



GRUPO BLR

Ingeniería y Tecnología DE LA **POSCOSECHA**

Principios, Procesos y Aplicaciones
en la Agroindustria



Xavier Carrera - Erick Adrián López - Cesar Antonio Peña

ISBN: 978-9907-802-09-2



INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA DE LA POSCOSECHA PRINCIPIOS, PROCESOS Y APLICACIONES EN LA AGROINDUSTRIA

AUTORES:

WASHINGTON XAVIER CARRERA BORJA

ERICK ADRIÁN LÓPEZ PILLAJO

CESAR ANTONIO PEÑA HARO



Este libro ha sido debidamente examinado y valorado en la modalidad doble par ciego con fin de garantizar la calidad científica.

©Grupo Editorial BLR
Riobamba – Ecuador
Correo: publicaciones@grupobl.com
<https://grupobl.com/libros-investig>
REPOSITORIO



Carrera, W.,López, E.,Peña, C. (2026) Ingeniería y tecnología de la poscosecha principios, procesos y aplicaciones en la agroindustria. Grupo Editorial BLR.

© Washington Xavier Carrera Borja
Erick Adrián López Pillajo
Cesar Antonio Peña Haro

ISBN: 978-9907-802-09-2

El copyright promueve la libertad de expresión, protege la diversidad de ideas y conocimiento, además apoya la libre expresión. Se prohíbe de manera rigurosa la producción o el almacenamiento de esta publicación, ya sea en su totalidad o en parte, está estrictamente prohibido por ley, incluyendo el diseño de la portada, así como su difusión a través de cualquiera de sus medios, ya sean electrónicos, mecánicos, ópticos, de grabación o incluso de fotocopia, sin permiso de los propietarios de los derechos de autor.

FILIACIONES DE LOS AUTORES

Washington Xavier Carrera Borja

Universidad Técnica de Cotopaxi - Extensión La Maná - Facultad
de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales

Correo Electrónico: washington.carrera3625@utc.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9237-7563>



Erick Adrián López Pillajo

Universidad Técnica de Ambato

Correo Electrónico: ea.lopez@uta.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9936-5052>

Cesar Antonio Peña Haro

Universidad Agraria del Ecuador

Correo Electrónico: cpena@uagraria.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0242-0637>



ÍNDICE GENERAL

Capítulo I	12
1. Propiedades térmicas y su aplicación en procesos de conservación	12
1.1 Cálculo de transferencia de calor en productos hortofrutícolas	12
1.2 Importancia del manejo térmico	13
1.3 Fisiología de frutas y verduras	14
1.4 El control de la transferencia de calor	15
1.5 La respiración como proceso exotérmico	16
1.5.1 Clasificación por tasa respiratoria y etileno	16
1.5.2 La Transpiración: Pérdida de masa y calor latente	17
1.6 Propiedades térmicas	19
1.6.1 Calor específico	19
1.6.2 Conductividad térmica	23
1.6.3 Difusividad térmica	23
1.6.4 Densidad (ρ)	24
1.7 Mecanismos de transferencia de calor	24
1.7.1 Conducción	24
1.7.2 Convección	24
1.7.3 Radiación	25
1.8 Aplicación en procesos de conservación	25
1.8.1 Refrigeración	25
1.8.2 Congelación	25
1.8.3 Escaldado	26
1.8.4 Pasteurización	26

1.9	Conclusión	29
	Capítulo II	30
2.	Normativas, estándares y certificaciones internacionales	30
2.1	Marco normativo global y el Codex Alimentarius	31
2.2	Cálculos de ingeniería en inocuidad y calidad	32
2.2.1	Validación térmica: Valor de letalidad (F0)	33
2.2.2	Análisis de riesgos: número de prioridad de riesgo (NPR)	33
2.2.3	Índice de Capacidad Del Proceso (CPK)	34
2.2.4	Actividad de agua (AW)y estabilidad	34
2.3	Sistemas de gestión de inocuidad (ISO 22000 Y HACCP)	34
2.2.5	Norma ISO 22000:2018	35
2.4	Iniciativa global de inocuidad alimentaria (GFSI)	36
2.5	Esquemas de certificación de tercera parte reconocidos	36
	Capítulo III	39
3.	Modelos de respiración y producción de etileno	39
3.1	Tasa de respiración	40
3.2.1	¿Cómo se mide y qué se requiere?	40
3.2.2	¿Cómo se maneja y cuándo se usa?	41
3.2.3	Fórmula para calcular la tasa de respiración	42
3.2	Influencia de la temperatura: Energía de activación y el coeficiente	45
3.2.4	¿Cómo se mide?	46
3.2.5	¿Cómo se maneja y cuándo se usa?	46
3.2.6	Fórmulas para la influencia de la temperatura	46
3.2.7	Ejemplo práctico: Exportación de fresas en atmósfera modificada	47
3.3	Dinámica de empaque en atmósfera modificada (MAP)	48

3.2.8	¿Cómo se mide y qué se requiere?	48
3.2.9	¿Cómo se maneja y cuándo se usa?	49
3.2.10	Fórmula para calcular	49
Capítulo IV		52
4.	Cálculo y control de humedad relativa en almacenamiento	52
4.1	Fundamentos de la Humedad Relativa	52
4.1.1	Termodinámica y psicrometría	52
4.1.2	Cálculo de la Humedad Relativa	53
4.1.3	Impacto de la humedad en el almacenamiento	53
4.1.4	Estrategias de control de humedad	54
4.2	Dinámica del Déficit de Presión de Vapor (VPD) y Fisiología de la Transpiración	54
4.2.1	Importancia del VPD sobre la HR	55
4.3	Fisiología de la transpiración en postcosecha	55
4.3.1	El mecanismo del Déficit de Presión de Vapor (DPV)	55
4.3.2	Barreras estructurales y vías de salida	56
4.3.3	Factores ambientales determinantes	56
4.4	Consecuencias fisiológicas de la deshidratación	57
4.4.1	Pérdida de turgencia y cambios estructurales	57
4.4.2	Alteraciones en el metabolismo y senescencia	57
4.4.3	Degradación nutricional y daño de membranas	57
4.4.4	El riesgo de la humedad excesiva	58
4.5	Isotermas de sorción y actividad de agua (aw) en el almacenamiento de granos y semillas	58
4.5.1	El concepto de actividad de agua (aw)	58
4.5.2	Isotermas de sorción: Fundamentos termodinámicos	59
4.5.3	Modelado matemático de las isotermas	60

4.5.4	Relación con la estabilidad en almacenamiento	60
4.5.5	Efecto de la temperatura sobre la isoterma	61
4.6	Ingeniería de la Cadena de Frío: Humidificación Activa vs. Condensación	62
4.6.1	El Proceso de Deshumidificación en el Evaporador	62
4.6.2	Tecnologías de humidificación activa	63
4.6.3	Fenomenología de la condensación y el punto de rocío	64
4.7	Caso práctico: Dimensionamiento de humidificación y riesgo de condensación	65
4.8	Conclusión y recomendación	68
Capítulo V		69
5.	Fisiología postcosecha de frutas, hortalizas y granos	69
5.1	Metabolismo respiratorio y bioenergética	69
5.2	Bioquímica de la maduración y senescencia	69
5.3	Fisiología de granos: Dormancia y estabilidad	70
5.4	Regulación hormonal de la dormancia	71
Capítulo vi		73
6.	Evaluación del Ciclo de Vida (ACV) de Procesos Post-cosecha	73
6.1	Marco teórico	74
6.1.1	El ACV en la industria alimentaria	74
6.1.2	Dinámica metabólica y cargas ambientales	75
6.1.3	Multicriterialidad de los impactos en la cadena de suministro	76
6.1.4	Asignación de cargas en coproductos y subproductos	78
6.1.5	Categorías de impacto evaluadas	79
6.2	Definición y normativa aplicada	81

6.2.1	Factores críticos en el almacenamiento	83
6.3	Materiales de empaque y economía circular	84
6.3.1	La Paradoja del plástico	86
6.3.2	Biomateriales vs. reciclaje	86
6.4	Gestión de pérdidas y desperdicios de alimentos (PDA)	88
6.4.1	Impacto de los residuos no orgánicos en la postcosecha:	88
6.4.2	El desperdicio como recurso en la economía circular:	89
6.5	Ejemplo: Exportación de aguacate HASS	90
6.6	Conclusiones	93
Capítulo VII		95
7.	Sistemas de cosecha, recolección, manipulación y diseño de envases basado en resistencia mecánica	95
7.1	Sistema de cosecha	95
7.1.1	Métodos de sistemas de cosecha	96
7.1.2	Manipulación durante la cosecha	97
7.1.3	Fórmula para estimar el rendimiento del producto	99
7.2	Sistema de recolección en la cosecha	100
7.2.1	Madures y recolección del producto	101
7.2.2	Manipulación durante la cosecha	103
7.2.3	Curado o conservación del producto	104
7.2.4	Almacenamiento y distribución	105
7.3	Manipulación en la cosecha	107
7.3.1	Momento adecuado de cosecha y su relación con la manipulación	108
7.3.2	Técnicas de manipulación manual	108
7.3.3	Manipulación mecanizada en la cosecha	109
7.3.4	Higiene y sanidad durante la manipulación	109

7.3.5	Condiciones ambientales y su influencia	110
7.3.6	Capacitación del personal y conciencia del manejo	110
7.4	Diseño de envases basado en resistencia mecánica	110
7.4.1	Fundamentos técnicos de la resistencia mecánica de envases	111
7.4.2	Sistema de diseño de envases basado en resistencia mecánica	112
7.4.3	Importancia del diseño de envases basado en resistencia mecánica	112
7.5	Beneficios en la agroindustria	113
7.5.1	Impacto en la actualidad	113
7.5.2	Reducción de pérdidas en la postcosecha	114
	Capítulo VII	115
8.	Diseño de experimentos aplicados a poscosecha	115
8.1	Definiciones Conceptuales	115
8.1.1	Post Cosecha	115
8.2	Diseño de experimentos	118
8.2.1	Fundamentos del diseño de experimentos	123
8.2.2	Procedimiento para la experimentación	124
8.2.3	Componentes clave de un experimento	126
8.2.4	Ejemplos o aplicaciones	128
8.3	Tipos de diseños experimentales aplicados a postcosecha	130
8.3.1	Supuestos del análisis de varianza (ANOVA) y transformación de datos	134
8.3.2	Técnica de transformación de datos	135
8.3.3	Análisis e interpretación de resultados	136

8.3.4	Ejemplo de aplicación del diseño de experimentos aplicado a postcosecha	141
8.4	Conclusión	147
	Capítulo IX	148
9.	Calidad, vida útil, pérdida postcosecha: indicadores y métricas	148
9.1	Calidad en la agroindustria	148
9.2	Perdidas postcosechas	150
9.3	Indicadores cuantitativos de calidad postcosecha	151
9.4	Modelación y cálculo de la vida útil poscosecha	154
9.5	Análisis estadístico de pérdidas poscosecha	159
	Capítulo X	163
10.	Operaciones unitarias en post cosecha de productos agrícolas	163
10.1	Operaciones unitarias	163
10.1.1	Operaciones principales en plantas empacadoras de frutas y hortalizas	163
10.1.2	Diagrama operaciones de una planta empacadora de frutas y hortalizas	167
10.2	Operaciones al realizar en la postcosecha de la fresa	169
10.2.1	Limpieza	170
10.2.2	Desinfección	170
10.2.3	Empaque	170
10.2.4	Transporte	171
10.2.5	Almacenamiento	172
10.3	Resumen de proceso de postcosecha	173
10.3.1	Problemas en poscosecha	173

10.3.2	Aplicación de balance masa	176
10.4	Indicadores de eficiencia y pérdidas postcosecha	180
10.4.1	Merma total post cosecha	180
10.4.2	Rendimiento post cosecha	181
10.4.3	Perdidas por etapa	181
10.4.4	Eficiencia del proceso post cosecha	182
10.4.5	Índice de perdidas post cosecha	182
10.4.6	Pérdida económica	182
10.5	Balance de energía	182
10.5.1	Recepción	182
10.5.2	Enfriamiento	183
10.5.3	Respiración de la fruta	183
Capítulo XI		185
11.	Diseño ingenieril de atmósferas controladas	185
11.1	Aplicaciones en postcosecha agroindustrial	185
11.2	Fundamentos científicos de las atmósferas controladas	185
11.2.1	Fisiología de la respiración y maduración	185
11.2.2	Principios de control atmosférico	186
11.2.3	Mecanismos de extensión de vida útil	187
11.3	Diseño de sistemas de atmósferas controladas	188
11.3.1	Componentes y equipamiento	188
11.3.2	Criterios de diseño por producto	189
11.3.3	Protocolos de establecimiento y monitoreo	190
11.4	Tecnologías avanzadas y tendencias emergentes	191
11.4.1	Atmósferas controladas dinámicas	191
11.4.2	Tratamientos con atmósferas extremas	193
11.4.3	Integración con otras tecnologías postcosecha	194

11.5	Aspectos económicos y de sostenibilidad	195
Capítulo XII		198
12.	Aplicaciones en transporte refrigerado	198
12.1	Carga térmica del producto (banano)	198
12.2	Simulación de flujo de aire	198
12.3	Índice ODP	199
12.4	Simulación de cadenas de frío	200
12.4.1	Principios de modelado	202
12.4.2	Aplicaciones en transporte refrigerado	203
12.4.3	Optimización y casos prácticos dentro del transporte de frutas y hortalizas	205
12.5	Sistemas de refrigeración	205
12.5.1	Refrigerantes	205
12.5.2	Sistemas de almacenamiento y transporte	206
12.5.3	Tipos de refrigeración	206
12.6	Estructura de almacenamiento:	209
12.6.1	Refrigeración comercial	210
12.6.2	Refrigerantes	210
12.6.3	Índice de seguridad	211
12.6.4	Índice GWP	212
12.6.5	Aislantes térmicos	212
12.6.6	Influencia de la temperatura ambiente	213
12.7	Sistemas de almacenamiento y transporte	214
12.7.1	Maquinaria y estructuras disponibles en el mercado (Benchmarking)	214
Capítulo XIII		218
13.	Optimización de líneas de clasificación y empaque	218

13.1	Limpieza de productos	218
13.2	Clasificación y selección	222
13.3	Recolección cuidadosa	223
13.3.1	Tipos de recolección	223
13.4	Transporte y recepción	226
13.4.1	Selección (Descarte)	228
13.4.2	Clasificación (Graduación)	229
13.4.3	Métodos de conservación del producto	231
13.4.4	Factores claves a controlar	232
13.5	Calibrado de productos	239
13.5.1	Métodos de calibrado	239
13.5.2	Calibradores mecánicos: Rodillos o cintas con espacio ajustable	243
13.5.3	Sistemas ópticos o electrónicos: Detectan tamaño, color y forma automáticamente	243
13.6	Ejercicio práctico	244
13.6.1	Proceso poscosecha integral de manzanas	244
13.7	Conclusión	251
Capítulo XIV		252
14.	Cálculo de vida útil mediante cinética de deterioro	252
14.1	Vida útil y parámetros críticos de calidad de un alimento	252
14.2	Relación entre temperatura y reacciones de deterioro	257
14.3	Propiedades mecánicas del alimento	259
13.7.1	Atributos mecánicos fundamentales	259
13.7.2	Parámetros secundarios (Compuestos)	260
a)	Daño por impacto (Golpes)	261
b)	Daño por compresión (Aplastamiento)	261

c)	Daño por vibración (Fricción)	262
	Capítulo XV	263
15.	Ejercidos de aplicación	263
15.1	Fundamento teórico	263
15.1.1	Ejercicio Aplicado	264
15.2	Modelo cinético	266
15.2.1	Cálculo de las constantes cinéticas	266
	Bibliografía	269

Capítulo I

1. Propiedades térmicas y su aplicación en procesos de conservación

1.1 Cálculo de transferencia de calor en productos hortofrutícolas

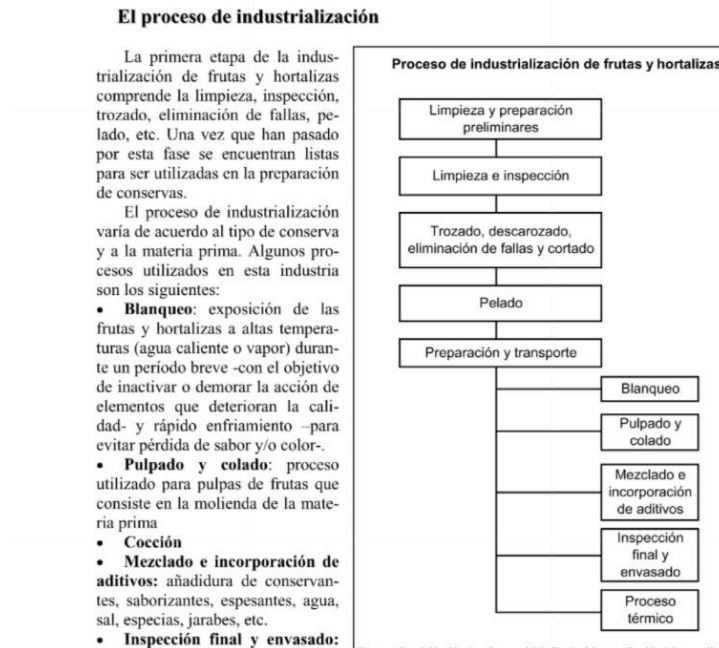
Figura 1.1. Productos hortofrutícolas



La industria agroindustrial enfrenta uno de los retos más complejos en la cadena de suministro mantener la integridad fisiológica de productos perecederos desde el momento de la cosecha hasta el consumidor final. El objetivo del presente trabajo es analizar las propiedades térmicas de los productos hortofrutícolas y su aplicación en los procesos de conservación postcosecha.

A diferencia de otros materiales procesados, los productos hortofrutícolas (frutas y hortalizas) son estructuras biológicas que permanecen metabólicamente activas después de ser separadas de la planta madre. Esta actividad biológica está regida fundamentalmente por la temperatura, convirtiendo a la **transferencia de calor** en la variable crítica para el diseño de sistemas de conservación (Ferroice,2016).

Figura 1.2. Proceso de industrialización de productos hortofrutícolas



1.2 Importancia del manejo térmico

El deterioro de los productos vegetales es un proceso dependiente de la energía. Tras la cosecha, el producto inicia un proceso de senescencia acelerado por la respiración celular, donde los azúcares y ácidos orgánicos se oxidan para producir energía, CO₂ y agua. Este proceso genera el denominado calor de respiración, el cual, si no es removido de manera eficiente, eleva la temperatura interna del tejido, creando un ciclo de retroalimentación positiva que acelera la degradación enzimática y el crecimiento microbiológico (Choi,2006).

El diseño de procesos de conservación no solo implica “enfriar”, sino hacerlo de manera óptima. Un enfriamiento excesivamente lento resulta en una pérdida de peso por transpiración (pérdida de agua) y

ablandamiento del tejido. Por otro lado, un enfriamiento mal diseñado puede causar “daño por frío” o deshidratación superficial severa (Ferroice,2016).

1.3 Fisiología de frutas y verduras

La vida de las frutas y hortalizas pueden dividirse en tres etapas fisiológicas fundamentales: el crecimiento, la maduración y la senescencia

El crecimiento implica la división celular y el subsiguiente desarrollo de la célula que dan el tamaño final alcanzado por el producto la maduración fisiológica suele iniciarse antes de que termine el crecimiento e incluye diferentes actividades en los distintos productos al crecimiento la maduración fisiológica suele hacerse referencia conjunta durante la etapa del desarrollo (Villamizar et al.,2000).

La senescencia se define como una fase en la que los procesos bioquímicos anabólicos sintéticos dan paso a los catabólicos degradativos conduciendo el envejecimiento y finalmente a la muerte de los tejidos (Villamizar et al.,2000).

En cuanto a las hortalizas deben recolectarse en muy diversos estados fisiológicos a veces en periodos anteriores al comienzo de la madurez y en otras al inicio de la senescencia.

Figura 1.3. Ciclo de maduración de las frutas

microestructura celular, contenido de humedad y porosidad (Manrique, 2019).

El diseño de sistemas de pre-enfriamiento (aire forzado, hidrogenfriamiento, vacío) busca alcanzar el “**Siete Octavos de Enfriamiento**” (7/8). Este es el punto crítico donde se ha removido el 87.5% de la carga térmica de campo, garantizando que el calor generado internamente por el producto sea menor a la capacidad de extracción del sistema de refrigeración, estabilizando así el metabolismo celular (Manrique, 2019).

1.5 La respiración como proceso exotérmico

La respiración es la oxidación de sustratos orgánicos (almidones, azúcares y ácidos) para producir energía metabólica (ATP), pero con una eficiencia termodinámica imperfecta, lo que resulta en la liberación de calor sensible al medio circundante.

Este calor generado (calor de respiración) debe ser cuantificado en el balance térmico de la cámara frigorífica. Si el calor de respiración supera la capacidad de remoción de calor del sistema de refrigeración, se produce un calentamiento espontáneo del producto (Arias, 2016).

1.5.1 Clasificación por tasa respiratoria y etileno

Para diseñar un sistema de almacenamiento masivo, se debe clasificar los productos según su intensidad metabólica. El **etileno**, una hormona gaseosa, actúa como el catalizador de estas reacciones.

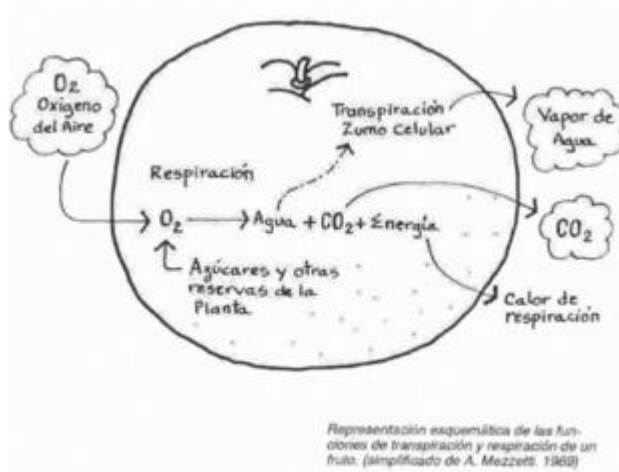
- **Productos Climatéricos:** Presentan un incremento súbito en la respiración y producción de etileno al inicio de la maduración (ej. tomate, banano, manzana). En estos, el control térmico debe ser agresivo antes del “pico climatérico”.
- **Productos No Climatéricos:** Su tasa respiratoria disminuye gradualmente tras la cosecha (ej. cítricos, uva, fresa). Su conservación depende más de evitar la deshidratación y ataques fúngicos (Wattco, 2022).

1.5.2 La Transpiración: Pérdida de masa y calor latente

La transpiración es la transferencia de vapor de agua desde el producto hacia el aire circundante. Este es un fenómeno de **transferencia de masa** que ocurre simultáneamente con la transferencia de calor.

- **Déficit de Presión de Vapor (DPV):** Es la fuerza impulsora de la transpiración. Si el aire en la cámara está muy seco, el producto pierde peso rápidamente (merma económica).
- **Enfriamiento Evaporativo:** La evaporación del agua superficial consume calor latente (2450kJ/kg de agua evaporada), lo que ayuda a enfriar ligeramente el producto, pero a costa de su calidad visual y turgencia.

