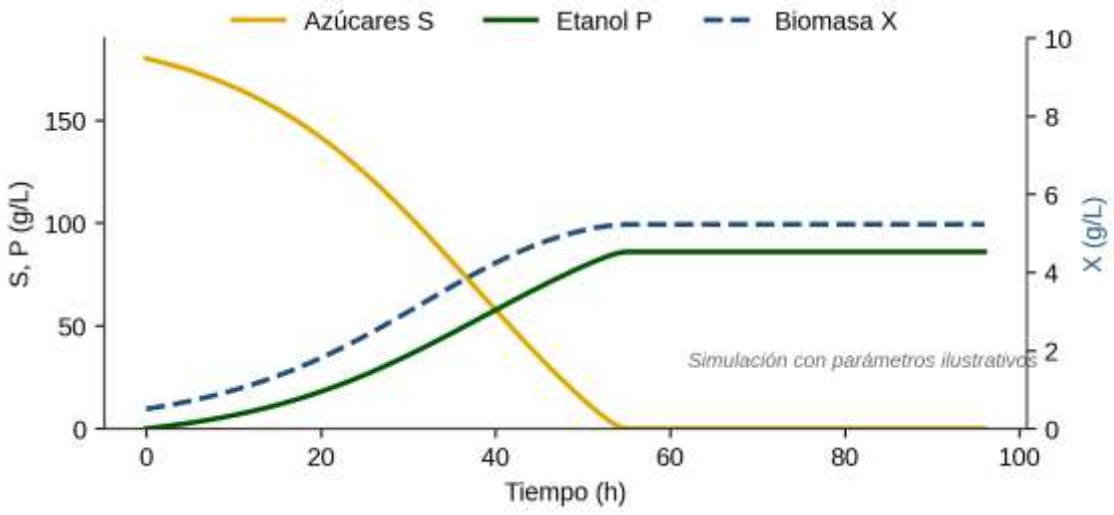
Parámetros usados en la simulación ilustrativa del lote

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Velocidad específica máxima	$\mu_{máx}$	0,12	h^{-1}
Constante de saturación	K_S	1,5	g/L
Constante de inhibición por sustrato	K_I	250	g/L
Concentración crítica de etanol	P*	100	g/L
Exponente de Levenspiel	n	1,5	–
Rendimiento de biomasa	$Y_{X/S}$	0,40	g/g
Coeficiente asociado al crecimiento	α	9,0	g/g
Coeficiente no asociado	β	0,30	$g \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$
Rendimiento de etanol	$Y_{P/S}$	0,511	g/g
Condiciones iniciales	X_0; S_0; P_0	0,5; 180; 0	g/L

Nota. Valores hipotéticos de elaboración propia para fines didácticos. No deben usarse como parámetros de diseño.

Figura 14.

Simulación de una fermentación alcohólica en lote con el modelo combinado



Nota. Integración numérica de las ecuaciones (4.11) a (4.13) con los parámetros de la Tabla 9. Resultados ilustrativos, no experimentales.

La Figura 14 muestra el resultado. El azúcar se agota hacia las 55 h, el etanol llega a unos 86 g/L y la biomasa a unos 5,2 g/L. El rendimiento global resulta de 0,477 g/g, el 93 % del teórico, cifra comparable al 91,7 % reportado para *M. caribbica* CC003 (Matos et al., 2021). Hay dos detalles del perfil que vale la pena mirar. Durante las primeras 12 horas el azúcar apenas baja, de 180 a 162 g/L,

porque todavía hay poca biomasa; después el consumo se acelera y entre las 24 y las 48 h desaparecen más de 100 g/L. Y la biomasa deja de crecer antes de que se agote el azúcar, porque el etanol acumulado ya pesa en el término de Levenspiel.

Ejemplo 4.1. Lectura de la simulación para planificar un lote

Supóngase que un pequeño productor de Iquitos quiere fermentar 200 L de mosto de camu camu corregido a 180 g/L de azúcar y que la cepa se comportara como en la simulación.

- A las 24 h el modelo predice unos 128 g/L de azúcar y 24 g/L de etanol: la fermentación está en marcha y el desprendimiento de CO_2 es intenso. Es el momento de controlar la temperatura, porque la producción de calor es máxima.
- Hacia las 48 h quedan unos 22 g/L de azúcar. Si el productor busca un vino semiseco, este es el intervalo en que debe decidir cuándo detener la fermentación por frío o por trasiego.
- A las 60 h el azúcar está agotado y el etanol ronda 86 g/L, cerca de 10,9 % v/v.

Con una cepa real los tiempos serán distintos. El valor del ejercicio está en el orden de los hechos, no en las horas exactas.

4.7.3. Sensibilidad a los parámetros

Un modelo sirve también para preguntar qué pasa si cambia una sola condición. Duplicar $\mu_{máx}$ acorta la fermentación casi a la mitad, pero no cambia el etanol final, que depende del azúcar disponible y del rendimiento. Bajar P* de 100 a 80 g/L, en cambio, detiene la fermentación con azúcar residual, porque la levadura deja de crecer y el término β no alcanza para consumir el remanente. Este segundo escenario reproduce lo que en bodega se llama fermentación detenida o lenta (Bisson, 1999). La simulación sugiere un diagnóstico: si un vino de fruta se detiene sistemáticamente con el mismo grado alcohólico, el problema probablemente sea la tolerancia de la cepa al etanol y no la falta de nutrientes.

4.8. Modelos sigmoideos: logístico y Gompertz

4.8.1. Por qué usarlos

Cuando no se mide el sustrato o se quiere describir una sola curva, los modelos sigmoideos son una alternativa práctica. No tienen fundamento mecanístico, pero sus parámetros se interpretan con facilidad y se ajustan con pocos datos. El modelo logístico para la biomasa es:

$$X(t) = \frac{X_m}{1 + (\frac{X_m}{X_0} - 1)e^{-\mu_{\text{máx}} t}} \quad (4.14)$$

donde X_m es la biomasa máxima. La ecuación se deriva de suponer que μ disminuye linealmente con la biomasa, lo que resume en un término la competencia por recursos.

4.8.2. Gompertz modificado

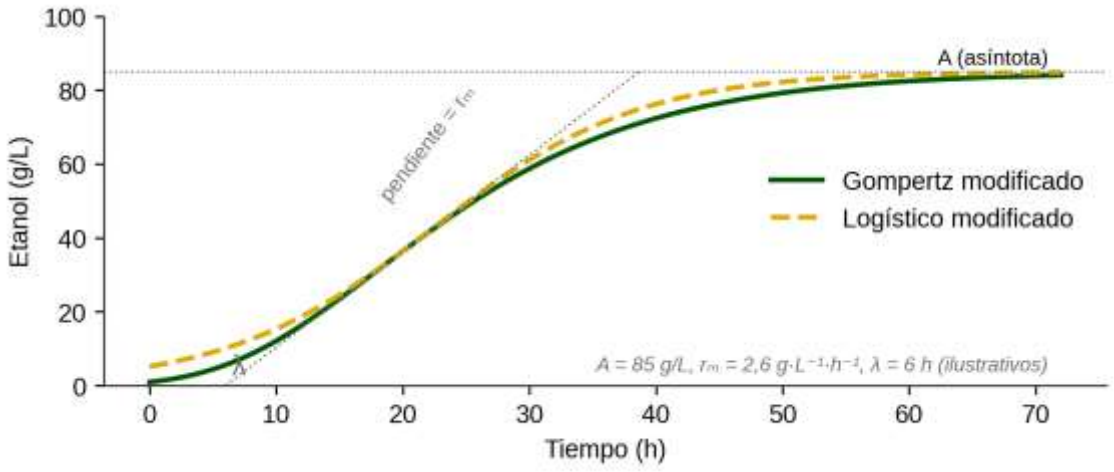
Zwietering et al. (1990) reparametrizaron las funciones de Gompertz y logística para que sus constantes tuvieran significado biológico. Aplicada a la producción de etanol, la forma de Gompertz modificada es:

$$P(t) = A \cdot \exp[-\exp(\frac{r_m\, e}{A}(\lambda - t) + 1)] \quad (4.15)$$

donde A es la concentración máxima de producto, r_m la velocidad máxima de producción ($g \cdot L^{-1} \cdot h^{-1}$) y λ el tiempo de latencia (h). La Figura 15 compara ambas funciones con los mismos parámetros.

Figura 15.

Producción de etanol descrita con los modelos de Gompertz y logístico modificados



Nota. A = 85 g/L, r_m = 2,6 $g \cdot L^{-1} \cdot h^{-1}$ y λ = 6 h. Parámetros ilustrativos; formas según Zwietering et al. (1990).

El atractivo de este modelo para las tesis de pregrado es evidente: con siete u ocho mediciones de °GL a lo largo de la fermentación se obtienen tres números que resumen el proceso y que se pueden comparar entre tratamientos mediante un análisis de varianza. Un diseño factorial como los que se usan en la UNAP

para el vodka de sachapapa (capítulo VIII) podría analizarse con A, r_m y λ como respuestas, en lugar de usar solo el grado alcohólico final. Se ganaría información sobre la velocidad sin añadir costo analítico.

Tabla 10.

Resumen de los modelos cinéticos presentados

Modelo	Ecuación base	Parámetros	Cuándo usarlo	Referencia
Monod	$\mu = \mu_{máx}\, S/(K_S + S)$	$\mu_{máx}$, K_S	Sustrato limitante bajo; base de otros modelos	Monod (1949)
Andrews	Monod con término S^2/K_I	$\mu_{máx}$, K_S, K_I	Mostos muy concentrados; decidir si alimentar por fracciones	Andrews (1968)
Levenspiel	Monod × $(1 - P/P^*)^n$	$\mu_{máx}$, K_S, P^*, n	Fermentaciones que se detienen por etanol	Levenspiel (1980)
Luedeking-Piret	$dP/dt = \alpha\, dX/dt + \beta X$	α, β	Producto formado en fase estacionaria	Luedeking y Piret (1959)
Logístico	X(t) sigmoidea	X_m, X_0, $\mu_{máx}$	Curvas de biomasa con pocos datos	Doran (2013)
Gompertz modificado	P(t) sigmoidea	A, r_m, λ	Curvas de producto; comparar tratamientos	Zwietering et al. (1990)

4.9. Estimación de parámetros a partir de datos

4.9.1. Diseño del muestreo

La calidad de un ajuste depende más del muestreo que del algoritmo. Tres recomendaciones concretas para fermentaciones de fruta en matraz o en biorreactor de mesa:

- Muestrear con mayor frecuencia al inicio. La fase exponencial de una levadura en mosto dura entre 12 y 30 horas, y es la que determina $\mu_{máx}$. Tomar muestras cada 3 o 4 horas durante el primer día y cada 12 horas después es más eficiente que muestrear cada 12 horas desde el principio.
- Medir las tres variables en la misma muestra. Si la biomasa se mide un día y el azúcar otro, los errores de tiempo se suman a los analíticos.
- Hacer réplicas biológicas, no solo analíticas. Tres fermentaciones independientes informan sobre la variabilidad del proceso; tres lecturas de la misma muestra solo informan sobre el equipo.

4.9.2. Estimación gráfica de la velocidad específica máxima

El método más sencillo aprovecha que en la fase exponencial ln X crece linealmente con el tiempo:

$$\ln X = \ln X_0 + \mu_{\text{máx}} t \tag{4.16}$$

Basta graficar ln X frente a t, identificar el tramo recto y calcular la pendiente por regresión lineal. El método es robusto y no necesita programas especiales. Su limitación es la elección del tramo: si se incluyen puntos de la latencia o de la desaceleración, la pendiente se subestima. Una regla práctica es exigir al menos cuatro puntos alineados con un coeficiente de determinación superior a 0,98.

4.9.3. Ajuste no lineal

Para modelos con varios parámetros, el procedimiento estándar es la regresión no lineal por mínimos cuadrados: se integra el modelo, se compara con los datos y se ajustan los parámetros hasta minimizar la suma de cuadrados de los residuos. El listado siguiente muestra un ajuste del modelo de Gompertz modificado en Python, con la biblioteca SciPy. Los datos del ejemplo son ficticios y deben reemplazarse por los del experimento.

```
import numpy as np
from scipy.optimize import curve_fit

# Datos de ejemplo (reemplazar por los medidos): tiempo en h, etanol en g/L
t = np.array([0, 6, 12, 18, 24, 36, 48, 60, 72])
P = np.array([0.0, 1.2, 9.5, 24.8, 40.1, 63.0, 76.4, 82.0, 84.1])

def gompertz(t, A, rm, lam):
    return A * np.exp(-np.exp(rm * np.e / A * (lam - t) + 1))

p0 = [P.max(), 2.0, 5.0]                  # valores iniciales razonables
par, cov = curve_fit(gompertz, t, P, p0=p0)
err = np.sqrt(np.diag(cov))               # errores estándar
for nombre, v, e in zip(["A", "rm", "lambda"], par, err):
    print(f"{nombre} = {v:.2f} ± {e:.2f}")

res = P - gompertz(t, *par)
r2 = 1 - np.sum(res**2) / np.sum((P - P.mean())**2)
print(f"R2 = {r2:.4f}")
```

Para el modelo diferencial completo el procedimiento es el mismo, con dos cambios: la función que se ajusta integra el sistema con solve_ivp y los residuos se calculan sobre X, S y P a la vez, con pesos que compensen las diferencias de escala entre variables. Los valores iniciales importan mucho; conviene

tomarlos de la estimación gráfica de $\mu_{máx}$ y de los rendimientos calculados con las expresiones (4.3).

4.9.4. Cómo reportar los parámetros

Un parámetro sin su intervalo de confianza no permite comparar. Al reportar un ajuste conviene incluir el valor con su error estándar o su intervalo al 95 %, el coeficiente de determinación, la suma de cuadrados de los residuos y, sobre todo, un gráfico de residuos frente al tiempo. Si los residuos muestran un patrón sistemático, por ejemplo, positivos al inicio y negativos al final, el modelo no es adecuado, aunque el R^2 supere 0,99. Este último punto se pasa por alto con frecuencia en las tesis, donde un R^2 alto se presenta como prueba suficiente.

4.10. Cinética en fermentaciones lácticas y acéticas

4.10.1. Bacterias ácido-lácticas

Las bebidas lácticas de fruta se modelan con las mismas herramientas, con algunos ajustes. El producto inhibidor ya no es el etanol sino el ácido láctico, y la inhibición depende sobre todo de la fracción no disociada, que aumenta a medida que baja el pH. Por eso en bebidas de fruta con pH inicial bajo la acidificación se detiene pronto. En la bebida probiótica de copoazú fermentada con *Lacticaseibacillus casei* NRRL B-442, los autores ajustaron el pH inicial a 5,8 y fermentaron a 30 °C durante unas 18 h (Batista et al., 2025). Con camu camu, cuyo pH natural está entre 2,51 y 2,54 (Batista et al., 2025), una fermentación láctica directa es poco viable sin dilución o neutralización parcial, y ese ajuste tiene que decidirse antes de modelar.

4.10.2. Bacterias acéticas

La oxidación de etanol a ácido acético depende del oxígeno disuelto, y la cinética de un vinagre suele estar limitada por la transferencia de oxígeno antes que por el sustrato. En un proceso sumergido, la velocidad de acetificación se relaciona con el coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno, k_La, que es el parámetro de escalamiento más usado en procesos aerobios (Garcia-Ochoa y Gomez, 2009). La velocidad de transferencia se escribe:

$$OTR = k_L a(C^* - C_L) \tag{4.17}$$

donde C* es la concentración de oxígeno en equilibrio con el gas y C_L la concentración en el líquido. En la escala de laboratorio de la FIQ-UNAP, con matraces agitados, k_{La} depende del volumen de llenado y de la velocidad del agitador orbital; un ensayo de acetificación que no reporte esas dos condiciones no es reproducible. El capítulo IX retoma el k_{La} como criterio de escalamiento.

4.11. Datos regionales aprovechables para modelado

La revisión no encontró series temporales completas de biomasa, sustrato y producto para frutas nativas. La serie más cercana es la de Vasquez Shuña (2020), que registró cada 24 horas los °Brix, el pH, la densidad y la acidez de tres mostos de camu camu hasta el corte de la fermentación, aunque sin medir biomasa. Esos datos, junto con otros de punto final, pueden servir como punto de partida o como validación (Tabla 11).

Tabla 11.

Información regional útil para construir o validar modelos cinéticos

Estudio	Sustrato	Dato disponible	Uso posible
Barrera Vela y Reyes Muro (2015)	Jugo de caña, planta piloto FIQ-UNAP	18,4 °Brix; pH 4,78; 29 °C; 7,4 % v/v a 16 h	Productividad de referencia; validación de un modelo a escala piloto
Matos et al. (2021)	Caldo con 180 g/L de glucosa	$Y_{P/S}$ = 0,4688 g/g; Q_P = 0,781 $g \cdot L^{-1} \cdot h^{-1}$; 91,7 % de eficiencia	Parámetros de una levadura aislada del camu camu
Vasquez Shuña (2020)	Pulpa de camu camu en diluciones 1:1, 1:2 y 1:3; mosto a 22 °Brix	°Brix, pH, densidad y acidez cada 24 h; corte a 12,5 °Brix a las 192, 264 y 338 h; 10,19 °GL en la dilución 1:3	Ajuste de modelos de consumo de sustrato; validación de simulaciones de vino dulce
Ramírez Trujillo y Urrutia Vílchez (s. f.)	Almidón de sachapapa hidrolizado con malta	Maceración a 68 °C por 90 min; mosto de 11,33 °Brix; fermentación de 7 días con *S. cerevisiae*	Condiciones de un sustrato amiláceo regional
Yupanqui (2024)	Masato de yuca	5 % de alcohol; pH 6,0; acidez 0,72 %; 4,0 °Bx	Estado final de una fermentación mixta tradicional

La lectura de la tabla deja una tarea clara para los próximos años: repetir las formulaciones de vino de camu camu o de cocona con muestreo frecuente, medir las tres variables y publicar los parámetros. El protocolo mínimo que se propone en el capítulo X parte de este diagnóstico.

4.12. Ejercicios propuestos

Los ejercicios siguientes aplican las ecuaciones del capítulo con valores sencillos. Las respuestas se dan al final de cada enunciado para que el lector pueda verificar su procedimiento.

Ejercicio 4.1. Una levadura crece en fase exponencial con $\mu_{máx} = 0{,}30\ h^{-1}$. ¿Cuál es su tiempo de duplicación? *Respuesta:* $t_d = \ln 2/\mu_{máx} = 0{,}693/0{,}30 = 2{,}31$ h.

Ejercicio 4.2. En un matraz con mosto de cocona corregido, la biomasa pasa de 0,40 a 1,60 g/L entre las 4 y las 12 horas, dentro de la fase exponencial. Estime $\mu_{máx}$. *Respuesta:* $\mu_{máx} = \ln(1{,}60/0{,}40)/(12 - 4) = 1{,}386/8 = 0{,}173\ h^{-1}$.

Ejercicio 4.3. Con el modelo de Andrews, $K_S = 2$ g/L y $K_I = 150$ g/L, ¿a qué concentración de sustrato es máxima la velocidad de crecimiento? *Respuesta:* $S_{opt} = \sqrt{(K_S \cdot K_I)} = \sqrt{300} = 17{,}3$ g/L. El resultado muestra que, con una levadura sensible al estrés osmótico, un mosto de 200 g/L de azúcar está muy lejos del óptimo de crecimiento, aunque sea adecuado para el grado alcohólico final.

Ejercicio 4.4. Con el modelo de Levenspiel, P = *100 g/L y n = 1,5, ¿qué fracción de la velocidad de crecimiento sin inhibición conserva la levadura cuando el etanol llega a 50 g/L?* Respuesta:* (1 − 50/100) elevado a 1,5 = 0,5 elevado a 1,5 = 0,354, es decir, alrededor del 35 %.

Ejercicio 4.5. Con los parámetros de Gompertz de la Figura 15 ($A = 85$ g/L, $r_m = 2{,}6\ g \cdot L^{-1} \cdot h^{-1}$, $\lambda = 6$ h), ¿en qué momento se alcanza la mitad del etanol máximo? *Respuesta:* se despeja t de $0{,}5 = \exp\{-\exp[r_m \cdot e/A \cdot (\lambda - t) + 1]\}$. Con $\ln 0{,}5 = -0{,}693$ se obtiene $r_m \cdot e/A \cdot (\lambda - t) = -1{,}366$, y de ahí $t \approx 22{,}4$ h.

Ejercicio 4.6. Un vino de fruta alcanza 11,0 % v/v en 10 días a partir de un mosto con 190 g/L de azúcar fermentable, que se agota por completo. Calcule el rendimiento $Y_{P/S}$, la eficiencia fermentativa y la productividad volumétrica. *Respuesta:* etanol = 11,0 × 7,89 = 86,8 g/L; $Y_{P/S} = 86{,}8/190 = 0{,}457$ g/g; eficiencia = 0,457/0,511 × 100 = 89,4 %; $Q_P = 86{,}8/240 = 0{,}36\ g \cdot L^{-1} \cdot h^{-1}$.

4.13. Síntesis del capítulo

La cinética convierte una fermentación en un conjunto de números comparables. El modelo de Monod es el punto de partida, pero en mostos de fruta corregidos

con 180 a 220 g/L de azúcar lo que limita a la levadura es el etanol, el nitrógeno y el pH, de modo que los modelos útiles incorporan términos de inhibición como los de Andrews y Levenspiel y describen la formación de producto con la ecuación de Luedeking y Piret. Para trabajos con pocos datos, el modelo de Gompertz modificado ofrece tres parámetros interpretables. En todos los casos la calidad del resultado depende del muestreo: frecuencia alta al inicio, las tres variables en la misma muestra y réplicas biológicas. En la región hay datos de punto final y alguna serie de °Brix y densidad, pero ninguna con biomasa, sustrato y producto medidos a la vez; generarlas es la contribución más inmediata que pueden hacer los laboratorios de la FIQ-UNAP.



Capítulo V: Operaciones unitarias y tecnología de procesos

5.1. Del fruto al mosto

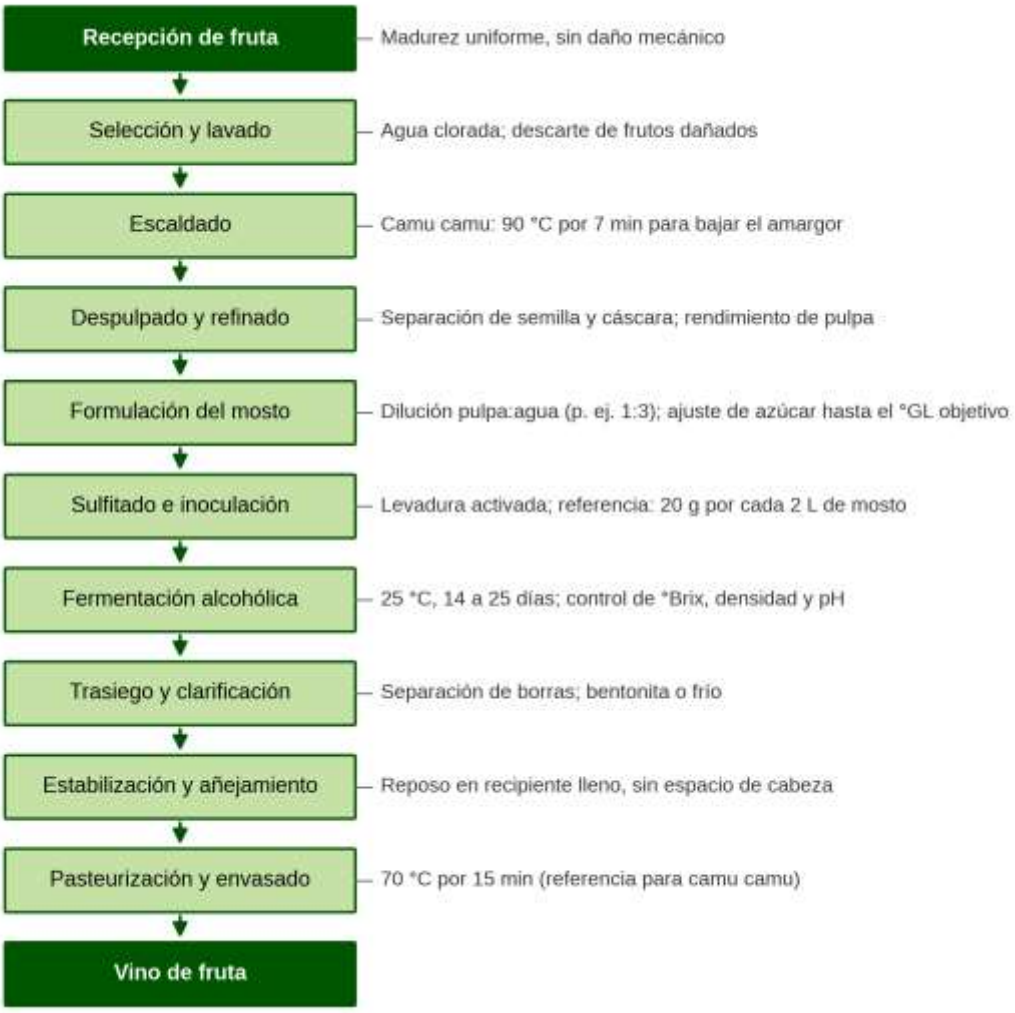
5.1.1. Un proceso definido por la materia prima

Los capítulos anteriores trataron qué microorganismos fermentan un mosto de fruta, qué reacciones ocurren y a qué velocidad. Este capítulo trata de cómo se construye el proceso: qué operaciones se aplican al fruto antes de fermentar, cómo se conduce la fermentación y qué se hace después con el líquido fermentado. La secuencia general es conocida desde la enología clásica (Ribéreau-Gayon et al., 2006), pero en las frutas amazónicas cada etapa tiene un matiz que la distingue del vino de uva. El camu camu necesita escaldado porque su cáscara aporta amargor; la cocona tiene pocos azúcares y mucha agua; el aguaje y el pijuayo aportan grasa y almidón que la uva no tiene. El proceso, en suma, se ajusta a la fruta y no al revés.

La Figura 16 resume el diagrama de flujo general para un vino de fruta, con las condiciones reportadas para camu camu por Maeda y Andrade (citados en Batista et al., 2025). Las secciones siguientes recorren cada operación.

Figura 16.

Diagrama de flujo para la elaboración de vino de fruta amazónica



Nota. Elaboración propia. Las condiciones de escaldado, inoculación, fermentación y pasteurización corresponden al vino de camu camu descrito por Maeda y Andrade (citados en Batista et al., 2025); la relación pulpa:agua 1:3 corresponde a Vasquez Shuña (2020).

5.1.2. Recepción, selección y lavado

El fruto que entra a la planta define el techo de calidad del producto. Un fruto golpeado o sobremaduro llega con levaduras y bacterias acéticas ya activas en las zonas dañadas, y ninguna operación posterior elimina del todo los compuestos que esos microorganismos producen, en particular el ácido acético y el acetato de etilo. La selección se hace por inspección visual y por madurez. En el camu camu la madurez importa por partida doble: los frutos en estado intermedio, con cáscara verde rojiza, presentan los máximos de ácido ascórbico,

antocianinas y fenoles totales (Batista et al., 2025), mientras que los frutos maduros tienen algo más de azúcar y menos astringencia.

La pérdida de calidad en poscosecha es rápida en la región, donde la fruta se cosecha y se transporta a temperaturas que rara vez bajan de 22 °C. En esas condiciones, la distancia entre la chacra y la planta se mide en horas, no en kilómetros, y los centros de acopio en Iquitos, Nauta o Yurimaguas necesitan cámaras frías o, al menos, un procesamiento a pulpa congelada el mismo día de la cosecha.

El lavado se hace con agua potable clorada y un enjuague posterior. Su función es retirar tierra, restos vegetales y parte de la carga microbiana superficial; no esteriliza.

5.1.3. Escaldado

El escaldado es un tratamiento térmico breve, en agua caliente o vapor, que inactiva enzimas y reduce la carga microbiana de la superficie. Para camu camu se reporta un escaldado a 90 °C durante 7 minutos, con el objetivo declarado de reducir el amargor (Maeda y Andrade, citados en Batista et al., 2025). Esa misma fuente comparó vinos elaborados con pulpa escaldada y sin escaldar: ambos llegaron a 11 % de alcohol y la aceptabilidad sensorial fue de 69,2 % y 70,1 %, respectivamente. La diferencia es pequeña y deja abierta una pregunta que vale la pena investigar en Loreto, donde el camu camu de rodales naturales y el de plantación pueden diferir en amargor: si el escaldado no mejora la aceptación, su costo energético y la posible pérdida de vitamina C deben justificarse por otra vía, por ejemplo por la estabilidad microbiológica del mosto.

5.1.4. Despulpado y refinado

El despulpado separa la pulpa de la cáscara y la semilla, y el refinado elimina fibras gruesas con tamices más finos. El rendimiento de pulpa es un dato de proceso que conviene medir en cada campaña, porque varía con la variedad, la madurez y el tamaño del fruto. En el camu camu de Pucallpa, la pulpa separada tuvo apenas 5,5 °Brix (Vasquez Shuña, 2020), lo que obliga a una corrección de azúcar importante; la misma tesis incluye balances de materia de la extracción de pulpa que sirven de modelo para calcular este rendimiento.

En el estudio de prefactibilidad de una planta de vino de camu camu en Loreto se estimó que 125,27 kg de fruto rinden 300,85 L de vino por turno de 8 horas (Dávila López et al., 2015). La relación, cercana a 2,4 L de vino por kilogramo de fruto, refleja la dilución de la pulpa con agua y la adición de azúcar, y es la cifra que debe usarse para dimensionar el abastecimiento de fruta.

5.1.5. Tratamiento enzimático

Las pectinas de la pulpa elevan la viscosidad y dificultan la clarificación. Los preparados comerciales de pectinasas reducen la viscosidad, aumentan el rendimiento de jugo y facilitan la sedimentación posterior (Ribéreau-Gayon et al., 2006). En la cerveza de sachapapa con cocona elaborada en la UNAP se usó un preparado enzimático comercial durante la maceración (Pereira Ramírez y Ríos Pérez, 2023). En vinos de fruta, el uso de pectinasas tiene una contrapartida que ya se mencionó en el capítulo III: la pectinmetilesterasa libera metanol. Si el producto se va a destilar, el metanol se concentrará en las cabezas, y esa fracción deberá separarse con cuidado.

5.2. Formulación del mosto

5.2.1. Dilución

Casi ninguna pulpa amazónica se fermenta pura. El camu camu, con pH entre 2,51 y 2,54 (Batista et al., 2025), es demasiado ácido para la levadura y para el paladar. La cocona tiene poco azúcar. El aguaje aporta grasa. La dilución con agua resuelve en parte los tres problemas: baja la acidez, reduce la concentración de compuestos amargos y aumenta el volumen de producto por kilogramo de fruto. La contrapartida es la dilución de lo que da identidad al producto: aroma, color y compuestos bioactivos.

La dilución es la primera decisión de formulación. En el vino dulce de camu camu de la Universidad Nacional de Ucayali se compararon relaciones pulpa:agua de 1:1, 1:2 y 1:3, y la más aceptada fue la de 1:3; la dilución también influyó en el tiempo de fermentación, que se alargó de 192 a 338 horas a medida que bajaba la proporción de pulpa (Vasquez Shuña, 2020). Ese resultado muestra que la dilución es, por lo tanto, una variable de diseño y debería tratarse como factor en los experimentos, no como una constante heredada de una receta.