Figura 1.4. El Coeficiente Q10 y su relación con la respiración



El coeficiente Q10 es un parámetro ampliamente utilizado en fisiología vegetal para describir la sensibilidad de la velocidad de las reacciones bioquímicas frente a los cambios de temperatura. En productos hortofrutícolas, el Q10 se emplea principalmente para evaluar cómo varía la tasa de respiración y, en consecuencia, la velocidad de deterioro del producto durante el almacenamiento postcosecha.

La respiración es un proceso metabólico exotérmico controlado por enzimas, cuya velocidad aumenta con la temperatura debido al incremento de la energía cinética de las moléculas. Este comportamiento explica por qué pequeños incrementos térmicos pueden acelerar significativamente la maduración y la senescencia de frutas y hortalizas.

Fórmula:

$$Q_{10} = (R_2/R_1)^{(10/(T_2-T_1))}$$

Q10 = coeficiente de temperatura (adimensional)

R_1, R_2 : Velocidades de reacción a las temperaturas T_1, T_2

T_1, T_2 : Temperaturas en Celsius o Kelvin

Para la mayoría de los productos hortofrutícolas, el Q_{10} está entre 2.0 y 3.0. Esto significa que reducir la temperatura del producto de 20°C a 10°C reduce su velocidad de deterioro a la mitad o a un tercio (Portilla s. f.).

Este comportamiento justifica el uso de la refrigeración como principal estrategia de conservación, ya que una reducción adecuada de la temperatura permite:

- Disminuir la tasa respiratoria
- Reducir la producción de calor metabólico
- Retardar la maduración y la senescencia
- Prolongar la vida útil del producto

1.6 Propiedades térmicas

El diseño de sistemas de enfriamiento y almacenamiento requiere el conocimiento preciso de cuatro propiedades fundamentales: calor específico, conductividad térmica, difusividad térmica y densidad (Arias,2016).

1.6.1 Calor específico

El calor específico se define como la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura de una unidad de masa de un material en una unidad de temperatura. Se se expresa como:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Donde:

Q = cantidad de calor transferido (J)

m = masa del producto (kg)

c_p = calor específico (J/kg·°C)

ΔT = variación de temperatura (°C)

En frutas y hortalizas, el calor específico suele presentar valores elevados debido a su alto contenido de agua. Este hecho implica que estos productos requieren una mayor cantidad de energía para modificar su temperatura, lo que debe ser considerado cuidadosamente en el diseño de procesos de enfriamiento y calentamiento (Ferroice,2016).

Tabla 1.1. Calor específico en frutas

CALORES ESPECIFICOS								
Frutas	Temp. conservac. °C	Humedad relativa %	Tiempo conservac. recomend.	Punto de congelac. °C	Calor esp. antes cong. Kcal/Kg/°C	Calor esp. después cong. Kcal/Kg/°C	Calor latente Kcal/Kg	Calor respirac. Kcal/Tm/24h
Aguacates	+0 a +1	85/90	2/3 semanas	-2,7	0,91	0,46	62,0	1.200-6.000
Albaricoques	+0 a +1	85/90	2/4 semanas	-2,2	0,91	0,48	67,9	160-2.200
Arándanos	+2 a +4	90/95	2/4 meses	-0,9	0,90	0,46	69,3	110-2.800
Bayas	+0 a +1	85	3/10 días	-2	0,90	0,49	66,6	160-6.000
Caquis	-1 a +0	90	3/4 meses	-2,2	0,82	0,43	62,1	100-4.000
Cerezas agrias	-1 a +0	85/90	1/2 semanas	-1,7	0,89	0,46	70,0	250-3.000
Cerezas dulces	-1 a -0,5	85/90	2/4 semanas	-1,8	0,87	0,45	66,9	200-2.500
Ciruelas	-0,6 a +0,5	85/90	2/6 semanas	-0,8	0,89	0,46	68,5	200-6.000
Cocos	+0 a +1,5	80/85	1/2 meses	-0,8	0,58	0,34	37,3	50-300
Dátiles Frescos	-1 a +0	85/90	7/10 días	-2,4	0,82	0,43	62,1	220-2.800
Dátiles curados	-1,8 a +0	65/75	6/12 meses	-15,7	0,36	0,26	38,2	100-1.500
Frambuesa negra	-0,5 a +0	90/95	2/3 días	-1,1	0,85	0,44	64,5	1.200-8.000
Frambuesa roja	-0,5 a +0	90/95	2/3 días	-0,6	0,87	0,45	66,9	1.200-9.000
Fresa	-0,5 a +0	90/95	2/4 días	-1,1	0,92	0,48	71,7	900-7.000
Granadas	+1 a +2,5	90/95	2/4 meses	-3	0,86	0,44	65,5	50-2.000
Grosellas	-1 a +0	90/95	2/4 semanas	-1,1	0,91	0,47	71,0	400-6.000
Guayaba	+5 a +10	90	2/3 semanas	-0,5	0,86	0,45	66,2	200-5.000
Higos frescos	-0,5 a +1	85/90	7/10 días	-2,4	0,82	0,43	62,1	220-2.800
Higos secos	+0 a +4	50/60	9/12 meses	-2	0,39	0,27	19,2	50-200

Limas	+7 a +8	85/90	6/8 semanas	-1,6	0,90	0,48	69,0	400-5.000
Limón	+2 a +4	85/90	3/6 semanas	-1,4	0,91	0,47	71,0	400-2.000
Mandarinas	+1 a +3	90/95	6/8 semanas	-1,1	0,92	0,49	69,3	300-7.000
Mangos	+11 a +13	85/90	2/3 semanas	-0,9	0,85	0,44	64,5	800-5.000
Manzanas verde	-1 a +1	90/95	1/8 meses	-1,5	0,88	0,45	67,4	120-3.400
Manzanas secas	+0 a +5	55/60	3/8 meses		0,39	0,27	28,0	50-500
Melocotón verde	-0,5 a 1	88/92	2/4 semanas	-1,1	0,91	0,47	68,0	150-4.700
Melones	+2 a +4	85/90	3/8 semanas	-1,1	0,97	0,49	77,0	500-2.000
Melón de Indias	+7 a +10	85/95	4/6 semanas	-1,1	0,94	0,48	74,1	300-5.000
Membrillo	-0,5 a +1	88/92	2/3 meses	-2	0,88	0,45	67,9	200-6.000
Moras	-0,5 a +0	90/95	3 días	-0,8	0,88	0,46	67,9	160-3.500
Naranjas	+0 a +2	85/90	2/4 meses	-0,8	0,90	0,46	69,3	300-2.800
Nectarinas	-0,5 a +0	90	2/4 semanas	-0,9	0,86	0,44	65,5	200-5.000
Papayas	+6 a +7	85/90	1/3 semanas	-0,8	0,93	0,48	72,6	400-8.000
Pasas de Corinto	-0,5 a +0	90/95	10/14 días	-1	0,88	0,46	67,9	200-2.800
Peras verdes	-0,5 a 0,5	85/90	1/7 meses	-1,5	0,86	0,45	66,2	240-6.000
Piñas verdes	+7 a +8	85/90	3/4 semanas	-1	0,86	0,43	66,4	100-4.000
Piñas maduras	+4 a +5	85/90	2/4 semanas	-1	0,88	0,45	67,9	100-9.000
Plátanos verdes	+11 a +13	85/95	10/20 días	-0,8	0,85	0,42	60,0	550-4.100
Plátanos maduros	+12 a +14	85/90	5/10 días	-0,8	0,85	0,42	60,0	840-5.300
Pomelo	+5 a +7	85/90	2/4 meses	-1,1	0,91	0,47	71,0	600-6.000
Sandías	+2 a +4	85/90	2/3 semanas	-0,4	0,94	0,48	74,1	500-1.200
Toronjas	+0 a +1	85/90	1/2 meses	-1,1	0,91	0,48	70,0	500-7.000
Uvas	-1 a +0	85/90	1/5 meses	-2,1	0,86	0,44	65,5	240-2.500
Zarzamoras	-0,5 a +0,5	92/97	3 días	-0,8	0,88	0,46	68,0	400-5.000

Tabla 1.2. Calor específico de verduras

CALORES ESPECÍFICOS								
Verduras	Temp. conservac. °C	Humedad relativa %	Tiempo conservac. recomend.	Punto de congelac. °C	Calor esp. antes cong. Kcal/Kg/°C	Calor esp. después cong. Kcal/Kg/°C	Calor latente Kcal/Kg	Calor respirc. Kcal/Tm/24h
Acelgas	+0 a +1	90/95	2/3 semanas	-1	0,89	0,47	70,0	270-3.800
Ajos secos	-4 a +1	70/75	6/9 meses	-4 a -0,8	0,69	0,40	50,0	200-2.000
Alcachofas	-0,5 A +0,5	90/95	1/4 semanas	-1,7	0,86	0,45	66,0	370-3.500
Apio	-0,5 a +0	93/98	1/4 meses	-1,3	0,95	0,48	75,0	270-5.000
Batata	+13 a +14	80/85	6/9 meses	-1,5	0,80	0,43	59,0	270-3.500
Berenjena	+8 a +9	+85/90	7/10 días	-0,8	0,95	0,48	79,0	270-4.000
Berrazas	+0 a +1	95	2/4 meses	-1,6	0,86	0,44	66,0	300-5.000
Berros	+0 a +1	95	3/4 días	-0,3	0,95	0,48	74,0	400-6.000
Berzas	+0 a +1	95	3/4 meses	-0,5	0,93	0,47	73,2	270-2.300
Boniatos	+13 a +14	85/90	3/6 meses	-1,5	0,80	0,43	59,0	270-3.500
Brécol	+0 a +1	90	7/10 días	-1,5	0,90	0,48	74,9	250-5.500
Brócoli	+0 a +1	90/95	10/14 días	-0,6	0,92	0,47	72,0	220-6.800
Calabaza de invierno	+10 a +11	70/75	4/6 meses	-0,6	0,95	0,46	71,0	380-3.800
Calabaza de verano	+5 a +6	85/95	5/14 días	-0,6	0,95	0,48	74,0	350-4.500
Cebollas	-2 a +0	70/75	3/6 meses	-1	0,91	0,46	68,8	220-3.600
Champinón	+0 a +1	90/95	3/4 días	-0,9	0,93	0,48	73,0	200-2.800
Chirivía	+0 a +1	92/98	2/6 meses	-0,9	0,84	0,44	62,0	230-4.800
Coco	+0 a +1	80/85	1/2 meses	-0,9	0,58	0,34	38,0	150-1.600
Col	+0 a +0,5	85/90	1/2 meses	-0,5	0,91	0,46	72,0	210-2.200
Coles de Bruselas	+0 a +0,5	90/95	3/6 semanas	-0,8	0,91	0,46	70,0	280-3.500
Coliflor	+0 a +1	85/90	2/3 semanas	-0,8	0,94	0,47	77,0	280-3.800
Collars	+0 a +1	95	10/14 días	-0,8	0,89	0,46	74,0	230-2.500
Endivia	+0 a +1	92/98	2/3 semanas	-0,5	0,94	0,48	75,0	270-5.500
Escarola	+0 a +1	92/98	2/3 semanas	-0,5	0,94	0,48	74,0	270-5.500
Espárragos	+0 a +1	90/95	2/3 semanas	-1,1	0,95	0,48	75,0	350-2.800
Espinacas	-0,5 a +0,5	92/96	10/14 días	-0,9	0,94	0,48	73,0	330-2.500
Guisantes verdes	-0,5 a +0,5	85/90	1/3 semanas	-0,6	0,79	0,42	58,8	240-2.800
Habas	+1 a +3	85/90	1/3 semanas	-0,7	0,86	0,45	68,0	240-2.800
Judías verdes	+0,5 a +1	90/95	1/2 meses	-1,2	0,89	0,47	66,0	530-3.200
Lechuga	+0 a +1	90/95	1/3 semanas	-0,5	0,96	0,48	76,0	560-3.900
Maíz tierno	+0 a +1	92/98	4/8 días	-1,1	0,82	0,42	60,0	270-4.200
Nabos	+0 a +1	90/95	4/5 meses	-0,9	0,93	0,47	72,0	270-3.800
Patatas	+5 a +7	85/90	4/8 meses	-1,6	0,82	0,43	62,0	280-2.200
Pepinos	+8 a +10	85/90	5/8 meses	-0,5	0,97	0,49	76,0	110-6.000
Perejil	+0 a +1	95/100	1/2 meses	-1,1	0,88	0,46	66,0	280-2.200
Pimienta dulce	+7 a +8	90/95	2/3 semanas	-0,7	0,94	0,47	73,0	750-5.500
Pimientos frescos	+7 a +8	90/95	2/3 semanas	-0,7	0,94	0,48	73,0	500-5.500
Puerros	+0 a +1	90/95	1/3 meses	-0,7	0,88	0,46	70,0	450-5.000
Rábano picante	-1 a +0	92/98	2/3 semanas	-1,8	0,80	0,43	60,0	300-3.200
Remolacha raiz	+0 a +1	90/95	1/4 meses	-0,9	0,90	0,47	72,0	270-3.800
Remolacha hojas	+0 a +1	90/95	10/14 días	-0,4	0,90	0,47	72,0	270-3.800
Setas	+0 a +1	93/98	2/6 semanas	-0,9	0,93	0,48	72,0	200-2.800
Tomates verdes	+11 a +12	85/90	3/5 semanas	-0,5	0,95	0,48	74,0	250-4.200
Tomates maduros	+0 a +1	85/90	5/15 días	-0,5	0,95	0,48	74,0	300-6.000
Trigo fresco	+0 a +1	90/95	4/8 días	-0,6	0,79	0,42	59,0	500-6.000
Verduras congeladas	-23 a -18	90/95	6/2 meses	-0,6	0,94	0,48	72,0	
Verduras frondosas	+0 a +1	95/100	10/14 días	-0,3	0,94	0,48	72,0	500-6.000
Zanahorias hojas	+0 a +1	90/95	1/2 semanas	-1,3	0,87	0,45	70,0	500-4.500
Zanahorias raices	-1 a +1	90/95	4/6 meses	-1,3	0,92	0,46	70,0	500-4.500

1.6.2 Conductividad térmica

La conductividad térmica es la capacidad de un material para conducir calor. En productos hortofrutícolas, esta propiedad está fuertemente influenciada por el contenido de humedad.

Ecuación básica:

$$k = q \cdot L / (A \cdot \Delta T)$$

Donde:

- q = flujo de calor (W)
- L = espesor del material (m)
- A = área de transferencia (m^2)
- ΔT = diferencia de temperatura (K)

En los productos hortofrutícolas, la conductividad térmica depende de factores como la estructura celular, la porosidad y el contenido de agua. Una mayor conductividad térmica favorece una transferencia de calor más rápida y uniforme (Altamirano et al ,2015).

1.6.3 Difusividad térmica

La difusividad térmica indica la rapidez con la que un cambio de temperatura se propaga dentro de un material. Se define como:

$$\alpha = k / (\rho \cdot c_p)$$

Donde:

α = difusividad térmica (m^2/s)

ρ = densidad (kg/m^3)

c_p = calor específico ($\text{J}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$)

Este parámetro es especialmente importante en procesos transitorios, como el enfriamiento y la congelación, donde la temperatura del producto varía con el tiempo.

1.6.4 Densidad (ρ)

La densidad se define como la masa por unidad de volumen:

$$\rho = m / V$$

La densidad de un producto hortofrutícola indica la relación entre su masa y volumen y refleja su contenido de agua y estructura interna. Esta propiedad influye directamente en la transferencia de calor, ya que productos con mayor densidad suelen requerir más energía para cambiar su temperatura, lo que debe considerarse en los procesos de conservación postcosecha

1.7 Mecanismos de transferencia de calor

1.7.1 Conducción

La conducción es el principal mecanismo de transferencia de calor dentro de los productos hortofrutícolas. Ocurre debido a la interacción molecular y se rige por la ley de Fourier (Argüello et al, 2017).

1.7.2 Convección

La convección es un mecanismo de transferencia de calor que ocurre cuando el calor se transfiere entre la superficie de un producto y un fluido en movimiento, como el aire o el agua. En los procesos de conservación de frutas y hortalizas, la convección es fundamental durante el enfriamiento, ya que permite remover el calor del producto hacia el medio circundante (Argüello et al, 2017).

1.7.3 Radiación

La radiación térmica ocurre por la emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas y tiene mayor relevancia en procesos de secado o calentamiento superficial (AGROSAVIA,2023).

1.8 Aplicación en procesos de conservación

1.8.1 Refrigeración

La refrigeración es una de las técnicas más utilizadas para la conservación de frutas y hortalizas. Su objetivo principal es reducir la velocidad de respiración y el crecimiento microbiano. El cálculo del calor a extraer se basa en el calor específico del producto y la diferencia de temperatura deseada.

- Manzana refrigerada a 1–4 °C para almacenamiento prolongado.
- Lechuga refrigerada a 0–2 °C para evitar marchitamiento (Cruz Manrique,2019).

1.8.2 Congelación

La congelación implica la remoción de calor sensible y calor latente. Este proceso permite prolongar significativamente la vida útil del producto, aunque requiere un control riguroso de la transferencia de calor para evitar daños estructurales.

- Fresas congeladas a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Brócoli congelado tras escaldado previo (Cruz Manrique,2019).

1.8.3 Escaldado

El escaldado se utiliza para inactivar enzimas responsables del deterioro. Un diseño adecuado del proceso térmico es esencial para minimizar pérdidas nutricionales

- Zanahoria escaldada a $90\text{--}95\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 2–3 minutos.
- Espinaca escaldada antes de la congelación (Cruz Manrique,2019).

1.8.4 Pasteurización

La pasteurización se aplica principalmente a productos hortofrutícolas procesados, como jugos y pulpas.

Ejemplos:

- Jugo de naranja pasteurizado a $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 30 segundos.
- Pulpa de mango pasteurizada para exportación (Cruz Manrique,2019).

a) Cálculo de la transferencia de calor

El balance de energía para un producto hortofrutícola se expresa como:

$$Q=m \cdot C_p \cdot (T_i - T_f)$$

Un lote de **100 kg de manzanas recién cosechadas** se encuentra a una temperatura inicial de **25 °C**. Para su almacenamiento en una cámara frigorífica, se requiere reducir su temperatura hasta **5 °C**. Si el **calor específico de la manzana** es de **3.6 kJ/kg·K**, determine la **cantidad de calor que debe extraerse** del producto.

Datos

- Masa (m): 100 kg
- Temperatura inicial (Ti): 25 °C
- Temperatura final (Tf): 5 °C
- Calor específico (Cp): 3.6 kJ/kg·K

$$Q=m \cdot C_p \cdot (T_i - T_f)$$

$$Q=100\text{kg} \cdot 3.6 \text{ KJ/kg} \cdot \text{K} (25-5) \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$Q=7200 \text{ KJ}$$

Se deben extraer **7200 kJ de energía térmica** para refrigerar el lote de manzanas.

EJEMPLO 2

Se desea enfriar **80 kg de zanahorias** desde una temperatura inicial de **20 °C** hasta **4 °C** para su conservación en frío. El calor específico de la zanahoria es **3.7 kJ/kg·K**.

Calcule el **calor que debe removerse** durante el proceso.

Datos

- $m = 80 \text{ kg}$
- $T_i = 20 \text{ °C}$
- $T_f = 4 \text{ °C}$
- $C_p = 3.7 \text{ kJ/kg·K}$

$$Q = m \cdot C_p \cdot (T_i - T_f)$$

$$Q = 80 \text{ kg} \cdot 3.7 \cdot \text{Kj/kg·K} \cdot (20 - 4) \text{ °C}$$

$$Q = 4736 \text{ KJ}$$

El sistema de refrigeración debe remover **4736 kJ** de calor del producto.

EJEMPLO 3

Escaldado de una verdura (brócoli)

Antes de la congelación, **50 kg de brócoli** deben ser escaldados para inactivar enzimas. El producto se calienta desde **10 °C** hasta **95 °C**. Si el calor específico del brócoli es **3.8 kJ/kg·K**, determine el **calor suministrado** durante el proceso.

Datos

- $m = 50 \text{ kg}$

- $T_i = 10 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_f = 95 \text{ }^\circ\text{C}$
- $C_p = 3.8 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$

$$Q = 50 \text{ kg} \cdot 3.8 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} \cdot (95 - 10) \text{ }^\circ\text{C}$$

$$Q = 16150 \text{ KJ}$$

Durante el escaldado se suministran **16 150 kJ** de energía térmica.

1.9 Conclusión

Las propiedades térmicas de los productos hortofrutícolas desempeñan un papel fundamental en el diseño y la eficiencia de los procesos de conservación postcosecha. El control adecuado de la transferencia de calor permite regular la tasa de respiración, reducir la generación de calor metabólico y retardar los procesos de maduración y senescencia, contribuyendo así a la preservación de la calidad y la vida útil de frutas y hortalizas.

Asimismo, el conocimiento de parámetros como el calor específico, la conductividad térmica, la difusividad térmica, la densidad y el coeficiente Q10 resulta indispensable para realizar balances energéticos precisos y seleccionar estrategias de refrigeración, congelación y tratamiento térmico adecuadas

Capítulo II

2. Normativas, estándares y certificaciones internacionales

Las exigencias sanitarias y de inocuidad de los alimentos para la comercialización han ido en aumento, tanto en el ámbito internacional como nacional. Este nuevo escenario ha determinado ajustes a los procesos de producción y elaboración que permiten a los productores y empresarios agroindustriales asegurar la calidad y la inocuidad del alimento. Esto se logra mediante el control y prevención de los peligros de contaminación y de la pérdida de calidad del producto a lo largo de la cadena de producción, procesamiento y distribución (PILAR SANTACOLOMA, 2007).

La adopción por parte de las empresas agroindustriales de programas como las Buenas Prácticas Agrícolas, las Buenas Prácticas De Fabricación o de Manufactura (BPF/BPM), las Buenas Prácticas De Higiene (BPH), el sistema De Análisis De Peligros y Puntos Críticos De Control (APPCC), así como de Sistemas De Gestión de la Calidad y la Inocuidad como las normas ISO 9001 e ISO 22000 respectivamente, han ido en aumento en la última década (PILAR SANTACOLOMA, 2007).

Dichos sistemas han surgido como respuesta a la pérdida de confianza de parte de los consumidores respecto a la calidad y la inocuidad de los alimentos, a la necesidad de asegurar la salud de los consumidores por parte de las autoridades correspondientes, y a la necesidad de garantizar un nivel de dado de calidad e inocuidad alimentaria en las operaciones comerciales. La inocuidad tiene cada vez más importancia en la agenda de los países, principalmente de los países desarrollados, sobre todo

desde 1996 con la crisis de la encefalopatía espongiforme (vaca loca), seguido por la aparición de la amenaza de virus H5N1 altamente patógeno (gripe aviar) en el 2003, o en todos los países de brotes de infección de índole alimentaria o enfermedades transmitidas por los alimentos (ETAS), además de la contaminación por metales pesados (PILAR SANTACOLOMA, 2007).

Se prevé que las exigencias en el ámbito de la calidad e inocuidad sean cada vez mayores. Por ello los productores y empresarios deben adoptar una posición activa y prevenir problemas relacionados con la calidad y la inocuidad, ya que en caso de que ocurriesen, tendrían consecuencias negativas, no solo para la empresa, sino que podrían repercutir en forma global sobre el sector que produce y comercializa el producto (PILAR SANTACOLOMA, 2007).

2.1 Marco normativo global y el Codex Alimentarius

El marco normativo global de la industria agroalimentaria se sustenta primordialmente en el Codex Alimentarius, un compendio de normas internacionales cuya finalidad es la protección de la salud pública y la armonización de las prácticas comerciales. Este organismo, gestionado de manera conjunta por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), establece directrices basadas en evidencia científica para garantizar que los productos consumidos a nivel mundial sean inocuos y de calidad. Su estructura normativa permite que tanto países desarrollados como en desarrollo cuenten con un punto de referencia

técnico para legislar sobre la seguridad de sus suministros alimentarios. (FAO/OMS, 2024).

La Comisión del Codex Alimentarius (2020) establece que el Codex Alimentarius despliega una serie de códigos de prácticas y límites máximos que regulan la presencia de agentes externos en los alimentos. Entre sus contribuciones más críticas se encuentran la fijación de límites máximos para residuos de plaguicidas y medicamentos veterinarios, así como la regulación de aditivos alimentarios y contaminantes ambientales. Estas especificaciones técnicas son fundamentales para prevenir enfermedades transmitidas por alimentos (ETA) y asegurar que los procesos de transformación industrial no comprometan la integridad química o biológica del producto final.

La relevancia internacional de estas normativas trasciende lo sanitario para convertirse en un pilar del derecho comercial. Aunque las normas del Codex son de carácter voluntario, la Organización Mundial del Comercio (OMC) las reconoce como el estándar de referencia en el Acuerdo sobre la Aplicación de Medidas Sanitarias y Fitosanitarias (MSF). (Organización Mundial del Comercio, 2023)

Esto significa que cualquier país que exporte productos agroindustriales y cumpla con estas normativas posee un sustento legal sólido frente a posibles barreras comerciales, facilitando así el flujo de bienes en el mercado global y garantizando que las exigencias técnicas no se utilicen como proteccionismo injustificado. (Smith, 2022)

2.2 Cálculos de ingeniería en inocuidad y calidad

En agroindustria, la normativa no solo es documental; Se valida mediante cálculos físicos y estadísticos.

2.2.1 Validación térmica: Valor de letalidad (F0)

Para cumplir con el Codex y GFSI en procesos de esterilización, debemos calcular el efecto letal acumulado de un tratamiento térmico.

$$F0 = \int_0^t 10 * \frac{T(t) - 121.1}{z} dt$$

T(t): Temperatura en el punto más frío del producto en el tiempo t.

z: Resistencia térmica del microorganismo objetivo (típicamente 10 °C para *C. botulinum*).

121.1: Temperatura de referencia en grados Celsius.

2.2.2 Análisis de riesgos: número de prioridad de riesgo (NPR)

En la implementación de HACCP e ISO 22000, el NPR ayuda a determinar si un peligro es un Punto Crítico de Control (PCC).

$$NPR = S * O * D$$

S(Severidad): Impacto en la salud del consumidor.

O(Ocurrencia): Probabilidad de que el peligro aparezca.

D(Detección): Probabilidad de detectar el fallo antes de que llegue al cliente.

2.2.3 Índice de Capacidad Del Proceso (CPK)

Exigido por estándares GFSI (como SQF) para asegurar que el proceso está bajo control estadístico y cumple con las especificaciones de seguridad.

$$Cpk = \min \left(\frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSKL}{3\sigma} \right)$$

USL / LSL: Límites Superior e Inferior de Especificación (ej. % de cloro en lavado).

μ : Media del proceso.

σ : Desviación estándar.

(Food., 2023)

2.2.4 Actividad de agua (AW)y estabilidad

Fundamental para definir límites críticos en el plan HACCP según el Codex Alimentarius.

$$aw = \frac{P}{P0}$$

P: Presión de vapor de agua en el alimento.

P0: Presión de vapor del agua pura a la misma temperatura.

(Food., 2023).

2.3 Sistemas de gestión de inocuidad (ISO 22000 Y HACCP)

Según la normativa internacional, el éxito del HACCP radica en la aplicación rigurosa de siete principios que permiten el control de procesos:

1. Análisis de peligros.
2. Determinación de los Puntos Críticos de Control (PCC).
3. Establecimiento de límites críticos.
4. Sistema de monitoreo.
5. Establecimiento de acciones correctivas.
6. Procedimientos de verificación.
7. Documentación y registro.

(Arispe, 2007)

2.2.5 Norma ISO 22000:2018

La norma ISO 22000 es el estándar internacional que integra los principios del HACCP con los Programas de Prerrequisitos (PPR) y una estructura de gestión empresarial. La versión más reciente (2018) adopta la Estructura de Alto Nivel (HLS), lo que facilita la integración con otras normas como ISO 9001 (ISO, 2018).

Tabla 2.1. Matriz comparativa: HACCP vs ISO 22000

Criterio	HACCP (Codex)	ISO 22000:2018
-----------------	----------------------	-----------------------

Enfoque principal	Control técnico de peligros en el proceso.	Gestión sistémica y estratégica de la inocuidad.
Estructura	7 principios y 12 pasos de aplicación.	Estructura de Alto Nivel (10 cláusulas).
Programas de Prerrequisitos	Mencionados como base necesaria.	Obligatorios y detallados (PPR, PPRO).
Certificación	Generalmente obligatoria por ley.	Certificación internacional voluntaria.

Fuente: Escrache, (2015)

2.4 Iniciativa global de inocuidad alimentaria (GFSI)

La GFSI no es una norma de certificación en sí misma, sino una organización internacional que establece **puntos de referencia (benchmarking)**. Su objetivo es la armonización de los estándares de inocuidad para que una certificación sea "aceptada en cualquier lugar" (*once certified, accepted everywhere*).

- **Punto Clave:** Un esquema de certificación se considera "reconocido por GFSI" solo si cumple con los requisitos del Documento de Orientación de la GFSI, lo que garantiza un nivel de rigor superior al HACCP básico ([GFSI]., 2020).

2.5 Esquemas de certificación de tercera parte reconocidos

Las certificaciones de tercera parte son auditorías realizadas por organismos independientes para verificar que una empresa cumple con estándares internacionales. Los esquemas más destacados bajo el paraguas de GFSI son:

a) FSSC 22000 (Food Safety System Certification)

La FSSC 22000 es una norma de certificación para sistemas de gestión de seguridad alimentaria. Está basada en la norma ISO 22000, pero añade requisitos específicos para cumplir con los estándares de la **GFSI** (Global Food Safety Initiative), lo que la hace aceptada por los grandes minoristas y fabricantes globales.

Componentes: ISO 22000 + ISO/TS 22002-x (especificaciones técnicas) + Requisitos adicionales de FSSC (22000, 2023).

b) BRCGS (Global Standard for Food Safety)

Desarrollado por el British Retail Consortium. Es extremadamente prescriptivo y popular en el mercado europeo. Se enfoca fuertemente en el compromiso de la gerencia y el control del entorno de la fábrica (BRCGS., 2022).

c) SQF (Safe Quality Food)

Muy difundido en Estados Unidos y Australia. Es único porque permite integrar la gestión de la calidad junto con la inocuidad en distintos niveles de certificación (Luning, 2009).

d) IFS (International Featured Standards)

Estándar común de los minoristas alemanes y franceses. Se centra en la seguridad de los procesos y la evaluación de proveedores (Trienekens, 2008).

Capítulo III

3. Modelos de respiración y producción de etileno

En postcosecha, los productos hortofrutícolas se centran en el control que debe ejercerse sobre el metabolismo activo de los productos, los principales elementos que causan el deterioro y la maduración. Por un lado, la respiración va acompañada del consumo de reservas de energía y de la producción de etileno, un gas que se genera de forma intensiva y que produce calor de respiración. Para reducirlo, se controla por refrigeración para que no cause un sobrecalentamiento del tejido. Por otro lado, el etileno constituye un acelerador del proceso de pudrición del vegetal cosechado, su condición de señal química de envejecimiento.

Para mitigar estos problemas, se debería implementar empaques de atmósfera modificada, ya que crean un ambiente con niveles más bajos de oxígeno y la formación de dióxido de carbono, lo que reduce la intensidad metabólica y ayuda a prolongar la vida útil del producto de manera estratégica.

Los modelos de respiración y producción de etileno describen matemáticamente cómo los frutos y hortalizas consumen O_2 , producen CO_2 y generan etileno a lo largo del tiempo y a distintas temperaturas y atmósferas. Estos modelos se usan para predecir la evolución de los gases dentro de sistemas de almacenamiento o empaques, y así diseñar tecnología que prolonguen la vida útil y mantengan la calidad del producto.

En muchos casos se emplean ecuaciones tipo Michaelis–Menten para representar la dependencia de la respiración y la producción de etileno con las concentraciones de O₂ y CO₂, y relaciones de Arrhenius para el efecto de la temperatura

3.1 Tasa de respiración

La tasa de respiración también conocida como intensidad respiratoria, es la medida de la velocidad con la que los productos hortofrutícolas utiliza sus reservas de energía y consume oxígeno para mantenerse vivo, liberando en este proceso dióxido de carbono, agua y calor (Ortolá, 2020).

En síntesis, es la velocidad en la que el producto consume oxígeno o produce dióxido de carbono, siendo este un indicador directo de la actividad metabólica y de la vida de almacenamiento, a mayor respiración menor vida útil. Se expresa generalmente en volumen de gas por masa y tiempo (Uchenna & Abiodun, 2024).

En modelos, la respiración se formula como una reacción de oxidación de sustratos o dióxido de carbono y agua, liberando así energía y calor. La tasa depende fuertemente de la temperatura que se exponga al producto y las concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono, que pueden inhibir o limitar la respiración (Mutiar, Putra, & Affan, 2024).

3.2.1 ¿Cómo se mide y qué se requiere?

En teoría, se debe expresar la cantidad calculada en miligramos de dióxido de oxígeno producido o a su vez la cantidad de oxígeno que

consume el producto hortofrutícola por cada kilogramo de producto en una hora expresado de la siguiente manera:

$$\frac{mg \text{ CO}_2}{Kg * h}$$

Lo que se necesita para llegar al resultado deseado son espirómetros siendo estas cámaras herméticas donde se coloca el producto, también se ocupa sensores de gases para medir cuánto baja el oxígeno y cuánto sube el dióxido de carbono en un tiempo determinado y un control de temperatura para conocer la medición exacta, debido a que la tasa cambia drásticamente con cada grado Celsius (Camelo, 2003).

3.2.2 ¿Cómo se maneja y cuándo se usa?

La tasa de respiración es el termómetro que nos indica cual es el manejo que se debe llevar a cabo dependiendo la delicadeza del producto que se vaya analizando (Yahia, 2019).

En donde se debe llevar a cabo la clasificación de perecebilidad, utilizado para la categorización de los productos, como los que tienen tasas muy altas como los espárragos o los champiñones que se dañan en pocos días; y los de tasa baja como las nueces o las papas que su durabilidad es de meses, esto también se relaciona con la cantidad de agua que contiene los productos (Yahia, 2019).

El cálculo de refrigeración, este paso es utilizado más por los ingenieros para conocer la cantidad de calor de respiración que produce la carga y poder así diseñar un sistema de aire acondicionado que se adapte a las necesidades del producto contrastando el calor (Ortolá, 2020).

Según Camelo, (2003), el diseño de empaques se utiliza para calcular la permeabilidad que debe de contener una bolsa de plástico para que la fruta o vegetal no se asfixie causando así una pérdida prematura del producto hortofrutícola.

3.2.3 Fórmula para calcular la tasa de respiración

Como ya se mencionó el modelo más aceptado a nivel de ingeniería es el de Michaelis-Menten modificado, ya que este modelo describe como el consumo de oxígeno depende de su concentración ambiental y la inhibición por dióxido de carbono.

$$r_{O_2} = \frac{V_{max} * [O_2]}{K_m + [O_2] * \left(1 + \frac{[CO_2]}{K_i}\right)}$$

Donde:

- V_{max} : Tasa máxima de respiración ($mL * kg^{-1} * h^{-1}$).
- K_m : Constante de Michaelis (concentración de O_2 donde la tasa es la mitad de V_{max}).
- K_i : Constante de inhibición por el CO_2 .

a) Ejemplo práctico: Almacenamiento de fresas

Las fresas son muy perecederas y toleran niveles altos de dióxido de carbono hasta un rango de un 15-20%, lo cual se usa para controlar hongos como el *Botrytis*.

Datos del producto:

- V_{max} : 50 mg $O_2/kg * h$

- K_m : 1.2% O_2
- K_i : 5% CO_2 (alta sensibilidad al inhibidor)

➤ **Escenario 1: Sin inhibición**

$$[O_2] = 21\%$$

$[CO_2] = 0.03\%$ (*despreciable, por lo que el paréntesis es ≈ 1*)

$$rO_2 = \frac{50 * 21}{1.2 + 21}$$

$$rO_2 \approx 47.3 \text{ mg } \frac{O_2}{\text{kg} * h}$$

➤ **Escenario 2: Con inhibición**

Se diseñó un empaque con bajo oxígeno y alto dióxido de carbono para atenuar a la degeneración de la fresa:

- $[O_2]$: 5%
- $[CO_2]$: 15%

Paso 1: Calcular el factor de inhibición

$$1 + \frac{15}{5} = 1 + 3 = 4$$

Paso 2: Aplicar la fórmula completa

$$rO_2 = \frac{50 * 5}{1.2 + (5 * 4)}$$

$$rO_2 = \frac{250}{1.2 + 20}$$

$$rO_2 = \frac{250}{21.2}$$

$$rO_2 \approx 11.8 \frac{mg O_2}{kg * h}$$

En el escenario 2, el modelo matemático demuestra que la tasa de respiración de la fresa se reduce drásticamente de 47.3 a 11.8 $mg O_2/kg \cdot h$, lo que conlleva beneficios críticos para su conservación. Esta disminución implica una reducción metabólica significativa, logrando que el fruto respire cuatro veces más lento y, en consecuencia, extienda su vida útil teórica en la misma proporción al ralentizar el agotamiento de sus reservas energéticas. Además, al optimizar el consumo de oxígeno bajo este modelo de inhibición por CO_2 , la generación de calor de respiración dentro del empaque es mucho menor, lo que facilita el control térmico y previene el deterioro acelerado por sobrecalentamiento interno.

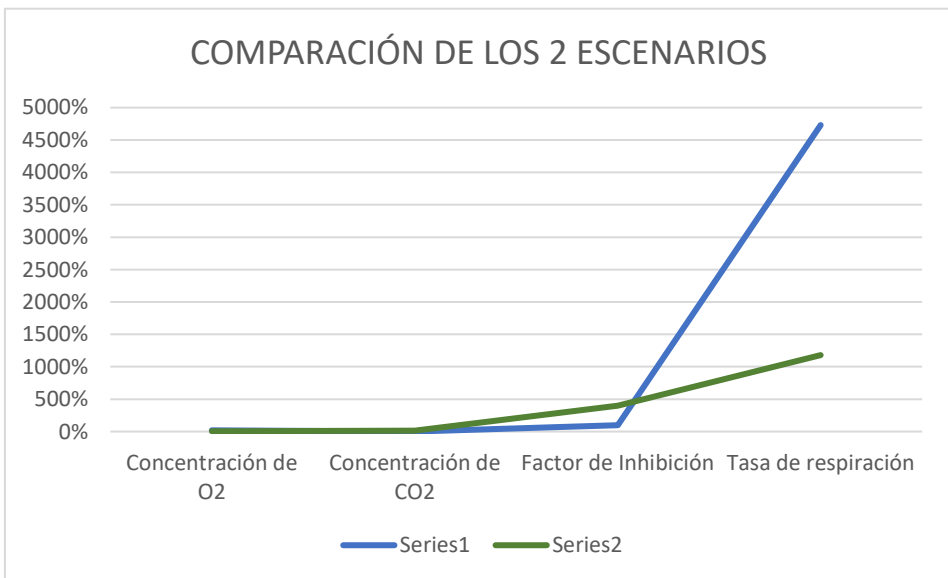
Tabla 3.1. Resultados calculados

Parámetro	Escenario 1 Aire Normal	Escenario 2 (Con Inhibición)
Concentración de O2	21%	5%
Concentración de CO2	0,03%	15%
Factor de Inhibición	1	4

Tasa de respiración	47,3	11,8
Estado Metabólico	Máxima actividad	Estado de latencia
Generación de calor	Muy Alta	Baja (Controlable)

Fuentes: Elaboración propia, (2026)

Figura 3.1. Comparación de los 3 resultados calculados



Fuentes: Elaboración propia, (2026)

3.2 Influencia de la temperatura: Energía de activación y el coeficiente

La respiración y la producción son procesos termo dependientes lo cual nos sirve para el diseño de los sistemas de cambio de temperatura, mediante la energía de activación y el coeficiente (Navarro, 2012).

3.2.4 ¿Cómo se mide?

La temperatura se mide determinando la variación de la tasa de respiración (mg de CO₂/kg * h o mg de O₂/kg * h) a diferentes temperaturas para observar los procesos metabólicos de la fruta es decir que tan rápido consumen su energía De manera matemática, esto se realiza con el coeficiente Q₁₀, que cuantifica el incremento de la actividad biológica por cada aumento de 10°C (Valencia, 2023).

3.2.5 ¿Cómo se maneja y cuándo se usa?

Según Ulloa, Saénz, Castro, & Ramírez, (2020), dice que el estudio del manejo de la temperatura es sumamente importante debido a que con esto se realiza el manejo de la logística y la tecnología en los productos a comercializar. Y se toman en cuenta para los siguientes aspectos:

- Clasificación de perecebilidad.
- Cálculo de refrigeración y carga térmica.
- Predicción de la vida útil.

3.2.6 Fórmulas para la influencia de la temperatura

La temperatura es uno de los procesos más importantes debido a que con el aumento de la temperatura también aumenta la producción de etileno acelerando así la descomposición de la fruta (Navarro, 2012).

A. Coeficiente Q10

$$Q_{10} = \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^{\frac{10}{T_2 - T_1}}$$

Donde:

- R_2 : Tasa de respiración a la temperatura más alta (T_2).
- R_1 : Tasa de respiración a la temperatura más baja (T_1).

3.2.7 Ejemplo práctico: Exportación de fresas en atmósfera modificada

1. Datos del producto y escenario

Un exportador desea enviar fresas a un mercado que requiere un transporte a 15°C (simulando una falla parcial en la cadena de frío) comparado con el almacenamiento óptimo a 5°C.

- Masa (M): 0.5 kg de fresas
- V_{max} : (a5°C): 50 mg O₂/kg * h
- K_m : 1.2% O₂
- K_i : 5% CO₂

Atmósfera interna deseada (MAP): 5% O₂ y 15% CO₂

Factor de calor vital :10.7 J/mg CO₂

Como se conoce que a 5°C la tasa de respiración con inhibición es 11.8 mg O₂/kg * h y tenemos un coeficiente Q₁₀ = 2.5 el cual es bastante común en frutos rojos así se calcula si la temperatura sube a 15°C.

$$R_{15^{\circ}C} = R_{5^{\circ}C} * Q_{10}^{\frac{T_2-T_1}{10}}$$

$$R_{15^{\circ}C} = 11.8 * 2.5^{\frac{15-5}{10}}$$

$$R_{15^{\circ}C} = 29.5 \text{ mg O}_2/\text{Kg} * \text{h}$$

Con este resultado se nos indica que con el aumento de tan solo 10 °C la velocidad con que las fresas consumen sus reservas de energía se duplica lo cual reduce considerablemente su vida útil.

3.3 Dinámica de empaque en atmósfera modificada (MAP)

Lo que se busca con estos empaques es crear ambientes que sean bajos en O₂ con el fin de reducir el metabolismo de la fruta y de tal manera alargar la vida útil de la misma (Calero, 2006).

3.2.8 ¿Cómo se mide y qué se requiere?

Según García, Gago, & Fernández, (2006), indican que para calcular la dinámica de empaque en atmósfera modificada (MAP), lo que se debe medir es el flujo de gases a través de la película plástica y la tasa de consumo de oxígeno (O₂) o producción de dióxido de carbono (CO₂) del producto. La tasa de respiración se expresa generalmente en miligramos de gas por kilogramo de producto en una hora de la siguiente manera:

$$\frac{mg\ CO_2}{Kg * h}$$

Lo que se requiere para obtener los resultados son espirómetros o cámaras herméticas donde estará el producto, también sensores de gases de alta precisión para controlar la evolución de las concentraciones de O₂ y CO₂ en un determinado tiempo, y un control de temperatura sumamente estricto (García, Gago, & Fernández, 2006).

3.2.9 ¿Cómo se maneja y cuándo se usa?

García, Gago, & Fernández, (2006), cuentan que esto se usa generalmente para intervenir en el metabolismo del producto sin la necesidad de recurrir únicamente al frío y se puede aplicar a:

- Diseño de tecnología postcosecha
- Prevención de la asfixia
- Control del calor vital
- Reducción del etileno

3.2.10 Fórmula para calcular

García, Gago, & Fernández, (2006), describen la siguiente fórmula que se utiliza el balance de masa que iguala la permeación con la respiración por lo que se usa la siguiente fórmula:

$$P_{O_2} = \frac{r_{O_2} * M * L}{A * (O_{2ext} - O_{2int})}$$

Donde:

- **PO₂**: Permeabilidad de la película.
- **rO₂**: Tasa de respiración (calculada con el modelo de Michaelis-Menten)¹.
- **M**: Masa del producto.
- **L**: Espesor de la película plástica.
- **A**: Área superficial del empaque.
- **(O₂, ext - O₂, int)**: Gradiente de concentración de oxígeno entre el aire externo y el interior del empaque.

a) Ejemplo practico

Masa (M): 1 kg de fresas.

Tasa de consumo de O₂ (rO₂): 40 mg O₂/kg *h

Área superficial de la bolsa (A): 0.12 m²

Espesor de la película (L): 40 mu = (0.00004 m)

Gradiente de concentración (Delta O₂) = 21% (ext) - 3% (int)= 18 %

$$P_{O_2} = \frac{r_{O_2} * M * L}{A * (O_{2ext} - O_{2int})}$$

$$P_{O_2} = \frac{40 * 1 * 40}{0.12 * 18}$$

$$P_{O_2} = \frac{1600}{2.16}$$

$$= 740.74 \text{ mL um/ (m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{atm)}$$

Como se puede observar se necesita una permeabilidad de 740.74 mL um/ (m² * h * atm) por lo cual con este dato se puede seleccionar materiales poliméricos como el polietileno para garantizar el flujo de gases.