5.2.2. Corrección de azúcar

La corrección de azúcar, o chaptalización, se calcula con las relaciones estequiométricas del capítulo III. El procedimiento práctico tiene cuatro pasos: medir los sólidos solubles del mosto diluido, estimar los azúcares fermentables presentes, calcular el azúcar total necesario para el grado alcohólico objetivo con una eficiencia realista, y restar. La sacarosa se añade disuelta en una porción del mosto para no dejar cristales sin disolver en el fondo del tanque.

Ejemplo 5.1. Chaptalización de un mosto de cocona

Se dispone de 100 L de mosto de cocona diluido con 4,5 °Brix, de los cuales se asume, por falta de un análisis de azúcares, que unos 40 g/L son fermentables. Se busca un vino de 11 % v/v.

- Etanol necesario: 11 % v/v × 7,89 g/L por cada 1 % = 86,8 g/L.
- Con un rendimiento real de 0,47 g/g, cercano al 92 % del teórico, el azúcar fermentable total necesario es 86,8/0,47 = 184,7 g/L.
- Azúcar por añadir: 184,7 − 40 = 144,7 g/L, es decir, unos 14,5 kg de sacarosa para 100 L. El volumen final aumentará algo más de 9 L por el azúcar disuelto, lo que diluye ligeramente el resultado; en la práctica se recalcula una vez con el volumen corregido.

El supuesto de 40 g/L de azúcares fermentables es el punto débil del cálculo. Un análisis por DNS o por HPLC antes de corregir cuesta poco y evita un error que después solo se corrige mezclando lotes.

Cuando la corrección es grande conviene fraccionarla. El capítulo IV mostró, con el modelo de Andrews, que una concentración inicial muy alta de azúcar frena el arranque. Añadir la mitad de la sacarosa al inicio y el resto cuando el °Brix baja a la mitad es una forma simple de lote alimentado que reduce el estrés osmótico sin equipos adicionales.

5.2.3. Acidez y pH

La acidez del camu camu protege el mosto frente a bacterias, pero puede ser excesiva para la levadura y para el consumidor. Las opciones de ajuste son tres: diluir, desacidificar químicamente con carbonato de calcio o de potasio, o mezclar con una fruta menos ácida. La tercera es la más interesante desde el punto de vista del producto. En el caso inverso, la cocona o el aguaje, de acidez moderada, pueden necesitar ácido cítrico o tartárico para llevar el pH por debajo de 3,8 y ganar estabilidad microbiológica.

5.2.4. Nutrientes nitrogenados

Los mostos de fruta, a diferencia del mosto de uva, suelen ser pobres en nitrógeno asimilable por la levadura, y la falta de nitrógeno es una de las causas más documentadas de fermentaciones lentas o detenidas (Bisson, 1999). En la planta piloto de la FIQ-UNAP el mosto de caña se suplementó con sales de amonio y de zinc, manganeso y magnesio (Barrera Vela y Reyes Muro, 2015). En el vino de guanábana con levadura nativa se añadieron, por cada 100 mL de mosto, 0,08 g de KH_2PO_4, 0,06 g de sulfato de amonio y 0,02 g de metabisulfito de sodio (Batista et al., 2025). Ninguno de los trabajos regionales revisados midió el nitrógeno asimilable del mosto antes de suplementar, de modo que las dosis provienen de la costumbre más que del diagnóstico. Medirlo por el método del formol o por kits enzimáticos permitiría ajustar la dosis a cada fruta.

5.3. Sulfitado

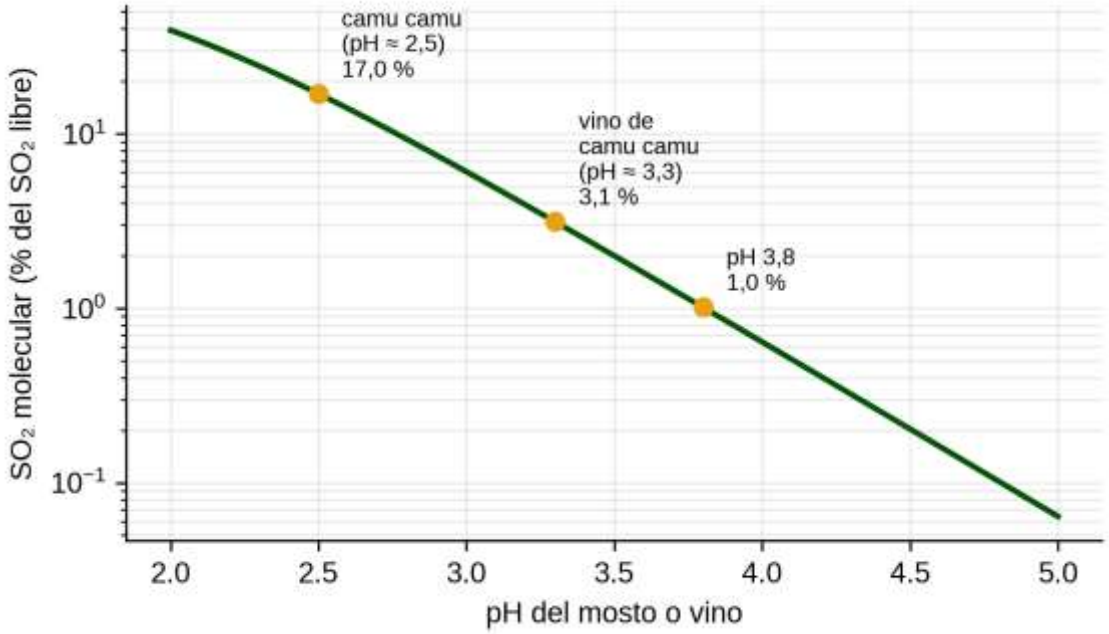
5.3.1. Función y formas químicas

El dióxido de azufre cumple dos funciones en un vino: inhibe bacterias y levaduras no deseadas y protege frente a la oxidación. Se añade como metabisulfito de potasio ($K_2S_2O_5$), que aporta en teoría el 57,6 % de su masa como SO_2, o de sodio. En solución, el SO_2 se reparte entre la forma molecular, el bisulfito y el sulfito según el pH, y solo la forma molecular tiene acción antimicrobiana significativa (Ribéreau-Gayon et al., 2006). La fracción molecular se calcula con la primera constante de disociación del ácido sulfuroso, cuyo pKa es 1,81:

$$\mathrm{SO_2\ molecular} = \frac{\mathrm{SO_2\ libre}}{1 + 10^{\mathrm{pH} - 1{,}81}} \qquad (5.1)$$

Figura 17.

Fracción de SO_2 molecular en función del pH



Nota. Cálculo propio con $pKa_1 = 1,81$ y $pKa_2 = 7,2$. Los puntos marcan pH representativos de la pulpa y el vino de camu camu.

5.3.2. Implicaciones para las frutas amazónicas

La Figura 17 explica por qué el camu camu es una fruta fácil de proteger con poco sulfito: a pH 3,3, cercano al del vino dulce de camu camu de la Universidad Nacional de Ucayali, alrededor del 3 % del SO_2 libre está en forma molecular, mientras que a pH 3,8 la fracción baja a cerca del 1 %. Para lograr la misma protección, un vino de cocona o de aguaje con pH cercano a 3,8 necesitaría unas tres veces más SO_2 libre que uno de camu camu. En enología de uva suele citarse un objetivo de 0,8 mg/L de SO_2 molecular para una protección adecuada (Ribéreau-Gayon et al., 2006). A pH 3,3 eso equivale a unos 26 mg/L de SO_2 libre; a pH 3,8, a unos 80 mg/L.

Hay una segunda consecuencia menos obvia. El ácido ascórbico del camu camu es un antioxidante que compite con el SO_2 en la protección frente al oxígeno, pero al oxidarse genera peróxido de hidrógeno, que a su vez puede oxidar otros componentes si no hay SO_2 libre suficiente. En vinos blancos de uva se recomienda por eso no usar ácido ascórbico sin sulfito (Ribéreau-Gayon et al., 2006). En el camu camu el ácido ascórbico ya viene en la fruta, en concentraciones muy superiores a las que se añaden en bodega, y la interacción

entre ambos compuestos durante la vinificación no ha sido estudiada. Es una línea de investigación con respuesta práctica directa.

5.4. Inoculación y conducción de la fermentación

5.4.1. Preparación del inóculo

La levadura seca activa se rehidrata en agua o en mosto diluido a una temperatura cercana a 35–40 °C durante 15 a 30 minutos, según las indicaciones del fabricante, y se incorpora al mosto cuando la diferencia de temperatura entre ambos es pequeña, para evitar un choque térmico. La dosis reportada para el vino de camu camu es de 20 g de levadura de panificación por cada 2 L de mosto (Maeda y Andrade, citados en Batista et al., 2025), cifra alta si se compara con las dosis habituales de levaduras vínicas, y que probablemente compensa la menor vitalidad de una levadura no diseñada para vino. En la planta piloto de la FIQ-UNAP se usan prefermentadores que representan entre el 15 y el 20 % del volumen del fermentador principal (Barrera Vela y Reyes Muro, 2015), práctica común en destilerías que permite inocular con levadura en fase activa.

5.4.2. Temperatura

La temperatura es la variable de conducción más importante. A temperaturas bajas, entre 15 y 20 °C, la fermentación es lenta pero conserva los ésteres aromáticos; a temperaturas altas, por encima de 30 °C, es rápida pero pierde aroma y aumenta el riesgo de que la levadura se detenga. El vino de camu camu de Maeda y Andrade se fermentó a 25 °C durante 25 días; el de pijuayo, a 27 °C durante 7 días; el de caña de la planta piloto, a 29 °C (Barrera Vela y Reyes Muro, 2015; Batista et al., 2025). En Iquitos, con temperaturas ambientales que rara vez bajan de 22 °C, el control térmico es el principal costo de operar a 18–20 °C, y la mayoría de los productores artesanales fermenta a temperatura ambiente. La fermentación libera calor, y en tanques grandes sin camisa de enfriamiento la temperatura interna puede superar a la del ambiente durante la fase tumultuosa. Un termómetro en el centro del tanque es la inversión más barata y la que más información da.

5.4.3. Seguimiento

El seguimiento mínimo de una fermentación de fruta incluye °Brix o densidad, temperatura y pH, medidos una o dos veces al día. La caída de la densidad es la forma más directa de seguir el consumo de azúcar y permite estimar el alcohol formado con la relación empírica presentada en el capítulo III. Cuando la densidad deja de bajar durante dos días consecutivos, la fermentación terminó o se detuvo; distinguir entre ambos casos requiere medir el azúcar residual.

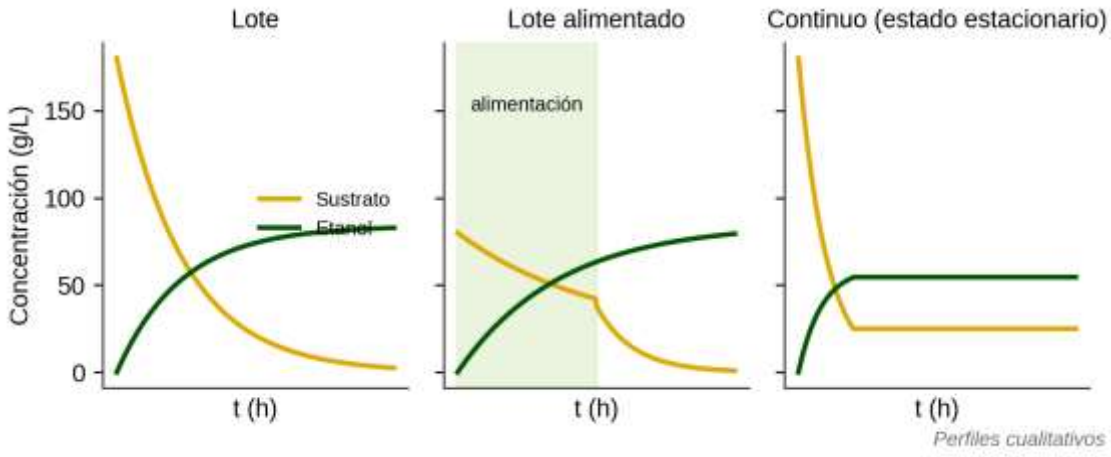
5.5. Modos de operación

5.5.1. Lote, lote alimentado y continuo

La mayoría de los vinos y bebidas de fruta se fermentan en lote: se llena el tanque, se inocula y se espera a que termine. El lote alimentado añade mosto o azúcar durante la fermentación, y el continuo alimenta y extrae a caudal constante (Figura 18). Cada modo tiene ventajas propias. El lote es simple y cada tanque es una unidad de trazabilidad; el alimentado reduce la inhibición por sustrato; el continuo maximiza la productividad en instalaciones grandes y con sustrato homogéneo, condición que casi nunca se cumple con fruta de temporada.

Figura 18.

Evolución del volumen y de las concentraciones en los tres modos de operación



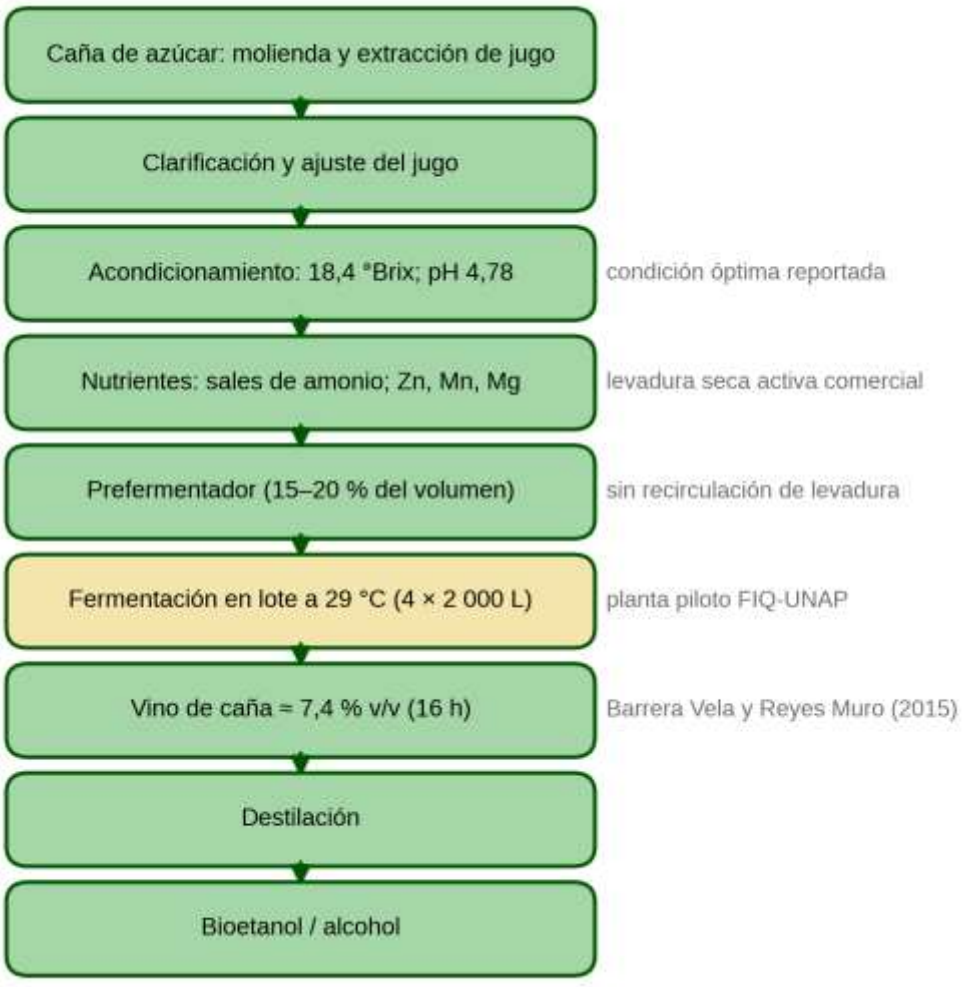
Nota. Perfiles cualitativos de elaboración propia.

5.5.2. El caso de la planta piloto de la FIQ-UNAP

La planta piloto de alcohol de la FIQ-UNAP es la referencia regional más cercana a una operación industrial. Funciona con cuatro fermentadores de 2 000 L en lote, sin recirculación de levadura, alimentados desde prefermentadores (Figura 19). Con jugo de caña ajustado a 18,4 °Brix y pH 4,78, a 29 °C, se obtuvo 7,4 % v/v de etanol en 16 h, frente a los 6,5 a 7,1 °GL en 72 h de la destilería tomada como referencia (Barrera Vela y Reyes Muro, 2015).

Figura 19.

Esquema del proceso de fermentación en la planta piloto de alcohol de la FIQ-UNAP



Nota. Elaboración propia a partir de Barrera Vela y Reyes Muro (2015).

La instalación fue diseñada para caña, pero sus equipos sirven para mostos de fruta con cambios menores. Dos adaptaciones serían necesarias: un sistema de

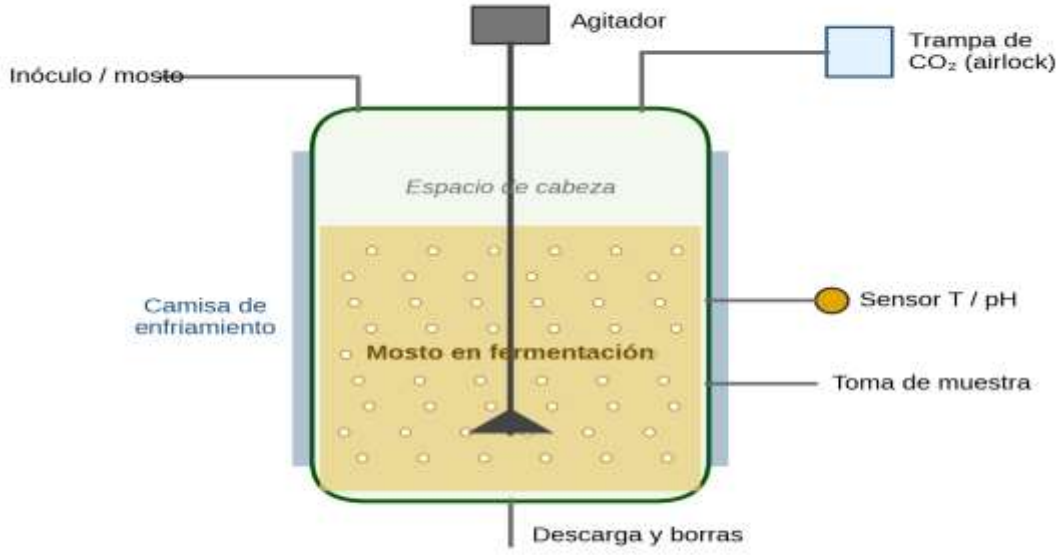
enfriamiento que permita fermentar por debajo de 25 °C, porque un vino de fruta a 29 °C pierde buena parte de su aroma, y un protocolo de limpieza y sanitización entre lotes de caña y de fruta, porque la carga microbiana de un jugo de caña fermentado a alta temperatura no debe pasar a un vino. Con esas dos condiciones, la planta podría servir para ensayos de escalamiento de vino de camu camu, vinagre y destilados de fruta, y generar los datos a escala piloto que la región no tiene (capítulo IX).

5.5.3. El fermentador

Un fermentador para vino de fruta no necesita la complejidad de un biorreactor farmacéutico. Los elementos esenciales se muestran en la Figura 20: un tanque de acero inoxidable con camisa de enfriamiento, una válvula de salida de CO_2 que impida la entrada de aire, un punto de muestreo, una válvula de descarga en el fondo para retirar las borras y, si el presupuesto lo permite, sensores de temperatura y pH con registro continuo. La agitación suele limitarse a remontados periódicos. Para vinagre sumergido, en cambio, el tanque necesita un sistema de aireación y un agitador que distribuya el aire, y el diseño se acerca al de un biorreactor aerobio convencional.

Figura 20.

Elementos básicos de un fermentador para vino de fruta



Nota. Esquema de elaboración propia.

5.6. Operaciones posteriores a la fermentación

5.6.1. Trasiego y clarificación

Terminada la fermentación, las levaduras y las partículas de pulpa sedimentan formando las borras o lías. El trasiego consiste en pasar el vino a otro recipiente dejando las borras en el fondo, y se repite dos o tres veces a lo largo de varias semanas. Dejar el vino sobre borras muertas por mucho tiempo favorece la aparición de olores sulfhídricos. La clarificación se completa con agentes clarificantes como bentonita, gelatina o proteínas vegetales, o con frío, que precipita partículas en suspensión y algunas sales (Ribéreau-Gayon et al., 2006). En los vinos de frutas con mucha pectina, un tratamiento enzimático previo reduce la cantidad de clarificante necesaria.

5.6.2. Estabilización y maduración

Un vino de fruta puede consumirse joven o madurar algunos meses. Durante la maduración conviene mantener los recipientes llenos, sin espacio de cabeza, y el SO_2 libre en el nivel que corresponda a su pH (sección 5.3). Si se busca un vino dulce, como el de camu camu con azúcar residual de la Universidad Nacional de Ucayali (Vasquez Shuña, 2020), la estabilización es obligatoria: un vino con azúcar y levaduras viables volverá a fermentar en la botella. Las opciones son la filtración esterilizante, la pasteurización o la adición de sorbato de potasio junto con SO_2. En ese vino, la fermentación se cortó al llegar a 12,5 °Brix con 200 mg/L de metabisulfito de potasio, después de haber añadido 50 mg/L al mosto antes de inocular; luego vinieron dos trasiegos, un filtrado y una clarificación con bentonita a 1 g por litro (Vasquez Shuña, 2020). La dosis de corte es alta si se compara con el cálculo de SO_2 molecular de la sección 5.3, y un ensayo que la reduzca, midiendo el SO_2 libre y la estabilidad del vino, sería útil para los productores.

5.6.3. Pasteurización

La pasteurización del vino de camu camu se reporta a 70 °C durante 15 minutos, antes del enfriamiento y la filtración (Maeda y Andrade, citados en Batista et al., 2025). Es un tratamiento eficaz contra levaduras y bacterias acéticas, pero no es inocuo para el producto: el calor acelera la degradación del ácido ascórbico y

puede alterar el aroma. En un producto cuyo argumento de venta sea la vitamina C, la pasteurización en botella con tiempos cortos o la filtración esterilizante son alternativas que conviene evaluar con mediciones antes y después del tratamiento.

5.7. Vinagre de fruta

5.7.1. Dos etapas

La elaboración de vinagre de fruta tiene dos fermentaciones sucesivas: una alcohólica, que produce un vino de base, y una acética, en la que bacterias del género *Acetobacter*, *Gluconobacter* o afines oxidan el etanol a ácido acético (Mas et al., 2014). La Figura 21 muestra la secuencia. El vino de base debe tener un grado alcohólico moderado, porque el rendimiento de ácido acético depende del etanol disponible (1,304 g de ácido por g de etanol en teoría, capítulo III) y porque una concentración alta de etanol inhibe a las bacterias acéticas al inicio.

Figura 21.

Diagrama de flujo para la elaboración de vinagre de fruta



Nota. Elaboración propia con base en Mas et al. (2014) y Solieri y Giudici (2009).

5.7.2. Métodos de acetificación

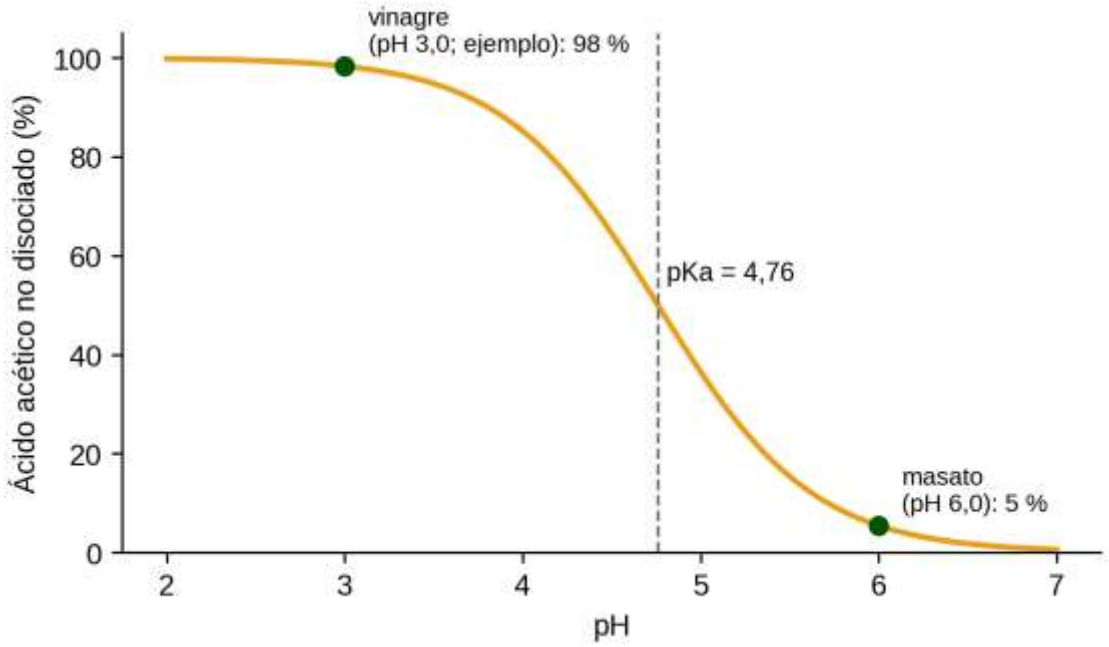
Existen dos familias de métodos (Solieri y Giudici, 2009). En el método de superficie, u Orleans, la película bacteriana crece sobre el vino en recipientes parcialmente llenos, en contacto con el aire; el proceso tarda semanas y da vinagres de aroma complejo. En el método sumergido, el vino se airea de forma forzada en un acetificador y el proceso se completa en uno o dos días. Para una planta pequeña en la región, el método de superficie con inóculo de un vinagre anterior no pasteurizado, la llamada madre del vinagre, es la opción de menor inversión.

El ácido acético no disociado es la forma que atraviesa las membranas y ejerce la acción antimicrobiana. Su fracción depende del pH según el pKa de 4,76 (Figura 22). En un vinagre con pH 3,0, alrededor del 98 % del ácido está no

disociado, lo que explica la estabilidad del producto. En el masato, con pH 6,0, apenas el 5 % del ácido acético presente estaría en esa forma.

Figura 22.

Fracción de ácido acético no disociado en función del pH



Nota. Cálculo propio con pKa = 4,76. El pH del vinagre es un valor de ejemplo; el del masato corresponde a Yupanqui (2024).

5.7.3. Datos disponibles

Los datos regionales sobre vinagre de fruta son escasos: no encontramos vinagres de camu camu, cocona o aguajes caracterizados en trabajos con autoría verificable. Para planificar la acetificación hay que apoyarse en la literatura general. Los vinagres de vino se elaboran con vinos de base de graduación moderada, y el seguimiento mínimo incluye la acidez total, expresada en gramos de ácido acético por 100 mL, y el etanol residual, que debe quedar bajo, pero no nulo para evitar la sobreoxidación del ácido acético a CO_2 y agua por algunas bacterias acéticas (Mas et al., 2014). Las cepas de arranque se seleccionan por su velocidad de acetificación y su tolerancia al etanol y a la acidez (Gullo y Giudici, 2008).

5.8. Destilación

5.8.1. Principio

La destilación separa el etanol del vino por diferencia de volatilidad. El etanol hierve a 78,3 °C y el agua a 100 °C, de modo que el vapor que sale de un vino en ebullición está enriquecido en alcohol. La mezcla etanol-agua forma un azeótropo con 95,6 % en masa de etanol, y por destilación simple no se puede superar esa concentración. Para aguardientes y licores eso no es una limitación, porque el destilado se diluye después a 35–45 °GL.

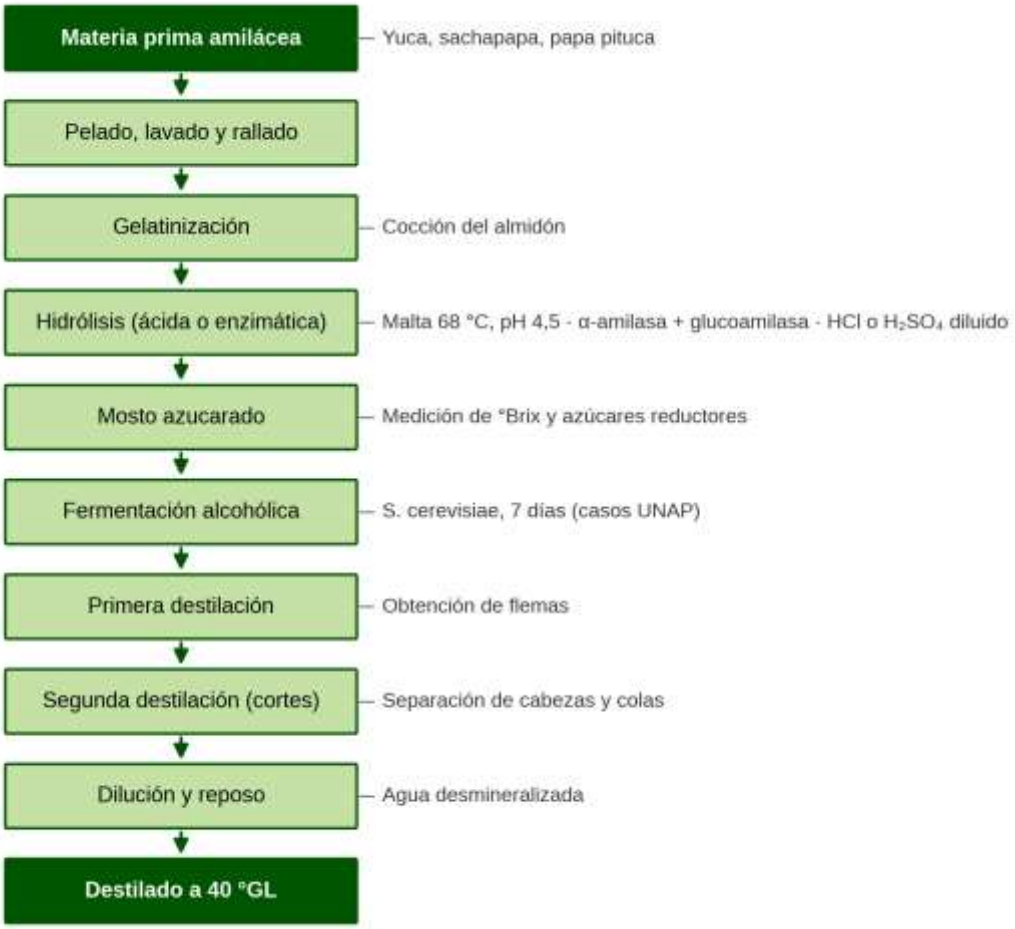
5.8.2. Cabezas, corazón y colas

Durante la destilación discontinua en alambique la composición del destilado cambia con el tiempo. Las primeras fracciones, o cabezas, concentran los compuestos más volátiles, entre ellos acetaldehído, acetato de etilo y buena parte del metanol. Le sigue el corazón, la fracción comercial. Al final salen las colas, ricas en alcoholes superiores y en compuestos menos volátiles. La separación correcta de las cabezas es un requisito de inocuidad cuando el vino de base proviene de frutas con pectina, por el metanol que se discutió en el capítulo III.