Capítulo IV

4. Cálculo y control de humedad relativa en almacenamiento

4.1 Fundamentos de la Humedad Relativa

La humedad es un factor ambiental crítico que describe la cantidad de vapor de agua presente en el aire. Para fines de almacenamiento, el concepto más relevante es la **Humedad Relativa (HR)**, la cual se define como la relación porcentual entre la presión parcial del vapor de agua en una mezcla de aire y la presión de saturación del vapor a una temperatura determinada. A diferencia de la humedad absoluta, la HR es dependiente de la temperatura; esto implica que, si la temperatura de un almacén aumenta sin que se añada vapor de agua, la humedad relativa disminuirá, y viceversa. Este fenómeno es fundamental en la logística, ya que pequeñas fluctuaciones térmicas pueden alterar drásticamente las condiciones de conservación de los productos (Dorighello, 2022).

4.1.1 Termodinámica y psicrometría

El estudio de las propiedades termodinámicas del aire húmedo se denomina **psicrometría**. En el ámbito técnico, el uso de la carta psicrométrica permite visualizar la relación entre la temperatura de bulbo seco, la temperatura de bulbo húmedo, el punto de rocío y la humedad relativa. El punto de rocío es especialmente crítico en el almacenamiento, pues representa la temperatura a la cual el aire se satura y el vapor de agua comienza a condensarse en forma líquida sobre las superficies de los productos o las estructuras del almacén. La prevención de la condensación es el objetivo principal de cualquier sistema de

control de humedad, ya que el agua líquida es el principal catalizador de procesos de degradación como la corrosión, el crecimiento fúngico y el apelmazamiento de sólidos (Dorighello, 2022).

4.1.2 Cálculo de la Humedad Relativa

El cálculo preciso de la humedad relativa se basa en la medición de variables físicas y el uso de ecuaciones de estado. Matemáticamente, se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$HR = \left(\frac{e}{e_s} \right) \times 100$$

Donde e representa la presión de vapor real y e_s es la presión de vapor de saturación a la temperatura actual. Para determinar e de manera automatizada en sistemas de control, se utilizan frecuentemente ecuaciones como la de **Magnus-Tetens** o la de **Goff-Gratch**, que permiten estimar la presión de saturación en función de la temperatura ambiente. En la práctica industrial moderna, estos cálculos son realizados por microprocesadores integrados en sensores capacitivos o resistivos, que entregan una lectura directa del porcentaje de HR tras compensar las variaciones térmicas del entorno (Figuerola et al, 2020).

4.1.3 Impacto de la humedad en el almacenamiento

La estabilidad de las mercancías en un almacén depende del equilibrio higroscópico. Cada material posee un Contenido de Humedad de Equilibrio (CHE), que es el punto en el cual el material ni gana ni pierde agua frente al aire circundante. Si la HR del almacén es superior al CHE del producto, este absorberá humedad, lo que puede provocar hinchamiento, pérdida de propiedades mecánicas o degradación

química. En el caso de productos alimenticios o farmacéuticos, una HR elevada favorece la actividad acuática (a_w), permitiendo la proliferación de microorganismos y moho. Por el contrario, una humedad excesivamente baja puede generar fragilidad en ciertos plásticos, cueros o papeles, además de incrementar el riesgo de descargas electrostáticas que pueden dañar componentes electrónicos (Figuerola et al, 2020).

4.1.4 Estrategias de control de humedad

El control de la humedad relativa en instalaciones de almacenamiento se aborda mediante dos métodos principales: el control pasivo y el control activo. El **control pasivo** se basa en el diseño arquitectónico del almacén, utilizando barreras de vapor, aislamiento térmico adecuado y ventilación natural para minimizar el intercambio de humedad con el exterior. Por otro lado, el **control activo** implica el uso de sistemas mecánicos como deshumidificadores (por refrigeración o desecantes) y sistemas de Climatización (HVAC). Los deshumidificadores refrigerativos funcionan enfriando el aire por debajo de su punto de rocío para extraer el agua, mientras que los sistemas desecantes utilizan materiales como el gel de sílice para adsorber el vapor de agua directamente del flujo de aire, siendo estos últimos más eficientes en almacenes que requieren niveles de humedad muy bajos o que operan a temperaturas de congelación (García et al, 2012).

4.2 Dinámica del Déficit de Presión de Vapor (VPD) y Fisiología de la Transpiración

A diferencia de la Humedad Relativa (HR), que es una medida porcentual de la saturación del aire, el **VPD** es la diferencia real entre la

cantidad de humedad en el aire y la cantidad que el aire puede retener cuando está saturado a una temperatura determinada. En postcosecha, el VPD es el verdadero motor termodinámico de la pérdida de agua. Se expresa matemáticamente como:

$$\text{VPD} = \text{VP}_{\text{SATURACION}} - \text{VP}_{\text{ACTUAL}}$$

- **VP_{SATURACION}**: Presión de vapor de agua en el interior del tejido vegetal (asumido como 100% de HR).
- **VP_{ACTUAL}**: Presión de vapor del aire circundante en la cámara de almacenamiento.

4.2.1 Importancia del VPD sobre la HR

Dos ambientes con 80% de HR pueden tener efectos radicalmente distintos. A 5°C, el VPD es bajo, pero a 25°C, el VPD es significativamente mayor, lo que acelera la deshidratación, aunque el porcentaje de humedad sea el mismo (García et al, 2012).

4.3 Fisiología de la transpiración en postcosecha

La transpiración es uno de los procesos fisiológicos más críticos en la vida postcosecha de frutas y hortalizas. A diferencia de lo que ocurre cuando el producto está unido a la planta, una vez cosechado, este no puede reponer el agua perdida a través de las raíces. Este fenómeno consiste básicamente en el movimiento del agua desde los tejidos internos del producto hacia la atmósfera circundante, lo que se traduce en una pérdida directa de peso fresco y calidad visual (Huertas, (2020).

4.3.1 El mecanismo del Déficit de Presión de Vapor (DPV)

El motor principal de la transpiración es la diferencia de presión de vapor entre el interior del producto y el aire exterior. El interior de una fruta o verdura está prácticamente saturado de humedad (cercano al 100% de humedad relativa). Si el aire que la rodea tiene una humedad menor, se crea un gradiente de presión que "succiona" el agua hacia afuera. Cuanto más seco y caliente esté el aire, mayor será este Déficit de Presión de Vapor (DPV) y, por lo tanto, la pérdida de agua será más rápida y agresiva (Huertas, (2020).

4.3.2 Barreras estructurales y vías de salida

El agua sale del producto principalmente a través de tres vías: las estomas (poros regulables, aunque pierden control tras la cosecha), las lenticelas y, sobre todo, a través de la cutícula o piel. La composición de la cutícula, rica en ceras y cutina, actúa como una barrera aislante. Productos con pieles delgadas o con mucha superficie en relación con su volumen (como las espinacas o las fresas) transpiran mucho más rápido que aquellos con cáscaras gruesas y cerosas (como las manzanas o las naranjas) (Larrosa et al, 2016).

4.3.3 Factores ambientales determinantes

La temperatura es el factor externo más influyente, ya que afecta directamente la capacidad del aire para retener humedad; a mayor temperatura, el aire puede contener más vapor de agua, aumentando el DPV. Por otro lado, la velocidad del aire también juega un papel clave: un flujo de aire rápido elimina la "capa límite" de humedad estancada alrededor del fruto, acelerando la evaporación. Por ello, en cámaras de

enfriamiento es vital mantener una humedad relativa alta (90-95 %) para minimizar el gradiente (Larrosa et al, 2016).

4.4 Consecuencias fisiológicas de la deshidratación

La pérdida de agua no es solo una reducción de peso (merma económica); desencadena procesos metabólicos degradativos:

4.4.1 Pérdida de turgencia y cambios estructurales

La consecuencia física más inmediata de una baja humedad relativa es la pérdida de la presión de turgencia. El agua en las vacuolas celulares mantiene la rigidez de los tejidos; al perderse, las células se colapsan, lo que se traduce visualmente en marchitamiento, arrugamiento de la piel y una textura flácida o "gomosa". En vegetales de hoja, como la lechuga, una pérdida de peso de apenas el 3 % al 5 % ya es suficiente para que el producto pierda su valor comercial debido a la falta de frescura visual (Tuero, 2016).

4.4.2 Alteraciones en el metabolismo y senescencia

La deshidratación no es solo un cambio físico, sino que actúa como un estresor fisiológico que acelera el metabolismo. El estrés hídrico provocado por una baja HR induce la síntesis de etileno (la hormona de la maduración) y aumenta la tasa de respiración. Esto significa que un producto deshidratado consume sus reservas energéticas (azúcares y ácidos) mucho más rápido, lo que acorta drásticamente su vida de anaquel y acelera su envejecimiento o senescencia (Tuero, 2016).

4.4.3 Degradación nutricional y daño de membranas

La baja humedad relativa también afecta la composición química. La deshidratación acelera la oxidación y pérdida de vitaminas hidrosolubles, especialmente el ácido ascórbico (Vitamina C). Además, a nivel celular, la pérdida excesiva de agua puede comprometer la integridad de las membranas celulares, provocando "fugas" de solutos que sirven de alimento para microorganismos, aumentando la susceptibilidad a pudriciones y ataques de patógenos (Ruiz et al, 2023).

4.4.4 El riesgo de la humedad excesiva

Si bien una HR alta (90 % a 95 %) es ideal para minimizar la transpiración, una humedad cercana al punto de saturación (100 %) o que cause condensación líquida sobre la superficie del producto puede ser contraproducente. La presencia de agua libre facilita la germinación de esporas de hongos y el desarrollo de bacterias. Por ello, el manejo fisiológico ideal busca un equilibrio: una HR lo suficientemente alta para evitar la sed, pero con una ventilación adecuada para evitar el "mojado" del producto (Ruiz et al, 2023).

4.5 Isotermas de sorción y actividad de agua (a_w) en el almacenamiento de granos y semillas

4.5.1 El concepto de actividad de agua (a_w)

En la ciencia de postcosecha de granos, es fundamental distinguir entre el contenido de humedad (cantidad total de agua) y la actividad de agua (disponibilidad de esa agua). La a_w se define como la relación entre la presión de vapor de agua del sustrato (P) y la presión de vapor del agua pura (P_o) a la misma temperatura:

$$a_w = P/P_0$$

Fisiológicamente, la a_w representa el estado energético del agua en el grano. Un valor de $a_w = 0.70$ indica que el agua en el grano tiene el 70% de la capacidad de vaporización del agua pura. Este parámetro es el principal determinante del crecimiento de microorganismos y de la tasa de reacciones bioquímicas.

4.5.2 Isotermas de sorción: Fundamentos termodinámicos

Una isoterma de sorción describe la relación de equilibrio entre el contenido de humedad de equilibrio (CHE) del grano y la actividad de agua (o humedad relativa de equilibrio, HRE) a una temperatura constante.

a) Clasificación de las isotermas

La mayoría de los granos y semillas presentan una isoterma de Tipo II (forma sigmoidea o en "S"), característica de materiales porosos y poliméricos. Se divide en tres regiones:

- 1. Agua Monocapa (Región A):** $a_w < 0.25$. El agua está fuertemente ligada a los sitios hidrofílicos (proteínas, almidón) mediante puentes de hidrógeno. Es agua no disponible para reacciones.
- 2. Agua Multicapa (Región B):** $0.25 < a_w < 0.75$. El agua se condensa en capas adicionales. Es la región crítica para el almacenamiento seguro de granos.

3. **Agua Libre o Capilar (Región C):** $a_w > 0.75$. El agua llena los poros capilares y se comporta como agua líquida, permitiendo el crecimiento acelerado de hongos y bacterias (Vega, 2018).

b) El fenómeno de histéresis

En el almacenamiento de granos, la curva de desorción (secado) no coincide con la de adsorción (rehidratación). Para un mismo valor de a_w , el grano retiene más humedad durante la desorción que la que gana durante la adsorción. Este fenómeno es vital en la práctica, ya que un grano que ha sido secado excesivamente y luego se rehidrata puede tener una estabilidad distinta a uno que nunca bajó de ese nivel de humedad (Vega, 2018).

4.5.3 Modelado matemático de las isotermas

Para predecir el comportamiento del grano en el silo, se utilizan modelos matemáticos que ajustan los datos experimentales:

- Modelo de BET (Brunauer, Emmett y Teller): Útil para predecir la humedad de la monocapa, pero limitado a $a_w < 0.50$.
- Modelo de GAB (Guggenheim, Anderson y de Boer): Es el más aceptado en granos, ya que es una extensión del BET que describe con precisión la isoterma hasta una a_w de 0.90.
- Ecuación de Henderson y Chung-Pfost: Muy utilizadas en ingeniería agrícola para calcular el equilibrio aire-grano durante la aireación en silos.

4.5.4 Relación con la estabilidad en almacenamiento

La a_w determina el límite crítico para la conservación de granos y semillas:

- **Límite de Seguridad:** La mayoría de los hongos de almacenamiento (como *Aspergillus* y *Penicillium*) no pueden crecer por debajo de una a_w de 0.70. Por lo tanto, el objetivo del secado es llevar el grano a un contenido de humedad que corresponda a esta a_w a la temperatura de almacenamiento.
- **Oxidación de Lípidos:** En semillas oleaginosas, si la a_w es extremadamente baja (< 0.20), la oxidación de grasas se acelera debido a la exposición directa de los lípidos al oxígeno al perderse la capa protectora de agua.
- **Viabilidad de la Semilla:** Para el almacenamiento de germoplasma (semillas), se busca una a_w baja (cercana a 0.25 - 0.35) para reducir el metabolismo respiratorio al mínimo y prolongar la longevidad del embrión.

4.5.5 Efecto de la temperatura sobre la isoterma

La capacidad de adsorción de agua de los granos disminuye al aumentar la temperatura. Esto significa que si un silo se calienta (por respiración del grano o radiación solar), la a_w del aire intersticial aumentará, aunque el contenido de humedad del grano sea el mismo, elevando el riesgo de deterioro. Este principio es la base de los mapas de estabilidad de almacenamiento, que cruzan temperatura, humedad y tiempo (García, 2024).

4.6 Ingeniería de la Cadena de Frío: Humidificación Activa vs. Condensación

En la ingeniería de postcosecha, la gestión de la humedad en cámaras frigoríficas representa un desafío técnico de balance de masas. Mientras que la refrigeración es necesaria para reducir la tasa metabólica, el proceso de enfriamiento es intrínsecamente deshumidificador, lo que obliga a implementar sistemas de humidificación activa que, de no ser controlados con precisión psicrométrica, pueden derivar en condensación indeseada (Garcia, 2024).

4.6.1 El Proceso de Deshumidificación en el Evaporador

El aire de una cámara frigorífica pierde humedad de forma constante debido al funcionamiento del sistema de refrigeración. Este fenómeno ocurre cuando el aire circula a través del serpentín del evaporador.

- **Punto de Rocío del Serpentín:** Para que exista transferencia de calor, la temperatura del serpentín ($T_{\text{serpentín}}$) debe ser inferior a la temperatura del aire de la cámara (T_{aire}).
- **Condensación en Superficie Fría:** Si $T_{\text{serpentín}}$ es menor que la temperatura de rocío (T_{dp}) del aire circundante, el vapor de agua se condensa sobre las aletas del evaporador en forma líquida o escarcha.
- **Diferencial de Temperatura (DT):** La tasa de deshumidificación es proporcional al DT. Un DT amplio (por ejemplo, 10°C entre el refrigerante y el aire) provoca una deshidratación severa del aire, mientras que un DT estrecho ($2\text{-}3^{\circ}\text{C}$) ayuda a mantener una

humedad relativa (HR) más alta, aunque requiere evaporadores de mayor superficie (García, 2024).

4.6.2 Tecnologías de humidificación activa

Para compensar la pérdida de agua en el evaporador y mantener niveles de HR superiores al 90-95%, se integran sistemas de humidificación activa. Las principales tecnologías empleadas en la ingeniería de frío son:

a) Humidificación ultrasónica (Niebla Fría)

Utiliza transductores piezoeléctricos que vibran a frecuencias ultrasónicas para atomizar el agua en gotas de 1 a 5 micras.

- **Ventaja:** Las gotas son tan pequeñas que se evaporan instantáneamente en el aire antes de depositarse sobre el producto (efecto de "niebla seca").
- **Eficiencia:** No añade carga térmica sensible significativa al ambiente.

b) Nebulización de Alta Presión (Misting)

El agua se impulsa a través de boquillas cerámicas a presiones de 500 a 1000 PSI.

- **Dinámica:** Genera gotas de 10-20 micras. Aunque es eficiente para áreas grandes, existe un mayor riesgo de "mojado" superficial si el flujo de aire no es suficiente para evaporar la gota antes de que impacte el producto.

c) **Humidificadores Centrifugos**

Utilizan un disco giratorio para romper el agua en gotas mediante fuerza centrífuga. Son comunes en pre-enfriamiento pero menos precisos para el control fino en almacenamiento prolongado.

4.6.3 Fenomenología de la condensación y el punto de rocío

La condensación sobre el producto es el principal riesgo microbiológico de una HR elevada. Ocurre cuando la temperatura de la superficie del producto (T_s) cae por debajo de la temperatura de rocío del aire del local (T_{dp}).

a) **Matemáticamente, la condición para evitar la condensación se define como:**

$$T_{\text{SUPERFICIE_PRODUCTO}} > TDP$$

La temperatura de rocío se puede aproximar mediante la ecuación de Magnus-Tetens para rangos de almacenamiento:

$$T_{dp} = \frac{c \cdot \gamma(T, HR)}{B - \gamma(T, HR)}$$

Tdp: Temperatura de punto de rocío (la temperatura a la cual el vapor de agua se convierte en líquido).

T: Temperatura actual del aire.

HR: Humedad Relativa.

Y (T, HR): Una función intermedia que relaciona la temperatura y la humedad.

b y c: Son constantes empíricas. Los valores más comunes para el aire son b aprox. 17.67 y c aprox. 243.5°C.

b) Riesgos de la condensación líquida:

1. Proliferación de Patógenos: El agua libre en la superficie es un sustrato ideal para hongos (*Botrytis cinerea*) y bacterias.
2. Daño Estructural: En granos y semillas, la condensación puede causar "apelmazamiento" y brotación prematura.
3. Transferencia de Calor: La condensación es un proceso exotérmico que libera calor latente sobre el fruto, aumentando su carga térmica.

4.7 Caso práctico: Dimensionamiento de humidificación y riesgo de condensación

Planteamiento del problema

Una cámara frigorífica de 100 m³ almacena 5,000 kg de fresa a una temperatura de 2 °C- El sistema de refrigeración opera con un flujo de aire de 2,000 m³/h.

Se desea mantener una Humedad Relativa (HR) del 95% para minimizar el VPD. Sin embargo, el aire que pasa por el evaporador sale saturado (100 %HR) pero a una temperatura de 0 °C (debido al diferencial térmico necesario para enfriar).

Se solicita:

1. Calcular la cantidad de agua que el sistema de humidificación activa debe reponer por hora para compensar la deshumidificación del evaporador.
2. Evaluar el riesgo de condensación si, por una apertura de puerta, el aire de la cámara sube repentinamente a 5 °C mientras el fruto permanece a 2 °C.

a) Parte 1: Cálculo de Humidificación Activa (Balance de Masa)

Para resolver esto, utilizaremos las propiedades psicrométricas del aire a nivel del mar.

Datos de entrada:

- **Estado 1 (Aire de la cámara):** $T = 2\text{ °C}$, $HR = 95\%$.
 - **Humedad absoluta (W1):** aprox. 4.15 g de agua/kg de aire seco.
- **Estado 2 (Salida del evaporador):** $T = 0\text{ °C}$, $HR = 100\%$.
 - **Humedad absoluta (W2):** aprox. 3.77 g de agua/kg de aire seco.
- **Densidad del aire (p):** aprox. 1.28 kg/m^3 (a 2 °C)

Paso 1: Calcular el flujo de masa de aire (m_{AIRE})

$$(m_{\text{AIRE}}) = \text{Caudal} \times p = 2000\text{ m}^3/\text{h} \times 1.28\text{ kg/m}^3 = 2560\text{ kg de aire/h}$$

Paso 2: Calcular la tasa de extracción de agua por el evaporador (m_{AGUA})

El evaporador "retira" la diferencia de humedad entre el aire que entra y el que sale:

$$m_{AGUA} = m_{AIRE} \times (W1 - W2)$$

$$m_{AGUA} = 2560 \text{ kg/h} \times (0.00415 - 0.00377) \text{ kg}_w / \text{kg}_{as}$$

$$m_{AGUA} = \text{aprox. } 0.973 \text{ kg/h}$$

Resultado 1: El sistema de humidificación activa (por ejemplo, boquillas ultrasónicas) debe inyectar aproximadamente 0.97 litros de agua por hora} solo para compensar lo que el sistema de frío retira y mantener el 95% de HR.

b) Parte 2: Análisis de Riesgo de Condensación

Supongamos una fluctuación: el aire de la cámara se calienta a 5 °C pero el sistema de humidificación mantiene la HR al 95%. El fruto, debido a su inercia térmica, sigue a 2 °C.

Paso 1: Calcular la Temperatura de Rocío (T_{dp}) del nuevo aire

A 5 °C y 95% HR, la presión de vapor es alta. Usando la aproximación de Magnus:

$$T_{dp} \approx T - \left(\frac{100 - HR}{5} \right) = 5 - \left(\frac{100 - 95}{5} \right) = 4^\circ\text{C}$$

(Nota: El cálculo exacto daría aproximadamente 4.2 °C.)

Paso 2: Comparar con la temperatura del fruto (T_{fruto})

- $T_{\text{dp}} = 4.2 \text{ °C}$
- $T_{\text{fruto}} = 2.0 \text{ °C}$

Resultado 2: Como $T_{\text{dp}} > T_{\text{fruto}}$, el vapor de agua en el aire se condensará inmediatamente sobre la superficie fría de las fresas.

4.8 Conclusión y recomendación

El ejemplo demuestra una paradoja de la cadena de frío:

1. Para evitar que la fresa pierda peso (VPD alto), necesitamos inyectar casi 1 litro de agua/h.
2. Sin embargo, si permitimos que el aire se caliente solo 3 °C (por una puerta abierta o mal aislamiento) manteniendo esa humedad, crearemos agua líquida sobre el fruto, disparando el crecimiento de *Botrytis* (moho gris).

Capítulo V

5. Fisiología postcosecha de frutas, hortalizas y granos

- Cambios bioquímicos y metabólicos durante la maduración y senescencia
- Fisiología del control: actividad de agua y atmósferas en el almacenamiento

5.1 Metabolismo respiratorio y bioenergética

La respiración es el proceso catabólico fundamental donde la energía química almacenada en sustratos como el almidón, azúcares y ácidos orgánicos se libera mediante oxidación. Este proceso ocurre en tres etapas citosólicas y mitocondriales: la glucólisis, el ciclo de los ácidos tricarboxílicos (TCA) y la cadena de transporte de electrones.

- **Tasa Respiratoria (TR):** La intensidad de la TR es el indicador primario del potencial de almacenamiento. Según Kader (2011), los productos con una TR extremadamente alta (ej. espárrago) agotan sus reservas de carbono rápidamente, entrando en senescencia prematura.
- **Cociente Respiratorio (CR):** Definido como la relación entre el CO₂ producido y el O₂ consumido. Saltveit (2019) indica que un CR cercano a 1.0 sugiere el uso de carbohidratos, mientras que un CR < 1.0 indica la oxidación de lípidos (común en granos oleaginosos y aguacate).