La Figura 23 muestra la secuencia de un destilado de sustrato amiláceo como los elaborados en la UNAP con sachapapa. En el vodka de sachapapa, los mejores resultados se obtuvieron con una proporción almidón:malta de 30:15 y maceración durante 90 minutos a 68 °C; el mosto alcanzó 11,33 °Brix y el destilado final se ajustó a 40 °GL sin metanol detectable (Ramírez Trujillo y Urrutia Vílchez, s. f.).

Figura 23.

Diagrama de flujo para destilados de sustratos amiláceos amazónicos



Nota. Elaboración propia con base en Ramírez Trujillo y Urrutia Vílchez (s. f.).

5.8.3. Destilados de fruta

No se encontraron en la revisión aguardientes de camu camu, cocona o aguaje con caracterización química publicada. El camino técnico es conocido: destilar un vino de fruta seco, separar cabezas y colas, y reducir con agua desmineralizada. Lo que falta es el dato: rendimiento de destilado por kilogramo de fruta, contenido de metanol y de alcoholes superiores, y perfil aromático. Un aguardiente de fruta amazónica con cabezas bien separadas podría ser un producto con valor agregado alto y con una vida útil que no depende de la cadena de frío.

5.9. Hidrólisis de sustratos amiláceos

Las raíces y tubérculos amazónicos, como la yuca y la sachapapa, y los frutos con almidón, como el pijuayo, no pueden fermentarse directamente con *S. cerevisiae*, que no hidroliza el almidón. Hace falta una etapa previa de sacarificación, química o enzimática. En la hidrólisis ácida se usan ácidos minerales diluidos a temperatura alta; es barata, pero degrada parte de los azúcares. En la enzimática, las amilasas de la cebada malteada o las enzimas comerciales hidrolizan el almidón en condiciones suaves, como en el vodka de sachapapa de la UNAP, macerado con malta a 68 °C durante 90 minutos (Ramírez Trujillo y Urrutia Vílchez, s. f.).

La hidrólisis enzimática, con α-amilasa para licuar y glucoamilasa para sacarificar, requiere condiciones más suaves y no genera los productos de degradación que la hidrólisis ácida forma a partir de los azúcares, como el hidroximetilfurfural, que inhiben a la levadura. En el masato de la Universidad Nacional de Ucayali la enzima reemplazó a la saliva o al camote de la preparación tradicional: una α-amilasa fúngica al 0,3 % (Yupanqui, 2024). Para una planta que procese pijuayo o yuca con fines alimentarios, la vía enzimática es la recomendable.

5.10. Balance de materia de un lote

Un balance de materia sencillo organiza la información del proceso y permite detectar pérdidas. La Tabla 12 muestra un balance para 100 kg de camu camu procesados según el diagrama de la Figura 16, con las cifras que pueden fijarse a partir de las fuentes y las que deben medirse.

Tabla 12.

Balance de materia orientativo para un lote de vino de camu camu

Corriente	Cantidad	Base del dato
Fruto recibido	100 kg	Base de cálculo
Vino obtenido	≈ 240 L	Relación de 300,85 L por 125,27 kg de fruto (Dávila López et al., 2015)
Relación pulpa:agua en el mosto	1:3	Vasquez Shuña (2020)
Cáscara, semilla y descarte	Por medir	Depende de la variedad y la madurez
Sacarosa añadida	Por calcular	Ejemplo 5.1, según el °GL objetivo y los azúcares de la pulpa

Corriente	Cantidad	Base del dato
Borras de trasiego	Por medir	Suelen retirarse en dos o tres trasiegos
Vapor y energía por turno de 8 h	75,55 kg de vapor; 5,06 kW	Dávila López et al. (2015), para 125,27 kg de fruto

Nota. Balance orientativo. Las filas marcadas "por medir" o "por calcular" deben completarse con datos propios de cada planta.

La tabla deja ver un vacío de información que se repite en casi todos los trabajos regionales: se reporta el producto, pero no los subproductos. Sin la masa de cáscara y semilla no se puede evaluar su valorización, y sin la masa de borras no se puede cerrar el balance ni estimar la pérdida de vino por trasiego.

5.11. Problemas resueltos de proceso

Los problemas siguientes reúnen cálculos que un responsable de producción debe hacer antes de cada lote. Se resuelven con las relaciones de los capítulos III y V.

5.11.1. Dosis de sulfito

Se tienen 500 L de vino de camu camu con pH 3,3 y se busca 0,8 mg/L de SO_2 molecular. Con la ecuación (5.1), la fracción molecular a pH 3,3 es 1/[1 + 10 elevado a (3,3 − 1,81)] = 1/(1 + 30,9) = 0,031. El SO_2 libre necesario es 0,8/0,031 = 25,5 mg/L, y para 500 L son 12,8 g de SO_2. Como el metabisulfito de potasio aporta en teoría el 57,6 % de su masa como SO_2, hacen falta 12,8/0,576 = 22,2 g. En la práctica, una parte del SO_2 añadido se combina con acetaldehído y otros compuestos y deja de estar libre, de modo que la dosis real es mayor. Lo correcto es añadir la dosis calculada, medir el SO_2 libre al día siguiente y corregir. Si el mismo cálculo se hace para un vino de cocona con pH 3,8, la fracción molecular baja a 0,010 y el SO_2 libre necesario sube a unos 79 mg/L, tres veces más.

5.11.2. Volumen de inóculo

En un fermentador de 2 000 L se quiere inocular con un prefermentador en fase activa que represente entre el 15 y el 20 % del volumen, como en la planta piloto de la FIQ-UNAP (Barrera Vela y Reyes Muro, 2015). El prefermentador debe tener entre 300 y 400 L de mosto en fermentación activa. Si se prepara con 24 horas de anticipación, su mosto debe tener menos azúcar que el del fermentador

principal y aireación inicial, para favorecer la biomasa y no el etanol, como se explicó en el capítulo III al tratar el efecto Crabtree.

5.11.3. Rendimiento de destilado

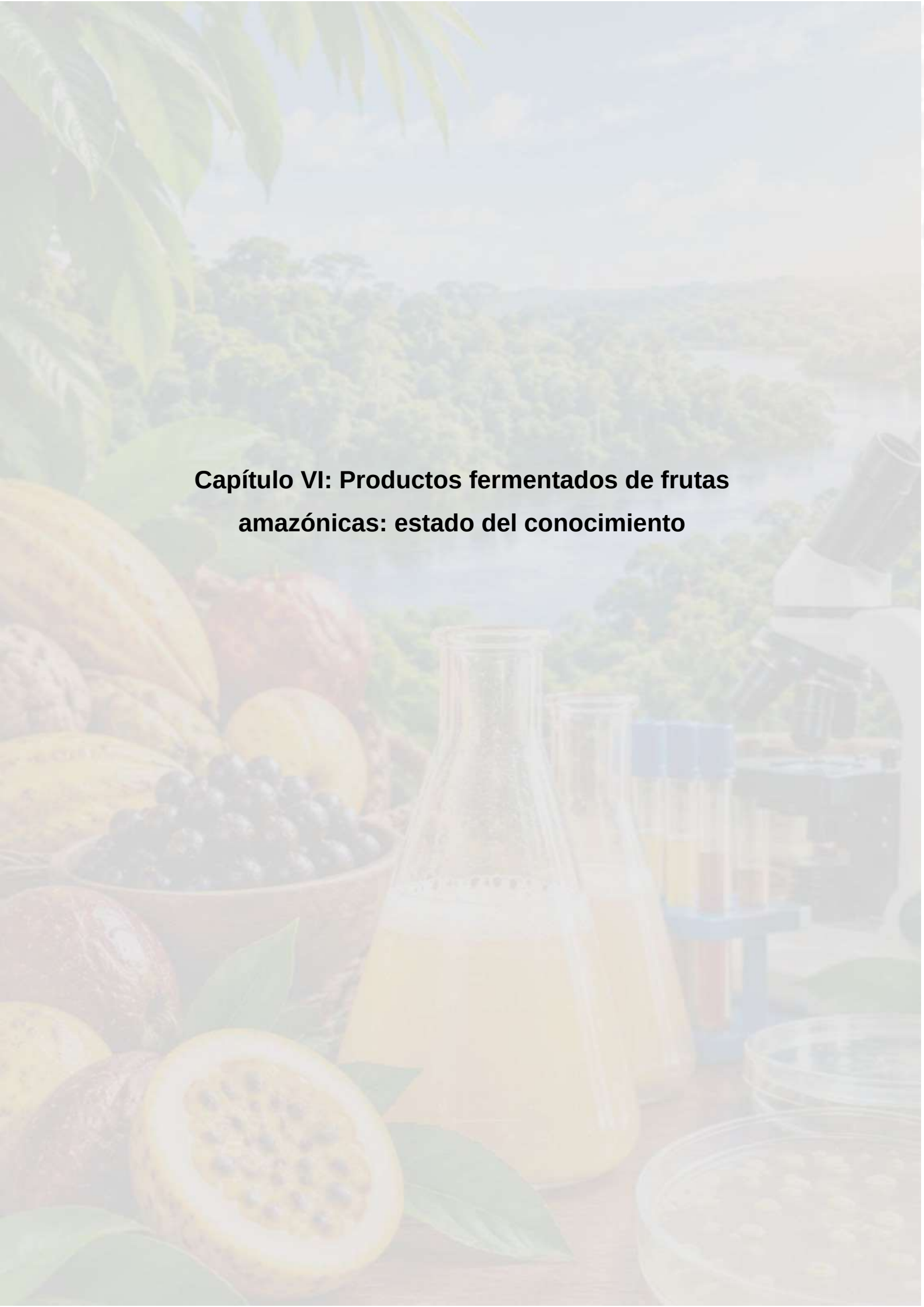
Se destilan 1 000 L de vino de fruta con 11 % v/v. El vino contiene 110 L de etanol absoluto. Si en el corazón de la destilación se recupera el 90 % de ese etanol, después de separar cabezas y colas, se obtienen 99 L de etanol absoluto, que diluidos a 40 % v/v dan 247,5 L de aguardiente. Con la relación de 2,4 L de vino por kilogramo de fruto estimada para camu camu (Dávila López et al., 2015), esos 1 000 L de vino corresponden a unos 417 kg de fruto, es decir, cerca de 0,6 L de aguardiente a 40 % por kilogramo de fruto. La cifra depende del azúcar añadido al mosto, que es de donde proviene casi todo el alcohol.

5.11.4. Acidez esperada de un vinagre

Un vino de base de 6 % v/v se acetifica por completo. El etanol del vino es 60 mL/L × 0,789 g/mL = 47,3 g/L, y el ácido acético teórico es 47,3 × 1,304 = 61,7 g/L, equivalente a 6,2 g por 100 mL. Si la conversión real es del 90 %, por pérdidas de etanol por evaporación y por consumo bacteriano, la acidez esperada es de unos 5,6 g por 100 mL. El cálculo muestra por qué el grado alcohólico del vino de base debe fijarse según la acidez que se quiere en el vinagre, y no al revés.

5.12. Síntesis del capítulo

El proceso de elaboración de un vino, un vinagre o un destilado de fruta amazónica sigue la secuencia clásica de la enología, con ajustes impuestos por cada fruta: escaldado para el camu camu, corrección fuerte de azúcar para la cocona, sacarificación previa para los sustratos amiláceos. Tres puntos técnicos merecen atención especial. El pH bajo del camu camu hace que el SO_2 sea muy eficaz a dosis bajas, pero la interacción entre SO_2 y ácido ascórbico durante la vinificación no se ha estudiado. La nutrición nitrogenada se aplica por costumbre, sin medir el nitrógeno del mosto. Y la planta piloto de la FIQ-UNAP, con cuatro fermentadores de 2 000 L, es un recurso subutilizado que, con enfriamiento y un protocolo de sanitización, podría generar los primeros datos de escalamiento de vinos y vinagres de frutas nativas.



Capítulo VI: Productos fermentados de frutas amazónicas: estado del conocimiento

Productos fermentados de frutas amazónicas: estado del conocimiento

6.1. Un inventario necesario

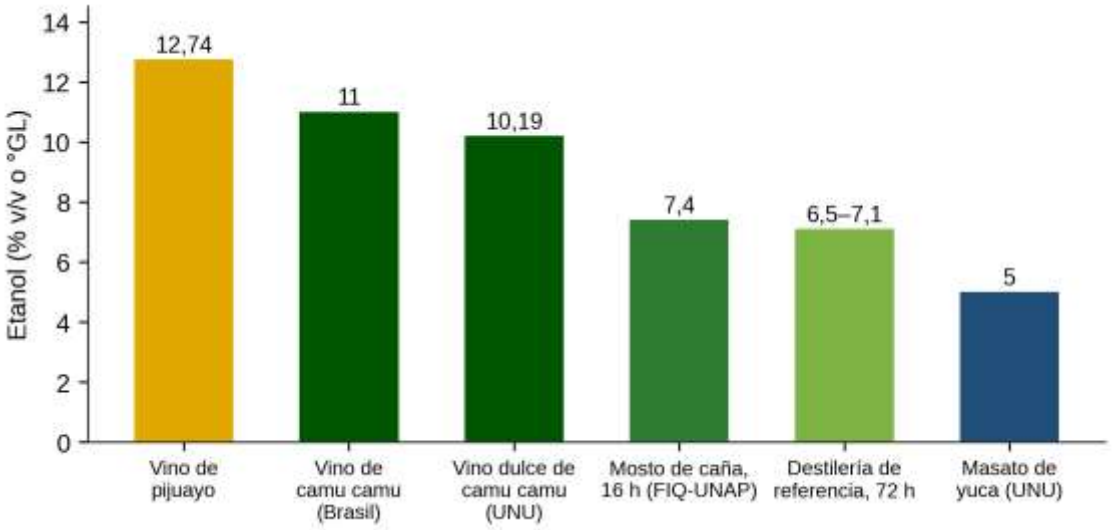
Este capítulo reúne lo que se ha publicado sobre productos fermentados elaborados con frutas y otros sustratos de la Amazonía: vinos, destilados, cervezas, vinagres, kombuchas, bebidas lácticas y fermentaciones tradicionales. La intención es doble. Por un lado, ofrecer al lector una referencia única con las condiciones de proceso y los resultados que cada trabajo reporta, transcritos con sus unidades originales. Por otro, mostrar dónde están los huecos. Para varios productos que se venden en Iquitos, como los vinos artesanales de camu camu o los licores macerados de frutas, no hay una sola caracterización publicada; para otros, como las bebidas lácticas de copoazú o taperibá, la literatura brasileña ofrece protocolos completos que podrían repetirse en Loreto con fruta local.

Las fuentes son de tres tipos: tesis de universidades peruanas, en particular de la UNAP y de la Universidad Nacional de Ucayali; artículos indexados, y la revisión de Batista et al. (2025) sobre bebidas fermentadas de frutas amazónicas, que sistematiza trabajos brasileños difíciles de consultar desde aquí. Cuando un dato proviene de un trabajo citado por esa revisión, se indica como cita secundaria.

La Figura 24 y la Figura 25 anticipan el panorama. Los productos van desde bebidas con menos de 3 % de alcohol hasta vinos de casi 13 % y destilados de 40 °GL, y desde el pH 2,3 de una bebida simbiótica de taperibá hasta el 6,2 de la chicha de bacaba.

Figura 24.

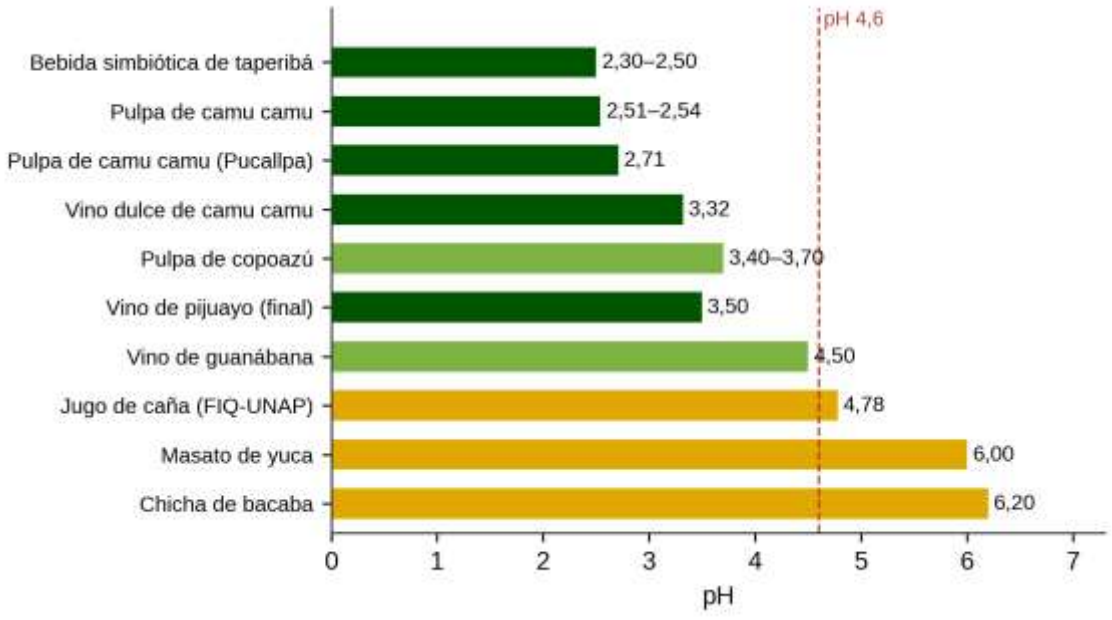
Contenido alcohólico de vinos y otros fermentados de sustratos amazónicos con datos publicados



Nota. Elaborado con datos de Vasquez Shuña (2020), Barrera Vela y Reyes Muro (2015), Yupanqui (2024) y los trabajos citados en Batista et al. (2025) para los vinos de pijuayo y de camu camu de Brasil.

Figura 25.

pH de pulpas y productos fermentados o acidificados de frutas amazónicas



Nota. Elaborado con datos de Batista et al. (2025), Vasquez Shuña (2020), Barrera Vela y Reyes Muro (2015) y Yupanqui (2024). La línea vertical marca pH 4,6, valor de referencia usual para separar alimentos ácidos de alimentos de baja acidez.

6.2. Vinos de fruta

6.2.1. Camu camu

El camu camu es la fruta amazónica con más trabajos de vinificación, aunque casi ninguno se ha publicado en revistas indexadas. En la Universidad Nacional de Ucayali se elaboró un vino dulce con una relación pulpa:agua de 1:3, fermentado durante 338 horas, que alcanzó 10,19 °GL, pH 3,32 y un rendimiento de 69,4 % (Vasquez Shuña, 2020). El trabajo comparó tres diluciones (1:1, 1:2 y 1:3) de un mosto ajustado a 22 °Brix con sacarosa, fermentado con la cepa vínica Montrachet y detenido al llegar a 12,5 °Brix. La dilución menor fermentó más rápido (192 horas frente a 338), pero el vino con dilución 1:3 obtuvo la mejor evaluación sensorial de un panel de 20 jueces no entrenados. La densidad final de ese vino fue de 1,0250 g/mL, dentro del intervalo que la norma técnica colombiana NTC 708 asigna a los vinos dulces de frutas, según la tesis.

En Brasil, Maeda y Andrade elaboraron vino de camu camu con pulpa escaldada a 90 °C durante 7 minutos y sin escaldar, corrigiendo el azúcar para 12 °GL y fermentando con 20 g de levadura de panificación por cada 2 L de mosto, durante 25 días a 25 °C. Ambos vinos llegaron a 11 % de alcohol, con una eficiencia fermentativa de 87 %, y obtuvieron una aceptabilidad de 69,2 % y 70,1 % (citados en Batista et al., 2025).

El trabajo de mayor alcance en la UNAP sobre este producto no es experimental. Dávila López et al. (2015) evaluaron la prefactibilidad de una planta de vino de camu camu en Loreto, estimaron una demanda insatisfecha de 451 272,56 L y propusieron una capacidad de 90 254,51 L anuales. Su discusión económica se retoma en el capítulo IX.

Con estos antecedentes, el estado del conocimiento sobre el vino de camu camu puede resumirse así: se sabe que la fruta fermenta bien una vez diluida y corregida, que el grado alcohólico de 10 a 11 % es alcanzable y que el producto es aceptado por los consumidores. No se sabe cuánto ácido ascórbico y cuántos fenoles sobreviven a la fermentación y al almacenamiento, qué compuestos volátiles definen su aroma ni cómo influye la cepa de levadura. Tampoco hay

datos cinéticos. Son las tres preguntas que un grupo de investigación en Iquitos podría responder con el equipamiento que ya existe.

6.2.2. Pijuayo

El pijuayo, o pupunha en Brasil, es un frutal muy difundido en las chacras de Loreto y tiene una particularidad que condiciona su procesamiento: no debe consumirse crudo, por la presencia de cristales de oxalato de calcio, lectinas, saponinas e inhibidores de amilasa y tripsina, y debe cocerse en agua con sal entre 30 y 60 minutos (Batista et al., 2025). Una formulación de vino con 1 kg de fruto, 4 L de solución de sacarosa y 1 % de *S. cerevisiae*, fermentada durante 7 días a 27 °C, produjo una bebida anaranjada con 12,74 % de alcohol, en la que el pH bajó de 6,0 a 3,5, los carotenoides se estabilizaron en 2,2 mg/100 mL de mosto y la aceptabilidad alcanzó 81,9 % (citado en Batista et al., 2025).

La cifra de aceptabilidad es la más alta entre los vinos de fruta amazónica revisados, y el color anaranjado de los carotenoides es un atributo diferenciador. Para Loreto, donde el pijuayo abunda y su precio en temporada es bajo, este es probablemente el vino de fruta con mejor relación entre disponibilidad de materia prima y potencial de producto.

6.2.3. Guanábana

La guanábana es un caso útil para discutir el uso de levaduras nativas. Un vino elaborado con pulpa pasteurizada, 15 g de sacarosa por cada 100 mL y nutrientes (0,08 g de KH_2PO_4, 0,06 g de sulfato de amonio y 0,02 g de metabisulfito de sodio), inoculado con una levadura aislada del propio jugo de guanábana fermentado durante dos días, alcanzó 16 % v/v en 10 días con pH final de 4,5. La levadura se aisló por estría en agar Sabouraud con 500 mg de cloranfenicol por placa (citado en Batista et al., 2025). Durante la fermentación aumentaron la acidez titulable, los lípidos y el alcohol, y disminuyeron la fibra, la proteína, los carbohidratos, el pH, la vitamina C y los °Brix.

Un 16 % v/v es un grado alto para una levadura nativa. Si el dato se confirma, indica que las frutas tropicales pueden albergar cepas con tolerancia al etanol comparable a la de las levaduras comerciales, lo que refuerza el argumento de bioprospección del capítulo II.

6.2.4. Otros vinos

No se encontraron vinos caracterizados de cocona, aguaje, arazá, copoazú ni ungurahui, pese a que las cinco frutas se consiguen en los mercados de Iquitos.

6.3. Destilados y licores

6.3.1. Vodkas de sustratos amiláceos

Los destilados son el grupo con más trabajos experimentales en la UNAP, aunque sus sustratos no son frutas. El vodka de sachapapa se elaboró con un diseño factorial 3^2; el mejor tratamiento usó una proporción almidón:malta de 30:15 y maceración de 90 minutos a 68 °C, el mosto alcanzó 11,33 °Brix y el destilado se ajustó a 40 °GL sin metanol detectable (Ramírez Trujillo y Urrutia Vílchez, s. f.). El trabajo sigue la ruta de la Figura 23 del capítulo V.

6.3.2. Licores de fruta

Los licores de fruta que se venden en Iquitos se preparan casi siempre por maceración de la fruta en aguardiente de caña, sin fermentación de la fruta misma. No encontramos licores de fruta amazónica caracterizados en trabajos con autoría verificable. En Brasil se ha reportado un licor de huasaí con 203 mg/L de antocianinas, frente a 17,31 mg/L en jugo de uva y entre 11 y 31,57 mg/L en vinos tintos (citado en Batista et al., 2025). La cifra sugiere que un licor de huasaí o de aguaje podría presentarse como fuente de pigmentos antioxidantes, aunque la comparación con vinos tintos debe tomarse con cautela, porque las antocianinas de un licor dependen mucho de la proporción de fruta y del tiempo de maceración.

6.4. Cervezas con frutas y tubérculos amazónicos

La cerveza es un vehículo interesante para las frutas amazónicas porque el consumidor ya la conoce y la fruta se usa como adjunto aromático. En la UNAP, Pereira Ramírez y Ríos Pérez (2023) elaboraron una cerveza tipo ale con sachapapa como adjunto y extracto de cocona. Usaron la levadura Safale US-05 y un preparado enzimático comercial, compararon proporciones de malta y sachapapa de 90:10, 80:20 y 70:30 con 30 % de extracto de cocona, y

encontraron que la formulación 90:10 fue la más aceptada en una prueba hedónica de 5 puntos con 30 panelistas.

En Brasil, una cervecería de Pará ganó el International Beer Challenge de 2014 con una cerveza de bacuri de 3,8 % de alcohol, descrita como clara, ligera, con espuma persistente y aroma frutal atribuido a la maduración con la fruta (citado en Batista et al., 2025). La receta no se publicó. Sí se publicó una cerveza con guanábana: 3,7 kg de malta Pilsen y 0,3 kg de malta Viena maceradas en 16 L de agua a 68 °C durante 60 minutos, 15 minutos de mash-out a 78 °C, 15,4 g de lúpulo, 60 minutos de hervido, fermentación a 19 °C durante 7 días con 8,05 g de levadura y maduración a 0 °C durante 10 días (citado en Batista et al., 2025). Es un protocolo casero, reproducible en cualquier laboratorio de la FIQ-UNAP con equipo de cervecería artesanal, que podría adaptarse sustituyendo la guanábana por cocona, camu camu o copoazú.

6.5. Vinagres

Los vinagres de fruta son, junto con las kombuchas, el producto fermentado de menor riesgo regulatorio: no contienen alcohol en cantidad significativa y su acidez los protege. No encontramos vinagres de camu camu, cocona o aguajes caracterizados en la literatura revisada.

La ausencia es llamativa porque el vinagre resuelve un problema del productor de vino artesanal: los lotes que se acetifican por error. Un vino de camu camu con acidez volátil alta no es vendible como vino, pero puede ser la base de un vinagre si se conduce la acetificación de forma controlada. Documentar ese aprovechamiento sería una contribución de interés tanto técnico como económico.

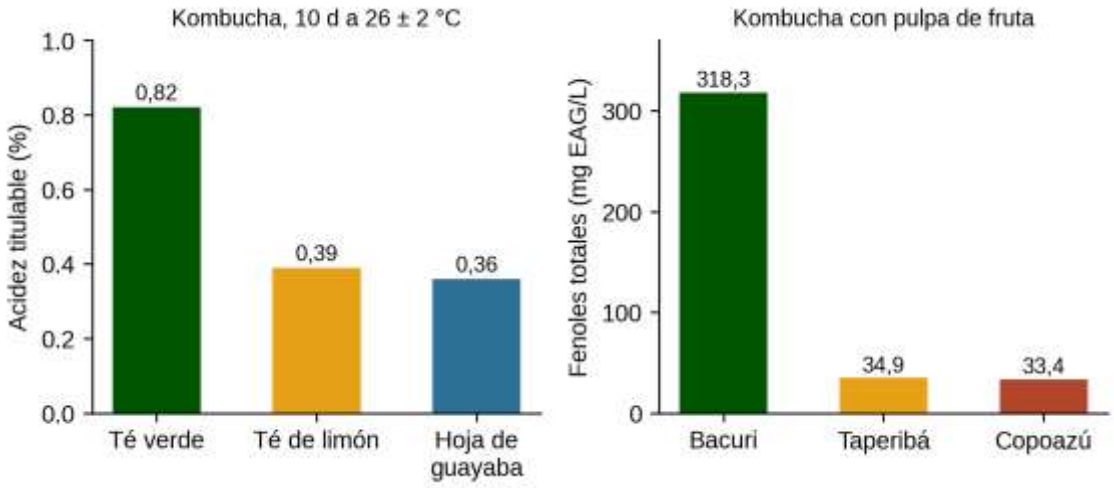
6.6. Kombuchas y bebidas con consorcios simbióticos

La kombucha se prepara fermentando té azucarado con un consorcio de levaduras y bacterias acéticas, y admite frutas en la formulación o en una segunda fermentación. Los datos de López Zazueta et al. (2022) sobre la acidez de kombuchas de té verde, té de limón y hoja de guayaba se presentaron en el capítulo II (Figura 4). A ellos se suma un trabajo con bacuri: una infusión de 14 g de té verde en 2 L de agua con 40 g de azúcar se inoculó con el SCOBY y se

incubó a 25 °C durante 7 días; después se añadió un 20 % de una formulación de pulpa de bacuri (100 g de pulpa, 150 mL de agua y 10 g de azúcar) y la bebida se embotelló y guardó al abrigo de la luz entre 24 y 36 horas (citado en Batista et al., 2025). El producto final tuvo 0,16 g/L de azúcares reductores, 2,27 g/L de etanol y 318,3 mg EAG/L de fenoles totales, frente a 34,92 y 33,40 mg EAG/L en kombuchas de taperibá y copoazú, respectivamente.

Figura 26.

Acidez titulable de kombuchas de distintas bases y fenoles totales de kombuchas con pulpa de fruta amazónica



Nota. Panel izquierdo con datos de López Zazueta et al. (2022); panel derecho con datos citados en Batista et al. (2025).

El contenido de etanol merece un comentario regulatorio. Con 2,27 g/L, la kombucha de bacuri tiene alrededor de 0,29 % v/v de alcohol, cifra que conviene controlar porque la segunda fermentación en botella puede aumentarla. Cualquier kombucha que se produzca en Loreto para la venta debería medir su alcohol al final de la vida útil y no solo al envasar.

6.7. Bebidas lácticas y probióticas

6.7.1. Con base de fruta

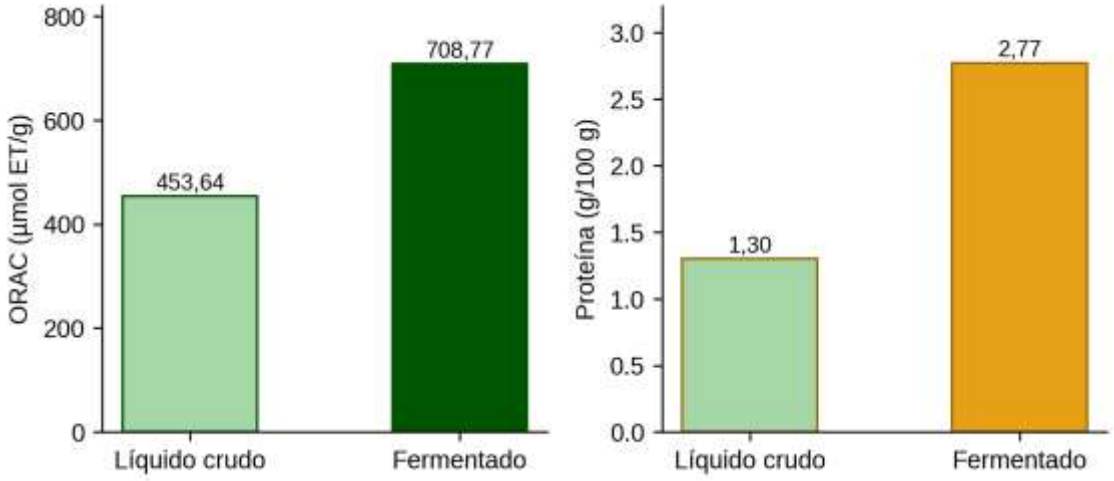
Las bebidas fermentadas con bacterias ácido-lácticas son, en la literatura brasileña, el grupo con más desarrollo experimental. La Tabla 13 reúne los protocolos principales. Tres casos ilustran el tipo de información disponible.

En copoazú, una bebida probiótica con *Lacticaseibacillus casei* NRRL B-442 se formuló con 34 % de pulpa, pH inicial 5,8 y fermentación a 30 °C durante unas 18 h. La fructosa fue el azúcar más consumido, con una reducción de 84,76 %, seguida de la sacarosa, con 62,10 %, y la bebida tuvo buena aceptación sensorial (citado en Batista et al., 2025).

En huasaí, la pulpa fermentada durante 6 días a 27 °C con *Lacticaseibacillus paracasei*, *Leuconostoc mesenteroides* y *Lactiplantibacillus plantarum* en proporción 0,5:1,0:1,5 y 2,5 % de fuente de nitrógeno aumentó su proteína de 1,30 a 2,77 g/100 g y su capacidad ORAC de 453,64 a 708,77 µmol ET/g (Figura 27). La fermentación generó además siete compuestos volátiles, entre ellos alcohol isoamílico, acetaldehído y acetato de etilo (citado en Batista et al., 2025).

Figura 27.

Capacidad antioxidante ORAC y proteína de la pulpa de huasaí antes y después de la fermentación láctica

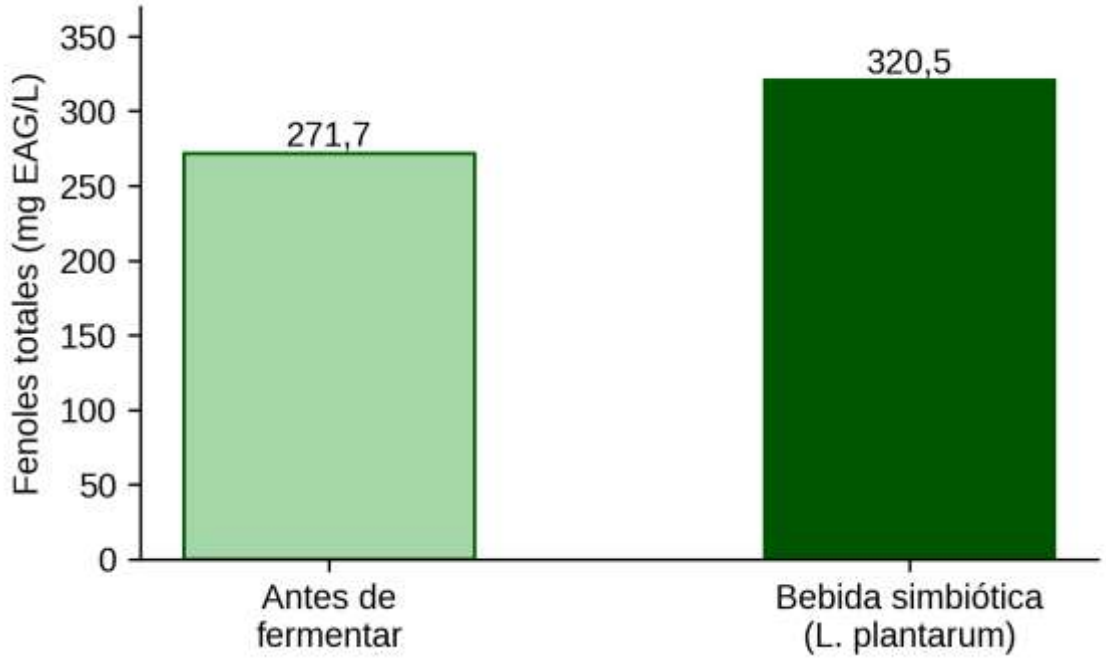


Nota. Elaborado con datos citados en Batista et al. (2025). ET = equivalentes de Trolox.

En taperibá, una bebida simbiótica con *Lactiplantibacillus plantarum* NRRL B-4496, fermentada a 30 °C durante 18 h con pH inicial de 4,5, mantuvo el pH entre 2,3 y 2,5 durante 28 días de almacenamiento, con una leve caída de la acidez de 0,79 a 0,76 mg de ácido cítrico/mL, y aumentó sus fenoles totales de 271,7 a 320,5 mg EAG/L (Figura 28) (citado en Batista et al., 2025).

Figura 28.

Fenoles totales de la bebida de taperibá antes y después de la fermentación con L. *plantarum*



Nota. Elaborado con datos citados en Batista et al. (2025). EAG = equivalentes de ácido gálico.

Los tres casos muestran un patrón que se repite en la literatura: la fermentación láctica no destruye los compuestos bioactivos de la fruta y, en algunos casos, aumenta los fenoles medibles o la capacidad antioxidante. Una explicación frecuente es la liberación de fenoles ligados por enzimas bacterianas, aunque también puede influir el método analítico, porque el reactivo de Folin-Ciocalteu responde a otros compuestos reductores que se forman durante la fermentación (capítulo VII).

Tabla 13.

Protocolos de bebidas fermentadas con bacterias ácido-lácticas a base de frutas amazónicas

Fruta	Microorganismos	Condiciones	Resultados relevantes	Fuente
Copoazú	*L. casei* NRRL B-442	34 % de pulpa; pH 5,8; 30 °C; ≈ 18 h	Consumo de fructosa 84,76 % y de sacarosa 62,10 %; buena aceptación	Citado en Batista et al. (2025)
Huasaí	*L. paracasei*, *Leuc. mesenteroides*, *L. plantarum* (0,5:1,0:1,5)	6 d; 27 °C; 2,5 % de fuente de N	Proteína 1,30 → 2,77 g/100 g; ORAC 453,64 → 708,77 µmol ET/g	Citado en Batista et al. (2025)

Fruta	Microorganismos	Condiciones	Resultados relevantes	Fuente
Taperibá	*L. plantarum* NRRL B-4496	30 °C; 18 h; pH 4,5; 10 % de inóculo	pH 2,3–2,5 en 28 d; fenoles 271,7 → 320,5 mg EAG/L	Citado en Batista et al. (2025)
Taperibá con *Talinum triangulare*	*L. casei* NRRL B-442 (7 log UFC/mL)	50 % de pulpa; 30 °C; 14 h	Fenoles 2,90 → 2,00 mg/100 mL en 42 d	Citado en Batista et al. (2025)
Camu camu (base de soya)	*L. helveticus*, *L. plantarum*	Fermentación láctica	Propiedades antihiperglucémicas y antihipertensivas in vitro	Fujita et al. (2017)

6.7.2. Con base láctea

Cuando la base es leche o lactosuero, la fruta se añade casi siempre después de la fermentación, como saborizante, lo que protege a las bacterias de la acidez de la pulpa. En camu camu, la leche tratada a 90 °C durante 15 minutos se fermentó a 42 °C con *Streptococcus thermophilus* y *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* hasta pH 4,5 y acidez superior a 0,90 % de ácido láctico; luego se añadió pulpa al 10, 13 y 15 %. El producto final tuvo pH medio de 4,08 y acidez de 1,01 %, dentro del intervalo legal brasileño para bebidas lácteas fermentadas, de 0,60 a 2,00 % (citado en Batista et al., 2025). Con aguaje se ha elaborado leche fermentada con *L. casei* SJRP38 y 1 % de pulpa, fermentada a 42 °C hasta pH 4,6 (citado en Batista et al., 2025).

En la UNAP y en otras universidades de la región se han formulado bebidas lácteas y yogures con fruta amazónica, pero no encontramos trabajos de este tipo con autoría verificable y datos completos. Los productos que se desarrollen deberían dar el paso que la literatura regional todavía no da: vida útil, recuento de bacterias viables al final del almacenamiento y, si se quiere hablar de probióticos, la cepa identificada y la dosis que llega al consumidor (Hill et al., 2014).

6.8. Fermentaciones tradicionales

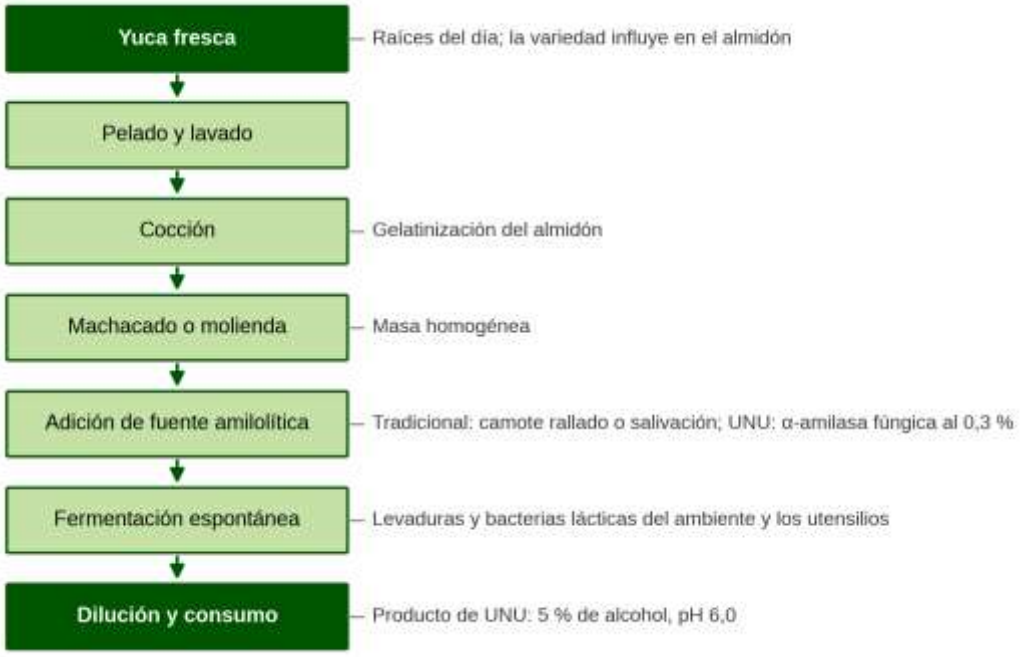
6.8.1. Masato y chichas amiláceas

El masato de yuca es la bebida fermentada tradicional más difundida en la Amazonía peruana. Su preparación sigue una secuencia de cocción, machacado, adición de una fuente de amilasa y fermentación espontánea de

pocos días (Figura 29). En la Universidad Nacional de Ucayali se estandarizó reemplazando la saliva o el camote por una α-amilasa fúngica al 0,3 %, con un producto final de 5 % de alcohol, pH 6,0, acidez de 0,72 % y 4,0 °Bx (Yupanqui, 2024).

Figura 29.

Elaboración tradicional y estandarizada del masato de yuca



Nota. Elaboración propia con base en Yupanqui (2024) y descripciones etnográficas generales.

El masato es también la fuente más estudiada de bacterias ácido-lácticas nativas del Perú (Rebaza-Cárdenas et al., 2023), y Colehour et al. (2014) mostraron, en cerveza de yuca de comunidades amazónicas, que la preparación tradicional mantiene comunidades microbianas estables. Para este libro, que trata de frutas, el masato importa por dos razones: es la prueba de que las fermentaciones amazónicas tienen una tradición técnica propia, y es un reservorio de microorganismos adaptados a la región que podrían usarse en productos de fruta.

6.8.2. Chichas de fruta

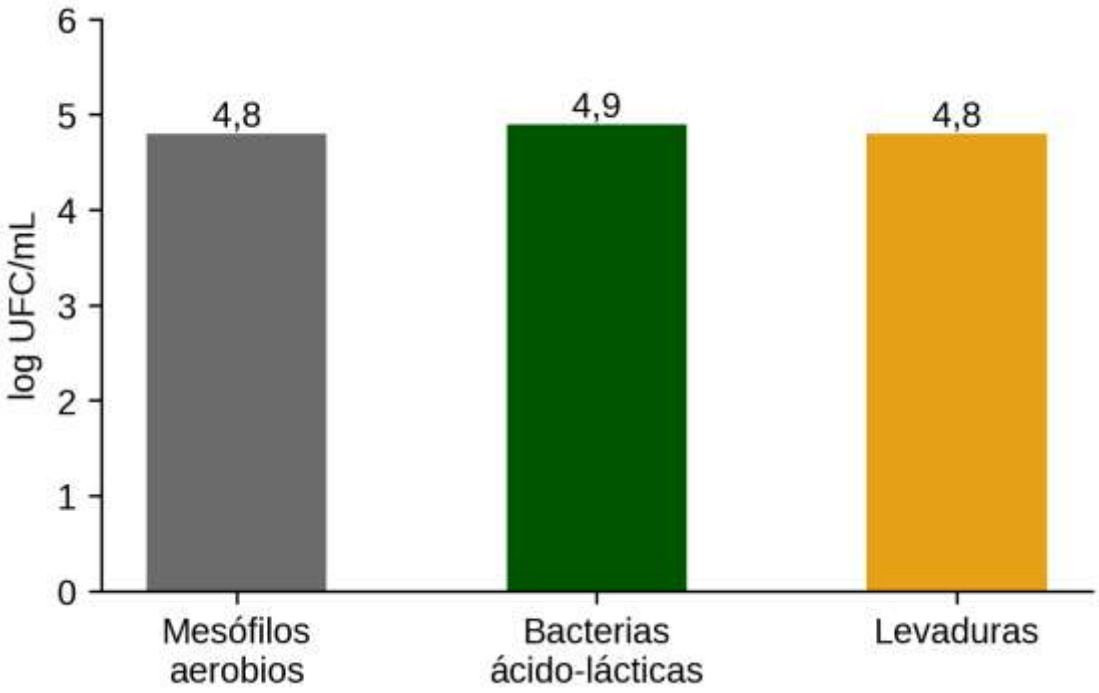
En la Amazonía ecuatoriana y en los llanos orientales de Colombia y Venezuela, los pueblos kichwa y guahibo fermentan el jugo de aguaje para preparar la chicha de morete. La pulpa triturada se deja fermentar entre 3 y 4 días con el líquido de

camote masticado como fuente de amilasa y de microorganismos, y los análisis microbiológicos reportan *S. cerevisiae*, bacterias de los géneros *Leuconostoc*, *Acetobacter* y *Lactobacillus*, y mohos como *Aspergillus* spp. (citado en Batista et al., 2025). Las chichas en general pueden tener entre 1 y 12 % v/v de alcohol.

La chicha de bacaba, preparada por pueblos indígenas de la Amazonía brasileña y colombiana, se fermenta alrededor de 30 horas a temperatura ambiente después de hervir los frutos, macerarlos y añadir jugo de caña. Su caracterización reportó recuentos de 4,8 log UFC/mL de mesófilos, 4,9 de bacterias ácido-lácticas y 4,8 de levaduras (Figura 30), pH 6,2, un aporte energético de 76,7 kcal/100 mL y apenas 0,52 g/L de etanol, sin metanol, de modo que se clasifica como bebida no alcohólica (citado en Batista et al., 2025).

Figura 30.

Recuentos microbianos en la chicha de bacaba al final de la fermentación



Nota. Elaborado con datos citados en Batista et al. (2025).

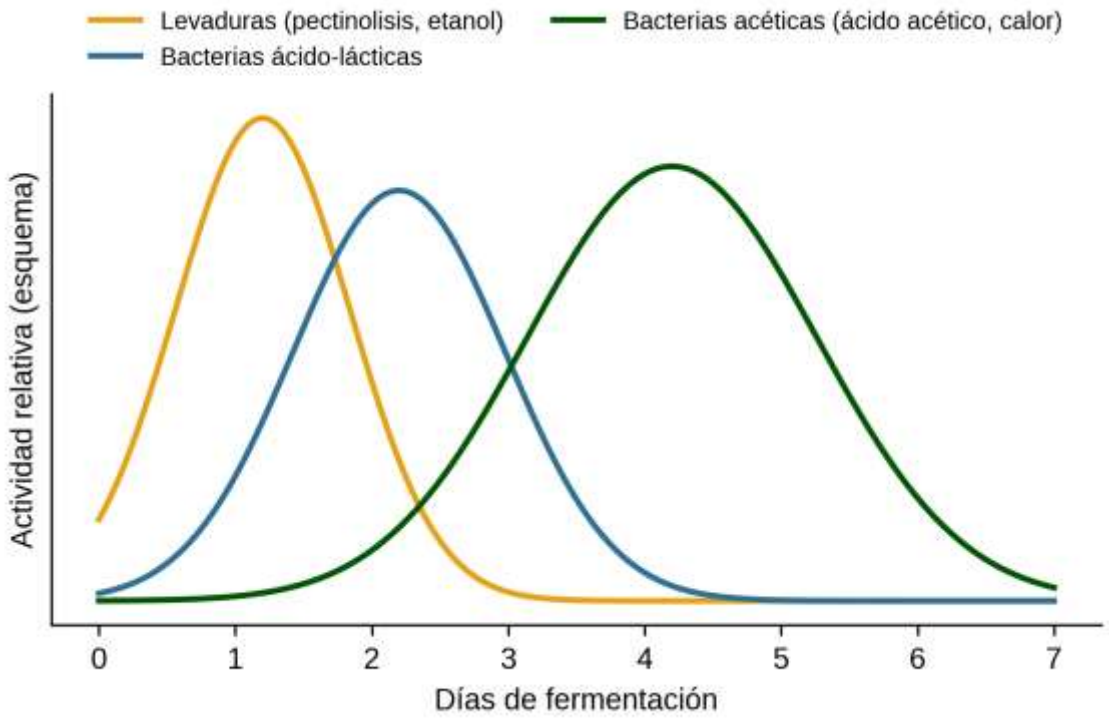
El pijuayo tiene su propia chicha: la pulpa cocida se mezcla con una porción masticada, tradicionalmente por mujeres, y fermenta varios días hasta alcanzar entre 2 y 5 % de alcohol (citado en Batista et al., 2025). Se trata de una práctica documentada en la etnografía que, más allá de su valor cultural, no es trasladable a un producto comercial por razones de inocuidad; el reemplazo de

la saliva por amilasas comerciales, como se hizo con el masato, es la vía para estudiarla en laboratorio.

6.9. Fermentación de semillas: cacao, macambo y copoazú

El cacao, el copoazú y el macambo pertenecen al género *Theobroma*, y sus semillas se fermentan antes del secado para desarrollar los precursores del aroma. La fermentación ocurre en la pulpa mucilaginosa que rodea a la semilla y sigue una sucesión microbiana bien descrita: las levaduras dominan los primeros días, consumen azúcares, producen etanol y degradan la pectina; las bacterias ácido-lácticas crecen después, y las bacterias acéticas, al airearse la masa, oxidan el etanol a ácido acético en una reacción exotérmica que eleva la temperatura (Schwan y Wheals, 2004; De Vuyst y Weckx, 2016). La Figura 31 esquematiza esa sucesión.

Figura 31.
Sucesión microbiana en la fermentación de semillas de cacao



Nota. Esquema cualitativo de elaboración propia con base en Schwan y Wheals (2004) y De Vuyst y Weckx (2016). Las curvas no representan datos medidos.

El macambo (*Theobroma bicolor*) y el copoazú tienen semillas con la misma estructura que las del cacao. Del copoazú se sabe que su pulpa, con pH entre

3,4 y 3,7, representa junto con las semillas alrededor del 57 % del peso del fruto (Batista et al., 2025), y que se usa en bebidas lácticas. Lo que no encontramos es un estudio de fermentación de semillas de copoazú o macambo con seguimiento microbiológico en Loreto. El modelo del cacao ofrece el método, y las semillas de copoazú, que hoy se descartan en gran parte cuando se vende la pulpa, ofrecen la materia prima.

6.10. Tabla maestra

La Tabla 14 reúne los productos revisados en el capítulo con sus condiciones y resultados principales. Es una tabla de consulta: las unidades son las de cada fuente, y los vacíos señalan datos que no se reportaron.

Tabla 14.

Productos fermentados de frutas y sustratos amazónicos con datos publicados

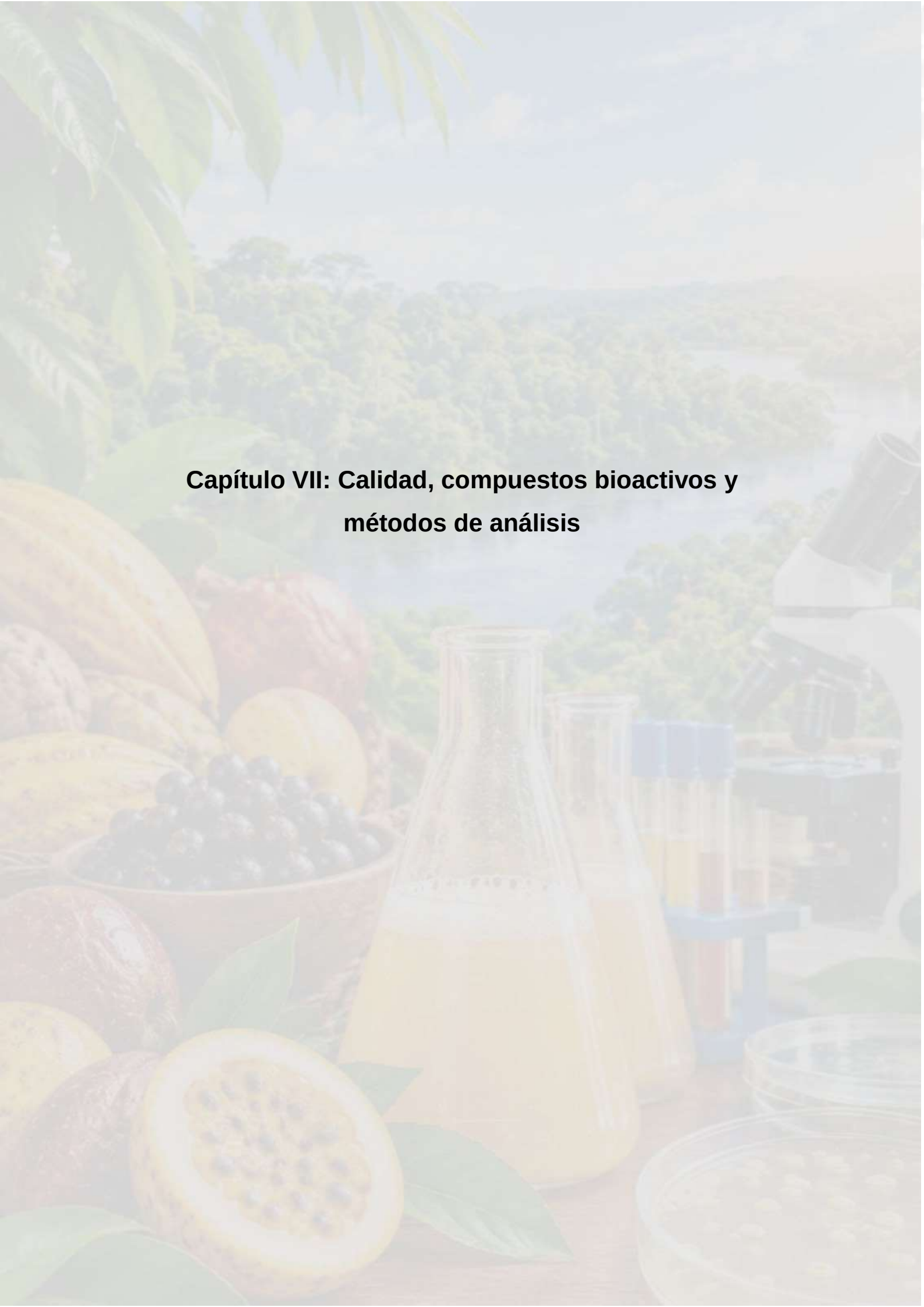
Producto	Sustrato y condiciones	Resultado principal	Fuente
Vino dulce de camu camu	Pulpa:agua 1:3; mosto a 22 °Brix; cepa Montrachet; corte a 12,5 °Brix a las 338 h	10,19 °GL; pH 3,32; rendimiento 69,4 %	Vasquez Shuña (2020)
Vino de camu camu	Escaldado 90 °C, 7 min; 25 °C, 25 d; 20 g levadura/2 L	11 % de alcohol; eficiencia 87 %; aceptabilidad 69,2–70,1 %	Maeda y Andrade, citados en Batista et al. (2025)
Vino de pijuayo	1 kg fruto + 4 L solución de sacarosa; 1 % *S. cerevisiae*; 27 °C, 7 d	12,74 % de alcohol; pH 6,0 → 3,5; aceptabilidad 81,9 %	Citado en Batista et al. (2025)
Vino de guanábana	Levadura nativa; 15 g sacarosa/100 mL; 10 d	16 % v/v; pH 4,5	Citado en Batista et al. (2025)
Vodka de sachapapa	Factorial 3^2; almidón:malta 30:15; 68 °C, 90 min	Mosto 11,33 °Brix; 40 °GL; sin metanol	Ramírez Trujillo y Urrutia Vílchez (s. f.)
Cerveza ale con sachapapa y cocona	US-05; malta:sachapapa 90:10; 30 % extracto de cocona	Mejor aceptación (hedónica de 5 puntos, n = 30)	Pereira Ramírez y Ríos Pérez (2023)
Cerveza con bacuri	Maduración con la fruta	3,8 % de alcohol	Citado en Batista et al. (2025)
Kombucha de bacuri	Té verde; 25 °C, 7 d; 20 % de formulación de pulpa	Etanol 2,27 g/L; fenoles 318,3 mg EAG/L	Citado en Batista et al. (2025)
Bebida probiótica de copoazú	*L. casei*; 34 % pulpa; 30 °C, 18 h	Consumo de fructosa 84,76 %	Citado en Batista et al. (2025)
Bebida de huasaí	Consorcio de tres BAL; 27 °C, 6 d	ORAC 453,64 → 708,77 µmol ET/g	Citado en Batista et al. (2025)

Producto	Sustrato y condiciones	Resultado principal	Fuente
Bebida simbiótica de taperibá	*L. plantarum*; 30 °C, 18 h	Fenoles 271,7 → 320,5 mg EAG/L	Citado en Batista et al. (2025)
Masato de yuca	α-amilasa fúngica 0,3 %	5 % alcohol; pH 6,0; acidez 0,72 %; 4,0 °Bx	Yupanqui (2024)
Chicha de bacaba	Fermentación espontánea, ≈ 30 h	pH 6,2; 0,52 g/L etanol; 76,7 kcal/100 mL	Citado en Batista et al. (2025)

Nota. Las unidades se transcriben como aparecen en las fuentes. "Citado en Batista et al. (2025)" indica que el dato se tomó de esa revisión, que cita el trabajo original.

6.11. Síntesis del capítulo

El inventario deja tres conclusiones. La primera es que hay más productos fermentados de frutas amazónicas documentados de lo que suele creerse, pero la mayoría en Brasil y en tesis sin publicar. La segunda es que en el Perú el conocimiento experimental con autoría verificable se concentra en destilados de sustratos amiláceos, en la cerveza con cocona de la UNAP y en el vino dulce de camu camu de la Universidad Nacional de Ucayali, y ninguno de esos trabajos reporta biomasa ni evolución de compuestos bioactivos durante la fermentación. La tercera es que los protocolos brasileños de bebidas lácticas de copoazú, huasaí y taperibá, y el vino de pijuayo, están descritos con suficiente detalle para repetirlos en Iquitos con fruta local. Hacerlo, midiendo lo que esos trabajos no midieron, sería una forma rápida y barata de generar conocimiento propio.



Capítulo VII: Calidad, compuestos bioactivos y métodos de análisis

Calidad, compuestos bioactivos y métodos de análisis

7.1. Qué significa calidad en un fermentado de fruta

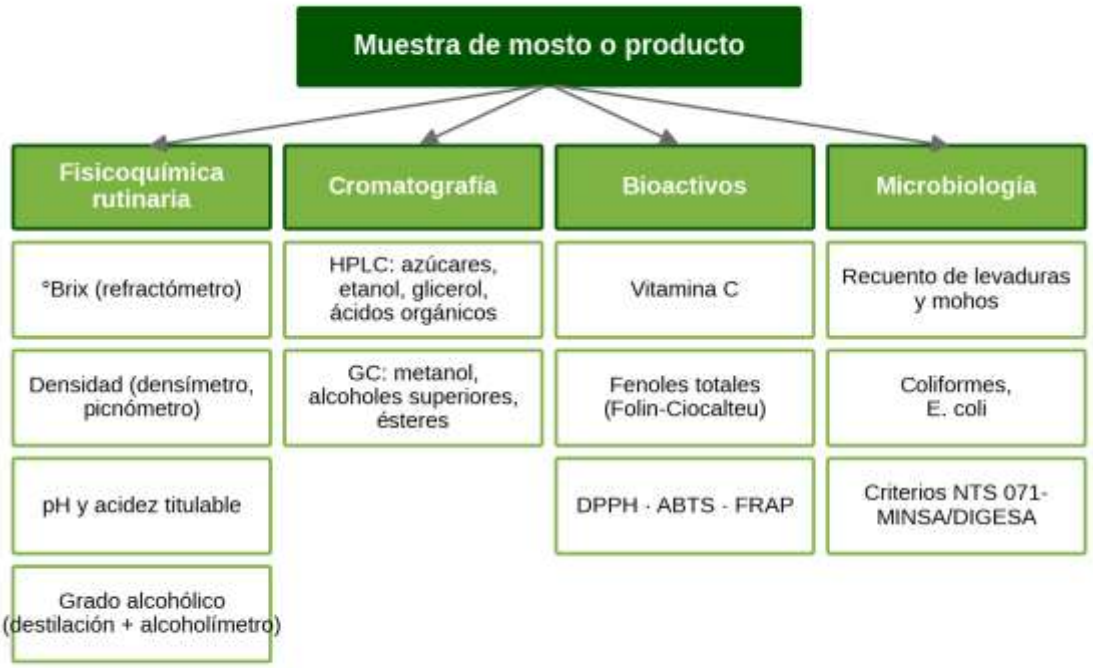
La calidad de un vino, un vinagre o una bebida láctica de fruta tiene al menos cuatro dimensiones que se evalúan con métodos distintos. La composición fisicoquímica define si el producto es lo que dice ser: un vino con el grado alcohólico declarado, un vinagre con la acidez mínima. La inocuidad define si puede consumirse sin riesgo: recuentos microbianos, metanol, residuos de sulfito. La calidad sensorial define si alguien querrá comprarlo. Y en el caso de las frutas amazónicas aparece una cuarta dimensión que suele ser el argumento de venta: el contenido de compuestos bioactivos, como la vitamina C del camu camu o los carotenoides del aguaje y el pijuayo.