5.2 Bioquímica de la maduración y senescencia

La maduración es un proceso coordinado de cambios bioquímicos que transforman un tejido fisiológicamente maduro, pero no comestible en uno con características sensoriales óptimas.

- **Degradación de la Pared Celular:** El ablandamiento es el resultado de la despolimerización de las pectinas y la celulosa. Valero y Serrano (2010) explican que la *Pectinmetilesterasa (PME)* prepara el sustrato para que la *Poligalacturonasa (PG)* rompa los enlaces glicosídicos, reduciendo la firmeza del tejido.
- **Biosíntesis del Etileno (Ruta de Yang):** El etileno (C_2H_4) es el regulador maestro de los frutos climatéricos. La ruta comienza con la Metionina, que se convierte en S-adenosilmetionina (SAM) y luego en el precursor clave: el ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC). Las enzimas limitantes son la *ACC sintasa (ACS)* y la *ACC oxidasa (ACO)* (Yang & Hoffman, 1984).
- **Sistema de Retroalimentación:** En frutos climatéricos, se activa el "Sistema II", donde la presencia de etileno estimula la expresión de genes de síntesis de más etileno de forma exponencial (Giovannoni, 2004).

5.3 Fisiología de granos: Dormancia y estabilidad

A diferencia de los tejidos carnosos, los granos son órganos diseñados para la supervivencia en estado de desecación.

- **Actividad de Agua (a_w):** Es la cantidad de agua libre disponible para reacciones bioquímicas. Maier (2021) establece que la estabilidad del grano durante el almacenamiento depende de

mantener una a_w inferior a 0.70. Superar este umbral activa la germinación incipiente y la respiración microbiana.

- **Isotermas de Sorción:** Describen la relación de equilibrio entre el contenido de humedad del grano y la humedad relativa del aire circundante a una temperatura constante. Según Brookfield (2012), estas curvas son esenciales para predecir si un grano ganará o perderá humedad en un silo, evitando el "calentamiento de la masa".

5.4 Regulación hormonal de la dormancia

En órganos de reserva como granos y tubérculos, la latencia es un estado inducido por el balance entre promotores e inhibidores de crecimiento. El Ácido Abscísico (ABA) mantiene la dormancia inhibiendo la síntesis de alfa-amilasa, mientras que las Giberelinas (GA) promueven la movilización de reservas almidonáceas para el crecimiento del brote (Hiwasa-Tanase & Ezura, 2014).

Figura 5.1. Cálculo de termodinámica poscosecha

ANEXO TÉCNICO: CÁLCULO DE TERMODINÁMICA POSCOSECHA

CURSO: Fisiología Poscosecha de Frutas, Hortalizas y Granos

TEMA: Relación entre Tasa Respiratoria, Temperatura y Vida Útil

1. CASO DE ESTUDIO



Exportación de 15 toneladas (15,000 kg) de Tomate a 25°C. Determinar calor vital.

2. DATOS TÉCNICOS

Producto: Tomate

Masa (M): 15,000 kg

TR (25°C): 35 mg CO₂ kg⁻¹ h⁻¹

Factor Energetico: 10.7 J/mg CO₂

Q₁₀: 2.5

3. CÁLCULOS CLAVE

- A. Producción CO₂/h = 15,000 kg * 35 mg/kg/h = 525,000 mg/h
- B. Calor Vital (Q) = 522,000 mg/h * 5,617,500 J/h
- C. Potencia (W) = 5,617,500 J / 3,000 s = 1,872.5 Watts

4. IMPACTO DEL FRÍO (5°C) ❄️

$$TR(5^\circ\text{C}) = TR(25^\circ\text{C}) / Q_{10} = 35 / 2.5^2 = 5.6 \text{ mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$$

¡El frío reduce la respiración respición 6.25 veces!
Potencia térmica a 5°C:
1,872.5 W / 6,25 ≈ 299.5 W

Capítulo vi

6. Evaluación del Ciclo de Vida (ACV) de Procesos Post-cosecha

En 2022, el mundo desperdició 1.050 millones de toneladas de alimentos, lo que representa el 19% de los alimentos disponibles para los consumidores. Este desperdicio se concentra principalmente en los hogares (60%), seguido por los servicios de alimentación y el comercio minorista. Cada persona desecha en promedio 79 kg de comida al año, y se tiran al menos 1.000 millones de raciones diarias (Acuña & Domper, 2018).

La demanda global de alimentos crece de manera exponencial, impulsada por una población que superará los 9 mil millones para 2050, mientras que los sistemas de producción actuales están agotando los límites planetarios. Históricamente, la atención científica y mediática se ha enfocado en la "tranquera hacia adentro" (el cultivo), sin considerar que una proporción alarmante de los impactos ambientales ocurre una vez que el producto sale del campo. En este contexto, la etapa postcosecha, que incluye el acopio, acondicionamiento, empaque, almacenamiento y distribución, ha surgido como un "eslabón oculto" de contaminación y consumo energético (CIMMYT, 2024).

La Evaluación del Ciclo de Vida (ACV) se presenta no solo como una métrica técnica, sino también como un imperativo ético y estratégico. Esta metodología estandarizada (ISO 14040/14044) permite desentrañar la complejidad de las cadenas de suministro modernas, mostrando que una manzana consumida en Europa puede tener una huella de carbono

muy diferente dependiendo de si fue almacenada en atmósfera controlada durante seis meses o transportada desde el hemisferio sur. El presente estudio analiza la aplicación del ACV en tres aspectos críticos: la descarbonización de la cadena de frío, la dicotomía de los materiales de empaque y el impacto ambiental de las pérdidas de alimentos, proponiendo una visión integral hacia una agroindustria verdaderamente circular y sostenible (Trazable, 2024).

6.1 Marco teórico

6.1.1 El ACV en la industria alimentaria

La Evaluación del Ciclo de Vida es una técnica para evaluar los aspectos ambientales y los impactos potenciales asociados con un producto. En el contexto de la postcosecha, el análisis se vuelve complejo debido a la naturaleza perecedera de los productos (Trazable, 2024).

La aplicación de la Evaluación del Ciclo de Vida (ACV) en la industria alimentaria presenta desafíos particulares que la diferencian de otros sectores industriales. A diferencia de la fabricación de bienes inertes, los sistemas agroalimentarios manejan materiales biológicos dinámicos cuya huella ambiental está intrínsecamente ligada a la estacionalidad, la perecederidad y la variabilidad geográfica (Trazable, 2024).

La norma ISO 14040/14044 establece un marco sistemático para la ACV, compuesto por cuatro etapas: definición de objetivo y alcance, análisis de inventario, evaluación de impacto y la interpretación de resultados (Trazable, 2024).

El ACV permite evaluar los impactos ambientales de productos y procesos, facilitando la toma de decisiones sostenibles y la gestión responsable de recursos (Trazable, 2024).

6.1.2 Dinámica metabólica y cargas ambientales

La aplicación de la Evaluación del Ciclo de Vida (ACV) en la industria alimentaria se distingue de otros sectores por la gestión de materiales biológicos dinámicos, cuya huella ambiental está vinculada a la estacionalidad, la perecederidad y la variabilidad geográfica. A diferencia de los bienes inertes, un producto vivo, como una fruta en etapa de postcosecha, continúa interactuando metabólicamente con su entorno. Por esta razón, el ACV en este sector no debe limitarse a contabilizar únicamente los insumos energéticos o materiales, sino que es imprescindible integrar la tasa respiratoria y el metabolismo secundario de los productos dentro del inventario de cargas ambientales (Trazable, 2024; Acuña y Domper, 2018).

Esta interacción biológica es la que determina la intensidad de carbono durante el almacenamiento no logra ralentizar eficazmente el metabolismo del producto, se genera una ineficiencia termodinámica y ecológica sistémica. Esto implica que todos los impactos ambientales acumulados previamente en la etapa de cultivo (uso de fertilizantes, agua y energía en la "tranquera hacia adentro") se pierden al degradarse el producto, lo que resulta en un desperdicio de los recursos invertidos en la fase de producción primaria (Acuña & Domper, 2018; CIMMYT, 2024).

El control riguroso de variables metabólicas, como la temperatura y la humedad relativa, es, por tanto, una estrategia crítica de mitigación. Por ejemplo, investigaciones en hortalizas han demostrado que las temperaturas elevadas aceleran la pérdida de peso y la degradación de la calidad, lo que incrementa indirectamente el impacto ambiental por cada kilogramo de producto que finalmente llega a ser comercializable. En consecuencia, el diseño de sistemas que garanticen un manejo térmico eficiente, como el preenfriamiento optimizado, asegura que la huella ambiental acumulada no se desperdicie debido a una senescencia acelerada del producto (Aguilar et al., 1999; Yajamín Quisilema, 2023).

6.1.3 Multicriterialidad de los impactos en la cadena de suministro

En el contexto de la industria alimentaria globalizada, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) debe ir más allá de la simple medición de las emisiones de gases de efecto invernadero (CO₂ eq) y adoptar un enfoque multicriterio que evite el desplazamiento de cargas ambientales. Esta perspectiva es fundamental, ya que una mejora tecnológica en una etapa, como el empaque, podría reducir el desperdicio, pero al mismo tiempo aumentar el impacto en otras categorías si no se evalúa de manera integral. La aplicación de esta metodología, conforme a las normas ISO 14040/14044, permite que la toma de decisiones sea transparente y coherente, garantizando que no se ignore la complejidad intrínseca de los sistemas agroalimentarios (Trazable, 2024).

La evaluación multicriterio debe integrar indicadores específicos de degradación ambiental, tales como la eutrofización antropogénica y la escasez de agua. La primera se origina principalmente por los vertidos

de nitrógeno y fósforo en las aguas utilizadas para el lavado de productos en las plantas de beneficio, mientras que la segunda mide la huella hídrica azul consumida en procesos críticos de enfriamiento. Al contabilizar estos diversos impactos, el ACV se convierte en una herramienta de auditoría indispensable para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), considerando que la producción de alimentos es la principal responsable de la alteración de los flujos biogeoquímicos dentro de los límites planetarios (Acuña y Domper, 2018).

Asimismo, es imperativo incluir en el análisis la toxicidad derivada del manejo de insumos químicos en la postcosecha. La aplicación de fungicidas en las líneas de empaque y el tratamiento fitosanitario de la fruta generan residuos que, de no ser gestionados mediante sistemas de recogida selectiva y triple lavado, pueden filtrarse al entorno natural. Estas sustancias residuales alteran significativamente los indicadores de ecotoxicidad dentro del ACV, transformando un proceso de acondicionamiento necesario en un foco de contaminación ambiental si no se lleva a cabo una gestión adecuada de residuos peligrosos (Fundación Global Nature, 2021).

Finalmente, la multidimensionalidad del ACV permite cuantificar el impacto ambiental incluso en el suelo, evaluando cómo las actividades humanas afectan este recurso limitado. En el contexto de la postcosecha, esto implica analizar cómo el procesamiento y la disposición final de los subproductos influyen en la capacidad de regeneración de los ecosistemas locales. De esta manera, el ACV proporciona una métrica técnica que ayuda a las empresas a transitar hacia modelos de economía

circular, donde el impacto no se mide solo por la huella de carbono, sino por la integridad de todos los recursos naturales involucrados (Tecnología Hortícola, 2020).

6.1.4 Asignación de cargas en coproductos y subproductos

Dentro del marco técnico de la Evaluación del Ciclo de Vida (ACV), la asignación de impactos ambientales es un paso crucial cuando un proceso genera más de un producto. En la postcosecha agroindustrial, este escenario es la norma y no la excepción, ya que tras el procesamiento se obtienen coproductos y subproductos de origen biológico dinámico. La normativa ISO 14040/14044 establece directrices estrictas para este análisis, exigiendo transparencia y coherencia al decidir si las cargas ambientales se distribuyen según criterios de masa, valor económico o contenido energético (Domper, 2018).

La correcta gestión de estos materiales sobrantes permite transformar un residuo en un recurso dentro de una estrategia de sostenibilidad. En las plantas de empaque, por ejemplo, los residuos orgánicos, basado en la jerarquía de gestión de residuos, no solo reduce la carga ambiental final, sino que también evita la emisión de gases nocivos, como el metano, en los vertederos (Trazable, 2024; Acuña).

Finalmente, la integración de estos subproductos en la economía circular permite que materiales como la celulosa de la cáscara de cacao se reincorporen a la industria para la fabricación de nuevos envases compostables. Al asignar adecuadamente los impactos, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) demuestra que la reutilización de productos que

no cumplen con los estándares estéticos, para su transformación en jugos o harinas, optimiza el uso de los recursos ya invertidos en el cultivo. De este modo, la asignación de cargas deja de ser un mero cálculo matemático para convertirse en un imperativo estratégico para una agroindustria circular (Trazable, 2024; Fundación Global Nature, 2021; Arrieta, 2023).

6.1.5 Categorías de impacto evaluadas

El ACV transforma los datos de inventario (energía, agua, materiales) en categorías de impacto:

- **Potencial de Calentamiento Global (GWP):** Medido en kg de CO₂ eq.
- **Agotamiento de la Capa de Ozono (ODP):** Crítico por el uso de refrigerantes.
- **Eutrofización:** Impacto en cuerpos de agua por vertidos de lavado.
- **Escasez de Agua:** Huella hídrica azul consumida en procesos de lavado y enfriamiento.

El proceso de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en la postcosecha transforma los datos objetivos del inventario (como el consumo de kilovatios-hora, litros de agua y kilogramos de materiales) en indicadores ambientales específicos, denominados categorías de impacto. Esta fase es crucial porque permite traducir el uso de recursos en daños potenciales al ecosistema. Según las directrices de las normas ISO 14040 y 14044, este procedimiento garantiza que la evaluación sea sistemática y que los resultados puedan ser interpretados para la mejora de los procesos agroindustriales (Trazable, 2024).

Una de las categorías más críticas es el Potencial de Calentamiento Global (GWP), que mide las emisiones de gases de efecto invernadero en kilogramos de CO₂ equivalente. En las instalaciones de refrigeración y almacenamiento, esta categoría se ve fuertemente afectada no solo por el consumo eléctrico, sino también por las emisiones directas de refrigerantes sintéticos como el R-404A o el R-134a, los cuales poseen un GWP miles de veces superior al del dióxido de carbono en caso de fugas (Poscosecha.com, 2025; Yajamín Quisilema, 2023).

Asimismo, el ACV debe evaluar la eutrofización y la escasez de agua, categorías que reflejan el impacto de las operaciones de lavado y acondicionamiento. La eutrofización cuantifica el enriquecimiento excesivo de nutrientes en cuerpos de agua debido a vertidos de nitrógeno y fósforo, mientras que la escasez de agua analiza la huella hídrica azul extraída para los procesos de enfriamiento y limpieza de la fruta. Estos indicadores son fundamentales para que la industria alimentaria cumpla con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), considerando que este sector es el principal responsable de la alteración de los flujos biogeoquímicos globales (Acuña y Domper, 2018; Tecnología Hortícola, 2020).

Finalmente, se debe integrar la categoría de ecotoxicidad, la cual evalúa el impacto de los residuos químicos y fitosanitarios utilizados en el tratamiento de la fruta en las líneas de empaque. Si los envases de fungicidas y desinfectantes no reciben un tratamiento de triple lavado y una disposición final adecuada, las sustancias residuales pueden filtrarse al suelo y al agua, alterando significativamente este indicador. Por lo tanto, una gestión responsable de los residuos peligrosos es fundamental

para reducir la carga tóxica total dentro del perfil ambiental del producto (Fundación Global Nature, 2021).

6.2 Definición y normativa aplicada

El ACV es una metodología sistemática que permite evaluar el impacto ambiental de cualquier actividad humana, examinando detalladamente cada fase, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final o el reciclaje (Tecnología Hortícola, 2020). En la agroindustria, este análisis se realiza conforme a las directrices de las normas ISO 14040 y 14044, que estructuran el estudio en: definición de objetivos, inventario, evaluación de impactos e interpretación (Trazable, 2024).

a) Consumo energético y descarbonización de la cadena de frío

La gestión térmica es el núcleo de la postcosecha, pero también representa su mayor carga ambiental. Mantener la cadena de frío es indispensable para la seguridad alimentaria, aunque el consumo energético es elevado (Poscosecha.com, 2025).

El uso de energías renovables en almacenes frigoríficos puede reducir el impacto ambiental entre un 40 y 60%, dependiendo de la radiación solar local (Poscosecha.com, 2025).

El almacenamiento de energía térmica mediante materiales de cambio de fase (PCM) permite optimizar el consumo eléctrico y disminuir la carga sobre la red (Poscosecha.com, 2025).

Regulaciones internacionales como el Protocolo de Montreal y el Acuerdo de Kigali fomentan la eliminación progresiva de refrigerantes con alto potencial de calentamiento global (Poscosecha.com, 2025).

b) Emisiones directas: El problema de los refrigerantes

Los sistemas convencionales de compresión de vapor utilizan hidrofluorocarbonos (HFC) como el R-404A o R-134a. Aunque son eficientes desde el punto de vista termodinámico, su Potencial de Calentamiento Global es muy alto en caso de fugas (Yajamín Quisilema, 2023).

Investigaciones recientes indican que las emisiones fugitivas pueden representar hasta el 30% de la huella de carbono de una instalación frigorífica con mantenimiento deficiente (Yajamín Quisilema, 2023).

Tabla 6.1. Comparativa de Impacto Ambiental de Refrigerantes Comunes en Postcosecha

Refrigerante	Tipo	GWP (100 años)	Eficiencia Energética	Nivel de Seguridad
R-404A	HFC (Sintético)	3,922	Media	Alta (No tóxico)
R-134a	HFC (Sintético)	1,430	Media-Alta	Alta (No tóxico)
R-290 (Propano)	HC (Natural)	3	Muy Alta	Baja (Inflamable)
R-717 (Amoníaco)	Inorgánico	0	Excelente	Baja (Tóxico)

R-744 (CO2)	Inorgánico	1	Variable (climas fríos)	Alta (Alta presión)
--------------------	------------	---	----------------------------	------------------------

Nota: Tabla elaborada con datos de Bortolini et al., 2023 y Zhang & Wang, 2025

6.2.1 Factores críticos en el almacenamiento

La temperatura y la humedad relativa son variables clave en la huella ambiental. Estudios sobre productos específicos, como el apio criollo, muestran que las temperaturas elevadas aceleran la pérdida de peso y calidad, lo que indirectamente aumenta el impacto ambiental por kilogramo de producto comercializable (Aguilar et al., 1999). Por ello, el control riguroso de estas variables es una estrategia eficaz para mitigar el impacto ambiental.

a) Eficiencia térmica y diseño de cámaras

La adopción de tecnologías de preenfriamiento es fundamental para eliminar rápidamente el calor en el campo. Estudios sobre el diseño de cámaras de preenfriamiento utilizando dinámica de fluidos computacional (CFD) muestran que una distribución de aire optimizada no solo mejora la conservación del producto, sino que también maximiza el rendimiento térmico de los equipos (Yajamín Quisilema, 2023).

1. Ejemplo: Almacenamiento de Rosas para Exportación con Eficiencia Energética

En la industria florícola, el preenfriamiento representa la fase con mayor consumo energético y carga ambiental inicial. Una investigación

realizada por la Escuela Politécnica Nacional propone el diseño de cuartos de preenfriamiento optimizados mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) para garantizar que el aire frío llegue de manera uniforme a todos los tallos (Yajamín Quisilema,2023).

La aplicación de esta tecnología, junto con el uso de variadores de frecuencia en los ventiladores, permite reducir el consumo eléctrico en un 40%, lo que impacta directamente en el Análisis de Ciclo de Vida al disminuir las emisiones de CO₂ por cada tallo exportado. Además, el control preciso de la temperatura evita la pérdida de peso de la flor, asegurando que la huella ambiental acumulada en el cultivo no se desperdicie debido a un manejo térmico ineficiente (Horticultura, 2022).

Figura 6.1. Almacenamiento de rosas



Fuente: Yajamín Quisilema, (2023)

6.3 Materiales de empaque y economía circular

Los envases alimentarios no solo protegen los alimentos del entorno durante el transporte y almacenamiento, sino que también cumplen funciones de barrera esenciales para conservar los productos que

contienen. Protegen los alimentos de agentes externos (contaminantes físicos, químicos y/o microbiológicos) y previenen la pérdida de componentes propios de los alimentos, como sabores y aromas. Asimismo, en su etiquetado proporcionan información relevante al consumidor, como la fecha preferente de consumo o de caducidad, el aporte nutricional y las indicaciones para la conservación de los alimentos envasados. Los plásticos son, sin duda, los materiales más utilizados para el envasado de alimentos, ya que ofrecen numerosas ventajas, como ligereza, bajo costo y gran versatilidad. Sin embargo, en los últimos años se ha comenzado a cuestionar el uso de envases plásticos para alimentos, debido a que están fabricados a partir del petróleo, un recurso fósil no renovable que eventualmente se agotará y que no se degrada en tiempos breves (Arrieta, 2023).

De hecho, según los datos reportados por Plastic Europe, en 2021 la producción mundial de plásticos derivados directamente del petróleo alcanzó los 352 millones de toneladas, y se obtuvieron alrededor de 32 millones de toneladas de plástico reciclado post-consumo.

El sector del envasado es el mercado con mayor demanda; de hecho, cada año más del 40 % de los plásticos producidos se destinan a este sector. Aunque los plásticos termoplásticos pueden reciclarse mecánicamente y transformarse en nuevos productos mediante los métodos habituales de procesamiento, el sector alimentario es muy estricto en cuanto a la incorporación de plásticos reciclados para el contacto con alimentos, y la legislación se vuelve cada vez más rigurosa (Arrieta, 2023).

6.3.1 La Paradoja del plástico

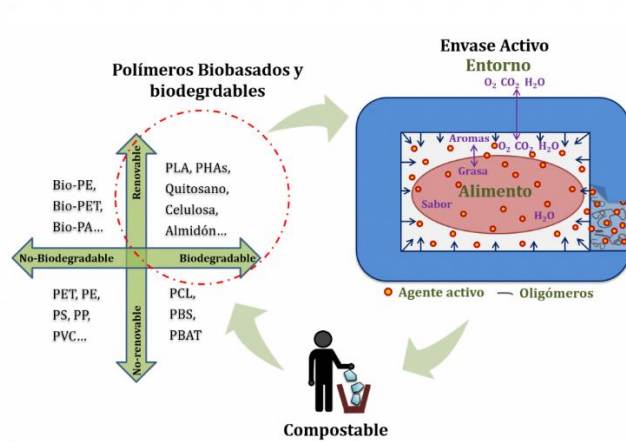
Eliminar el plástico no siempre representa la mejor opción ambiental. Un estudio de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) sobre pepinos demostró que envolverlos en una fina película de polietileno (1.5 g) prolonga su vida útil de 3 a 14 días. El impacto ambiental de fabricar ese plástico es insignificante en comparación con el impacto de cultivar un pepino que termina en la basura por deshidratación (Arrieta, 2023).