Esta última dimensión es la más difícil de sostener con datos. Decir que un vino de camu camu es rico en vitamina C porque la fruta lo es supone que el ácido ascórbico sobrevive a la dilución, a la fermentación, a la pasteurización y al almacenamiento, y ninguno de los trabajos revisados en el capítulo VI lo midió en el producto terminado. El capítulo presenta los compuestos de interés, los métodos para medirlos y sus limitaciones, y el marco normativo peruano que se aplica a estos productos.

La Figura 32 organiza los análisis en cuatro grupos, que se desarrollan en las secciones siguientes.

Figura 32.

Organización de los análisis de control de calidad para mostos y productos fermentados de fruta



7.2. Análisis fisicoquímicos de rutina

7.2.1. Sólidos solubles, pH y acidez

Los sólidos solubles se miden con refractómetro y se expresan en °Brix. En un mosto sin fermentar la lectura aproxima el contenido de azúcares, pero no es igual a él: los ácidos orgánicos, las sales y otros solutos también desvían la luz. En el camu camu, con mucho ácido y poco azúcar, la diferencia puede ser importante. Durante la fermentación el etanol altera el índice de refracción y la lectura en °Brix deja de representar el azúcar residual, de modo que a partir de ese momento hay que seguir la fermentación con densidad o medir los azúcares directamente.

El pH se mide con potenciómetro calibrado con dos soluciones tampón, y la acidez titulable, por valoración con NaOH 0,1 N hasta pH 8,2 o hasta el viraje de fenolftaleína. La acidez se expresa en el ácido predominante: cítrico para pulpas de camu camu y cocona, tartárico en la tradición enológica, láctico en bebidas

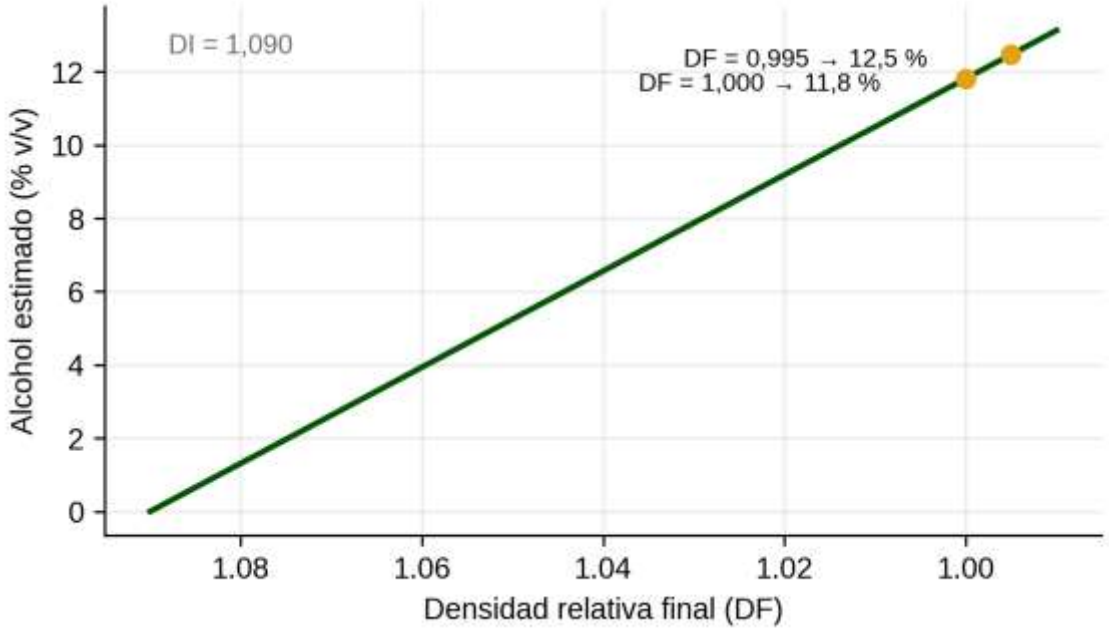
lácteas y acético en vinagres. Parece un detalle, pero dos trabajos que reportan "acidez de 0,8 %" pueden estar hablando de cantidades distintas si uno la expresa en ácido cítrico y otro en tartárico. Toda tabla de resultados debería indicar el ácido de referencia.

7.2.2. Grado alcohólico

El método de referencia para el grado alcohólico es la destilación de una muestra de volumen conocido seguida de la medición de la densidad del destilado con picnómetro o alcoholímetro, según los métodos AOAC (AOAC International, 2019). La estimación por diferencia de densidades inicial y final, presentada en el capítulo III, es útil para el seguimiento en planta, pero no reemplaza la destilación en un informe técnico o en una tesis. En la Figura 33 se muestra la relación empírica para un mosto de densidad inicial 1,090.

Figura 33.

Alcohol estimado a partir de la densidad relativa final para un mosto de densidad inicial 1,090



Nota. Cálculo con la aproximación empírica (DI − DF) × 131,25 presentada en el capítulo III. DI = densidad relativa inicial; DF = densidad relativa final.

La cromatografía de gases con detector de ionización de llama permite medir en una sola corrida el etanol, el metanol, el acetaldehído, el acetato de etilo y los alcoholes superiores. No es un equipo de rutina en los laboratorios de docencia

de la FIQ-UNAP, pero sí es imprescindible para cualquier destilado que vaya a comercializarse, por la cuestión del metanol.

7.2.3. Azúcares

Los azúcares reductores se determinan con el método del ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS), que mide la absorbancia a 540 nm del producto de reducción del reactivo (Miller, 1959). Es barato y rápido, y por eso es el método habitual en las tesis de fermentación. Tiene dos limitaciones. No mide la sacarosa, que debe hidrolizarse antes si se quiere el azúcar total, y responde a otros compuestos reductores. En el camu camu, el ácido ascórbico es un reductor fuerte que puede interferir; conviene verificar la interferencia con un blanco de pulpa o, mejor, usar cromatografía líquida con detector de índice de refracción, que separa glucosa, fructosa, sacarosa, glicerol y etanol en una sola corrida.

7.2.4. Acidez volátil

La acidez volátil, expresada como ácido acético, es el indicador de alteración más importante de un vino. Se determina por destilación por arrastre de vapor y valoración del destilado. Un vino de fruta con acidez volátil alta indica actividad de bacterias acéticas, casi siempre por contacto con aire durante la fermentación o el almacenamiento. Ninguno de los vinos de camu camu revisados reporta este parámetro.

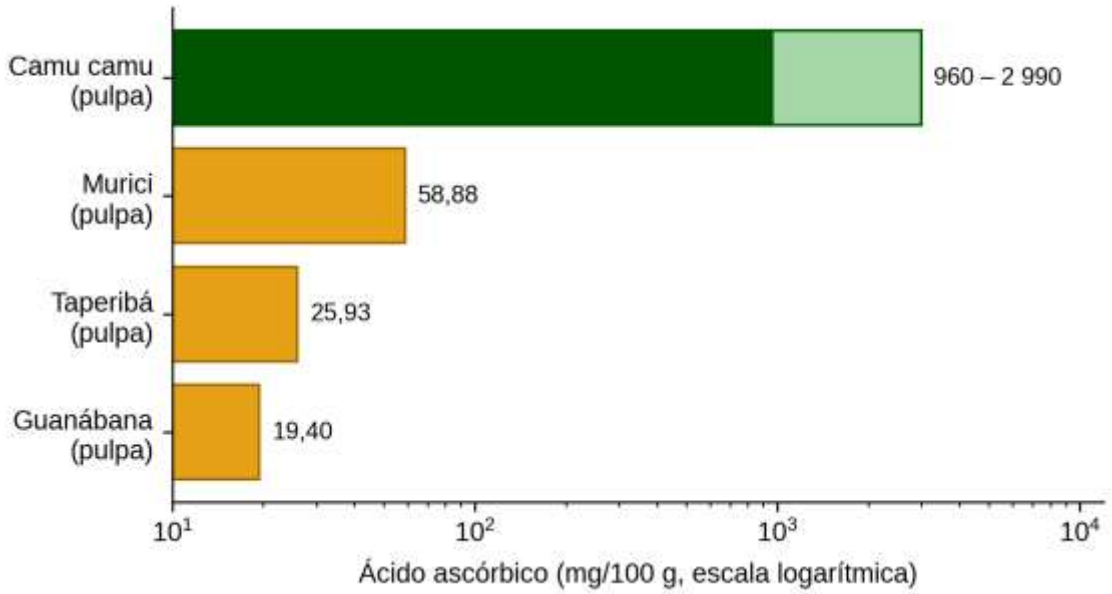
7.3. Compuestos bioactivos

7.3.1. Vitamina C

El camu camu es conocido por su contenido de ácido ascórbico. La revisión de Batista et al. (2025) reporta valores entre 0,96 y 2,99 g/100 g, y señala que en el estado de madurez intermedio, con cáscara verde rojiza, la pulpa alcanzó 4 752,23 mg/100 g de ácido ascórbico, junto con 52,6 mg/100 g de antocianinas y 12 798,80 mg EAG/100 g de fenoles totales. La Figura 34 compara el intervalo del camu camu con los valores de otras pulpas tropicales medidos por Aniceto et al. (2021) y los citados en Batista et al. (2025).

Figura 34.

Contenido de ácido ascórbico de pulpas de frutas tropicales



Nota. Camu camu, intervalo citado en Batista et al. (2025); murici y taperibá según Aniceto et al. (2021); guanábana citada en Batista et al. (2025). Escala logarítmica.

La diferencia es de dos órdenes de magnitud. Esa es la razón por la que el camu camu se exporta como pulpa congelada y polvo, y la razón por la que un fermentado de camu camu podría diferenciarse. Pero el ácido ascórbico es inestable: se oxida en presencia de oxígeno, calor, luz y metales, y la oxidación se acelera a pH cercano a la neutralidad. En un vino con dilución 1:3, la concentración inicial en el mosto ya es un cuarto de la de la pulpa, antes de cualquier pérdida por proceso.

No encontramos datos regionales con autoría verificable que midan la retención de vitamina C en productos procesados de frutas amazónicas. La literatura general es clara en la dirección del efecto: el calor, el oxígeno y el tiempo de almacenamiento reducen el ácido ascórbico, de modo que cada operación del diagrama de flujo es un punto de pérdida posible. Para vinos y bebidas fermentadas de camu camu, la pregunta de cuánta vitamina C queda al final no tiene todavía respuesta publicada.

El método clásico de determinación es la valoración con 2,6-diclorofenolindofenol, rápido y adecuado para jugos claros. En productos coloreados, como vinos de camu camu con antocianinas o bebidas de aguaje, el viraje es difícil de observar y conviene usar cromatografía líquida con detector

UV, que además distingue el ácido ascórbico del dehidroascórbico si se incluye una etapa de reducción.

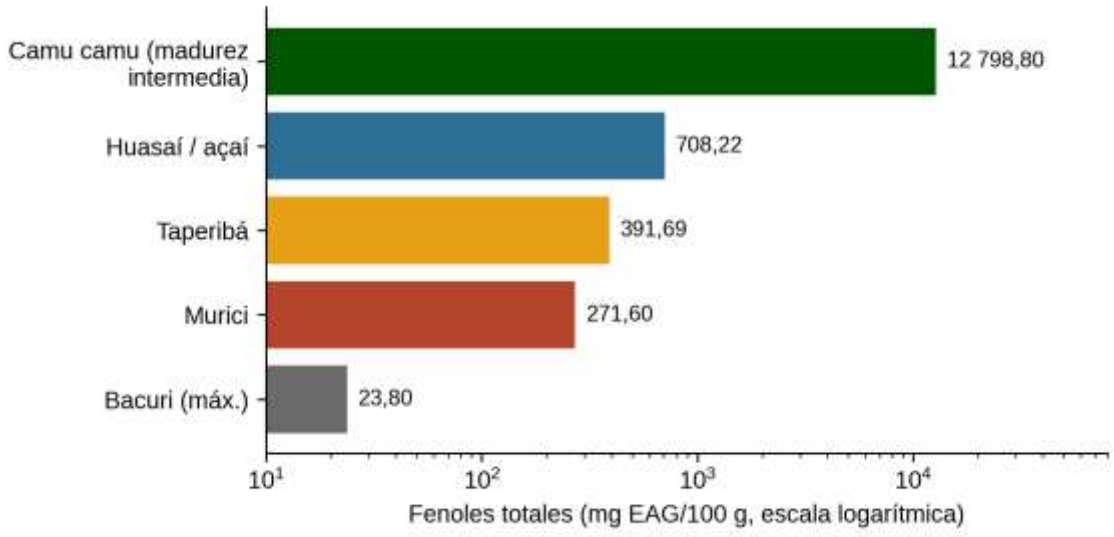
7.3.2. Compuestos fenólicos

Los fenoles totales se determinan con el reactivo de Folin-Ciocalteu, que se reduce en medio alcalino y forma un complejo azul medido a unos 760 nm, con ácido gálico como patrón (Singleton y Rossi, 1965). Es el método más usado y también el más malinterpretado. El reactivo no reacciona solo con fenoles: responde a cualquier reductor, incluidos el ácido ascórbico, algunos aminoácidos y ciertos azúcares en medio alcalino (Singleton et al., 1999). En el camu camu, donde el ácido ascórbico está en concentraciones de gramos por cada 100 g, una parte del valor de "fenoles totales" es en realidad vitamina C. Las cifras de fenoles del camu camu deben leerse con esa advertencia, y un laboratorio que quiera medir fenoles de verdad en esta fruta debe corregir la interferencia, por ejemplo midiendo el ascórbico por separado y restando su contribución con una curva propia, o eliminándolo antes de la reacción.

La Figura 35 compara los fenoles totales de varias pulpas según los datos reunidos por Batista et al. (2025). La advertencia anterior se aplica sobre todo al primer valor.

Figura 35.

Fenoles totales de pulpas de frutas amazónicas



Nota. Elaborado con datos citados en Batista et al. (2025). EAG = equivalentes de ácido gálico. El valor del camu camu corresponde a la madurez intermedia y puede incluir la contribución del ácido ascórbico al método de Folin-Ciocalteu.

7.3.3. Antocianinas, carotenoides y tocoferoles

Las antocianinas dan color al camu camu maduro, al huasaí, al ungurahui y a la uvilla. En el huasaí, las predominantes son cianidina-3-glucósido y cianidina-3-rutinósido; *Euterpe precatoria*, la especie de huasaí más común en la Amazonía peruana, tiene alrededor de 50 % más antocianinas totales que *E. oleracea*, la especie brasileña de exportación, y contiene pelargonidina-3-glucósido (319 mg/kg), ausente en la otra especie (Batista et al., 2025). El dato tiene interés práctico para Loreto: los productos de huasaí elaborados con la especie local podrían tener más color y más antocianinas que el açaí brasileño que domina el mercado.

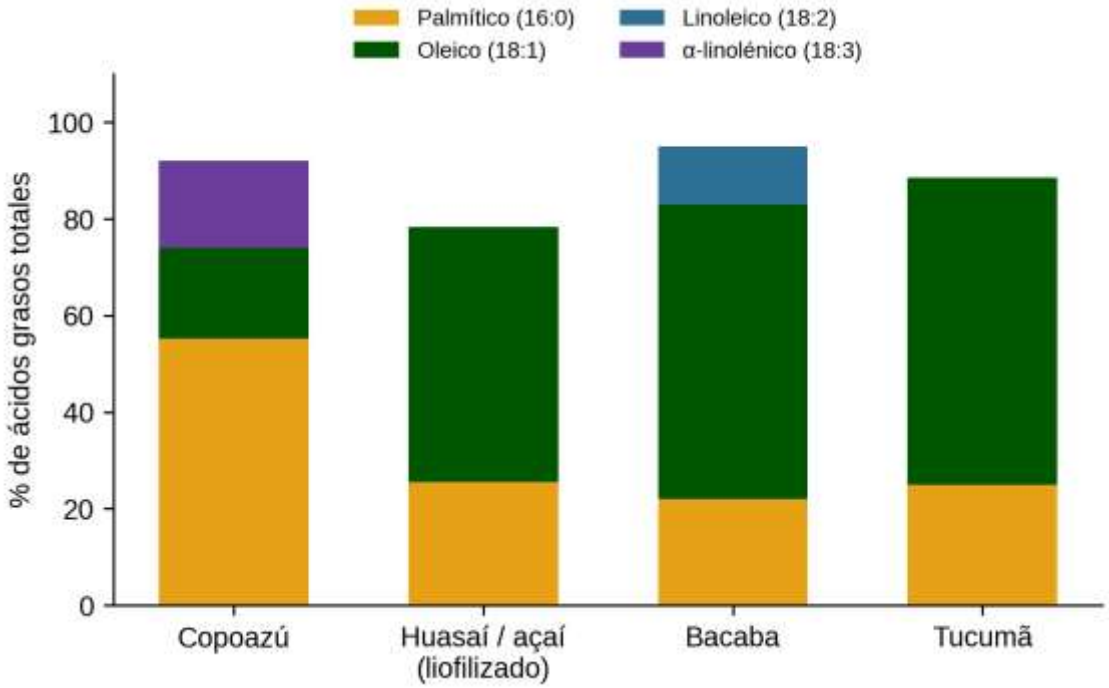
Los carotenoides caracterizan al aguaje y al pijuayo. En la pulpa de pijuayo cocida, forma tradicional de consumo, se han medido 115,6 µg de β-caroteno por gramo de peso fresco, y la cocción no solo conserva, sino que genera nuevos carotenoides por isomerización (Batista et al., 2025). El aguaje, por su parte, es fuente de tocoferoles: 1 169 µg/g, con 37,2 % de α-tocoferol, y tiene 19,0 g/100 g de grasa (Batista et al., 2025). Estos compuestos son liposolubles y se comportan de forma distinta a la vitamina C durante la fermentación: no se oxidan tan rápido en medio ácido, pero pueden quedar retenidos en las borras junto con la fracción grasa. En el vino de pijuayo, los carotenoides se estabilizaron en 2,2 mg/100 mL de mosto durante la fermentación (citado en Batista et al., 2025).

7.3.4. Perfil lipídico y mineral

Las frutas de palmeras y algunas *Theobroma* tienen perfiles de ácidos grasos que conviene conocer si el producto fermentado conserva parte de la pulpa, como ocurre con las bebidas lácticas y las chichas (Figura 36). El copoazú tiene 12,7 % de lípidos en base seca, con predominio de ácido palmítico (55,2 %) y una fracción notable de α-linolénico (18 %); el huasaí liofilizado y la bacaba son ricos en ácido oleico (Batista et al., 2025).

Figura 36.

Perfil de ácidos grasos principales de pulpas de frutas amazónicas

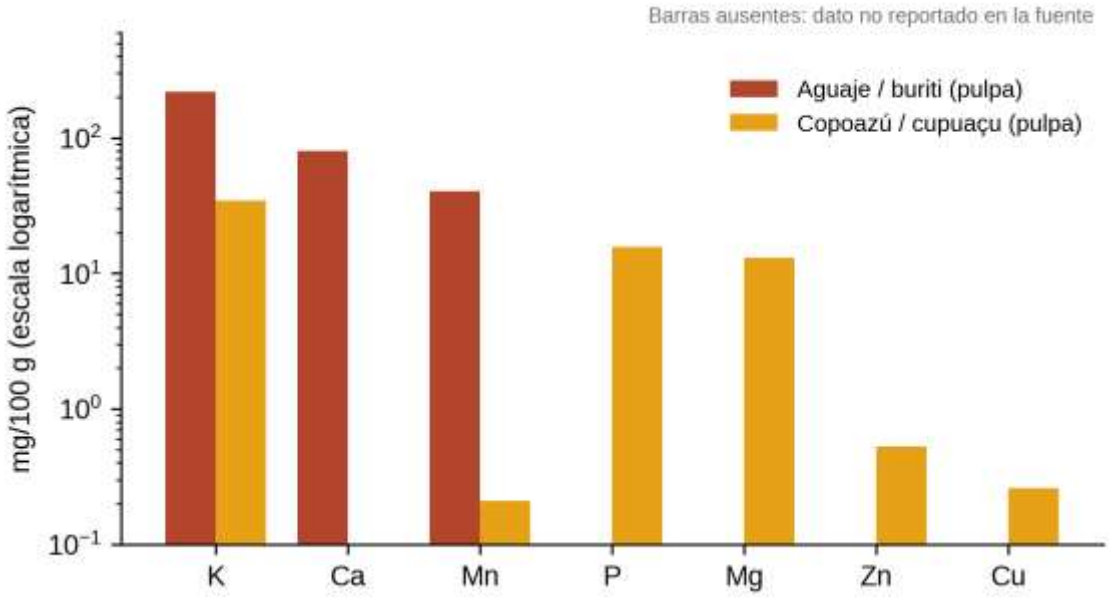


Nota. Elaborado con datos citados en Batista et al. (2025). Los porcentajes se refieren a los ácidos grasos totales reportados por cada fuente; los ácidos no mostrados completan el 100 %.

Los minerales tampoco son irrelevantes para la fermentación. El potasio, el magnesio y el zinc son cofactores de enzimas de la levadura, y la adición de zinc, manganeso y magnesio en la planta piloto de la FIQ-UNAP (Barrera Vela y Reyes Muro, 2015) responde a esa necesidad. La Figura 37 muestra que la pulpa de aguaje aporta más potasio, calcio y manganeso que la de copoazú, según los valores reunidos por Batista et al. (2025).

Figura 37

Contenido de minerales en pulpas de aguaje y copoazú



Nota. Elaborado con datos citados en Batista et al. (2025). Escala logarítmica.

7.4. Capacidad antioxidante

7.4.1. Tres métodos, tres mecanismos

La capacidad antioxidante no es una propiedad única de un alimento sino el resultado de un ensayo, y cada ensayo mide algo distinto (Figura 38). El ensayo de DPPH mide la decoloración de un radical estable de color púrpura, leída a 515–517 nm (Brand-Williams et al., 1995). El de ABTS usa un radical catión generado previamente con persulfato y leído a 734 nm, y funciona tanto con antioxidantes hidrofílicos como lipofílicos (Re et al., 1999). El FRAP mide la reducción del complejo férrico con TPTZ a pH 3,6, con lectura a 593 nm (Benzie y Strain, 1996). Los tres se expresan con frecuencia en equivalentes de Trolox, lo que da una apariencia de comparabilidad que no siempre existe.

Figura 38.

Fundamento de los ensayos de capacidad antioxidante más usados



Nota. Elaboración propia con base en Brand-Williams et al. (1995), Re et al. (1999) y Benzie y Strain (1996).

En frutas amazónicas peruanas, Vargas-Arana et al. (2021) evaluaron la capacidad antioxidante de cinco ecotipos de cocona junto con su perfil de compuestos bioactivos, lo que permite relacionar la actividad medida con los compuestos presentes. La recomendación práctica es usar al menos dos métodos con mecanismos distintos, reportar las condiciones exactas (tiempo de reacción, concentración del radical, solvente) y no comparar valores de trabajos que usaron protocolos diferentes.

7.4.2. Qué pasa con la capacidad antioxidante al fermentar

Los datos disponibles muestran que la fermentación puede aumentar la capacidad antioxidante medida. En la pulpa de huasaí fermentada con bacterias ácido-lácticas el valor ORAC pasó de 453,64 a 708,77 µmol ET/g, y en la bebida simbiótica de taperibá los fenoles subieron de 271,7 a 320,5 mg EAG/L (citados en Batista et al., 2025; capítulo VI). En cambio, en la bebida de taperibá con *Talinum triangulare* almacenada 42 días, la actividad frente a DPPH bajó 33,09 % (citado en Batista et al., 2025). Es decir, la fermentación puede liberar compuestos y el almacenamiento puede degradarlos. Un estudio que solo mida al final de la fermentación verá la primera parte de la historia y no la segunda.

7.5. Inocuidad

7.5.1. Microbiología

En el Perú, los criterios microbiológicos para alimentos y bebidas están establecidos en la Norma Sanitaria NTS N.° 071-MINSA/DIGESA-V.01, aprobada por la R. M. N.° 591-2008/MINSA (Ministerio de Salud [MINSA], 2008). La norma agrupa los productos en categorías y fija, para cada una, los microorganismos por evaluar, el plan de muestreo y los límites. Es el procedimiento que deben seguir los productos fermentados no alcohólicos, como las kombuchas y las bebidas lácticas. Para ubicar el producto en la categoría correcta y aplicar los límites vigentes, conviene consultar el texto oficial de la norma y sus actualizaciones, en lugar de copiar límites de otras tesis.

Las bebidas alcohólicas tienen un riesgo microbiológico menor por su etanol y su pH, pero no nulo: un vino dulce con azúcar residual y SO_2 insuficiente puede refermentar, y un vino con acidez volátil alta es un producto alterado. Para las bebidas lácticas que se quieran presentar como probióticas, el criterio adicional es el recuento de la cepa declarada al final de la vida útil y su identificación a nivel de cepa (Hill et al., 2014).

7.5.2. Metanol

El metanol se forma por hidrólisis de las pectinas de la fruta y, como se discutió en los capítulos III y V, se concentra en las cabezas de destilación. Su control es obligatorio en destilados de fruta. Los vodkas de sachapapa de la UNAP no presentaron metanol detectable (Ramírez Trujillo y Urrutia Vílchez, s. f.), resultado esperable en un sustrato amiláceo. Un aguardiente de camu camu o de cocona, frutas con pectina, no puede darse por seguro sin análisis.

7.5.3. Marco normativo

Los vinos se rigen en el Perú por la NTP 212.014:2011, revisada en 2016, que establece requisitos para vinos (Instituto Nacional de Calidad [INACAL], 2016). La comercialización de bebidas alcohólicas está regulada además por la Ley N.° 28681, que norma su comercialización, consumo y publicidad, y todo alimento o bebida industrializada requiere registro sanitario ante la DIGESA según el

Reglamento sobre Vigilancia y Control Sanitario de Alimentos y Bebidas, aprobado por el D. S. N.° 007-98-SA. La Tabla 15 resume los instrumentos que un productor de fermentados de fruta en Loreto debería revisar antes de salir al mercado.

Tabla 15.

Instrumentos normativos peruanos aplicables a productos fermentados de fruta

Instrumento	Ámbito	Aplicación a los fermentados de fruta
NTP 212.014:2011 (revisada en 2016)	Requisitos de vinos	Referencia para vinos de fruta; verificar si el producto se enmarca como vino o como bebida de fruta fermentada
NTS N.° 071-MINSA/DIGESA-V.01 (R. M. N.° 591-2008/MINSA)	Criterios microbiológicos de alimentos y bebidas	Kombuchas, bebidas lácticas, pulpas y vinos con azúcar residual
D. S. N.° 007-98-SA	Vigilancia y control sanitario; registro sanitario	Todo producto industrializado destinado a la venta
Ley N.° 28681	Comercialización, consumo y publicidad de bebidas alcohólicas	Vinos, licores, destilados, cervezas y kombuchas que superen el umbral alcohólico

Nota. Elaboración propia. Los textos vigentes y sus modificatorias deben consultarse en las fuentes oficiales antes de su aplicación.

Una observación sobre la NTP de vinos: fue concebida para vinos de uva, y su aplicación a vinos de fruta requiere interpretación. En varios países los vinos de frutas distintas de la uva tienen normas propias o se clasifican como bebidas alcohólicas de fruta. Una norma técnica peruana específica para vinos de frutas tropicales sería una contribución concreta de la academia regional a la formalización de estos productos, y los datos que se sugieren en este libro son justamente los que un comité técnico de normalización necesitaría.

7.6. Evaluación sensorial

7.6.1. Pruebas afectivas

Casi todos los trabajos revisados evaluaron la aceptación con escalas hedónicas: la cerveza de sachapapa y cocona con una escala de 5 puntos y 30 panelistas (Pereira Ramírez y Ríos Pérez, 2023), el vino dulce de camu camu con 20 panelistas no entrenados y una escala de 5 puntos (Vasquez Shuña, 2020), el vino de pijuayo con un índice de aceptabilidad de 81,9 % (citado en Batista et al., 2025). Las pruebas afectivas son adecuadas para elegir entre formulaciones, pero tienen límites que conviene explicitar. Un panel de 30

estudiantes universitarios no representa al consumidor del producto; una escala de 5 puntos discrimina menos que una de 9, y la aceptabilidad expresada como porcentaje depende de la forma en que se calcule. Además, los resultados hedónicos no se analizan bien con estadística paramétrica si las distribuciones son asimétricas, lo que sugiere complementar el análisis de varianza con pruebas no paramétricas como la de Friedman, que es la que usó Vasquez Shuña (2020) para comparar los atributos sensoriales de sus tres vinos.

7.6.2. Pruebas descriptivas

Una prueba descriptiva, con un panel entrenado que cuantifica atributos como acidez, amargor, aroma frutal o astringencia, explica por qué un producto gusta o no. Ningún trabajo regional revisado la usó. Para el vino de camu camu, donde el escaldado se aplica para reducir el amargor, una prueba descriptiva permitiría medir si el amargor efectivamente baja, en lugar de inferirlo de una diferencia de aceptación de apenas un punto porcentual.

7.7. Un protocolo mínimo de caracterización

La Tabla 16 propone el conjunto mínimo de análisis para caracterizar un fermentado de fruta amazónica en una tesis o en un proyecto de desarrollo, con los métodos accesibles en la región y los que requieren apoyo externo.

Tabla 16.

Protocolo mínimo de caracterización para fermentados de fruta amazónica

Parámetro	Método	Momento de medición	Disponibilidad en la región
°Brix, pH, acidez titulable	Refractometría, potenciometría, valoración	Pulpa, mosto, diario durante la fermentación, producto final	Alta
Densidad	Densímetro o picnómetro	Diario durante la fermentación	Alta
Grado alcohólico	Destilación y picnometría (AOAC)	Producto final	Alta
Azúcares reductores	DNS (Miller, 1959)	Mosto, muestreo cinético, producto final	Alta
Acidez volátil	Destilación por arrastre de vapor	Producto final y almacenamiento	Media
Vitamina C	2,6-diclorofenolindofenol o HPLC-UV	Pulpa, mosto, producto final y vida útil	Media
Fenoles totales	Folin-Ciocalteu con corrección por ascórbico	Pulpa, mosto, producto final y vida útil	Media

Parámetro	Método	Momento de medición	Disponibilidad en la región
Capacidad antioxidante	DPPH y ABTS (al menos dos métodos)	Pulpa, producto final y vida útil	Media
Metanol y alcoholes superiores	Cromatografía de gases	Destilados; vinos con enzimas pectolíticas	Baja; requiere servicio externo
Microbiología	NTS N.° 071 según categoría	Producto final	Media
Sensorial	Hedónica de 9 puntos y descriptiva	Producto final	Alta

Nota. Elaboración propia. "Disponibilidad" se refiere a la situación de los laboratorios universitarios de Iquitos según la experiencia de los autores y debe entenderse como orientativa.

7.8. Síntesis del capítulo

El control de calidad de un fermentado de fruta amazónica combina análisis de rutina, que cualquier laboratorio universitario de Iquitos puede hacer, con análisis de compuestos bioactivos que requieren más cuidado metodológico del que suele reconocerse. Dos advertencias resumen el capítulo. La primera es que la riqueza en vitamina C y fenoles de la fruta no se traslada automáticamente al producto: hay que medirla en el producto terminado y durante su vida útil, y en el camu camu hay que corregir la interferencia del ácido ascórbico en el método de Folin-Ciocalteu. La segunda es normativa: la NTP de vinos fue pensada para la uva, y la formalización de los vinos de fruta de la región pasa por generar los datos que una norma específica necesitaría.