6.3.2 Biomateriales vs. reciclaje

La industria se encuentra dividida entre polímeros compostables (PLA, PHA) y plásticos reciclados (rPET).

- PLA (Ácido Poliláctico): Tiene una baja huella de carbono en su producción, pero su ACV aumenta considerablemente en las categorías de "Uso de Suelo" y "Eutrofización" debido a la agricultura necesaria para obtener la materia prima (maíz o caña). Además, si termina en un vertedero convencional, genera metano.
- rPET (PET Reciclado): Parashar et al. (2020) concluyen que, en países con infraestructura de reciclaje avanzada, el rPET es ambientalmente superior a los bioplásticos actuales gracias a la economía de escala y a un sistema de circularidad cerrado.

Figura 6.2. Biomateriales y reciclaje



Fuente: Arrieta, M. (2023)

a) Ejemplo: Implementación de ecodiseño en envases de cuarta gama (Fruta Cortada)

La aplicación del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en el diseño de envases para vegetales mínimamente procesados muestra que el impacto ambiental no depende únicamente del material, sino también de su capacidad para prolongar la vida útil. El uso de películas de atmósfera modificada (MAP) diseñadas bajo criterios de ecodiseño permite reducir el espesor del plástico sin comprometer la barrera contra gases (Ecoembes,2023).

Aunque el plástico es un derivado del petróleo, su uso se justifica en el ACV cuando logra extender la vida útil de 3 a 14 días, evitando que el impacto ambiental asociado al cultivo y procesamiento del vegetal se convierta en desperdicio. Para cerrar el ciclo, la industria está incorporando biopolímeros derivados de la celulosa de subproductos

agroindustriales, como la cáscara de cacao, con el objetivo de que el envase sea compostable y reduzca la huella de carbono en su disposición final (Arrieta,2023).

Figura 6.3. Implementación de ecodiseño de cuarta gama



Fuente: Arrieta,2023

6.4 Gestión de pérdidas y desperdicios de alimentos (PDA)

La gestión de las pérdidas y desperdicios de alimentos (PDA) constituye uno de los retos más complejos dentro del Análisis del Ciclo de Vida, dado que implica una pérdida directa de la eficiencia de todos los recursos previamente invertidos. Sin embargo, la perspectiva moderna de la postcosecha debe ir más allá del residuo orgánico e incluir la gestión integral de todos los materiales sobrantes del proceso industrial.

6.4.1 Impacto de los residuos no orgánicos en la postcosecha:

De acuerdo con la Fundación Global Nature (2021), la gestión de residuos en el sector agrícola y postcosecha se divide principalmente en

residuos peligrosos y no peligrosos. En las plantas de beneficio y empaque, la acumulación de envases de productos fitosanitarios y fertilizantes usados para el tratamiento de la fruta representa un punto crítico de impacto ambiental. Si estos envases no se manejan mediante sistemas de recogida selectiva y triple lavado, las sustancias residuales pueden filtrarse al medio ambiente, alterando los indicadores de ecotoxicidad en el análisis del ciclo de vida (ACV) (Fundación Global Nature, 2021).

6.4.2 El desperdicio como recurso en la economía circular:

Un análisis detallado desde la postcosecha muestra que gran parte de lo que hoy se considera "desperdicio" es, en realidad, materia prima que no se aprovecha completamente. La integración de la jerarquía de gestión de residuos es esencial: primero, la prevención de la pérdida mediante mejores tecnologías de refrigeración; segundo, la reutilización de productos que no cumplen con los estándares estéticos para procesos de transformación (como jugos o harinas); y, finalmente, la valorización energética o el compostaje de los residuos orgánicos inevitables (Fundación Global Nature, 2021). Este enfoque reduce considerablemente la carga ambiental final, ya que evita la emisión de metano en vertederos y reemplaza el uso de fertilizantes sintéticos por abonos orgánicos.

Tabla 6.2. Ejemplo de gestión de pérdidas

Categoría de Residuo	Tipo de Residuo	Ejemplo en la Agroindustria	Gestión Recomendada
-----------------------------	------------------------	------------------------------------	----------------------------

Residuo Orgánico	No Peligroso	Restos de poda, frutos de destrío, cáscaras y hojas.	Compostaje o valorización energética.
Residuos de Envases	No Peligroso	Plásticos (film), cartón, madera de palés y papel.	Reciclaje mecánico (gestión mediante SIG).
Residuo Peligroso	Químico / Fitosanitario	Envases de fungicidas, desinfectantes y herbicidas.	Triple lavado y entrega a centros de acopio autorizados.
Residuos de Mantenimiento	Peligroso	Aceites usados de maquinaria, filtros y baterías.	Almacenamiento estanco y gestor autorizado.
Residuos de Taller	No Peligroso	Chatarra, neumáticos de montacargas.	Entrega a chatarrería o centros de reciclaje.

Fuente: Elaborado por Pozo. A., 2026

6.5 Ejemplo: Exportación de aguacate HASS

Para mostrar la interrelación de los subtemas, se presenta un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de la cadena de suministro del aguacate desde México hasta Europa.

Fases del proceso y sus impactos:

1. Selección y Lavado: Consumo de agua (5 litros/kg) y uso de fungicidas. Impacto: Toxicidad para equinos.
2. Pre-enfriamiento: Consumo de energía eléctrica. Impacto: 0.05 kg de CO2 equivalente por kg de fruta.

3. Empaque: Uso de cajas de cartón corrugado de 4 kg. Impacto: 0.15 kg de CO₂ equivalente por kg.
4. Transporte Marítimo (25 días): Contenedores refrigerados (Reefer). Impacto: 0.35 kg de CO₂ equivalente por kg.

a) Análisis de Mejoras:

1. Mejora en el Consumo Energético y Descarbonización

La fase de preenfriamiento representa el mayor consumo energético inicial, generando 0,05 kg de CO₂ equivalente por kilogramo de fruta. La mejora propuesta consiste en el diseño de cámaras mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) y el uso de variadores de frecuencia, lo que permite una distribución uniforme del aire y reduce el consumo eléctrico en un 40 %. Asimismo, la transición hacia refrigerantes naturales como el R-290 (propano) o el R-717 (amoníaco) elimina el riesgo de emisiones directas con alto potencial de calentamiento global, asociadas a los gases sintéticos tradicionales.

2. Mejoras en Materiales de Empaque y Economía Circular

Aunque el empaque de cartón corrugado genera 0.15 kg de CO₂ eq por kg, la mejora se centra en la implementación de envases activos y películas de atmósfera modificada (MAP). El Análisis de Ciclo de Vida demuestra que el uso de estos materiales se justifica cuando logran extender la vida útil del aguacate, evitando que el impacto ambiental acumulado en el cultivo se pierda debido a la degradación del producto. Para lograr una circularidad total, se propone la integración de biopolímeros derivados de residuos agroindustriales, como la celulosa de la cáscara de cacao, con el fin de asegurar que el envase sea compostable al final de su vida útil.

3. Mejora en la Gestión de Pérdidas y Desperdicios de Alimentos (PDA)

La mayor mejora ambiental se logra mediante el uso de atmósferas controladas durante el transporte marítimo, lo que reduce el rechazo de carga en un 8 % al controlar la tasa respiratoria y el metabolismo del fruto. Desde la perspectiva de la economía circular, los residuos que no cumplen con los estándares de exportación (frutos de destrío) no deben considerarse desperdicio, sino materia prima para procesos de transformación, como la obtención de aceites o harinas. Esta jerarquía de gestión evita la emisión de metano en vertederos y maximiza la eficiencia termodinámica de los recursos hídricos y energéticos ya invertidos en la cadena.

4. Formulas: Optimización de la Huella de Carbono del Aguacate

Una empresa exportadora envía 20,000 kg de aguacate Hass desde México hacia Europa.

- Pre-enfriamiento: $20000 \text{ kg} \times 0.05 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} = 1000 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$
- Empaque (Cartón): $20000 \text{ kg} \times 0.15 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} = 3000 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$
- Transporte Marítimo: $20000 \text{ kg} \times 0.35 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} = 7000 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$

Resultado Total actual: $1000+3000+7000= 11000 \text{ kg de CO}_2 \text{ equivalente}$

1. Ahorro en pre-enfriamiento (Mejora del 40%)

Si antes gastábamos 1000 kg de CO₂ equivalente, se reduce el 40%

- $1000 \text{ kg} \times 0.40 = 400 \text{ kg CO}_2 \text{ equivalente de ahorro}$

- Nuevo impacto de pre-enfriamiento: 600 kg de CO2 equivalente
2. Reducción de perdidas (Atmósfera controlada)

Fruta salvada: El 8% de 20000 kg que antes se pudría o rechazaba ahora llega al cliente

- $20000 \times 0.08 = 1600$ kg de aguacate salvados
- Aunque la atmósfera controlada consume un poco más de energía, el ACV demuestra ser más sostenible. ¿Por qué? Porque producir esos 1,600 kg de aguacate en el campo requiere miles de litros de agua, fertilizantes y meses de trabajo. Si esa fruta se desperdicia, todo ese impacto ambiental se pierde. Es preferible gastar un poco más de energía en el transporte que perder toda la inversión ambiental del cultivo.

Figura 6.4. Aguacates HASS



Fuente: Mejía-Carmona et al., (2023)

6.6 Conclusiones

La investigación confirma que la etapa poscosecha es clave en la huella ecológica de los alimentos. El ACV ha permitido pasar de decisiones

basadas en intuiciones (por ejemplo, "el plástico es malo") a decisiones fundamentadas en evidencia científica (por ejemplo, "el plástico es necesario si evita el desperdicio, pero debe ser circular"). Se concluye que invertir en infraestructura de frío sostenible y tecnologías de conservación es una de las estrategias más costo-efectivas para mitigar el cambio climático en el sector agroalimentario.

Capítulo VII

7. Sistemas de cosecha, recolección, manipulación y diseño de envases basado en resistencia mecánica

7.1 Sistema de cosecha

La cosecha es la separación de la planta madre de la parte comercialmente importante de la planta, que pueden ser frutos como tomates, pimientos, manzanas, kiwis, etc.; hortalizas como rábanos, zanahorias y otras; hojas como espinacas y rábanos; cebollas, como cebollas o ajos; tubérculos como patatas; tallos como espárragos; tallos como el apio; flores como el brócoli, la coliflor (FAO, 2003).

La recolección es el final del periodo de crecimiento y el inicio de la preparación o acondicionamiento para el mercado (Blueberries Magazine, 2018). Existen dos sistemas de recolección: manual y mecanizado, aunque algunos cultivos utilizan una combinación de ambos, como cebolla, papa, zanahoria y otros, en los que la remoción de tierra para la recolección manual se realiza por medios mecánicos. La elección de un sistema particular depende principalmente del cultivo, el destino y especialmente del tamaño de la cosecha (Chilean, 2020). La recolección manual es el sistema predominante para recolectar frutas y hortalizas para consumo fresco, mientras que la recolección mecánica se prefiere para las hortalizas con fines industriales y algunas otras hortalizas que se cultivan habitualmente en grandes superficies (FAO, 2003).

Figura 7.1. Recolección de productos como por ejemplo maíz



7.1.1 Métodos de sistemas de cosecha

Los métodos de cosecha se definen como el conjunto de técnicas y procedimientos utilizados para recolectar los productos agrícolas una vez que han alcanzado su madurez fisiológica o comercial. Estos métodos varían según el tipo de cultivo, el destino del producto, el nivel tecnológico disponible y las condiciones socioeconómicas del productor. En términos generales, los sistemas de cosecha se clasifican en manuales, mecanizados y semimecanizados, cada uno con características particulares que responden a distintas realidades productivas (Morales, 2017).

El sistema de cosecha manual es el método más tradicional y aun ampliamente utilizado, especialmente en países en desarrollo y en cultivos que requieren un manejo cuidadoso, como frutas, hortalizas y algunos granos. Este sistema se basa en la intervención directa del ser humano, utilizando herramientas simples o, en algunos casos, únicamente las manos. Su principal ventaja radica en la posibilidad de seleccionar el producto, evitar daños mecánicos y adaptarse a terrenos irregulares. Sin embargo, también presenta desventajas importantes,

como el alto costo de mano de obra, la menor velocidad de recolección y la dependencia de la disponibilidad de trabajadores, lo que puede limitar su eficiencia a gran escala. (Morales, 2017).

Por otro lado, el sistema de cosecha mecanizado se caracteriza por el uso de maquinaria especializada que permite recolectar grandes volúmenes de producción en menor tiempo. Este método es común en cultivos extensivos como arroz, maíz, trigo y caña de azúcar. La mecanización contribuye a reducir costos operativos a largo plazo, aumentar la productividad y disminuir las pérdidas por retrasos en la cosecha. No obstante, su implementación requiere una elevada inversión inicial, capacitación técnica y condiciones adecuadas del terreno, además de que puede ocasionar daños al producto si no se maneja correctamente. (Morales, 2017).

Figura 7.2. Sistemas de sembríos para una cosecha rápida



7.1.2 Manipulación durante la cosecha

Según la FAO (2003), la recolección incluye una serie de operaciones más allá de la simple separación de la planta madre de sus órganos comercialmente importantes, como la selección o preparaciones

preliminares como recorte de hojas, eliminación de partes no comestibles, etc., realizadas en el mismo lugar y para facilitar la posterior preparación para la venta. En algunos casos, el producto está completamente listo para la venta en el campo, aunque los contenedores postcosecha a menudo se vacían en contenedores más grandes para transferirlos a la empacadora para descargar la carga seca o húmeda en la línea de clasificación (Morales, 2017). Es durante esta serie de pasos que se deben realizar cuando ocurre la mayor parte del daño que se acumula y afecta la calidad del producto. Las lesiones se dividen en diferentes tipos: por un lado, son heridas, cortes o laceraciones en las que se daña la integridad del tejido debido a un corte o punción (Intagri, 2020).

Figura 7.3. Manipulación del producto en la cosecha



Como señala Infoberry (2007), estas heridas son puntos de entrada de hongos y bacterias que causan caries. Hay tres causas principales de lesión:

Impacto: bolas individuales que golpean superficies duras o después del embalaje, así como bolas que golpean entre sí. Este tipo de lesiones son muy comunes durante la cosecha y el empaque.

Compresión: causada por deformación bajo presión o aplastamiento. Un fenómeno común cuando se almacena o transporta en grandes cantidades y debido al peso que ejerce la masa transportada en las capas inferiores.

Abrasión: se produce cuando las frutas rozan entre sí o contra las paredes del recipiente.

Esto es muy importante en el caso de productos destinados a pieles muy delicadas, por ejemplo: las peras. Este tipo de lesión se limita casi exclusivamente al caparazón o la piel. En el caso de la cebolla o el ajo, esto se manifiesta por la pérdida de agentes protectores (Figura 7.4).

Figura 7.4. Daño por impacto en pera



7.1.3 Fórmula para estimar el rendimiento del producto

Rendimiento **estimado**=*Número de plantas * frutos * peso promedio del grano*

7.2 Sistema de recolección en la cosecha

La cosecha es la acción de separar la parte comercialmente valiosa de la planta madre, marcando el fin de la producción y el inicio del acondicionamiento para el mercado. Este proceso se realiza mediante sistemas manuales o mecánicos, cuya elección depende del tipo de cultivo, su destino y la extensión del predio. La recolección mecánica destaca por su rapidez y bajo costo operativo en grandes superficies, aunque es un método agresivo que requiere maduración uniforme, infraestructura adaptada y una fuerte inversión económica que debe ser analizada debido a la ociosidad del equipo durante gran parte del año. Singh, S. P. (2024).

Por el contrario, la cosecha manual es la preferida para el consumo fresco, pues no exige inversiones tecnológicas iniciales y aprovecha la capacidad humana para seleccionar frutos en su punto exacto de madurez. Su mayor virtud es la delicadeza en el trato, lo que garantiza una calidad superior en productos sensibles Singh, S. P. (2024).

No obstante, para que la labor manual sea efectiva, es imprescindible una supervisión estricta y un entrenamiento adecuado del personal. El tipo de contratación influye directamente en el resultado final: mientras que el pago por tiempo fomenta un trabajo cuidadoso, el pago por volumen suele derivar en un manipuleo rudo que daña el producto. Además, factores como la fatiga por jornadas extensas o condiciones climáticas extremas pueden comprometer la integridad de la cosecha.

En conclusión, el éxito de la recolección depende de equilibrar la eficiencia del sistema elegido con un manejo cuidadoso que preserve el valor comercial de la producción Singh, S. P. (2024).

Figura 7.5. Sistema de recolección para clasificar el producto



7.2.1 Madures y recolección del producto

La determinación del éxito en la recolección depende de identificar correctamente la madurez fisiológica, que ocurre cuando el fruto completa su desarrollo biológico y sus semillas están listas, frente a la madurez comercial, la cual se define exclusivamente por las exigencias del mercado y puede presentarse incluso en estados inmaduros como sucede con los pepinos o los vegetales. Un factor determinante en esta etapa es la distinción entre frutos climatéricos, que como el tomate o el durazno poseen la capacidad de seguir madurando después de ser separados de la planta gracias a la producción de etileno y un pico respiratorio, y los no climatéricos, como los cítricos y pimientos, que requieren obligatoriamente alcanzar su madurez total en la planta ya que

su sabor y color no evolucionarán positivamente tras la cosecha. (Sharma, Y, 2022).

El indicador visual más confiable para los operarios es la transición cromática producida por la degradación de la clorofila y la síntesis de nuevos pigmentos, permitiendo que en frutos climatéricos se adelante la cosecha para envíos a mercados distantes asegurando una mayor firmeza durante el trayecto mientras que los frutos sobre maduros, aunque pierden valor para el consumo en fresco por su ablandamiento, encuentran un mercado secundario ideal en la industria de salsas y dulces. Como aporte adicional es fundamental considerar que una vez recolectados los frutos climatéricos se vuelven extremadamente sensibles a la presencia de etileno ambiental y a las variaciones de temperatura por lo que el uso de absorbedores de este gas y una cadena de frío estricta son herramientas indispensables para ralentizar el metabolismo y extender la vida útil del producto evitando que el proceso de maduración natural se convierta en una degradación acelerada antes de llegar al punto de venta (Sharma, Y, 2022).

Figura 7.6. Calidad organoléptica de un fruto en función de su madurez

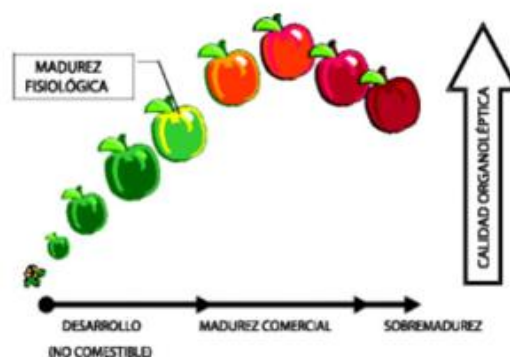


Figura 7.8. Grados de madurez en pimiento, por no ser climatéricos



7.2.2 Manipulación durante la cosecha

La manipulación durante la cosecha va más allá de la simple recolección ya que incluye tareas esenciales como la preselección y el recorte de partes no comestibles en el propio campo con el fin de agilizar la comercialización posterior (AGROCALIDAD, 2020).

Durante este flujo de trabajo que incluye el traslado desde recipientes pequeños a contenedores de mayor volumen y su paso por las líneas de clasificación es donde se origina la mayor acumulación de daños físicos que deterioran irreversiblemente la calidad final del producto. Entre los perjuicios más comunes se encuentran las heridas y cortes provocados por herramientas mal afiladas, uñas de los operarios o incluso por el roce con los pedúnculos de otros frutos lo que crea vías de entrada críticas para hongos y bacterias que causan pudriciones (De madurez adecuada et al., 2023).

Por otro lado, se destacan los golpes y machucones que, aunque resultan menos evidentes en el momento de la recolección representan una

amenaza mayor ya que sus síntomas suelen manifestarse tardíamente cuando el alimento ya está en manos del consumidor. Es vital comprender que cada etapa de este manejo físico impacta directamente en la rentabilidad por lo que minimizar los movimientos innecesarios y controlar la agresividad del equipo humano y mecánico es determinante para asegurar que el producto llegue en condiciones óptimas a su destino final evitando pérdidas económicas por descarte o rechazo del mercado. FAO (2023–2024).

Figura 7.9. Recolección y manipulación del producto



7.2.3 Curado o conservación del producto

El curado es una técnica complementaria a la cosecha que resulta vital para extender la vida útil y proteger la sanidad del producto mediante una pérdida rápida de humedad en la superficie que genera barreras protectoras contra la desecación y los patógenos. En cultivos como el ajo y la cebolla este proceso permite el secado de las capas externas y el cierre del cuello del bulbo mientras que en tubérculos y raíces como la papa o la batata favorece el endurecimiento de la cáscara y la

cicatrización de heridas evitando peladuras durante el transporte (García, M., 2014).

Aunque se realiza habitualmente en el campo mediante el acordonado o el reposo en el suelo tras eliminar el follaje también puede ejecutarse de forma artificial en almacenes adaptados con aire caliente y húmedo para garantizar condiciones óptimas antes de iniciar el almacenamiento prolongado. Como valor agregado este procedimiento no solo mejora la apariencia visual del producto para el mercado, sino que reduce drásticamente las tasas de respiración inicial y previene la invasión de microorganismos que suelen aprovechar las lesiones de la cosecha para pudrir el alimento asegurando así que el agricultor mantenga la calidad de su inversión por mucho más tiempo. (Morales, 2017).

Figura 7.10. Curado de las frutas



7.2.4 Almacenamiento y distribución

El almacenamiento posterior al curado tiene como objetivo principal mantener la calidad lograda en el campo mediante el control estricto de

la temperatura y la humedad para reducir la respiración del producto y evitar su deterioro biológico. En esta etapa es fundamental que los bulbos, raíces y tubérculos ya curados se mantengan en espacios con una ventilación adecuada que impida la acumulación de dióxido de carbono y calor metabólico, asegurando que las barreras protectoras formadas durante la cicatrización permanezcan intactas y libres de condensación que podría reactivar el crecimiento de hongos (Sistemas De Cosecha, 2024).

Por otro lado, la distribución y transporte representan la fase de mayor riesgo físico donde el producto debe enfrentar vibraciones, cambios bruscos de clima y manipuleo constante hacia los centros de consumo. Un transporte eficiente debe contar con sistemas de amortiguación y estiba que aprovechen la resistencia ganada en el curado, utilizando embalajes que permitan el flujo de aire y vehículos climatizados que preserven la cadena de frío establecida en el almacén. El éxito final depende de que la logística de distribución minimice los tiempos de traslado y las escalas innecesarias, garantizando que la protección obtenida mediante el endurecimiento de los tejidos y el reposo controlado se traduzca en un producto que llegue al consumidor final con la máxima firmeza, fresca y valor comercial (Morales, 2017).