Capítulo VIII: Diseño experimental y optimización de procesos fermentativos

Diseño experimental y optimización de procesos fermentativos

8.1. El experimento antes que la estadística

El análisis estadístico no rescata un experimento mal planteado. Esta frase, que se repite en cualquier curso de diseño de experimentos (Montgomery, 2017), tiene especial vigencia en la investigación sobre fermentación de frutas, donde cada ensayo consume fruta de temporada, tiempo de incubación y análisis que no siempre pueden repetirse. Un tesista que fermenta nueve tratamientos durante 14 días y descubre al final que dos factores estaban confundidos pierde una campaña entera de camu camu.

Este capítulo revisa los diseños usados en los trabajos regionales, propone criterios para elegir un diseño según la pregunta de investigación y desarrolla un ejemplo de optimización por superficie de respuesta para un vino de camu camu. El objetivo no es sustituir un texto de estadística, sino conectar las herramientas con los problemas concretos de la fermentación de frutas amazónicas.

8.2. Principios básicos

8.2.1. Factores, niveles y respuestas

Un factor es una variable que el investigador controla: temperatura, relación pulpa:agua, concentración de inóculo, cepa. Sus niveles son los valores que se ensayan. La respuesta es lo que se mide: grado alcohólico, vitamina C retenida, aceptación sensorial, velocidad específica de crecimiento. La primera decisión del diseño es qué respuestas importan, y esa decisión es menos obvia de lo que parece. Un diseño que optimiza el grado alcohólico de un vino de camu camu puede llevar a condiciones que destruyen la vitamina C; si la vitamina C es el argumento del producto, debe ser una respuesta desde el principio.

8.2.2. Réplica, aleatorización y bloques

Tres principios sostienen cualquier diseño experimental (Montgomery, 2017). La réplica permite estimar el error experimental; sin ella no hay forma de saber si una diferencia entre tratamientos es real. La aleatorización del orden de los

ensayos protege frente a efectos no controlados, como el envejecimiento de la levadura en el refrigerador o la variación de temperatura del laboratorio a lo largo del día. Y el bloqueo agrupa las unidades experimentales según una fuente de variación conocida que no interesa estudiar.

En la fermentación de frutas el bloqueo tiene una aplicación inmediata: el lote de fruta. Dos cosechas de camu camu de la misma cocha, separadas por dos semanas, pueden diferir en madurez, acidez y azúcares. Si un experimento necesita más fruta de la que se consigue en un solo día, cada lote de fruta debería ser un bloque que contenga todos los tratamientos, en lugar de asignar los primeros tratamientos a la primera cosecha y los últimos a la segunda. De lo contrario, el efecto del lote se confunde con el de los tratamientos.

8.2.3. Réplicas verdaderas y falsas

Un error frecuente es tratar como réplicas las lecturas múltiples de una misma muestra. Si se prepara un solo mosto por tratamiento y se miden tres veces el pH y el grado alcohólico, lo que se obtiene son réplicas analíticas, que estiman el error del instrumento y no la variabilidad del proceso. Las réplicas verdaderas son fermentaciones independientes, cada una con su propio mosto e inóculo. En el capítulo IV se hizo la misma advertencia para los ajustes cinéticos, y vale aquí con más fuerza, porque el análisis de varianza usa el error experimental como denominador de todas sus pruebas.

8.3. Diseños usados en los trabajos regionales

La revisión de los trabajos de la UNAP y la Universidad Nacional de Ucayali muestra una variedad de diseños, desde comparaciones simples de tratamientos hasta factoriales completos (Tabla 17).

Tabla 17.

Diseños experimentales empleados en trabajos regionales sobre fermentación y procesamiento de frutas y sustratos amazónicos

Trabajo	Diseño	Factores y niveles	Respuesta principal
Vodka de sachapapa (Ramírez Trujillo y Urrutia Vílchez, s. f.)	Factorial 3^2	Proporción almidón:malta; tiempo de maceración	°Brix del mosto, grado del destilado

Trabajo	Diseño	Factores y niveles	Respuesta principal
Cerveza de sachapapa y cocona (Pereira Ramírez y Ríos Pérez, 2023)	Tres formulaciones; prueba hedónica, n = 30	Proporción malta:sachapapa	Aceptación sensorial
Masato de yuca (Yupanqui, 2024)	6 tratamientos	Condiciones de hidrólisis y fermentación	Alcohol, pH, acidez, °Bx
Vino dulce de camu camu (Vasquez Shuña, 2020)	Completamente al azar, 3 tratamientos × 4 repeticiones; ANVA y Tukey; Friedman para el análisis sensorial	Relación pulpa:agua (1:1, 1:2, 1:3)	Tiempo de fermentación, pH, densidad, acidez, °GL, rendimiento y atributos sensoriales

Nota. Elaboración propia a partir de las fuentes citadas. Cuando la fuente consultada no detalla los niveles de todos los factores, se describen de forma general.

Dos rasgos se repiten. El primero es el uso de diseños factoriales de dos o tres niveles con uno o dos factores, adecuados para comparar, pero limitados para optimizar. El segundo es que la respuesta suele ser de punto final: el grado del destilado, la aceptación. Incluso la tesis de vino dulce de camu camu, que siguió los °Brix, el pH y la densidad a lo largo de la fermentación, comparó los tratamientos por el tiempo total y no por parámetros cinéticos. Ninguno usó la metodología de superficie de respuesta ni respuestas cinéticas como $\mu_{máx}$ o la productividad. Estas dos ausencias definen el margen de mejora metodológica.

8.4. Diseños para comparar tratamientos

8.4.1. Diseño completamente al azar

El diseño completamente al azar asigna los tratamientos a las unidades experimentales sin restricciones. Su modelo es:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (8.1)$$

donde μ es la media general, τ_i el efecto del tratamiento i y ε_ij el error aleatorio. Es el diseño adecuado cuando las unidades son homogéneas, por ejemplo, matraces con el mismo mosto en una incubadora de temperatura controlada. Si el análisis de varianza detecta diferencias, una prueba de comparaciones múltiples como la de Tukey identifica qué pares de tratamientos difieren, como se hizo en la tesis de vino dulce de camu camu de la Universidad Nacional de Ucayali, que comparó tres diluciones con cuatro repeticiones cada una y procesó los datos con InfoStat y Statgraphics (Vasquez Shuña, 2020).

8.4.2. Bloques completos al azar

Cuando hay una fuente de heterogeneidad conocida, como el lote de fruta, el diseño de bloques completos al azar la separa del error:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \tag{8.2}$$

con β_j como efecto del bloque j. El costo es pequeño, porque solo exige organizar los ensayos por lote, y la ganancia en precisión puede ser grande si los lotes de fruta difieren mucho.

8.5. Diseños factoriales

8.5.1. El factorial 2^k

Un factorial 2^k ensaya k factores en dos niveles cada uno, en todas sus combinaciones. Su ventaja principal sobre el ensayo de un factor a la vez es que estima las interacciones: si el efecto de la temperatura sobre el grado alcohólico depende de la dilución, solo un factorial lo muestra. Con factores codificados en −1 y +1, el modelo para dos factores es:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon \tag{8.3}$$

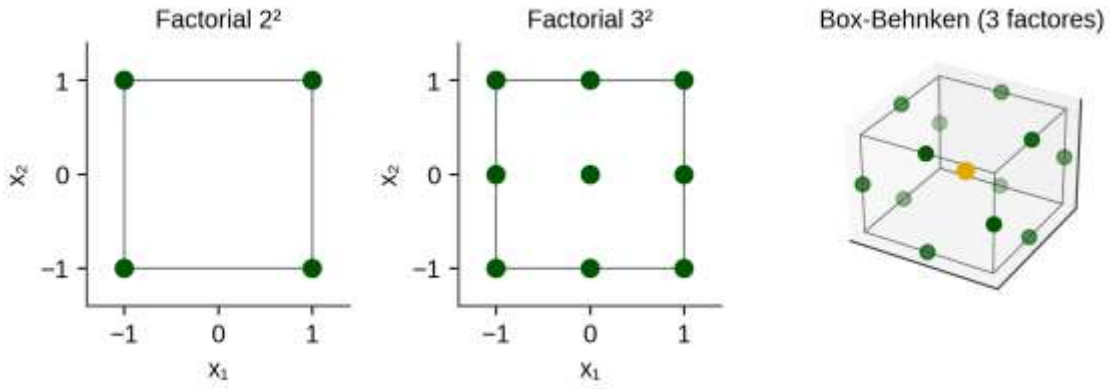
La codificación se hace con la transformación:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i,\text{centro}}}{\Delta X_i} \tag{8.4}$$

donde X_i es el valor real, X_i,centro el punto medio del intervalo y ΔX_i la mitad del intervalo. Trabajar con variables codificadas hace comparables los coeficientes de factores con unidades distintas, como grados Celsius y gramos por litro. La Figura 39 muestra la geometría de este diseño junto con la de los otros dos que se discuten en el capítulo.

Figura 39.

Geometría de los diseños factorial 2^2 con punto central, factorial 3^2 y Box-Behnken para tres factores



Nota. Elaboración propia. Los círculos representan corridas experimentales y los cuadrados, puntos centrales.

8.5.2. Puntos centrales

Añadir réplicas en el punto central de un factorial 2^k cumple dos funciones: estima el error experimental sin replicar todo el diseño y permite detectar curvatura. Si la media de los puntos centrales difiere de la media de los vértices, la respuesta no es lineal en el intervalo estudiado y hace falta un diseño con más niveles. Para una tesis con recursos limitados, un 2^2 con tres puntos centrales, siete fermentaciones en total, suele ser mejor punto de partida que un 3^2 sin réplicas, que exige nueve.

8.5.3. El factorial 3^k

El factorial 3^k ensaya cada factor en tres niveles y permite estimar efectos cuadráticos. Es el diseño usado en el vodka de sachapapa de la UNAP (Ramírez Trujillo y Urrutia Vílchez, s. f.). Su problema es el crecimiento del número de corridas: 9 para dos factores, 27 para tres, 81 para cuatro. Por encima de dos factores, los diseños de superficie de respuesta son más eficientes.

8.6. Metodología de superficie de respuesta

8.6.1. Origen y lógica

La metodología de superficie de respuesta fue propuesta por Box y Wilson (1951) para encontrar condiciones óptimas en procesos químicos con el menor número

de ensayos. Combina un diseño experimental que permite ajustar un modelo de segundo orden, el ajuste por regresión y el análisis gráfico de la superficie resultante. Bezerra et al. (2008) la revisaron para química analítica, y su guía de aplicación es útil para cualquier laboratorio de procesos. El modelo cuadrático completo para k factores es:

$$y = \beta_0 + \Sigma\beta_i x_i + \Sigma\beta_{ii} x_i^2 + \Sigma\Sigma\beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (8.5)$$

Los términos lineales describen la pendiente, los cuadráticos la curvatura y los cruzados las interacciones. Si los términos cuadráticos son negativos, la superficie tiene un máximo dentro de la región estudiada, que es lo que se busca al optimizar un rendimiento.

8.6.2. El diseño de Box-Behnken

El diseño de Box-Behnken usa tres niveles por factor y ubica las corridas en los puntos medios de las aristas del cubo experimental, más réplicas en el centro (Box y Behnken, 1960). No incluye los vértices, lo que tiene una ventaja práctica: evita las combinaciones extremas, por ejemplo, la temperatura más alta con la dilución más baja, que en fermentación suelen producir lotes fallidos. El número de corridas es:

$$N = 2k(k - 1) + C_0 \quad (8.6)$$

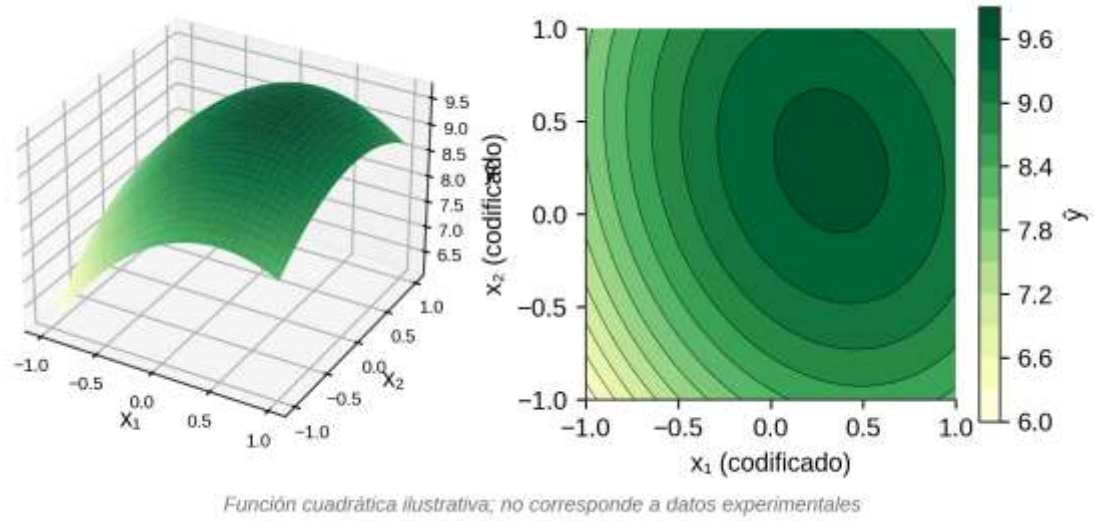
donde C_0 es el número de puntos centrales. Para tres factores y tres puntos centrales, N = 15; para cuatro factores, N = 27. Con 15 fermentaciones se estiman los diez coeficientes del modelo cuadrático de tres factores y queda información para evaluar la falta de ajuste.

8.6.3. Superficie y contorno

Ajustado el modelo, la superficie se representa en tres dimensiones o, con más utilidad práctica, como un gráfico de contorno (Figura 40). El contorno permite leer qué combinaciones de factores dan una respuesta mayor que un valor dado, algo más útil para un productor que el óptimo matemático exacto, porque le indica cuánto margen tiene para operar.

Figura 40.

Superficie de respuesta y gráfico de contorno de un modelo cuadrático de dos factores



Nota. Función cuadrática ilustrativa de elaboración propia. No corresponde a datos experimentales.

8.7. Propuesta: optimización de un vino de camu camu

8.7.1. Pregunta y factores

Con la información de los capítulos anteriores se puede plantear un experimento concreto. La pregunta: ¿qué combinación de dilución, temperatura y concentración inicial de azúcar da un vino de camu camu con grado alcohólico cercano a 11 % v/v, máxima retención de vitamina C y buena aceptación? Los factores y niveles propuestos se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18.

Factores y niveles propuestos para la optimización de un vino de camu camu

Factor	Símbolo	Nivel −1	Nivel 0	Nivel +1	Justificación
Relación pulpa:agua	X_1	1:2	1:3	1:4	1:3 es la relación reportada por Vasquez Shuña (2020)
Temperatura de fermentación (°C)	X_2	18	22	26	25 °C en Maeda y Andrade; 18 °C para conservar aroma
Azúcar fermentable inicial (g/L)	X_3	170	190	210	Intervalo para 10–12 % v/v con rendimiento de 0,47 g/g

Nota. Propuesta de los autores. Los niveles deben ajustarse después de caracterizar la pulpa de cada campaña.

Las respuestas propuestas son cuatro: grado alcohólico por destilación; vitamina C del vino terminado expresada como porcentaje de la del mosto; productividad volumétrica de etanol, y aceptación hedónica en escala de 9 puntos. La tercera es una respuesta cinética que requiere seguir la densidad durante la fermentación, pero no análisis adicionales.

8.7.2. Matriz del diseño

La Tabla 19 presenta la matriz de Box-Behnken con tres puntos centrales. El orden de ejecución debe aleatorizarse, y si la fruta no alcanza para las 15 corridas en un solo día, el diseño puede dividirse en dos bloques siguiendo las recomendaciones de Box y Behnken (1960).

Tabla 19.

Matriz de Box-Behnken para tres factores con tres puntos centrales

Corrida	x_1	x_2	x_3	Pulpa:agua	T (°C)	Azúcar (g/L)
1	−1	−1	0	1:2	18	190
2	+1	−1	0	1:4	18	190
3	−1	+1	0	1:2	26	190
4	+1	+1	0	1:4	26	190
5	−1	0	−1	1:2	22	170
6	+1	0	−1	1:4	22	170
7	−1	0	+1	1:2	22	210
8	+1	0	+1	1:4	22	210
9	0	−1	−1	1:3	18	170
10	0	+1	−1	1:3	26	170
11	0	−1	+1	1:3	18	210
12	0	+1	+1	1:3	26	210
13	0	0	0	1:3	22	190
14	0	0	0	1:3	22	190
15	0	0	0	1:3	22	190

Nota. Diseño estándar de Box y Behnken (1960) aplicado a los factores de la tabla anterior. El orden de la tabla no es el orden de ejecución.

Un detalle sobre la codificación de la dilución: las relaciones 1:2, 1:3 y 1:4 corresponden a fracciones de pulpa de 33,3 %, 25,0 % y 20,0 %, que no están equiespaciadas. Para que el nivel central quede en el punto medio, conviene codificar la fracción de pulpa y no la relación. Con fracciones de 32, 26 y 20 % el diseño queda balanceado y los niveles extremos siguen siendo cercanos a 1:2 y 1:4.

8.7.3. Análisis

El análisis sigue cinco pasos. Primero, ajustar el modelo cuadrático (8.5) para cada respuesta por mínimos cuadrados. Segundo, evaluar la significancia de los términos con el análisis de varianza y eliminar los no significativos si el modelo reducido no pierde capacidad de predicción. Tercero, verificar la falta de ajuste con las réplicas centrales y revisar los residuos. Cuarto, representar las superficies y contornos. Y quinto, buscar el compromiso entre respuestas, por ejemplo, con la función de deseabilidad, que transforma cada respuesta en una escala de 0 a 1 y combina las transformadas en una media geométrica (Bezerra et al., 2008).

El listado siguiente muestra el ajuste del modelo en Python con la biblioteca statsmodels. Las respuestas son ficticias y deben reemplazarse por las medidas.

```
import numpy as np, pandas as pd
import statsmodels.formula.api as smf

# Matriz codificada de Box-Behnken (15 corridas) y respuesta de ejemplo
x1 = [-1, 1,-1, 1,-1, 1,-1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
x2 = [-1,-1, 1, 1, 0, 0, 0, 0,-1, 1,-1, 1, 0, 0, 0]
x3 = [ 0, 0, 0, 0,-1,-1, 1, 1,-1,-1, 1, 1, 0, 0, 0]
y  = [9.8,9.1,10.6,9.9,9.4,8.8,10.9,10.1,9.2,10.0,10.4,11.2,10.8,10.7,10.9]

df = pd.DataFrame(dict(x1=x1, x2=x2, x3=x3, y=y))
modelo = smf.ols("y ~ x1 + x2 + x3 + I(x1**2) + I(x2**2) + I(x3**2)"
                 " + x1:x2 + x1:x3 + x2:x3", data=df).fit()
print(modelo.summary())

# Punto estacionario: resolver grad(y) = 0 para el modelo ajustado
b = modelo.params
B = np.array([[b["I(x1 ** 2)"], b["x1:x2"]/2, b["x1:x3"]/2],
              [b["x1:x2"]/2, b["I(x2 ** 2)"], b["x2:x3"]/2],
              [b["x1:x3"]/2, b["x2:x3"]/2, b["I(x3 ** 2)"]]])
bl = np.array([b["x1"], b["x2"], b["x3"]])
xs = -0.5 * np.linalg.solve(B, bl)
print("Punto estacionario (codificado):", xs.round(3))
```

El punto estacionario puede ser un máximo, un mínimo o un punto de silla, según los signos de los valores propios de la matriz B. Si cae fuera de la región estudiada, el óptimo no está dentro del diseño y hay que desplazar los niveles, lo que Box y Wilson (1951) resolvieron con el método del ascenso más pronunciado.

8.8. Tamaño de muestra y potencia

¿Cuántas réplicas hacen falta? La respuesta depende de la diferencia que se quiere detectar y de la variabilidad del proceso. Si la desviación estándar entre

fermentaciones repetidas del mismo mosto es de 0,3 % v/v de alcohol, detectar con buena probabilidad una diferencia de 0,5 % v/v entre dos tratamientos exige más réplicas que detectar una de 1,5 % v/v. El cálculo formal está en los textos de diseño de experimentos (Montgomery, 2017), pero exige conocer la variabilidad de antemano. Por eso un ensayo preliminar con tres réplicas del tratamiento central, antes del experimento principal, es la inversión más rentable que puede hacer un tesista: le da la estimación de la variabilidad que necesita para dimensionar el diseño.

En las pruebas sensoriales el criterio es distinto. Un panel de 20 o 30 consumidores, como los de los trabajos regionales revisados, permite detectar diferencias grandes de aceptación, pero no diferencias finas. Si dos formulaciones se diferencian en medio punto en una escala de 5, lo prudente es declararlas equivalentes y elegir por costo o por estabilidad.

8.9. Errores frecuentes

La revisión de trabajos regionales y la experiencia de asesoría de tesis permiten señalar algunos errores que se repiten:

- Confundir el lote de fruta con los tratamientos, al procesar cada tratamiento con fruta de un día distinto.
- Tratar las réplicas analíticas como réplicas experimentales, lo que reduce artificialmente el error y produce diferencias significativas que no existen.
- Elegir niveles demasiado cercanos, de modo que el efecto del factor queda por debajo del error, o demasiado lejanos, de modo que algunos tratamientos fracasan y dejan huecos en el diseño.
- Reportar solo el tratamiento ganador, sin los coeficientes del modelo ni la tabla de ANVA, lo que impide que otro investigador use los resultados.
- Usar el coeficiente de determinación como única medida de calidad del modelo, sin revisar la falta de ajuste ni los residuos.

8.10. Síntesis del capítulo

Los trabajos regionales usan diseños factoriales razonables para comparar tratamientos, pero ninguno ha aplicado la metodología de superficie de

respuesta ni ha usado respuestas cinéticas. La propuesta de este capítulo, un diseño de Box-Behnken de 15 corridas con dilución, temperatura y azúcar inicial como factores y cuatro respuestas que incluyen la retención de vitamina C, es ejecutable con el equipamiento de la FIQ-UNAP en una sola campaña de camu camu. Las condiciones son dos: tratar el lote de fruta como bloque y hacer réplicas biológicas verdaderas.

Capítulo IX: Escalamiento, factibilidad económica y economía circular

Escalamiento, factibilidad económica y economía circular

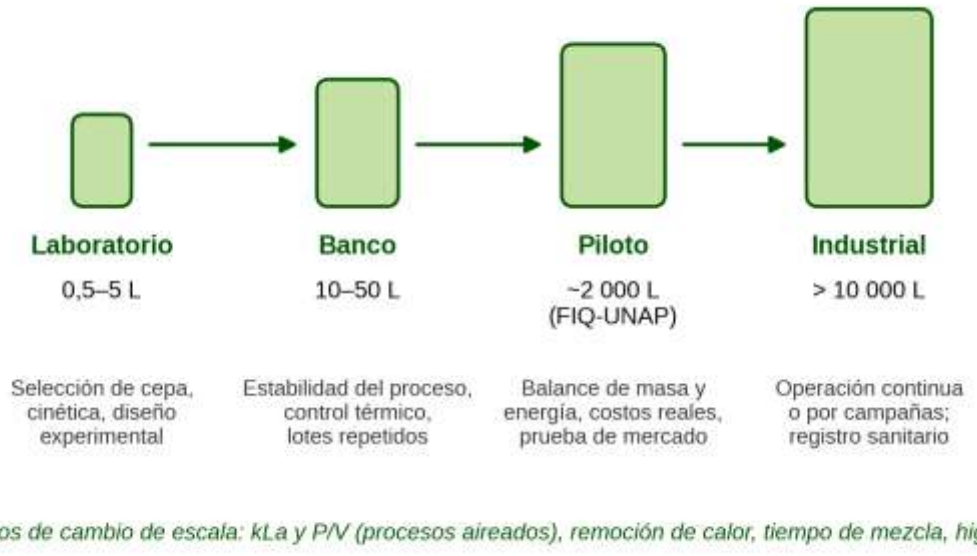
9.1. Del matraz a la planta

Un vino de fruta que funciona en un bidón de 20 litros no funciona necesariamente en un tanque de 2 000. Al aumentar la escala cambian la transferencia de calor, el mezclado, la distribución del inóculo, la presión hidrostática sobre la levadura en el fondo del tanque y, sobre todo, la logística de la materia prima. Este capítulo trata de esos cambios y de la pregunta económica que los acompaña: si producir un fermentado de fruta amazónica a escala comercial tiene sentido, y en qué condiciones.

La Figura 41 muestra las etapas habituales de un escalamiento. En la región existe una ventaja que pocas universidades tienen: la planta piloto de la FIQ-UNAP, con fermentadores de 2 000 L, ocupa el tercer escalón de esa secuencia (Barrera Vela y Reyes Muro, 2015). Lo que falta son los datos del segundo escalón, el de banco, y los estudios que conecten ambos.

Figura 41.

Etapas del escalamiento de un proceso fermentativo



Nota. Elaboración propia. Los volúmenes son orientativos; el volumen de la etapa piloto corresponde a los fermentadores de la planta de la FIQ-UNAP.

9.2. Criterios de escalamiento

9.2.1. Semejanza geométrica y sus límites

El escalamiento más simple mantiene la semejanza geométrica: el tanque grande es una copia ampliada del pequeño, con las mismas proporciones entre altura, diámetro y agitador. La semejanza geométrica no garantiza que el proceso se comporte igual, porque las magnitudes físicas no escalan de la misma forma. El volumen crece con el cubo del diámetro y el área de la pared con el cuadrado, de modo que la relación área/volumen disminuye al aumentar la escala. Si un tanque de 20 L se escala a 2 000 L con proporciones idénticas, el volumen aumenta 100 veces, el diámetro 100^(1/3) = 4,64 veces y la relación área/volumen se reduce en ese mismo factor de 4,64.

Para una fermentación alcohólica, esa reducción tiene una consecuencia directa: el calor generado por la levadura es proporcional al volumen, pero el calor que se disipa por las paredes es proporcional al área. Un bidón de 20 L a temperatura ambiente en Iquitos se mantiene cerca de la temperatura del aire; un tanque de 2 000 L en la misma sala, durante la fase tumultuosa, puede calentarse varios grados por encima. Por eso la camisa de enfriamiento o un serpentín interno, opcionales a escala de laboratorio, son obligatorios a escala piloto si se busca fermentar vinos de fruta por debajo de 25 °C.

9.2.2. Criterios según el tipo de proceso

No existe un criterio único de escalamiento; se elige el que corresponde al fenómeno que limita el proceso (Doran, 2013; Garcia-Ochoa y Gomez, 2009). La Tabla 20 resume los más usados y su pertinencia para los procesos del libro.

Tabla 20.

Criterios de escalamiento y su pertinencia para los fermentados de fruta

Criterio	Qué mantiene constante	Pertinencia
Coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno, k_La	Capacidad de suministro de oxígeno por volumen	Alta en vinagre sumergido y en propagación aerobia de levadura; baja en vino
Potencia por unidad de volumen, P/V	Intensidad de mezclado y dispersión	Media; relevante si hay pulpa en suspensión que debe mantenerse homogénea

Criterio	Qué mantiene constante	Pertinencia
Velocidad en la punta del agitador	Esfuerzo de corte máximo	Baja para levaduras; puede importar en cultivos sensibles al corte
Tiempo de mezcla	Homogeneidad de la adición de azúcar o nutrientes	Media en lote alimentado; alta en continuo
Capacidad de remoción de calor	Temperatura de fermentación	Alta en vinos de fruta a escala piloto e industrial

Nota. Elaboración propia con base en Doran (2013) y Garcia-Ochoa y Gomez (2009).

Para el vino de fruta, que es una fermentación prácticamente anaerobia con agitación mínima, el criterio dominante es la remoción de calor. Para el vinagre sumergido, lo es el k_La, que el capítulo IV relacionó con la velocidad de transferencia de oxígeno. Para una bebida láctica con pulpa en suspensión, la homogeneidad del mezclado cobra peso. Elegir el criterio equivocado explica muchos fracasos de escalamiento.

9.2.3. El inóculo a escala

En una planta el inóculo se prepara en cascada: del tubo o de la levadura seca a un matraz, del matraz a un prefermentador y del prefermentador al fermentador principal. La planta de la FIQ-UNAP usa prefermentadores del 15 al 20 % del volumen principal (Barrera Vela y Reyes Muro, 2015). Si se trabaja con una cepa nativa aislada de la fruta, como las levaduras de camu camu descritas en el capítulo II, la propagación en cascada es además el punto en que la cepa puede contaminarse o perder vitalidad, y conviene verificar su identidad y su pureza antes de cada inoculación a escala piloto.

9.3. Abastecimiento de materia prima

9.3.1. Volumen

La pregunta sobre si hay fruta suficiente para una planta se puede plantear con los datos disponibles. El estudio de prefactibilidad de vino de camu camu de la UNAP estimó un requerimiento de 37,58 t de fruto al año para una producción de 90 254,51 L (Dávila López et al., 2015). En el Perú, la mayor población natural de camu camu se encuentra en Loreto, en las cuencas del Nanay, el Itaya, el Marañón, el Napo, el Yavarí, el Curaray, el Tigre, el Amazonas y el Putumayo (Picon y Acosta, 2000, citados en Vasquez Shuña, 2020). Frente a esa oferta, 37,58 t anuales es una cantidad modesta: para convertirla en hectáreas basta

dividirla entre el rendimiento de las plantaciones o rodales de la zona de acopio, dato que debe tomarse de las series oficiales del sector agrario o de los propios productores.

El volumen, en consecuencia, no es la restricción. Las restricciones son otras: la estacionalidad de la cosecha, concentrada en unos meses del año; la dispersión de los rodales en cochas y riberas, a menudo accesibles solo por río; la perecibilidad del fruto, y la competencia por la fruta con la exportación de pulpa y polvo, que paga por la vitamina C y no por el aroma.

9.3.2. Estacionalidad y almacenamiento

Una planta que solo opere durante la cosecha tiene capacidad ociosa el resto del año. Hay dos salidas. La primera es trabajar con pulpa congelada, lo que desacopla la fermentación de la cosecha, pero añade el costo de la cadena de frío. La segunda es diversificar las frutas: camu camu en su temporada, cocona, aguaje o pijuayo en otras, con el mismo equipamiento. La segunda opción exige conocer el comportamiento fermentativo de cada fruta, que es justamente lo que falta según el capítulo VI.

9.3.3. Localización

El estudio de prefactibilidad evaluó la localización y asignó el puntaje máximo, 10, a Loreto, con Yurimaguas y Nauta como alternativas (Dávila López et al., 2015). La elección de la ciudad dentro de la región depende del equilibrio entre cercanía a los rodales, que favorece a Nauta y a las localidades ribereñas, y acceso a servicios, insumos y mercado, que favorece a Iquitos. Un esquema que combine centros de despulpado y congelamiento cerca de la fruta con una planta de fermentación en Iquitos es probablemente el más realista.

9.4. Factibilidad económica

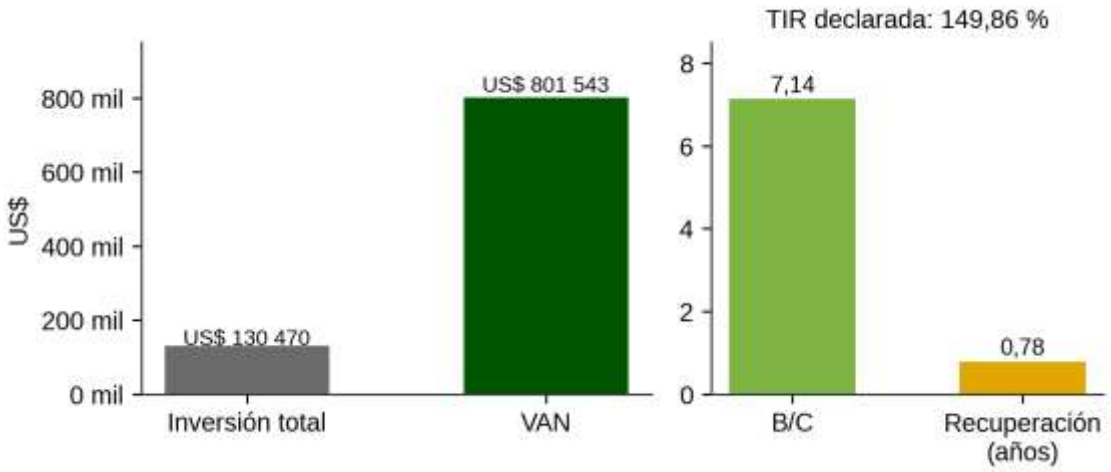
9.4.1. Los indicadores publicados

El único estudio económico regional sobre un fermentado de fruta es el de Dávila López et al. (2015) para vino de camu camu. La Figura 42 y la Tabla 21 resumen sus indicadores. Con una inversión total de US$ 130 469,85, el estudio calculó un valor actual neto de US$ 801 542,75, una tasa interna de retorno de 149,86

%, una relación beneficio/costo de 7,14 y un periodo de recuperación de 0,78 años. La planta procesaría 125,27 kg de fruto por turno de 8 horas para producir 300,85 L de vino, con un consumo de 75,55 kg de vapor y 5,06 kW por turno.

Figura 42.

Indicadores económicos del estudio de prefactibilidad de una planta de vino de camu camu en Loreto



Nota. Elaborado con datos de Dávila López et al. (2015). Montos en dólares estadounidenses del año del estudio.

Tabla 21.

Indicadores técnico-económicos del estudio de prefactibilidad de vino de camu camu

Indicador	Valor reportado
Demanda insatisfecha estimada	451 272,56 L
Producción anual propuesta	90 254,51 L
Requerimiento anual de fruto	37,58 t
Capacidad por turno de 8 h	125,27 kg de fruto; 300,85 L de vino
Servicios por turno	75,55 kg de vapor; 5,06 kW
Inversión total	US$ 130 469,85
Valor actual neto (VAN)	US$ 801 542,75
Tasa interna de retorno (TIR)	149,86 %
Relación beneficio/costo	7,14
Periodo de recuperación	0,78 años
Localización	Loreto (puntaje 10); alternativas Yurimaguas y Nauta

Nota. Datos de Dávila López et al. (2015).

9.4.2. Una lectura crítica

Los indicadores son excepcionalmente altos. Una TIR de 150 % y una recuperación de la inversión en menos de un año son cifras que rara vez se

observan en proyectos agroindustriales reales, y un lector que va a invertir o a financiar debe preguntarse de dónde salen. Sin desmerecer el trabajo, que es el primero de su tipo en la región, hay al menos cinco aspectos que merecen revisión antes de usar esas cifras para decidir.

El primero es la demanda. El estudio supone que la planta coloca su producción en un mercado con una demanda insatisfecha calculada en 2015. Un vino de fruta nuevo compite con vinos de uva nacionales e importados y con cervezas de precio bajo, y su participación real depende de distribución, marca y precio más que de la existencia de consumidores potenciales.

El segundo es el precio de venta. La rentabilidad de un vino de fruta es muy sensible al precio unitario, y un supuesto optimista de pocos soles por botella puede multiplicar el VAN.

El tercero son los costos que suelen subestimarse en estudios académicos: capital de trabajo para la temporada, en la que se compra toda la fruta del año; registro sanitario y cumplimiento normativo; pérdidas de lotes; distribución fuera de Iquitos, con costos de transporte fluvial o aéreo; y comercialización.

El cuarto es el tiempo. Las cifras son de 2015. Precios de fruta, azúcar, botellas, energía y mano de obra cambiaron desde entonces, y la tasa de descuento también.

El quinto es el análisis de sensibilidad. Un estudio de prefactibilidad debería mostrar cómo cambian los indicadores si el precio baja 20 %, si la planta opera al 60 % de su capacidad o si el costo de la fruta se duplica. Con esa información se sabe si el proyecto es robusto o si su rentabilidad depende de un supuesto frágil.

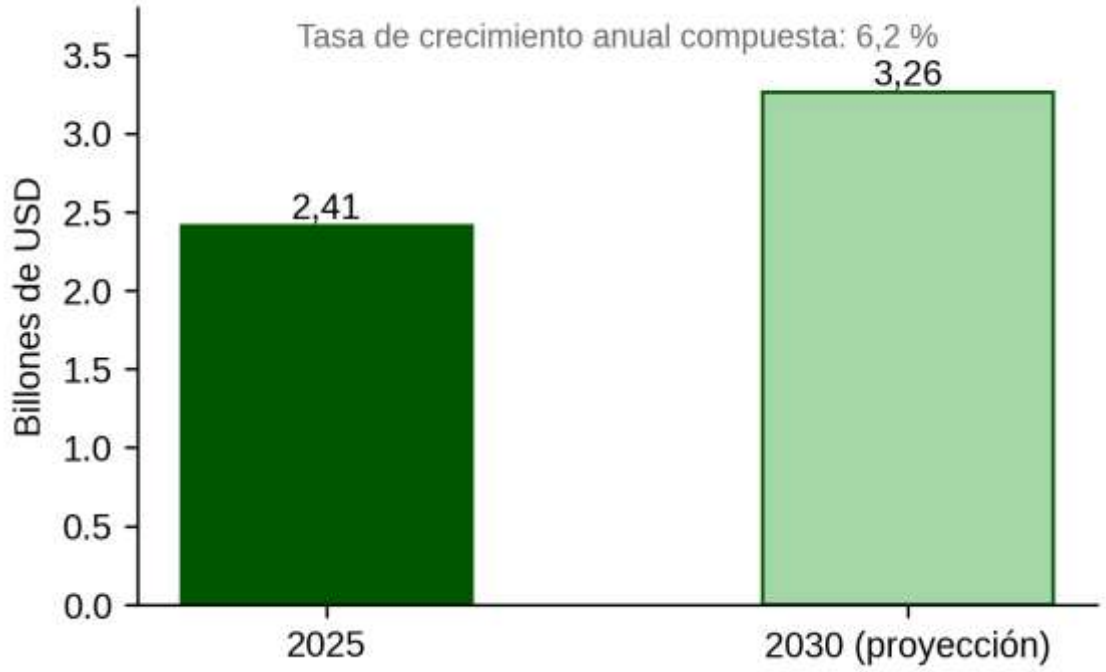
La recomendación práctica es tomar el estudio como punto de partida y actualizarlo con un análisis de sensibilidad antes de cualquier decisión. Un proyecto de fermentados de fruta en la región puede ser viable, pero la viabilidad debe demostrarse con supuestos conservadores.

9.4.3. El contexto de mercado

El mercado de bebidas fermentadas está en expansión. Según las cifras que recoge Batista et al. (2025), el mercado mundial de bebidas fermentadas alcanzaría 2,41 billones de dólares a fines de 2025 y 3,26 billones en 2030, con una tasa de crecimiento anual compuesta de 6,2 % (Figura 43). La revisión señala también que en Sudamérica Brasil y Argentina lideran el consumo, tanto de bebidas alcohólicas como de kombuchas y kéfires.

Figura 43.

Tamaño proyectado del mercado mundial de bebidas fermentadas



Nota. Elaborado con las cifras citadas en Batista et al. (2025). Billones en escala larga (10^{12} dólares).

Las cifras globales no dicen mucho sobre un vino de camu camu en Iquitos, pero sí indican una tendencia: el consumidor busca bebidas con identidad de origen y atributos funcionales, dos cosas que las frutas amazónicas pueden ofrecer si se respaldan con datos. Un producto que declare vitamina C o antioxidantes necesita demostrar que los conserva, y eso nos devuelve al capítulo VII.

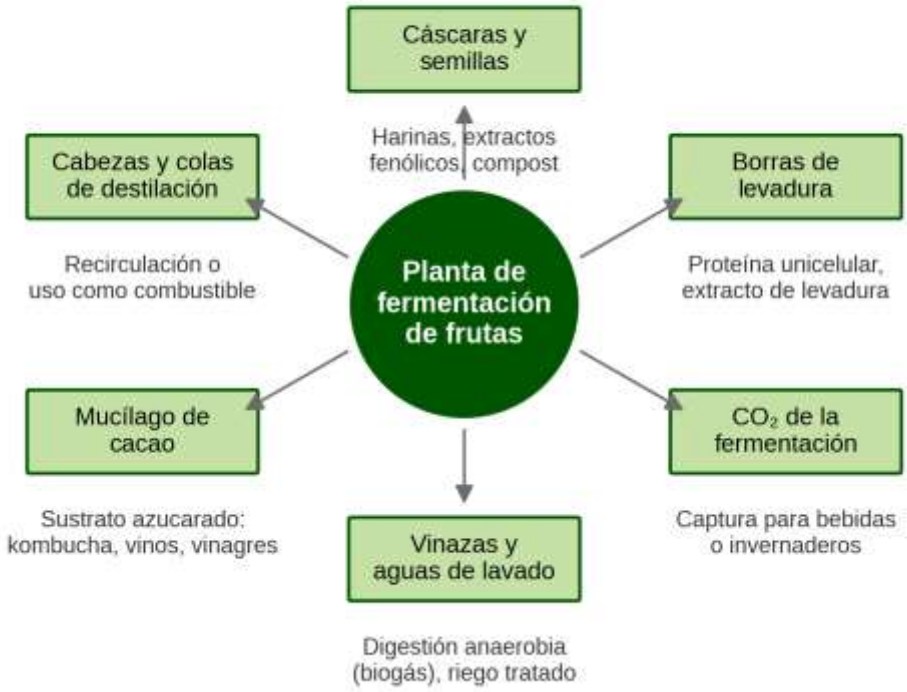
9.5. Residuos y economía circular

9.5.1. Qué residuos genera una planta de fermentados

Una planta de fermentados de fruta genera varias corrientes de residuos. El estudio de prefactibilidad de la UNAP identificó semillas, cáscaras y aguas con espuma (Dávila López et al., 2015). A esas corrientes se añaden las borras de levadura, las vinazas de destilación si se producen aguardientes y el CO_2 de fermentación. La Figura 44 muestra las opciones de valorización de cada una.

Figura 44.

Corrientes de residuos de una planta de fermentados de fruta y opciones de valorización



9.5.2. Opciones de valorización

Las cáscaras y semillas del camu camu conservan compuestos fenólicos y pueden secarse para obtener harinas o extractos. La cáscara, que se retira en el despulpado, es la fracción que da color al fruto maduro, y su aprovechamiento como fuente de pigmentos naturales es una línea que conviene explorar en paralelo con la producción de vino.

Las borras de levadura son biomasa con proteína que puede destinarse a alimentación animal o a la obtención de extracto de levadura, y en plantas pequeñas su uso más simple es el compostaje. Las vinazas de destilación, con carga orgánica alta, no deben verterse a cuerpos de agua; su tratamiento por digestión anaerobia produce biogás, y su aplicación controlada al suelo como fertilizante requiere evaluar su composición.

El mucílago de cacao ilustra cómo un residuo puede convertirse en sustrato. Es el líquido azucarado que escurre de la pulpa que rodea a las semillas durante su fermentación, y en las plantas de beneficio de cacao suele perderse. Podría servir como base para kombuchas, vinagres y bebidas fermentadas, y en Loreto, donde el cacao se cultiva en varias provincias, esa corriente está disponible. No encontramos, sin embargo, cuantificaciones de su volumen y composición en trabajos con autoría verificable, y medirlas es el primer paso para evaluar su uso.

Los residuos lignocelulósicos de la industria de bebidas, como el bagazo cervecero, pueden volver al ciclo como materia prima de etanol mediante hidrólisis y fermentación, siguiendo la misma lógica de sacarificación que se describió para los sustratos amiláceos en el capítulo V.

Tabla 22.

Residuos de una planta de fermentados de fruta y alternativas de valorización

Residuo	Origen	Alternativas	Información regional disponible
Cáscara y semilla	Despulpado	Harinas, extractos fenólicos, pigmentos, compost	No ubicada con autoría verificable
Borras de levadura	Trasiegos	Alimentación animal, extracto de levadura, compost	No ubicada
Vinazas	Destilación	Digestión anaerobia, fertirriego controlado	No ubicada
Aguas de lavado con espuma	Lavado y limpieza	Tratamiento antes del vertido	Identificadas por Dávila López et al. (2015)
CO_2	Fermentación	Carbonatación de bebidas; captura	No ubicada
Mucílago de cacao	Fermentación de semillas	Kombucha, vinagre, bebidas	No ubicada con autoría verificable
Bagazo lignocelulósico	Cervecería y otras agroindustrias	Etanol por hidrólisis y fermentación	No ubicada con autoría verificable

Nota. Elaboración propia a partir de las fuentes citadas.

9.5.3. Valor económico de la valorización

La valorización de residuos rara vez paga por sí sola una planta pequeña, pero reduce costos de disposición y puede abrir productos secundarios. En el caso del camu camu, la cáscara concentra pigmentos y compuestos fenólicos que la industria de extractos compra, y un productor que venda vino y extracto de cáscara tiene dos fuentes de ingreso con la misma fruta. Para estimar ese valor hace falta el dato que el capítulo V señaló como ausente: cuántos kilogramos de cáscara y semilla genera cada tonelada de fruto.

9.6. Transferencia a productores

La mayor parte del vino de fruta que se vende hoy en Iquitos lo elaboran productores artesanales, sin registro sanitario en muchos casos y con procesos transmitidos de forma oral. Para ellos, la mejora más valiosa no es un biorreactor sino un conjunto de prácticas: seleccionar la fruta, medir el °Brix y el pH, usar levadura en dosis adecuadas, controlar la temperatura con medios sencillos, aplicar SO_2 según el pH y registrar cada lote. Las universidades de la región pueden cumplir un papel en esa transferencia mediante cursos cortos, protocolos escritos en lenguaje accesible y servicios de análisis a costo reducido.

La formalización es el otro frente. Un productor que quiera vender fuera de su localidad necesita registro sanitario, y para obtenerlo debe demostrar que su producto cumple las normas del capítulo VII. Los laboratorios universitarios pueden apoyar esa demostración con análisis, y los datos generados alimentarían al mismo tiempo la base de conocimiento que este libro echa en falta.

9.7. Síntesis del capítulo

El escalamiento de un fermentado de fruta amazónica enfrenta problemas técnicos conocidos, entre los que destaca la remoción de calor en fermentaciones alcohólicas a escala piloto, y problemas de abastecimiento que tienen más que ver con la estacionalidad y la logística que con el volumen de fruta: una planta como la propuesta por Dávila López et al. (2015) necesitaría 37,58 t de fruto al año, una cantidad modesta para la región con las mayores poblaciones naturales de camu camu del país. Los indicadores económicos

publicados son alentadores, pero deben actualizarse con supuestos conservadores y análisis de sensibilidad. La valorización de cáscaras, semillas, borras, vinazas y mucílago de cacao puede mejorar la economía de una planta, y para cuantificarla hace falta medir los flujos de residuos que hoy no se reportan.

Capítulo X: Brechas de conocimiento y agenda de investigación

Brechas de conocimiento y agenda de investigación

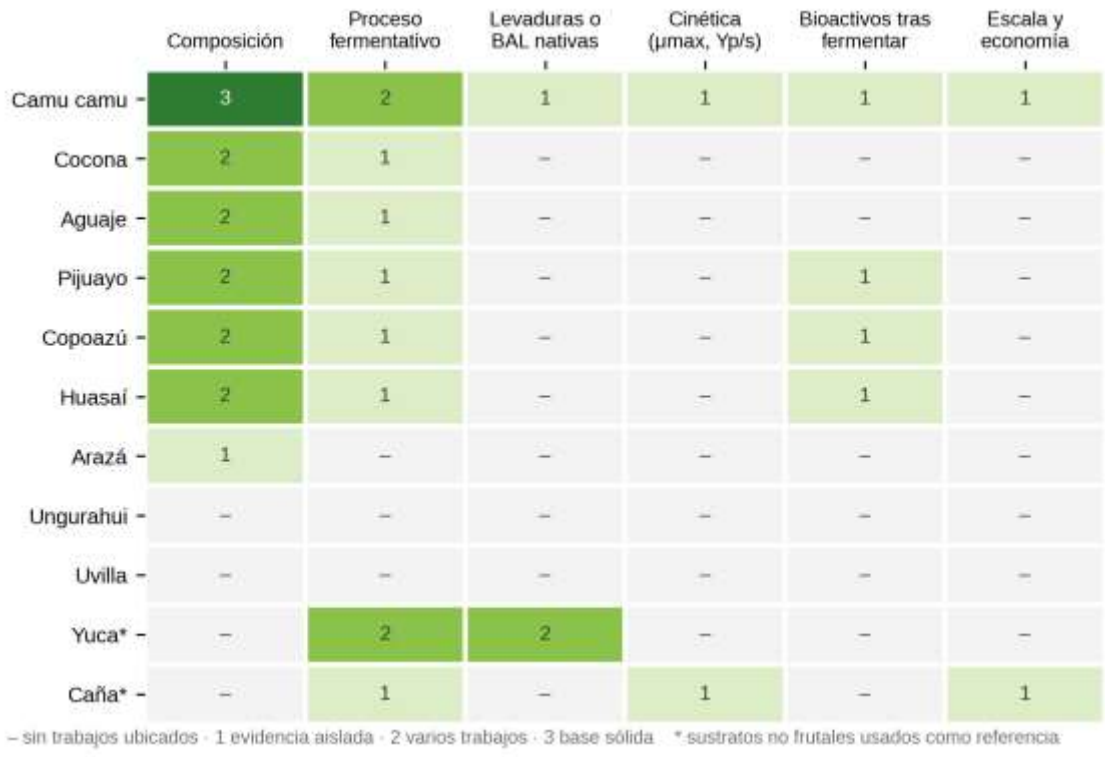
10.1. Lo que sabemos y lo que no

Los nueve capítulos anteriores reunieron la información verificable sobre la fermentación de frutas amazónicas, con énfasis en lo producido en la Amazonía peruana. Este último capítulo hace el balance. No repite los resultados, que están en las tablas de cada capítulo, sino que ordena los vacíos y propone una agenda para cerrarlos, con prioridades y con métodos concretos.

La Figura 45 resume el diagnóstico en forma de matriz. Cada fila es una fruta o sustrato y cada columna un tipo de conocimiento, desde la composición de la materia prima hasta la escala y la economía. El número de cada celda indica el grado de evidencia encontrado: un guion significa que no se ubicaron trabajos, 1 una evidencia aislada, 2 varios trabajos y 3 una base sólida.

Figura 45.

Matriz de evidencia disponible sobre fermentación de frutas y sustratos amazónicos



Nota. Elaboración propia a partir de la revisión documental de este libro. La valoración es cualitativa. La caña y la yuca se incluyen como sustratos de referencia, no por ser frutas.

La lectura de la matriz es clara. La composición de la materia prima es lo mejor conocido, sobre todo para camu camu y cocona. El proceso fermentativo tiene algunos trabajos para camu camu, yuca y caña. Todo lo que está a la derecha de esa columna, es decir, microorganismos nativos, cinética, compuestos bioactivos después de fermentar y escala, está casi vacío. Para las frutas que se venden todos los días en el mercado de Belén, como el aguaje, el ungurahui, la uvilla o el copoazú, no encontramos un solo estudio de fermentación con datos.

10.2. Brechas prioritarias

10.2.1. Criterios de priorización

No todas las brechas tienen la misma importancia. Para ordenarlas usamos tres criterios: la utilidad del conocimiento para un producto que pueda llegar al mercado en pocos años, la disponibilidad de la materia prima en Loreto y la factibilidad técnica con los recursos de los laboratorios regionales. Con esos criterios, la Tabla 23 lista las brechas en orden de prioridad.

Tabla 23.

Brechas de conocimiento priorizadas para la fermentación de frutas amazónicas

Prioridad	Brecha	Por qué importa	Factibilidad regional
1	Evolución de la vitamina C y los fenoles durante la fermentación y el almacenamiento de vino de camu camu	Es el argumento de venta del producto y no hay datos	Alta: DCPIP o HPLC-UV y Folin con corrección
2	Cinética de fermentación de mostos de camu camu, cocona y pijuayo	Sin parámetros no hay escalamiento ni comparación entre cepas	Alta: muestreo de densidad, azúcares y biomasa
3	Aislamiento e identificación de levaduras y BAL nativas de frutas de Loreto	Cepas adaptadas pueden mejorar aroma, tolerancia y diferenciación	Media: aislamiento local, secuenciación externa
4	Caracterización de vinos de aguaje, cocona, arazá, copoazú y ungurahui	Frutas disponibles sin ningún estudio fermentativo	Alta
5	Metanol y compuestos volátiles en destilados y vinos de fruta	Requisito de inocuidad y de calidad	Baja: requiere cromatografía de gases
6	Interacción SO_2-ácido ascórbico en vinos de camu camu	Define la dosis de sulfito y la estabilidad oxidativa	Media
7	Vinagres y kombuchas de frutas amazónicas	Productos de bajo riesgo regulatorio y buena estabilidad	Alta
8	Balances de materia con subproductos y valorización	Base para la economía circular y los costos reales	Alta

Prioridad	Brecha	Por qué importa	Factibilidad regional
9	Actualización económica con análisis de sensibilidad	Los indicadores de 2015 no sirven para decidir hoy	Alta
10	Norma técnica específica para vinos de frutas tropicales	Formalización de productores	Depende de datos de las prioridades 1 a 5

Nota. Elaboración propia. La prioridad refleja el criterio de los autores y puede discutirse.

10.2.2. La vitamina C como primera prioridad

La primera brecha merece un comentario. El camu camu se promociona por su ácido ascórbico, y los productos fermentados que se venden en la región usan esa imagen. Sin embargo, no hay un solo dato publicado sobre cuánto ácido ascórbico contiene un vino de camu camu al salir del tanque, a los tres meses o al año. La química permite anticipar pérdidas: el ácido ascórbico se oxida con el oxígeno disuelto, se degrada con el calor de la pasteurización y reacciona con compuestos del medio. Pero también permite anticipar algo de protección, porque el pH bajo del vino estabiliza la molécula y la fermentación consume parte del oxígeno. Cuál de los dos efectos domina es una pregunta experimental que se responde con un diseño sencillo: medir el ácido ascórbico en la pulpa, en el mosto, al final de la fermentación, después de la pasteurización y cada mes durante el almacenamiento, en botellas con y sin espacio de cabeza. Un trabajo así, bien hecho, sería publicable en una revista indexada y tendría uso inmediato para los productores.

10.2.3. Cinética y cepas

Las prioridades segunda y tercera van juntas. Aislar levaduras de camu camu, cocona o aguaje sin evaluar su cinética en mosto de fruta deja el trabajo a medias, y estudiar la cinética solo con levadura de panificación renuncia a la posibilidad de diferenciar el producto. El trabajo de Matos et al. (2021) con camu camu del norte de Brasil muestra el camino: quince aislados, tres especies con capacidad fermentativa y una cepa, *M. caribbica* CC003, con 91,7 % de eficiencia y tolerancia a 84,4 g/L de etanol. Repetir ese esquema con fruta de Loreto, añadiendo la evaluación en mosto real y no solo en caldo de glucosa, es un proyecto de tesis doctoral o de dos tesis de pregrado encadenadas.

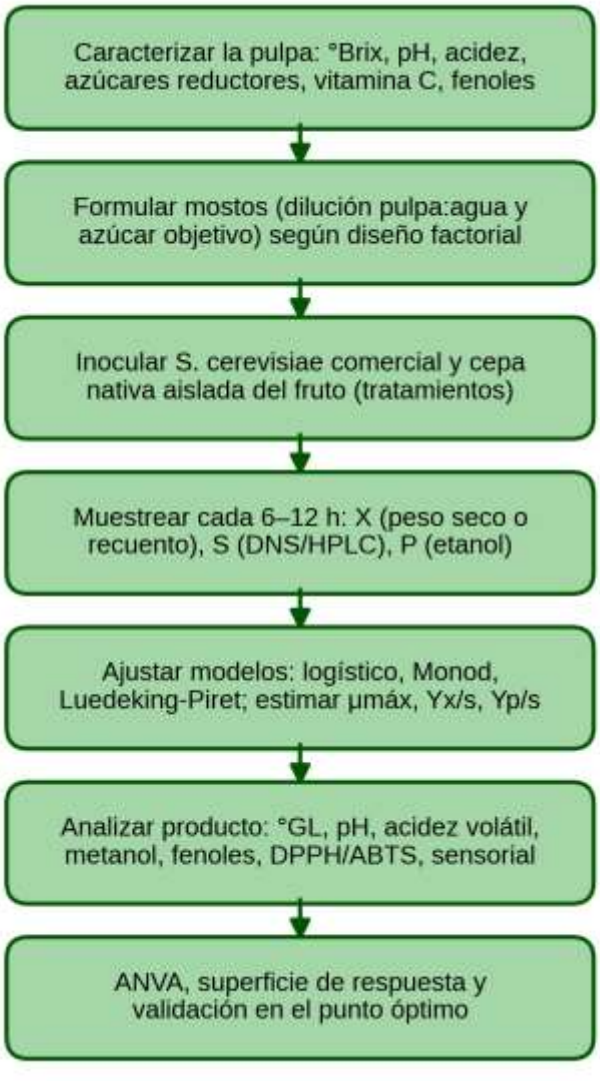
10.3. Un protocolo mínimo para estudios cinéticos

10.3.1. Por qué un protocolo común

Los datos de fermentación de frutas son difíciles de comparar porque cada trabajo usa condiciones, métodos y formas de reporte distintas. Si los grupos de la UNAP, la Universidad Nacional de Ucayali, el IIAP y otras instituciones de la región acordaran un protocolo mínimo, cada nueva tesis sumaría a una base de datos común en lugar de quedar como un resultado aislado. La Figura 46 y la Tabla 24 proponen ese protocolo.

Figura 46.

Protocolo mínimo propuesto para estudios cinéticos de fermentación de frutas amazónicas



Nota. Propuesta de los autores con base en los capítulos IV, VII y VIII.

Tabla 24.

Elementos del protocolo mínimo para estudios cinéticos

Elemento	Especificación mínima	Comentario
Materia prima	Especie, procedencia, fecha de cosecha, estado de madurez	La madurez del camu camu cambia la vitamina C y los fenoles
Caracterización de la pulpa	°Brix, pH, acidez (indicando el ácido), azúcares reductores, vitamina C	Antes de diluir y corregir
Mosto	Dilución, azúcar añadido, SO_2, nutrientes, volumen	Todas las adiciones con cantidades
Inóculo	Cepa (comercial con marca o nativa con identificación), dosis, preparación	Levadura seca: indicar rehidratación
Condiciones	Temperatura controlada o registrada, recipiente, agitación	Registrar la temperatura del mosto, no solo la del ambiente
Muestreo	Cada 3–4 h el primer día; cada 12 h después; X, S y P en la misma muestra	Mínimo tres fermentaciones independientes
Métodos	Biomasa por peso seco o recuento; azúcares por DNS o HPLC; etanol por destilación o GC	Indicar curvas de calibración
Modelado	Logístico o Gompertz como mínimo; Monod con inhibición si hay datos de S	Reportar parámetros con intervalos de confianza y residuos
Producto final	°GL, pH, acidez total y volátil, azúcar residual, vitamina C, fenoles, sensorial	Repetir vitamina C y fenoles durante el almacenamiento
Datos	Tablas completas en anexo o repositorio	Permite reanálisis y comparación

Nota. Propuesta de los autores.

10.3.2. Sobre la publicación de datos

El último elemento de la tabla es quizá el más importante y el menos costoso. Una tesis que publica en su anexo las series completas de biomasa, azúcar y etanol permite que otro investigador ajuste modelos distintos, compare con sus propios datos o use los resultados en una revisión. Los repositorios institucionales de la UNAP y de otras universidades peruanas admiten archivos complementarios, y los asesores de tesis pueden exigir ese anexo como parte del informe final.

10.4. Líneas de investigación y temas de tesis

La agenda puede organizarse en tres horizontes (Figura 47). En el corto plazo, uno o dos años, caben los estudios que pueden hacerse con el equipamiento existente: cinética de vinos de camu camu, cocona y pijuayo; evolución de la vitamina C; bioprospección de levaduras. En el mediano plazo, tres o cuatro años, la optimización por superficie de respuesta, el desarrollo de vinagres y

kombuchas y los estudios de vida útil. En el largo plazo, el escalamiento en la planta piloto, el registro sanitario de productos y la valorización de residuos.

Figura 47.

Horizontes de la agenda de investigación propuesta



La Tabla 25 traduce esa agenda en temas de tesis concretos, con el tipo de trabajo y los capítulos del libro que les sirven de base. Los títulos son propuestas de trabajo; cada asesor y cada tesista los ajustarán a sus recursos.

Tabla 25.

Temas de tesis sugeridos

Tema propuesto	Nivel	Base en el libro
Retención de ácido ascórbico y fenoles totales durante la fermentación y el almacenamiento de vino de camu camu (*Myrciaria dubia*)	Pregrado	Capítulos V y VII
Cinética de la fermentación alcohólica de mostos de cocona (*Solanum sessiliflorum*) con *S. cerevisiae*: ajuste de los modelos logístico, Gompertz y Luedeking-Piret	Pregrado	Capítulo IV
Aislamiento, identificación molecular y evaluación fermentativa de levaduras nativas de frutos de camu camu de Loreto	Pregrado o maestría	Capítulos II y IV
Optimización de un vino de camu camu mediante diseño de Box-Behnken: dilución, temperatura y azúcar inicial	Pregrado	Capítulo VIII
Elaboración y caracterización de vino de pijuayo (*Bactris gasipaes*) con énfasis en carotenoides	Pregrado	Capítulos VI y VII
Efecto del pH y del SO_2 libre sobre la estabilidad oxidativa de vinos de camu camu	Maestría	Capítulos V y VII
Vinagre de camu camu por método de superficie: cinética de acetificación y caracterización	Pregrado	Capítulos V y VI
Kombucha con pulpa de frutas amazónicas: acidez, etanol residual, fenoles y vida útil	Pregrado	Capítulos II, VI y VII
Fermentación de semillas de copoazú y macambo: sucesión microbiana y precursores de aroma	Maestría	Capítulo VI

Tema propuesto	Nivel	Base en el libro
Bebida láctica probiótica de arazá o copoazú con cepas nativas del masato	Maestría	Capítulos II y VI
Escalamiento de la fermentación de vino de camu camu en la planta piloto de la FIQ-UNAP	Maestría	Capítulos V y IX
Actualización técnico-económica y análisis de sensibilidad de una planta de fermentados de fruta en Loreto	Pregrado	Capítulo IX
Balance de materia y valorización de cáscaras y semillas en la elaboración de vino de camu camu	Pregrado	Capítulos V y IX
Metanol y alcoholes superiores en aguardientes de frutas amazónicas por cromatografía de gases	Pregrado	Capítulos III, V y VII

Nota. Propuestas de los autores.