Figura 7.11. Transporte y clasificación de los productos



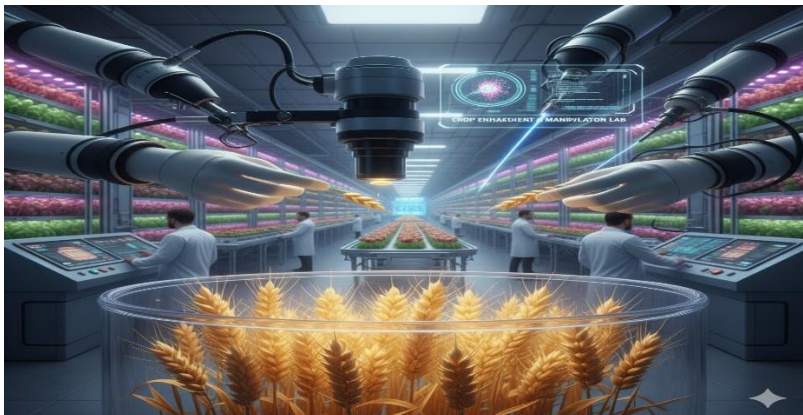
a) **Fórmula de capacidad de recolección**

$$\text{Capacidad} = \frac{\text{Producción total recolectada}}{\text{Tiempo total de trabajo} * \text{cantidad de recolectores}}$$

7.3 Manipulación en la cosecha

La correcta manipulación durante la cosecha permite reducir daños mecánicos, minimizar la contaminación y preservar la calidad del producto desde el campo hasta su destino final. golpes, cortes, magulladuras o compresiones excesivas pueden acelerar procesos de deterioro como la respiración, la deshidratación y el ataque de microorganismos. En productos frescos, especialmente frutas y hortalizas, estos daños suelen ser irreversibles y se manifiestan rápidamente en forma de pudriciones o pérdida de firmeza. Por esta razón, la manipulación adecuada no solo protege el producto, sino que también garantiza la inocuidad alimentaria y mejora la competitividad en los mercados FAO (2023–2024).

Figura 7.12. Imagen sobre la manipulación del producto en la actualidad



7.3.1 Momento adecuado de cosecha y su relación con la manipulación

El grado de madurez en el momento de la cosecha influye directamente en la resistencia del producto a la manipulación. Los productos cosechados inmaduros pueden presentar menor calidad sensorial, mientras que los sobre maduros suelen ser más frágiles y susceptibles a daños físicos. Una manipulación cuidadosa debe ir acompañada de una correcta determinación del momento de cosecha, considerando parámetros como color, tamaño, firmeza y contenido de sólidos solubles. De esta forma, se facilita un manejo más seguro y se prolonga la vida postcosecha FAO (2023–2024).

7.3.2 Técnicas de manipulación manual

En muchos sistemas agrícolas, especialmente en pequeñas y medianas explotaciones, la cosecha se realiza de forma manual. En estos casos, la capacitación del personal resulta fundamental. El uso adecuado de las manos, evitando presionar excesivamente el producto, así como la correcta utilización de herramientas como tijeras o cuchillos, contribuye

a disminuir lesiones. Además, es importante evitar lanzar o arrastrar los productos sobre el suelo, ya que estas prácticas incrementan el riesgo de daños mecánicos y contaminación. La manipulación manual cuidadosa permite mantener la integridad del producto y conservar su valor comercial FAO (2023–2024).

7.3.3 Manipulación mecanizada en la cosecha

La mecanización de la cosecha ha permitido aumentar la eficiencia y reducir costos de producción; sin embargo, también implica riesgos si no se ajusta correctamente a las características del cultivo. Las máquinas cosechadoras deben estar calibradas para minimizar impactos, vibraciones y presiones excesivas. Una manipulación mecanizada mal diseñada puede provocar daños severos, especialmente en productos delicados. Por ello, es esencial seleccionar tecnologías adecuadas y realizar mantenimientos periódicos que aseguren un manejo suave y eficiente (García 2023).

7.3.4 Higiene y sanidad durante la manipulación

La manipulación en la cosecha no solo debe enfocarse en el aspecto físico, sino también en la higiene. El contacto del producto con manos sucias, herramientas contaminadas o superficies inadecuadas puede introducir microorganismos patógenos. La aplicación de buenas prácticas agrícolas, como el lavado de manos, el uso de equipos limpios y la eliminación de productos dañados, reduce significativamente los riesgos sanitarios. Mantener condiciones higiénicas durante la cosecha es clave para garantizar la inocuidad y proteger la salud del consumidor (García 2023).

7.3.5 Condiciones ambientales y su influencia

Las condiciones ambientales durante la cosecha influyen notablemente en la manipulación del producto. Altas temperaturas, exposición directa al sol o lluvias pueden acelerar el deterioro. Por ello, se recomienda realizar la cosecha en horas frescas del día y proteger los productos recolectados del calor excesivo. Una manipulación adecuada incluye el traslado rápido a zonas sombreadas y ventiladas, lo que contribuye a mantener la calidad y reducir pérdidas (García 2023).

7.3.6 Capacitación del personal y conciencia del manejo

El factor humano es uno de los elementos más importantes en la manipulación durante la cosecha. La capacitación continua del personal permite crear conciencia sobre la importancia de un manejo cuidadoso y responsable. Trabajadores bien entrenados comprenden que cada acción durante la cosecha impacta directamente en la calidad del producto final. Invertir en formación no solo mejora los resultados productivos, sino que también fortalece la sostenibilidad del sistema agrícola (García 2023).

a) Fórmula del índice de daño

$$\text{IDM} = \left(\frac{\text{Peso de frutos dañados}}{\text{Peso total de la muestra}} \right) * 100$$

7.4 Diseño de envases basado en resistencia mecánica

En la agroindustria moderna, el envase cumple una función esencial que va más allá de la simple contención del producto. Su diseño influye directamente en la protección, conservación, transporte,

comercialización y aceptación del producto en el mercado. Dentro de este contexto, el diseño de envases basado en la resistencia mecánica adquiere una relevancia estratégica, especialmente para productos agrícolas y agroindustriales que son susceptibles a daños físicos durante la cosecha, postcosecha, almacenamiento y distribución. La resistencia mecánica del envase permite minimizar pérdidas, preservar la calidad del producto y garantizar su integridad hasta el consumidor final. Este ensayo analiza los principios, factores, materiales y aplicaciones del diseño de envases considerando la resistencia mecánica como eje fundamental.

El envase puede definirse como el sistema destinado a contener, proteger, conservar y facilitar el manejo de un producto desde su origen hasta su consumo. En la agroindustria, los envases deben adaptarse a productos con características físicas y biológicas variables, como frutas, hortalizas, granos, lácteos y productos procesados. Una de las principales funciones del envase es proteger al producto frente a fuerzas externas como golpes, vibraciones, compresión y apilamiento, las cuales pueden provocar daños mecánicos irreversibles (Robertson, 2021). La resistencia mecánica del envase se convierte así en un criterio de diseño prioritario, ya que permite soportar las condiciones reales de manipulación y transporte, reduciendo pérdidas económicas y desperdicio de alimentos.

7.4.1 Fundamentos técnicos de la resistencia mecánica de envases

La resistencia mecánica de un envase se define como su capacidad para **soportar cargas, impactos y deformaciones sin fallar**

estructuralmente ni comprometer el producto contenido. Desde el punto de vista de la ingeniería, esta resistencia depende de tres factores principales: el **material**, la **geometría estructural** y las **condiciones de carga** a las que será sometido el envase (Singh & Wang, 2020).

En la agroindustria, los envases deben diseñarse considerando que el producto atraviesa múltiples etapas: cosecha, transporte primario, almacenamiento, transporte secundario y comercialización. Cada una de estas fases impone esfuerzos mecánicos distintos, por lo que el diseño debe responder a un enfoque integral y no aislado.

7.4.2 Sistema de diseño de envases basado en resistencia mecánica

El sistema de diseño de envases basado en resistencia mecánica es un enfoque técnico aplicado en la agroindustria que tiene como finalidad desarrollar envases capaces de soportar las fuerzas físicas generadas durante la manipulación, el transporte y el almacenamiento de productos agrícolas, asegurando la protección de su integridad física y calidad comercial, este sistema se fundamenta en el análisis de cargas reales como compresión impacto y vibración integrando principios de ingeniería de materiales y diseño estructural para adaptar el envase a las condiciones operativas de la cadena agroindustrial, especialmente en productos de alta fragilidad donde los daños mecánicos representan una de las principales causas de pérdidas postcosecha (Singh & Wang, 2020; Robertson, 2021)

7.4.3 Importancia del diseño de envases basado en resistencia mecánica

La importancia del diseño de envases basado en resistencia mecánica radica en su contribución directa a la reducción de pérdidas postcosecha y al mantenimiento de la calidad de los productos agroindustriales ya que un envase diseñado sin considerar criterios mecánicos adecuados puede provocar daños invisibles que aceleran el deterioro del producto y disminuyen su valor comercial mientras que un diseño estructuralmente resistente permite cumplir con los estándares de calidad exigidos por los mercados actuales y garantiza la seguridad durante la distribución y comercialización (Robertson, 2021).

7.5 Beneficios en la agroindustria

Los beneficios del diseño de envases con resistencia mecánica en la agroindustria se reflejan en la disminución de daños físicos durante la cadena logística la reducción de costos asociados a pérdidas y devoluciones la mejora de la presentación del producto y el incremento de su vida útil además este tipo de diseño permite optimizar el apilamiento y el transporte seguro de los productos favoreciendo una mayor eficiencia operativa y competitividad comercial tanto en mercados locales como internacionales (Marsh & Bugusu, 2022; Singh & Wang, 2020).

7.5.1 Impacto en la actualidad

En la actualidad el diseño de envases basado en resistencia mecánica ha adquirido un impacto significativo en la agroindustria moderna debido a la incorporación de tecnologías como la simulación computacional y los ensayos mecánicos normalizados lo que ha permitido desarrollar envases más ligeros pero con mayor capacidad estructural capaces de

soportar condiciones exigentes de transporte y almacenamiento este avance ha contribuido a la reducción del desperdicio de alimentos y al fortalecimiento de la seguridad alimentaria a nivel global (Yam, 2022).

7.5.2 Reducción de pérdidas en la postcosecha

La relación entre la resistencia mecánica del envase y la reducción de pérdidas postcosecha es directa ya que un envase diseñado correctamente protege al producto de daños físicos que aceleran su deterioro fisiológico y microbiológico permitiendo mantener su calidad por más tiempo y reducir significativamente el porcentaje de productos descartados durante el almacenamiento y la comercialización especialmente en frutas y hortalizas frescas donde los daños mecánicos constituyen la principal causa de pérdidas económicas (FAO, 2024).

Figura 7.13. Imagen del desarrollo de la postcosecha



a) Fórmula de carga sobre la Base

Cargas sobre la base= $(N-1) * \text{Peso de la caja}$

Capítulo VII

8. Diseño de experimentos aplicados a poscosecha

8.1 Definiciones Conceptuales

8.1.1 Post Cosecha

La post cosecha es el conjunto de técnicas y cuidados utilizados para preservar y manejar los productos agrícolas después de su cosecha, con el fin de mantener su calidad y prolongar su vida útil. Tiene un papel fundamental en la garantía de la seguridad alimentaria al reducir las pérdidas y desperdicios de alimentos (CIMMYT, 2024).

La implementación de prácticas adecuadas de poscosecha puede ayudar a los agricultores a obtener mejores precios por sus productos al mantener su calidad y prolongar su vida útil. Esto a su vez puede mejorar los ingresos de los agricultores y fortalecer la economía local y nacional (CIMMYT, 2024).

Figura 8.1. Poscosecha



La post cosecha juega un papel esencial en la preservación de la calidad de los alimentos y en la minimización de estas pérdidas. Una adecuada post cosecha permite prolongar la vida útil de los alimentos, lo que significa que pueden ser almacenados por más tiempo sin perder sus características nutricionales y organolépticas (Barcelona Culinary Hub, 2024).

Las etapas de tratamiento post cosecha son las siguientes:

a) Enfriamiento

El enfriamiento rápido de los productos agrícolas después de la cosecha es esencial para mantener su calidad (Barcelona Culinary Hub, 2024).

Figura 8.2. Enfriamiento



b) Limpieza

Durante esta etapa, se eliminan los residuos y la suciedad de los alimentos, lo cual es especialmente importante en el caso de frutas y hortalizas (Barcelona Culinary Hub, 2024).

Figura 8.3. Limpieza



c) **Empaquetado**

El empaquetado adecuado protege los alimentos durante su transporte y almacenamiento. Los materiales de embalaje deben ser seleccionados cuidadosamente para garantizar la integridad de los productos y prevenir posibles daños mecánicos (Barcelona Culinary Hub, 2024).

Figura 8.4. Empaquetado



d) **Almacenamiento**

Durante esta etapa, los alimentos son almacenados en condiciones óptimas para preservar su calidad (Barcelona Culinary Hub, 2024).

Figura 8.5. Almacenamiento



8.2 Diseño de experimentos

Es una estrategia y metodología que se desarrolla en un experimento para la identificación de los factores que afectan a una variable respuesta, su control o manejo, el modo de ejecución concreto del experimento, la posterior recogida de datos y el análisis estadístico a llevar a cabo con esos datos para llegar a las conclusiones pertinentes en relación a la hipótesis planteada. Implica decisiones y actuaciones en relación con el experimento como la aleatorización, la introducción de factores bloque, la factorización, la decisión del tamaño muestral, la replicación o no de experimentos y la consideración de la interacción entre factores (Sarasola, Josemari, 2024).

Figura 8.6. Diseño de experimentos



Las ventajas principales del diseño experimental incluyen establecer relaciones claras de causa y efecto, obtener información confiable y precisa al controlar variables, permitir la replicación de resultados, aumentar la validez interna y facilitar la toma de decisiones basadas en datos sólidos, aplicable en campos como la ciencia, educación y negocios (Notagud, M. 2025).

La herramienta de calidad de Diseño de Experimentos DOE encuentra una ecuación o modelo matemático que ayudara a encontrar la mejor condición operacional del proceso evitando así caer en excesos de desperdicios al experimentar con diferentes variables y la relación entre las variables del proceso (Marmolejo, J. 2020).

Los pasos para desarrollar un diseño de experimentos es el siguiente:

a) Planificar el proceso del DOE

Antes de recolectar datos, deberá de definir los objetivos del experimento DOE que desea realizar, recuerde que los recursos son limitados y es importante contar con la mayor cantidad de información posible (Marmolejo, J. 2020).

b) Identificar el tipo de DOE a utilizar

Elegir el tipo de DOE a utilizar y numero de tratamientos o pruebas a realizar, recuerde hacer uso de todas las posibles fuentes de variación (Marmolejo, J. 2020).

c) Definir la respuesta (Y) DOE

Es necesario determinar la variable de respuesta (Y) para el proceso determinado. Ejemplo, elegir una respuesta con un valor mínimo y un máximo (Marmolejo, J. 2020).

d) Establecer un presupuesto y un plan de experimentación para DOE

Planificar un presupuesto de pruebas, se debe considerar hacer un numero de pruebas de experimentación al inicio del estudio, para comprobar el análisis (Marmolejo, J. 2020).

Un diseño experimental DOE debe incluir varios elementos clave para asegurar que los resultados sean válidos y confiables. Los principales componentes que debe incluir un diseno experimental DOE son:

- **Objetivo claro:** Un DOE debe definir la variable de respuesta o resultado que se va a medir y como se evaluara (Marmolejo, J. 2020).
- **Selección de factores:** Un DOE debe identificar los factores que se cree que afectan la variable de respuesta (Marmolejo, J. 2020).
- **Niveles de los factores:** DOE debe determinar los diferentes niveles en los que se va a manipular cada factor. Un factor puede tener dos o más niveles que representen diferentes configuraciones o condiciones (Marmolejo, J. 2020).
- **Control de variables confusas:** Con DOE se debe identificar y controlar cualquier variable adicional que pueda afectar la variable

de respuesta pero que no esté siendo estudiada como factor en el experimento (Marmolejo, J. 2020).

- **Diseño del experimento:** Con DOE se debe definir el tipo de diseño experimental que se utilizara, en función del objetivo y los recursos disponibles (Marmolejo, J. 2020).
- **Numero de tratamientos o replicas:** En DOE se determinan cuantas veces se repetirá cada combinación de niveles de los factores para obtener una respuesta precisa del efecto (Marmolejo, J. 2020).
- **Análisis estadístico:** En DOE se planifica como se analizarán los datos recopilados para evaluar la significancia de los factores y su interacción (Marmolejo, J. 2020).

Ejemplo: Un productor de mango de exportación desea mejorar la vida útil y la firmeza del fruto durante el almacenamiento postcosecha. Para ello, decide realizar un experimento de Diseño de Experimentos (DOE) con el fin de evaluar dos factores que influyen en la calidad del mango después de la cosecha. El objetivo es determinar la combinación óptima de estos factores que permita conservar mejor la firmeza del fruto y retrasar su maduración (Pérez, L. 2021).

Factores:

- Temperatura de almacenamiento
- Concentración de recubrimiento comestible

Niveles:

- Para la temperatura de almacenamiento se consideran 2 niveles:
 1. Alta = 15 °C
 2. Baja = 8 °C
- Para la concentración del recubrimiento comestible también se consideran 2 niveles:
 1. Alta = 2 %
 2. Baja = 1 %

Tratamientos:

Se realizan cuatro tratamientos, correspondientes a cada combinación de los niveles de los factores:

1. Alta temperatura y concentración de recubrimiento
2. Alta temperatura y baja concentración de recubrimiento
3. Baja temperatura y alta concentración de recubrimiento
4. Baja temperatura y concentración de recubrimiento

Interacción:

Se evaluará si existe una interacción significativa entre la temperatura de almacenamiento y la concentración del recubrimiento comestible, es decir, si el efecto de la temperatura sobre la firmeza del mango depende de la concentración del recubrimiento aplicado.

Significancia del factor:

Se aplicará un análisis estadístico (ANOVA) para determinar si la temperatura de almacenamiento y la concentración del recubrimiento comestible influyen significativamente en la firmeza y vida útil del mango durante el periodo de postcosecha.

8.2.1 Fundamentos del diseño de experimentos

El diseño experimental representa una fase esencial en el desarrollo de cualquier estudio, encontrando aplicaciones en campos tan diversos como la industria, la agricultura, la medicina y la ecología. El propósito del diseño es proporcionar al investigador una base metodológica sólida para la planificación, ejecución y análisis de investigaciones, lo cual hace posible que los profesionales sean capaces de generar conocimiento y tecnología de manera eficiente y confiable (Villarruel-Fuentes et al., 2024).

Este proceso se enmarca en el método científico, siguiendo un flujo lógico desde la observación hacia la validación de hipótesis, se apoya en 2 tipos de razonamientos:

- **Razonamiento inductivo:** Proceso que llega a un principio general a partir de una conclusión particular. Los experimentos son dirigidos para suministrar hechos específicos que permitan establecer principios generales (Villarruel-Fuentes et al., 2024).
- **Razonamiento deductivo:** Es un proceso que va desde un principio general para llegar a una conclusión específica (Villarruel-Fuentes et al., 2024).

La estadística ofrece herramientas fundamentales para estimar de manera imparcial los efectos de los tratamientos y evaluar sus diferencias mediante pruebas de significación basadas en mediciones de dicha variabilidad, todo diseño experimental se fundamenta en tres principios básicos que permiten evaluar la validez y fiabilidad de sus resultados:

- **Repetición:** Permite replicar los tratamientos varias veces en el experimento. Es decir, a mayor número de repeticiones, menor será el error experimental, aumentando la precisión de las estimaciones. Para diseños simples es recomendable la aplicación de 4 a 5 repeticiones (Villarruel-Fuentes et al., 2024).
- **Selección aleatoria (aleatorización):** Es un procedimiento o conjunto de reglas utilizadas para asignar los tratamientos a las unidades experimentales de manera aleatoria y sin restricciones. Este método garantiza que cada unidad experimental tenga la misma probabilidad de recibir cualquier tratamiento, evitando sesgos por parte del investigador (Villarruel-Fuentes et al., 2024).
- **Control local:** Hace referencia a técnicas usadas para la reducción del error experimental, como el agrupamiento de unidades experimentales en bloques homogéneos. Permitiendo que las comparaciones entre tratamientos se realicen en condiciones más uniformes, aumentando la precisión del experimento (Villarruel-Fuentes et al., 2024).

8.2.2 Procedimiento para la experimentación

La dirección que tendrá un experimento sigue un procedimiento estructurado que se divide en 3 fases principales (Villarruel-Fuentes et al., 2024).

a) Fase 1: Planificación

Etapa crítica donde se definirán las bases de la investigación.

- **Definir el problema:** Identificar con claridad la magnitud del problema a investigar. Un análisis inadecuado puede llevar a resultados de limitada trascendencia. En postcosecha un problema común suele ser la baja productividad (de Mendiburu, 2007).
 - **Establecer objetivos:** Se debe establecer un objetivo general y varios específicos. Los objetivos específicos deben estar formulados en función a las variables dependientes e independientes de la investigación (de Mendiburu, 2007).
 - **Determinar variables a medir:** Establecer las variables de respuesta y las estrategias de medición para garantizar la confiabilidad de los datos. El uso de instrumentos apropiados es fundamental (de Mendiburu, 2007).
 - **Seleccionar material experimental:** Dentro del material podemos encontrar semillas, animales, etc. El material debe ser seleccionado cuidadosamente para asegurar la calidad de los resultados (de Mendiburu, 2007).
- b) Fase 2: Ejecución**
- **Control de efectos de borde:** Tomando como ejemplo investigaciones agrícolas, las plantas en los bordes de la parcela pueden tener ventajas o desventajas. Es por ello por lo que es más seguro tomar datos de las plantas centrales para evitar sesgar los resultados (de Mendiburu, 2007).
 - **Muestreo:** Esta herramienta es utilizada cuando las unidades experimentales son muy elevadas. Se debe definir el tamaño de la muestra y el tipo de muestreo (probabilístico o no probabilístico). Los muestreos aleatorios son recomendados para la elaboración de investigaciones científicas (de Mendiburu, 2007).

- **Recolección de datos:** Es uno de los aspectos más importantes. Se debe usar equipos y herramientas que garanticen la credibilidad de los datos tomados para permitir un análisis fiable (de Mendiburu, 2007).
- c) **Fase 3: Resultados y conclusiones**
- **Análisis de datos:** Este proceso puede ser realizado de forma manual, con el uso de hojas de cálculo (Excel) o con software especializado. El análisis permite tomar decisiones sobre los tratamientos investigados (Mendiburu, 2007).
 - **Interpretación de resultados:** Mediante este procedimiento se confirma o rechaza la hipótesis propuesta, se evalúa la significancia de los tratamientos y se determina el error experimental (de Mendiburu, 2007).
 - **Elaboración de conclusiones:** Deben estar estrechamente relacionadas con los objetivos planteados, resumir los resultados alcanzados y su aporte a la ciencia (de Mendiburu, 2007).
 - **Difusión:** La redacción técnica de los resultados y publicación en revistas científicas nacionales e internacionales es el acto culminante, que contribuirá al conocimiento global (de Mendiburu, 2007).