10.5. Capacidades necesarias

10.5.1. Equipamiento

Buena parte de la agenda puede ejecutarse con lo que ya existe en los laboratorios universitarios de Iquitos: refractómetros, potenciómetros, espectrofotómetros UV-visible, estufas, incubadoras y material de destilación. Los equipos que marcarían una diferencia son pocos y concretos: un cromatógrafo de gases con detector de ionización de llama para metanol y volátiles, un HPLC con detectores UV e índice de refracción para azúcares, ácidos orgánicos y ácido ascórbico, y biorreactores de mesa con control de temperatura y pH para los estudios cinéticos. Varios de estos equipos pueden existir ya en otras dependencias de la universidad o en el IIAP; la colaboración entre laboratorios es la vía más rápida para usarlos.

10.5.2. Colaboración

La investigación sobre fermentación de frutas amazónicas cruza disciplinas: agronomía para la materia prima, microbiología para las cepas, ingeniería química para el proceso, ciencia de alimentos para la calidad, economía para la factibilidad. Ninguna facultad reúne todas esas capacidades. Las redes con universidades brasileñas, que tienen la literatura más desarrollada sobre bebidas fermentadas de frutas amazónicas como muestra la revisión de Batista et al. (2025), y con la Universidad Nacional de Ucayali, que tiene la experiencia más directa en vinos de camu camu en el Perú, pueden acelerar el avance.

10.6. Consideraciones éticas y de soberanía

Dos temas quedan fuera del alcance técnico del libro pero no pueden omitirse. El primero es el acceso a los recursos genéticos. Las levaduras y bacterias nativas que se aíslen de frutas amazónicas son recursos genéticos, y su uso comercial está sujeto a la normativa nacional de acceso a recursos genéticos y a los compromisos internacionales del Perú en esa materia. Un grupo de investigación que aísle una cepa promisoria debería depositarla en una colección reconocida y documentar su origen desde el inicio.

El segundo es el conocimiento tradicional. Las chichas, el masato y otras fermentaciones son parte del patrimonio de pueblos indígenas y comunidades ribereñas. Estudiarlas, estandarizarlas y convertirlas en productos comerciales plantea preguntas sobre reconocimiento y distribución de beneficios que la investigación académica debe hacerse con seriedad, idealmente en diálogo con las comunidades.

10.7. Conclusiones del libro

La fermentación de frutas amazónicas tiene una base científica sólida en los principios, que son los de cualquier fermentación, y una base empírica débil en los datos propios de la región. Las frutas de Loreto son sustratos fermentables con particularidades conocidas: el camu camu, muy ácido y con poco azúcar; la cocona, con pocos sólidos solubles; el aguaje y el pijuayo, con grasa, carotenoides y, en el pijuayo, almidón y factores antinutricionales que exigen cocción. Los microorganismos capaces de fermentarlas existen en la propia fruta, como muestran las levaduras aisladas de camu camu en Brasil, y en las fermentaciones tradicionales, como las bacterias ácido-lácticas del masato.

En la Amazonía peruana el conocimiento experimental se concentra en destilados de sustratos amiláceos, en una cerveza artesanal con cocona elaborada en la UNAP y en el vino dulce de camu camu de la Universidad Nacional de Ucayali. La planta piloto de la FIQ-UNAP demostró a escala de 2 000 L una fermentación de caña de 7,4 % v/v en 16 horas, y es un recurso que podría servir para escalar productos de fruta. El único estudio económico

regional sobre un fermentado de fruta es alentador, pero sus indicadores deben actualizarse con supuestos conservadores.

Las brechas son claras y abordables: medir la evolución de la vitamina C y los fenoles durante la fermentación y el almacenamiento, obtener parámetros cinéticos con muestreo adecuado, aislar y evaluar cepas nativas, caracterizar vinos de las frutas que nadie ha estudiado, controlar el metanol en destilados y registrar los subproductos en los balances de materia. Ninguna de estas tareas requiere tecnología inaccesible. Requieren, sobre todo, método, continuidad y la decisión de publicar los datos completos. Si este libro contribuye a que las próximas tesis sobre frutas amazónicas se diseñen con esos criterios, habrá cumplido su propósito.

10.8. Glosario

Las definiciones siguientes recogen el sentido con que se usan los términos en este libro. No pretenden sustituir a los diccionarios técnicos, sino facilitar la lectura a estudiantes de pregrado y a lectores de otras disciplinas.

Acetificación. Oxidación del etanol a ácido acético por bacterias acéticas en presencia de oxígeno. Es la segunda etapa de la elaboración de vinagre.

Acidez titulable. Cantidad de ácidos valorables con una base hasta un punto final definido, generalmente pH 8,2. Se expresa como el ácido predominante del producto: cítrico, tartárico, láctico o acético.

Acidez volátil. Fracción de la acidez de un vino formada por ácidos que se separan por destilación, principalmente el acético. Es el indicador más usado de alteración por bacterias acéticas.

Alcohol superior. Alcohol de más de dos átomos de carbono, como el isoamílico o el isobutílico, formado por la levadura a partir de aminoácidos. En concentraciones bajas aporta aroma; en altas, notas pesadas.

Aldehído. Compuesto con grupo carbonilo terminal. En fermentación, el más importante es el acetaldehído, intermediario de la formación de etanol y producto de la oxidación del vino.

Antocianina. Pigmento fenólico hidrosoluble de color rojo, púrpura o azul según el pH. Da color al camu camu maduro, al huasaí y al ungurahui.

Azeótropo. Mezcla líquida que hierve sin cambiar de composición. La mezcla etanol-agua forma un azeótropo con 95,6 % en masa de etanol, límite de la destilación simple.

Bacterias acéticas. Bacterias aerobias estrictas que oxidan el etanol a ácido acético. Incluyen los géneros *Acetobacter*, *Gluconobacter* y afines.

Bacterias ácido-lácticas (BAL). Bacterias grampositivas que producen ácido láctico como producto principal del metabolismo de azúcares. Pueden ser homofermentativas o heterofermentativas.

Bioprospección. Búsqueda sistemática de organismos o moléculas con valor biotecnológico en un ambiente natural, por ejemplo levaduras con capacidad fermentativa en frutos silvestres.

Borras o lías. Sedimento formado al final de la fermentación por levaduras muertas, restos de pulpa y sales precipitadas.

Box-Behnken, diseño de. Diseño experimental de tres niveles para ajustar modelos cuadráticos, con corridas en los puntos medios de las aristas del espacio experimental y réplicas en el centro.

°Brix. Porcentaje en masa de sólidos solubles, medido por refractometría. En mostos aproxima el contenido de azúcares.

Chaptalización. Adición de azúcar a un mosto para aumentar el grado alcohólico potencial del producto.

Chicha. Nombre genérico de bebidas tradicionales andinas y amazónicas, fermentadas o no, elaboradas con maíz, yuca, frutos de palmera u otros sustratos.

Clarificación. Eliminación de partículas en suspensión de un líquido fermentado mediante sedimentación, agentes clarificantes, frío o filtración.

Coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno. Parámetro k_{La} que mide la capacidad de transferir oxígeno del gas al líquido de un biorreactor. Es el criterio habitual de escalamiento de procesos aerobios.

Constante de saturación. Parámetro K_S del modelo de Monod igual a la concentración de sustrato a la que la velocidad específica de crecimiento es la mitad de la máxima.

Crabtree, efecto. Fermentación de la glucosa a etanol por *S. cerevisiae* aun en presencia de oxígeno, cuando la glucosa está en concentración alta.

Destilación. Separación de los componentes de una mezcla líquida por diferencia de volatilidad, mediante evaporación y condensación.

DNS, método del. Método espectrofotométrico para azúcares reductores basado en su reacción con el ácido 3,5-dinitrosalicílico.

Eficiencia fermentativa. Relación porcentual entre el rendimiento de etanol observado y el teórico de 0,511 g por g de glucosa.

Escaldado. Tratamiento térmico breve en agua caliente o vapor que inactiva enzimas y reduce la carga microbiana superficial de la fruta.

Éster. Compuesto formado por un ácido y un alcohol. Los ésteres etílicos y de acetato aportan aromas frutales a los vinos.

Fase estacionaria. Etapa de un cultivo en lote en que la biomasa deja de aumentar. En fermentación alcohólica, la levadura sigue produciendo etanol en esta fase.

Fase exponencial. Etapa de un cultivo en que la velocidad específica de crecimiento es aproximadamente constante y la biomasa crece de forma exponencial.

Fenoles totales. Suma de compuestos fenólicos estimada con el reactivo de Folin-Ciocalteu y expresada como ácido gálico. El método responde también a otros reductores, como el ácido ascórbico.

Fermentación alcohólica. Conversión de azúcares en etanol y CO_2 por levaduras, en condiciones anaerobias o con glucosa abundante.

Fermentación espontánea. Fermentación conducida por los microorganismos presentes en la materia prima o el ambiente, sin inoculación deliberada.

Fermentación maloláctica. Transformación del ácido málico en ácido láctico y CO_2 por bacterias ácido-lácticas, con reducción de la acidez.

Gay-Lussac, ecuación de. Ecuación global de la fermentación alcohólica de la glucosa: $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2\ C_2H_5OH + 2\ CO_2$.

°GL. Grados Gay-Lussac; porcentaje en volumen de etanol a 20 °C. Equivale a % v/v.

Glucólisis. Ruta metabólica que transforma la glucosa en piruvato, con producción neta de 2 ATP y 2 NADH por molécula.

Inóculo. Cultivo de microorganismos que se añade a un medio para iniciar la fermentación.

Kombucha. Bebida obtenida por fermentación de té azucarado con un consorcio simbiótico de levaduras y bacterias acéticas.

Latencia. Periodo inicial de un cultivo en que los microorganismos se adaptan al medio y la biomasa casi no aumenta.

Lote alimentado. Modo de operación en que se añade sustrato durante la fermentación sin retirar producto hasta el final.

Lote, operación en. Modo de operación en que el fermentador se carga, se inocula y se descarga al final, sin adiciones intermedias.

Luedeking-Piret, modelo de. Modelo que expresa la velocidad de formación de producto como suma de un término asociado al crecimiento y otro proporcional a la biomasa.

Masato. Bebida tradicional amazónica de yuca cocida y fermentada, con adición de una fuente de amilasas.

Metanol. Alcohol de un carbono formado por hidrólisis de las pectinas. Es tóxico y se concentra en las cabezas de destilación.

Monod, modelo de. Relación hiperbólica entre la velocidad específica de crecimiento y la concentración del sustrato limitante.

Mosto. Líquido azucarado preparado para fermentar, obtenido de la pulpa o jugo de la fruta con dilución y correcciones.

No-Saccharomyces*. Levaduras de géneros distintos de* Saccharomyces*, frecuentes en frutas y en las primeras etapas de las fermentaciones espontáneas.

Pasteurización. Tratamiento térmico moderado que reduce la carga de microorganismos alterantes o patógenos sin esterilizar el producto.

Pectinasas. Enzimas que hidrolizan las pectinas de la fruta, reducen la viscosidad y facilitan la extracción y la clarificación.

Probiótico. Microorganismo vivo que, administrado en cantidad adecuada, confiere un beneficio a la salud del huésped (Hill et al., 2014).

Productividad volumétrica. Cantidad de producto formado por unidad de volumen y de tiempo, en $g \cdot L^{-1} \cdot h^{-1}$.

Rendimiento. Cantidad de producto o de biomasa formada por unidad de sustrato consumido; se simboliza $Y_{P/S}$ o $Y_{X/S}$.

SCOBY. Sigla en inglés de cultivo simbiótico de bacterias y levaduras; el consorcio que fermenta la kombucha y forma una película de celulosa.

SO_2 molecular. Fracción del dióxido de azufre libre que está sin disociar y que ejerce la acción antimicrobiana. Depende del pH.

Superficie de respuesta, metodología de. Conjunto de técnicas de diseño experimental y regresión para modelar una respuesta en función de varios factores y localizar su óptimo.

Trasiego. Paso de un vino a otro recipiente separándolo de las borras sedimentadas.

Velocidad específica de crecimiento (μ). Velocidad de aumento de la biomasa por unidad de biomasa presente, en h^{-1}.

Vinaza. Residuo líquido de la destilación de un vino o mosto fermentado, con alta carga orgánica.

Referencias Bibliográficas

Akter, M. S., Oh, S., Eun, J.-B., y Ahmed, M. (2011). Nutritional compositions and health promoting phytochemicals of camu-camu (Myrciaria dubia) fruit: A review. *Food Research International, 44*(7), 1728–1732. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.03.045

Andrews, J. F. (1968). A mathematical model for the continuous culture of microorganisms utilizing inhibitory substrates. *Biotechnology and Bioengineering, 10*(6), 707–723. https://doi.org/10.1002/bit.260100602

Aniceto, A., Montenegro, J., Cadena, R. S., y Teodoro, A. J. (2021). Physicochemical characterization, antioxidant capacity, and sensory properties of murici (Byrsonima crassifolia (L.) Kunth) and taperebá (Spondias mombin L.) beverages. *Molecules, 26*(2), 332. https://doi.org/10.3390/molecules26020332

AOAC International. (2019). *Official methods of analysis of AOAC International* (21.ª ed.). AOAC International.

Bai, F. W., Anderson, W. A., y Moo-Young, M. (2008). Ethanol fermentation technologies from sugar and starch feedstocks. *Biotechnology Advances, 26*(1), 89–105. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.09.002

Barrera Vela, R. N., y Reyes Muro, J. L. (2015). *Optimización de los parámetros del proceso de fermentación del jugo de caña para obtener bioetanol en la planta piloto de alcohol de la Facultad de Ingeniería Química-UNAP* [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana]. https://api-repositorio.unapiquitos.edu.pe/server/api/core/bitstreams/6c10b394-d2ba-46c5-b1c8-04ce73851c84/content

Batista, B. N., Correia, A. C., Jordão, A. M., y Albuquerque, P. M. (2025). Fermented beverages from Amazonian fruits: Nutritional characteristics and bioactive compounds. *Beverages, 11*(5), 152. https://doi.org/10.3390/beverages11050152

Benzie, I. F. F., y Strain, J. J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "antioxidant power": The FRAP assay. *Analytical Biochemistry, 239*(1), 70–76. https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292

Bezerra, M. A., Santelli, R. E., Oliveira, E. P., Villar, L. S., y Escaleira, L. A. (2008). Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta, 76*(5), 965–977. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.05.019

Bisson, L. F. (1999). Stuck and sluggish fermentations. *American Journal of Enology and Viticulture, 50*(1), 107–119. https://doi.org/10.5344/ajev.1999.50.1.107

Box, G. E. P., y Behnken, D. W. (1960). Some new three level designs for the study of quantitative variables. *Technometrics, 2*(4), 455–475. https://doi.org/10.1080/00401706.1960.10489912

Box, G. E. P., y Wilson, K. B. (1951). On the experimental attainment of optimum conditions. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 13*(1), 1–45. https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1951.tb00067.x

Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., y Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology, 28*(1), 25–30. https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5

Casey, G. P., e Ingledew, W. M. (1986). Ethanol tolerance in yeasts. *CRC Critical Reviews in Microbiology, 13*(3), 219–280. https://doi.org/10.3109/10408418609108739

Colehour, A. M., Meadow, J. F., Liebert, M. A., Cepon-Robins, T. J., Gildner, T. E., Urlacher, S. S., Bohannan, B. J. M., Snodgrass, J. J., y Sugiyama, L. S. (2014). Local domestication of lactic acid bacteria via cassava beer fermentation. *PeerJ, 2*, e479. https://doi.org/10.7717/peerj.479

Dávila López, A. A., Pizango Ferreyra, E., y Paredes Rodríguez, W. (2015). *Estudio de pre factibilidad para la instalación de una planta industrial de producción de vino a partir del fruto de camu camu (Myrciaria dubia H.B.K)*

en la región Loreto [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana]. http://hdl.handle.net/20.500.12737/4857

De Deken, R. H. (1966). The Crabtree effect: A regulatory system in yeast. *Journal of General Microbiology, 44*(2), 149–156. https://doi.org/10.1099/00221287-44-2-149

De Vuyst, L., y Weckx, S. (2016). The cocoa bean fermentation process: From ecosystem analysis to starter culture development. *Journal of Applied Microbiology, 121*(1), 5–17. https://doi.org/10.1111/jam.13045

Doran, P. M. (2013). *Bioprocess engineering principles* (2.ª ed.). Academic Press.

Fleet, G. H. (2003). Yeast interactions and wine flavour. *International Journal of Food Microbiology, 86*(1–2), 11–22. https://doi.org/10.1016/S0168-1605(03)00245-9

Fujita, A., Sarkar, D., Genovese, M. I., y Shetty, K. (2017). Improving anti-hyperglycemic and anti-hypertensive properties of camu-camu (Myriciaria dubia Mc. Vaugh) using lactic acid bacterial fermentation. *Process Biochemistry, 59*, 133–140. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359511317303616

García-Chacón, J. M., Marín-Loaiza, J. C., y Osorio, C. (2023). Camu camu (Myrciaria dubia (Kunth) McVaugh): An Amazonian fruit with biofunctional properties – A review. *ACS Omega, 8*(6), 5169–5183. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07245

Garcia-Ochoa, F., y Gomez, E. (2009). Bioreactor scale-up and oxygen transfer rate in microbial processes: An overview. *Biotechnology Advances, 27*(2), 153–176. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.10.006

Gullo, M., y Giudici, P. (2008). Acetic acid bacteria in traditional balsamic vinegar: Phenotypic traits relevant for starter cultures selection. *International Journal of Food Microbiology, 125*(1), 46–53. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2007.11.076

Guriz Panaifo, S. L. (2018). *Microorganismos de uso industrial: vinos, quesos, yogurt, salsa de soja* [Examen de suficiencia profesional, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana]. https://api-repositorio.unapiquitos.edu.pe/server/api/core/bitstreams/96a34fcf-9ac6-4a24-9f77-258663f75679/content

Hazelwood, L. A., Daran, J.-M., van Maris, A. J. A., Pronk, J. T., y Dickinson, J. R. (2008). The Ehrlich pathway for fusel alcohol production: A century of research on Saccharomyces cerevisiae metabolism. *Applied and Environmental Microbiology, 74*(8), 2259–2266. https://doi.org/10.1128/AEM.02625-07

Hill, C., Guarner, F., Reid, G., Gibson, G. R., Merenstein, D. J., Pot, B., Morelli, L., Canani, R. B., Flint, H. J., Salminen, S., Calder, P. C., y Sanders, M. E. (2014). Expert consensus document: The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics consensus statement on the scope and appropriate use of the term probiotic. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology, 11*(8), 506–514. https://doi.org/10.1038/nrgastro.2014.66

Instituto Nacional de Calidad. (2016). *NTP 212.014:2011 (revisada el 2016). Bebidas alcohólicas vitivinícolas. Vinos. Requisitos* (3.ª ed.). INACAL.

Jayabalan, R., Malbaša, R. V., Lončar, E. S., Vitas, J. S., y Sathishkumar, M. (2014). A review on kombucha tea—Microbiology, composition, fermentation, beneficial effects, toxicity, and tea fungus. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 13*(4), 538–550. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12073

Jolly, N. P., Varela, C., y Pretorius, I. S. (2014). Not your ordinary yeast: Non-Saccharomyces yeasts in wine production uncovered. *FEMS Yeast Research, 14*(2), 215–237. https://doi.org/10.1111/1567-1364.12111

Kurtzman, C. P., y Robnett, C. J. (1998). Identification and phylogeny of ascomycetous yeasts from analysis of nuclear large subunit (26S) ribosomal DNA partial sequences. *Antonie van Leeuwenhoek, 73*(4), 331–371. https://doi.org/10.1023/A:1001761008817

Langley, P. C., Pergolizzi, J. V., Jr., Taylor, R., Jr., y Ridgway, C. (2015). Antioxidant and associated capacities of camu camu (Myrciaria dubia): A systematic review. *The Journal of Alternative and Complementary Medicine, 21*(1), 8–14. https://doi.org/10.1089/acm.2014.0130

Levenspiel, O. (1980). The Monod equation: A revisit and a generalization to product inhibition situations. *Biotechnology and Bioengineering, 22*(8), 1671–1687. https://doi.org/10.1002/bit.260220810

Lonvaud-Funel, A. (1999). Lactic acid bacteria in the quality improvement and depreciation of wine. *Antonie van Leeuwenhoek, 76*(1–4), 317–331. https://doi.org/10.1023/A:1002088931106

López Zazueta, A. C., Gutiérrez Zavala, P., y Zazueta Arguilez, C. G. (2022). Estandarización química de una bebida fermentada de kombucha a base de té verde, té de limón e infusión de hojas de guayaba. *Revista de Investigación Académica Sin Frontera, 15*(38). https://revistainvestigacionacademicasinfrontera.unison.mx/index.php/RDIASF/article/view/507

Luedeking, R., y Piret, E. L. (1959). A kinetic study of the lactic acid fermentation. Batch process at controlled pH. *Journal of Biochemical and Microbiological Technology and Engineering, 1*(4), 393–412. https://doi.org/10.1002/jbmte.390010406

Mas, A., Torija, M. J., García-Parrilla, M. C., y Troncoso, A. M. (2014). Acetic acid bacteria and the production and quality of wine vinegar. *The Scientific World Journal, 2014*, 394671. https://doi.org/10.1155/2014/394671

Matos, Í. T. S. R., de Souza, V. A., D'Angelo, G. R., Astolfi Filho, S., do Carmo, E. J., y Vital, M. J. S. (2021). Yeasts with fermentative potential associated with fruits of camu-camu (Myrciaria dubia, Kunth) from north of Brazilian Amazon. *The Scientific World Journal, 2021*, 9929059. https://doi.org/10.1155/2021/9929059

Miller, G. L. (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Analytical Chemistry, 31*(3), 426–428. https://doi.org/10.1021/ac60147a030

Ministerio de Salud. (2008). *Norma sanitaria que establece los criterios microbiológicos de calidad sanitaria e inocuidad para los alimentos y bebidas de consumo humano* (NTS N.° 071-MINSA/DIGESA-V.01; R. M. N.° 591-2008/MINSA). MINSA.

Monod, J. (1949). The growth of bacterial cultures. *Annual Review of Microbiology, 3*, 371–394. https://doi.org/10.1146/annurev.mi.03.100149.002103

Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9.ª ed.). John Wiley & Sons.

Nelson, D. L., y Cox, M. M. (2021). *Lehninger principles of biochemistry* (8.ª ed.). W. H. Freeman.

Pereira Ramírez, M. N., y Ríos Pérez, F. B. (2023). *Obtención de cerveza artesanal Ale usando sachapapa (Dioscórea trífida L.) como sucedáneo de la malta de cebada y cocona (Solanum sessiliflorum D.), Iquitos 2022* [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana]. https://api-repositorio.unapiquitos.edu.pe/server/api/core/bitstreams/225c6a5c-ecd2-4e2e-894f-1fd47b2bb311/content

Pretorius, I. S. (2000). Tailoring wine yeast for the new millennium: Novel approaches to the ancient art of winemaking. *Yeast, 16*(8), 675–729. https://doi.org/10.1002/1097-0061(20000615)16:8<675::AID-YEA585>3.0.CO;2-B

Pronk, J. T., Steensma, H. Y., y van Dijken, J. P. (1996). Pyruvate metabolism in Saccharomyces cerevisiae. *Yeast, 12*(16), 1607–1633. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0061(199612)12:16<1607::AID-YEA70>3.0.CO;2-4

Ramírez Trujillo, R. I., y Urrutia Vílchez, M. G. (s. f.). *Optimización de parámetros de hidrólisis enzimática del almidón de Dioscórea trífida con cebada malteada para la producción de vodka Iquitos 2023* [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana]. https://api-

repositorio.unapiquitos.edu.pe/server/api/core/bitstreams/5c1672bf-837b-41cb-a619-6ddfa805fad1/content

Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., y Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine, 26*(9–10), 1231–1237. https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3

Rebaza-Cárdenas, T. D., Silva-Cajaleón, K., Sabater, C., Delgado, S., Montes-Villanueva, N. D., y Ruas-Madiedo, P. (2023). "Masato de yuca" and "chicha de siete semillas": Two traditional vegetable fermented beverages from Peru as source for the isolation of potential probiotic bacteria. *Probiotics and Antimicrobial Proteins, 15*, 300–311. https://doi.org/10.1007/s12602-021-09836-x

Ribéreau-Gayon, P., Dubourdieu, D., Donèche, B., y Lonvaud, A. (2006). *Handbook of enology: Vol. 1. The microbiology of wine and vinifications* (2.ª ed.). John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/0470010363

Schwan, R. F., y Wheals, A. E. (2004). The microbiology of cocoa fermentation and its role in chocolate quality. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 44*(4), 205–221. https://doi.org/10.1080/10408690490464104

Shuler, M. L., y Kargi, F. (2002). *Bioprocess engineering: Basic concepts* (2.ª ed.). Prentice Hall.

Singleton, V. L., Orthofer, R., y Lamuela-Raventós, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology, 299*, 152–178. https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1

Singleton, V. L., y Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture, 16*(3), 144–158. https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144

Solieri, L., y Giudici, P. (Eds.). (2009). *Vinegars of the world*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-88-470-0866-3

Swain, M. R., Anandharaj, M., Ray, R. C., y Parveen Rani, R. (2014). Fermented fruits and vegetables of Asia: A potential source of probiotics. *Biotechnology Research International, 2014*, 250424. https://doi.org/10.1155/2014/250424

Swiegers, J. H., Bartowsky, E. J., Henschke, P. A., y Pretorius, I. S. (2005). Yeast and bacterial modulation of wine aroma and flavour. *Australian Journal of Grape and Wine Research, 11*(2), 139–173. https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2005.tb00285.x

Thivijan, S., Pavalakumar, D., Gunathunga, C. J., Undugoda, L. J. S., Manage, P. M., Nugara, R. N., Bandara, P. C., Thambugala, K. M., Al-Asmari, F., y Promputtha, I. (2024). Influence of indigenous non-Saccharomyces yeast strains on the physicochemical and sensory properties of wine fermentation: A promising approach to enhancing wine quality. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology, 14*, 1495177. https://doi.org/10.3389/fcimb.2024.1495177

Vargas-Arana, G., Merino-Zegarra, C., Riquelme-Penaherrera, M., Nonato-Ramirez, L., Delgado-Wong, H., Pertino, M. W., Parra, C., y Simirgiotis, M. J. (2021). Antihyperlipidemic and antioxidant capacities, nutritional analysis and UHPLC-PDA-MS characterization of cocona fruits (Solanum sessiliflorum Dunal) from the Peruvian Amazon. *Antioxidants, 10*(10), 1566. https://doi.org/10.3390/antiox10101566

Vasquez Shuña, C. Y. (2020). *Determinación de la concentración óptima de pulpa de camu camu (Myrciaria dubia H.B.K. Mc. Vaugh.), como mosto para elaboración de vino dulce en Pucallpa* [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de Ucayali]. https://apirepositorio.unu.edu.pe/server/api/core/bitstreams/113e4d1f-6d9f-494c-8cdd-0ccdc0606213/content

White, T. J., Bruns, T., Lee, S., y Taylor, J. (1990). Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. En M. A. Innis, D. H. Gelfand, J. J. Sninsky y T. J. White (Eds.), *PCR protocols: A guide to methods and applications* (pp. 315–322). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-372180-8.50042-1

Yupanqui, R. (2024). *Elaboración de una bebida fermentada (masato) a partir de yuca (Manihot esculenta) con sustitución parcial de maíz amarillo duro (Zea mays) germinado y camote (Ipomoea batatas) utilizando la amilasa comercial para la fermentación* [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de Ucayali]. https://repositorio.unu.edu.pe/items/2f3e0d78-e744-4a85-9e5b-dfa7ca38df59

Zwietering, M. H., Jongenburger, I., Rombouts, F. M., y van 't Riet, K. (1990). Modeling of the bacterial growth curve. *Applied and Environmental Microbiology, 56*(6), 1875–1881. https://doi.org/10.1128/aem.56.6.1875-1881.1990

Resumen

Este libro reúne y analiza la evidencia disponible sobre la fermentación de frutas de la Amazonía peruana desde la perspectiva de la ingeniería de bioprocesos. A partir de tesis del Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, trabajos de la Universidad Nacional de Ucayali y literatura indexada, se describen las frutas de Loreto como materia prima (camu camu, cocona, aguaje, arazá y otras), los microorganismos fermentativos, la bioquímica y la estequiometría de las fermentaciones alcohólica, láctica y acética, los modelos cinéticos de Monod, Andrews, Levenspiel y Luedeking-Piret, las operaciones del proceso, los productos desarrollados, los métodos analíticos y la normativa peruana, el diseño experimental, el escalamiento y la evaluación económica. La revisión muestra que la información de composición es relativamente abundante, pero que faltan datos de cinética, de levaduras nativas y de compuestos bioactivos después de fermentar. El libro cierra con una agenda de investigación y protocolos para generar esos datos en laboratorios de la región.

Palabras Clave: fermentación; frutas amazónicas; camu camu; bioprocesos; cinética microbiana; Loreto.

Abstract

This book gathers and analyzes the available evidence on the fermentation of fruits from the Peruvian Amazon from a bioprocess engineering perspective. Drawing on theses from the Institutional Repository of the Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, studies from the Universidad Nacional de Ucayali and indexed literature, it describes the fruits of Loreto as raw materials (camu camu, cocona, aguaje, arazá and others), fermenting microorganisms, the biochemistry and stoichiometry of alcoholic, lactic and acetic fermentations, the Monod, Andrews, Levenspiel and Luedeking-Piret kinetic models, process operations, the products developed so far, analytical methods and Peruvian regulations, experimental design, scale-up and economic assessment. The review shows that compositional information is relatively abundant, whereas kinetic data, native yeast studies and measurements of bioactive compounds after fermentation are scarce. The book closes with a research agenda and protocols to generate those data in regional laboratories.

Keywords: fermentation; Amazonian fruits; camu camu; bioprocesses; microbial kinetics; Loreto.



La obra "Biotecnología de la fermentación de frutas amazónicas: Investigación y desarrollo de procesos" presenta resultados de investigación científica y desarrollo experimental orientados al aprovechamiento biotecnológico de la biodiversidad amazónica. Aborda la aplicación de técnicas de fermentación y transformación de frutas tropicales, evaluando procesos para obtener productos con valor agregado. Asimismo, contribuye a generación y difusión de conocimiento científico y tecnológico, promoviendo aprovechamiento sostenible de los recursos amazónicos, innovación, valorización de materias primas y desarrollo productivo de las comunidades amazónicas.



OM EDITORIAL