8.2.3 Componentes clave de un experimento

El diseño experimental enfocado en la postcosecha está conformado por elementos que permiten el control y la medición precisa de los cambios en el producto (Gabriel Ortega et al., 2022).

a) **La unidad experimental (UE)**

Se define como un sitio o material físico al que se aplica un tratamiento específico. En postcosecha, la unidad experimental puede ser un fruto individual, una caja de productos o inclusive un lote dentro de una cámara frigorífica. Se recomienda que estas unidades sean lo más homogéneas posible para reducir el error no deseado (Ortega et al., 2022).

b) Factores y tratamientos

- **Factor:** Es una variable independiente la cual se desea estudiar. En postcosecha encontramos ejemplos comunes como la temperatura de almacenamiento, el tipo de empaque o la concentración de un gas (como el etileno) (Gabriel Ortega et al., 2022).
- **Tratamiento:** Son los niveles o estímulos específicos del factor que se asignan a las unidades experimentales. Para que un experimento sea efectivo, por ello resulta más efectivo maximizar las diferencias significativas (Ortega et al., 2022).

c) Variables de respuesta

Son indicadores cuantificables que reflejan el efecto de los tratamientos. En postcosecha, se suelen medir variables como la pérdida de peso, el contenido de azúcares (grados Brix), la firmeza del tejido o la tasa de respiración (Ortega et al., 2022).

d) El error experimental y su control

El error experimental representa las variaciones que no pueden ser explicadas por los tratamientos. En investigaciones de postcosecha, el error puede originarse de la variabilidad individual de cada fruto o

contratiempos en equipos de medición (termómetros mal calibrados, instrumentos dañados, etc.) (Ortega et al., 2022).

- **Principio MAXMICON:** Dentro de este principio el investigador debe buscar maximizar la varianza de los tratamientos, minimizando el error por instrumentos o técnicas inadecuadas y controlar variables extrañas (como la humedad relativa constante durante el transporte) (Ortega et al., 2022).

e) Análisis estadístico (ANOVA)

El experimento finaliza con el Análisis de Varianza, que permite determinar si las diferencias observadas en la calidad del producto (como la firmeza) son provocadas por los tratamientos aplicados o simplemente por el azar. Debido a que los experimentos de postcosecha suelen realizarse en ambientes controlados (laboratorios), generalmente se usa un nivel de confianza más estricto ($\alpha = 0.01$) (Ortega et al., 2022).

8.2.4 Ejemplos o aplicaciones

El diseño de experimentos es aplicado en el ámbito de la agricultura como una estrategia metodológica que permite a los productores analizar problemáticas específicas de sus unidades productivas con un enfoque científico, alineado con sus necesidades e intereses particulares (González, 2020).

A continuación, se describen los siguientes ejemplos de su aplicación:

b) Evaluación de variedades de quinua en el altiplano boliviano:

Un caso representativo corresponde a un proyecto desarrollado con redes de agricultores investigadores (RAI) en cuatro

comunidades del departamento de La Paz, Bolivia. Frente a la disminución de la productividad y la pérdida de diversidad genética, se estructuró un experimento orientado a identificar las variedades de quinua con mejor adaptación a distintos contextos agroecológicos y sociales (Gianella et al., 2021).

Figura 8.7. Evaluación de la quinua



- b) Experimentación con insumos agroecológicos (bio insumos):** Otra aplicación puede estar en la evaluación de la eficacia de fertilizantes y plaguicidas de origen natural. En este caso, agricultores y técnicos realizan ensayos con la elaboración y aplicación de biol (fertilizante líquido) y bocashi (abono orgánico), con el objetivo de analizar su impacto en la recuperación de la actividad biológica del suelo y en el control de enfermedades foliares. Durante estos experimentos se analizan variables como la capacidad de retención de humedad del suelo y el vigor de las plantas después de los tratamientos (Gianella et al., 2021).

Figura 8.8. Insumos agroecológicos



8.3 Tipos de diseños experimentales aplicados a postcosecha

a) Diseños experimentales estándar

Diseño Completamente Aleatorio (DCA)

- **Descripción:** Es un diseño simple, ya que los tratamientos se asignan a las unidades experimentales de forma completamente aleatoria, sin ninguna restricción (González, 2020).
- **Aplicación:** Es adecuado cuando las unidades experimentales son homogéneas, como pueden ser experimentos en laboratorio, invernaderos con condiciones controladas, entre otros (González, 2020).
- **Ventajas:** Es flexible en el número de repeticiones por tratamiento y posee el mayor número de grados de libertad para el error experimental, convirtiendo la estimación del mismo más eficaz para el diseño experimental (González, 2020).
- **Modelo Lineal Aditivo:** $Y_{ij} = \mu + t_i + e_{ij}$

Diseño de bloques completamente aleatorios (DBCA)

- **Descripción:** Es un diseño bastante utilizado en la experimentación en postcosecha. Se utiliza cuando existe una fuente de variabilidad conocida (gradiente de temperatura, flujo de aire y humedad, variabilidad del material biológico, etc.). El material experimental se organiza en bloques, y dentro de cada bloque, los tratamientos se distribuyen al azar (González, 2020).
- **Aplicación:** Ideal para experimentos de campo donde las condiciones no son uniformes (González, 2020).
- **Ventajas:** Permite el aumento de la precisión, con la eliminación de la variabilidad entre bloques del error experimental (González, 2020).
- **Modelo Lineal Aditivo:** $X_{ij} = \mu + t_i + b_j + e_{ij}$

Diseño de parcelas divididas

El diseño de parcelas divididas corresponde a un tipo de experimento en el que se considera al menos un factor que resulta complicado de modificar, ya sea por restricciones de tiempo, costos operativos o condiciones técnicas, lo que impide su completa aleatorización. En este tipo de diseño, los niveles del factor difícil de cambiar se mantienen constantes a lo largo de varias unidades experimentales, las cuales conforman la parcela principal. Dentro de cada una de estas parcelas, se evalúan factores que son más fáciles de variar, generándose así parcelas subdivididas que representan las distintas combinaciones de estos factores (Minitab, 2025).

- **Parcela:** Son las unidades experimentales de mayor tamaño, en ellas se asigna el factor que es más difícil mover. Se denomina parcela grande o principal (Domínguez, M. 2021).
- **Subparcela:** Son unidades experimentales que resultan de la división de la parcela principal; en ellas se asigna el factor que es más fácil de manipular. Se denomina parcela chica o subparcela (Domínguez, M. 2021).

Su implementación en la postcosecha interviene en muchos factores críticos como la temperatura de almacenamiento, la atmósfera controlada, entre otros.

Figura 8.9. Model matemático

MODELO MATEMÁTICO

$$y_{ijk} = \mu + A_i + \beta_j + (A\beta)_{ij} + B_k + (AB) + \epsilon_{ijk}$$

Respuesta	Efecto de la media de todos los datos	Efecto del factor de la parcela principal	Efecto del bloque	Error (a) o error de la parcela principal	Efecto del factor de la subparcela	Efecto de la interacción AxB o tratamiento	Error de la subparcela o error(ab)
------------------	---------------------------------------	---	-------------------	---	------------------------------------	--	------------------------------------

Ejercicio: Durante el almacenamiento postcosecha se evaluó el efecto de dos temperaturas de conservación y diferentes tiempos de almacenamiento, mediante un diseño de parcelas divididas. Como variable de respuesta se midió la intensidad de color del producto, a partir de una evaluación organoléptica, con el fin de determinar las condiciones que mejor preservan su calidad.

Tabla 7.1. Tiempos y temperaturas

Temperatura a C°	Tiempo, minutos	bloques				ExAB	ExA	ExB	Ex2AB	Ex2A	Ex2B
		I	II	III	IV						
10	60	6,3	5	4,8	5,4	21,50	69,30	54,50	462,25	4802,49	2970,25
10	80	5,4	5,2	7,4	4,8	22,80		57,40	519,84		3294,76
10	100	6,1	5,9	7,1	5,9	25,00		51,40	625		2641,96
parcelas		17,8	16,1	19,3	16,1						
5	70	8,9	8	7,3	8,8	33,00	94,00		1089	8836	
5	80	9,1	8,2	8,1	9,2	34,60			1197,16		
5	100	6,2	6,9	6,9	6,4	26,40			696,96		
parcelas		24,2	23,1	22,3	24,4						
Exb		42	39,2	41,6	40,5	163,30	163,30	163,30	4590,21	13638,49	8906,97
Ex2b		1764	1536,64	1730,56	1640,25	6671,45					
Cuadrados de las X						cuadrados de las parcelas grandes					
		39,69	25	23,04	29,16	Ex2P=	316,84	259,21	372,49	259,21	3419,65
		29,16	27,04	54,76	23,04		585,64	533,61	497,29	595,36	
		37,21	34,81	50,41	34,81						
		79,21	64	53,29	77,44	MODELO LINEAL ADITIVO					
		82,81	67,24	65,61	84,64	$y = u + A + B + E(a) + B + AB + E(b)$					
		38,44	47,61	47,61	40,96						
			Ex2		1156,99						

La tabla presenta los valores que se han conseguido para cada emparejamiento de tiempo y temperatura dentro de los bloques, además de las medias parciales y la media total. Los totales y cuadrados requeridos para el análisis de varianza (ANOVA) se determinaron con la información anterior, incluyendo los cuadrados de las parcelas grandes para examinar cómo la temperatura afecta y los de las parcelas subdivididas para estudiar el efecto del tiempo y su interrelación con la temperatura, utilizando un modelo lineal aditivo estadístico.

Figura 8.10. Modelo lineal aditivo

A=	2		
B=	3		
r=	4		
n=	24 (a*b*r)		
Ex=	163,30		
Ex2=	1156,99		
FC=	1111,12 (Ex)2/n		
SCT=	45,87 Ex2-FC		
SCA=	25,42 (Ex2A/(B*r))-FC		
SCB=	2,25 (Ex2B/(A*r))-FC		
SCAB=	8,76 (Ex2AB/r)-FC-SCA-SCB		
SCb=	0,79 (Ex2b/(A*B))-FC		
SCP=	28,76 (EX2P/B)-FC		
SCE(a)=	2,55 SCP-SCA-SCb		
SCE(b)=	6,09 SCT-SCP-SCB-SCAB		

MODELO LINEAL ADITIVO				
$y = u + A + b + E(a) + B + AB + E(b)$				
ADEVA				
FV	gl	SC	CM	Fcal
Total	23	45,87	1,99	
Fcator A	1	25,42	25,42	29,85
Bloques	3	0,79	0,26	0,31
Error(a)	3	2,55	0,85	
Fcator B	2	2,25	1,13	2,22
A*B	2	8,76	4,38	8,62
Error(b)	12	6,09	0,51	

El análisis de varianza (ADEVA) permitió determinar la importancia del factor temperatura, el tiempo, su interacción y los errores vinculados a parcelas grandes y subdivididas, brindando así un fundamento estadístico para comprender cómo los factores analizados afectan el estudio de postcosecha.

8.3.1 Supuestos del análisis de varianza (ANOVA) y transformación de datos

a) Supuestos fundamentales

- **Normalidad:** Los errores experimentales deben estrictamente colocados en una distribución normal (Sánchez, 2022).
- **Homogeneidad de varianza (Homocedasticidad):** Las varianzas asociadas a los distintos tratamientos deben ser similares entre sí y no mostrar dependencia respecto a las medias. Este supuesto suele incumplirse cuando los grupos con valores promedio elevados también exhiben una mayor variabilidad (Sánchez, 2022).
- **Aditividad:** Los componentes del modelo (media general, tratamiento, bloque y error) deben combinarse de forma aditiva. Este supuesto no se cumple cuando el efecto de un tratamiento actúa de manera multiplicativa, por ejemplo, cuando produce un aumento proporcional o porcentual en la respuesta (Sánchez, 2022).

8.3.2 Técnica de transformación de datos

Cuando los datos no cumplen con estos supuestos, a menudo se pueden transformar para validarlos antes de proceder con el ANOVA (Sánchez, 2022).

Tabla 7.2. Técnicas de transformación

Tipos de transformación	Cuando se utiliza	Descripción
Logarítmica	Se emplea cuando las varianzas aumentan a medida que lo hacen	Consiste en aplicar la transformación $\log(x)$ a los datos. Cuando

	las medias, lo que indica la presencia de efectos multiplicativos (Sánchez, 2022).	existen valores muy pequeños o cercanos a cero, se puede utilizar $\log(x + 1)$ para evitar inconvenientes en el cálculo (Sánchez, 2022).
Raíz Cuadrada	Se usa en datos de conteo de eventos poco frecuentes que siguen una distribución de Poisson (por ejemplo, cantidad de insectos o número de lesiones en una hoja) (Sánchez, 2022).	La transformación se realiza mediante \sqrt{x} . En el caso de conteos bajos (<10), se recomienda emplear $\sqrt{x + 0.5}$ para lograr una mejor estabilización de la varianza (Sánchez, 2022).
Angular (arco - seno)	Se aplica a datos expresados como proporciones o porcentajes, que generalmente presentan una distribución binomial (Sánchez, 2022).	La varianza depende de la media y suele ser menor en los valores extremos (0 % y 100 %). La transformación se realiza mediante $\arcseno(\sqrt{p})$, donde p representa la proporción (Sánchez, 2022).

8.3.3 Análisis e interpretación de resultados

a) Análisis de varianza (ANOVA)

El ANOVA separa la variabilidad total observada en los datos en componentes asociados a los tratamientos, a los bloques (cuando corresponda) y al error experimental (Sánchez, 2022).

Tabla 8.3. ANOVA

Fuente de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrados medios (CM)	F
Tratamiento	t - 1	SCT	$CMT = SCT / (t-1)$	CMT / CME
Error experimental	(varía según diseño)	SCE	$CME = SCE / gl\ Error$	
Total	N - 1	SC TOTAL		

b) Prueba de hipótesis

El estadístico F calculado (F_{cal}) se contrasta con el valor crítico obtenido de las tablas (F_{tab}) para un nivel de significancia (α) establecido (generalmente 0.05 o 0.01) (Sánchez, 2022).

- **Hipótesis Nula (H_0):** No existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los tratamientos (Sánchez, 2022).
- **Hipótesis Alternativa (H_1):** Al menos una de las medias de los tratamientos presenta una diferencia (Sánchez, 2022).
- **Regla de Decisión:** Si $F_{cal} \geq F_{tab}$, se rechaza la H_0 .

c) Pruebas de comparación de medias

Cuando la prueba F es significativa, señala la existencia de diferencias, pero no especifica entre cuáles medias ocurren. Para identificar estas diferencias se emplean las pruebas de comparación de medias (o pruebas post-hoc) (Villarruel-Fuentes et al., 2024).

Entre las más utilizadas se encuentran:

- **Prueba de Tukey (DSH – Diferencia Significativa Honesta):** Es rigurosa y se usa ampliamente para comparar todos los pares de medias (Villarruel-Fuentes et al., 2024).
- **Prueba de Duncan:** Corresponde a otra prueba de rangos múltiples (Villarruel-Fuentes et al., 2024).
- **Prueba de Scheffé:** Es más flexible y permite evaluar cualquier contraste entre medias (Villarruel-Fuentes et al., 2024).
- **Diferencia Mínima Significativa (DMS o LSD):** Debe aplicarse con cuidado y únicamente en comparaciones previamente planificadas (Villarruel-Fuentes et al., 2024).

d) Coeficiente de variación (CV)

El coeficiente de variación (CV) expresa la variabilidad experimental de forma relativa en porcentaje y se utiliza como un indicador de la precisión y confiabilidad del experimento (Valdivia, 2008).

Tabla 8.4. Coeficiente de variación

Rango de CV (%)	Precisión del Experimento
$5 < CV \leq 10$	Muy buena
$10 < CV \leq 15$	Buena
$15 < CV \leq 20$	Regular
$20 < CV \leq 25$	Mala
$CV > 25$	Muy mala

e) Herramientas de software estadístico

El manejo, procesamiento y análisis de datos experimentales se simplifican notablemente mediante el empleo de paquetes estadísticos computacionales (Valdivia, 2008).

- **SAS (Statistical Analysis System):** Es un software potente y versátil, ampliamente citado en la literatura. Permite almacenar, editar y analizar datos mediante un lenguaje de programación con procedimientos específicos (por ejemplo, PROC GLM para

modelos lineales y PROC ANOVA para análisis de varianza). En la actualidad, dispone de una versión gratuita denominada SAS University Edition (Valdivia, 2008).

f) Otros paquetes estadísticos

- **SPSS:** Ampliamente utilizado en ciencias sociales, exactas y aplicadas, destaca por su interfaz gráfica intuitiva (Villarruel-Fuentes et al., 2024).
- **R:** Software libre y gratuito de alta capacidad analítica, que opera principalmente mediante comandos, aunque cuenta con interfaces gráficas como R Commander que facilitan su utilización (Villarruel-Fuentes et al., 2024).
- **STATISTICA:** Paquete estadístico orientado a la investigación y al análisis de datos y minería de datos.
- **MINITAB:** Diseñado para realizar análisis estadísticos básicos y avanzados, combinando facilidad de uso con un buen nivel de potencia analítica (Villarruel-Fuentes et al., 2024).
- **MSTAT-C:** Software más antiguo basado en DOS, desarrollado en la Universidad Estatal de Michigan y ampliamente empleado en las ciencias de la vida (Villarruel-Fuentes et al., 2024).
- **InfoStat:** Software desarrollado en español, de uso gratuito y con una interfaz amigable. Una de sus principales ventajas es su integración con R, lo que permite combinar la simplicidad de su entorno gráfico con la potencia de cálculo de R (Villarruel-Fuentes et al., 2024).

8.3.4 Ejemplo de aplicación del diseño de experimentos aplicado a postcosecha

- 1. Planteamiento del ejercicio:** Se evaluó el efecto de diferentes tipos de recubrimientos comestibles aplicados a mango (*Mangifera indica*) sobre el contenido de sólidos solubles totales (°Brix) durante el almacenamiento poscosecha. Se utilizó el diseño completamente al azar, considerando los siguientes tratamientos, T1: sin recubrimiento (control), T2: recubrimiento a base de almidón, T3: recubrimiento a base de quitosano, T4: recubrimiento a base de aloe vera (Estrada Mesa et al., 2015).

Cada tratamiento contó con seis repeticiones, obteniendo así 24 unidades experimentales, las cuales correspondieron a frutos individuales almacenados bajo las mismas condiciones de temperatura y humedad relativa. Los datos resultantes fueron sometidos a un análisis de varianza (ADEVA) y, al detectarse diferencias significativas, se realizó la prueba de Diferencia Mínima Significativa (DMS) al 1 % (0,01) (Estrada Mesa et al., 2015).

a) Resolución del ejercicio

Tabla 8.5. Ejercicio

Contenido de sólidos solubles totales (°Brix) en mango almacenado bajo diferentes recubrimientos comestibles durante poscosecha																
Tipo de recubrimiento	1	2	3	4	5	6 Ext	Ex2t	Medias	cuadrados de las x							
Control	6,25	6,10	6,30	6,40	6,20	6,35	37,60	1413,76	6,27	39,0625	37,21	39,69	40,96	38,44	40,3225	
Almidón	5,80	5,75	5,90	5,85	5,70	5,80	34,80	1211,04	5,80	33,64	33,0625	34,81	34,2225	32,49	33,64	
Quitosano	5,10	5,20	5,15	5,05	5,10	5,20	30,80	948,64	5,13	26,01	27,04	26,5225	25,5025	26,01	27,04	
Aloe vera	5,45	5,50	5,55	5,40	5,50	5,45	32,85	1079,12	5,48	29,7025	30,25	30,8025	29,16	30,25	29,7025	
							136,05	4652,56							Ex ² 775,5425	
t	4,00	ADEVA									PRUEBA DE LA SEPARACIÓN DE MEDIAS (DMS)					
r	6,00	FV	gl	SC	CM	Fcal	F0,05	F0,01								
n	24,00	Total		23,00	4,31	0,19			Quitosano	Aloe vera	Almidón	Control				
Ex	136,05	tratamiento		3,00	4,19	1,40	242,23	3,10	4,94	d	c	b	a			
Ex ²	775,54	error		20	0,12	0,01			5,13	5,48	5,80	6,27				
FC	771,23	Fcal < F0,05: no hay diferencias estadísticas									1,13	0,79	0,47			
SCT	4,31	Fcal > F0,05: si hay diferencias significativas									0,67	0,33				
SCT	4,19	Fcal > F0,01: hay diferencias altamente significativas									0,34					
SCE	0,12															
		CV=(raíz CME/media general)*100					1,34	t student=	2,5280							
		x media= Ex/n					5,67	Sdx=	0,04							
											DMS= t*Sdx	0,11				

b) Explicación de la resolución del ejercicio

Los valores de °Brix obtenidos para cada tratamiento se organizaron en una tabla de datos y se calcularon las sumas, medias y cuadrados necesarios para el análisis estadístico. Posteriormente, se determinó la suma de cuadrados total, la suma de cuadrados de tratamientos y la suma de cuadrados del error, junto con sus respectivos grados de libertad. A partir de estos valores se calcularon los cuadrados medios y el estadístico F calculado, el cual fue comparado con los valores críticos de F a los niveles de significancia del 5 % y 1 %. Al encontrarse diferencias significativas, se aplicó la prueba DMS para la comparación de medias entre tratamientos.

c) Interpretación

El contenido de sólidos solubles totales (°Brix) del mango presentó diferencias altamente significativas entre los recubrimientos comestibles evaluados. El tratamiento control presentó el mayor valor promedio de °Brix, mientras que el recubrimiento a base de quitosano fue el valor más bajo. La prueba de separación de medias (DMS) evidenció que todos los tratamientos fueron estadísticamente diferentes entre sí, demostrando que la aplicación de recubrimientos comestibles influyó significativamente en la evolución de los sólidos solubles durante la poscosecha, según el diseño se pudo observar que el quitosano es el tratamiento más efectivo para retardar el proceso de maduración.

2. Planteamiento del ejercicio: Se evaluó el comportamiento productivo de cuatro variedades de quinua previamente

seleccionadas. El ensayo se estableció bajo un diseño completamente al azar, donde cada agricultor representó una repetición experimental. Se establecieron cuatro tratamientos (variedades) con seis repeticiones, pertenecientes a parcelas estandarizadas de 1000 m². La variable de respuesta fue el rendimiento de grano (kg/ha). Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza (ADEVA) y, al observar diferencias significativas, se aplicó la prueba de Diferencia Mínima Significativa (DMS) (Gianella et al., 2021).

a) Resolución del ejercicio

Tabla 8.6. Ejercicio

Evaluación del rendimiento (kg/ha) de variedades de quinua en agricultura familiar del altiplano boliviano

Variedad de quin	1	2	3	4	5	6	Ext	Ex2t	Medias	Cuadrados de las x						
Real blanca	1650	1700	1680	1720	1690	1710	10150	103022500	1691,67	2722500	2890000	2822400	2958400	2856100	2924100	
Kancolla	1500	1520	1480	1510	1490	1505	9005	81090025	1500,83	2250000	2310400	2190400	2280100	2220100	2265025	
Sajama	1380	1400	1420	1390	1410	1405	8405	70644025	1400,83	1904400	1960000	2016400	1932100	1988100	1974025	
Pandela	1250	1280	1260	1270	1240	1265	7565	57229225	1260,83	1562500	1638400	1587600	1612900	1537600	1600225	
							35125	311985775						Ex ²	52003775	
t	4,00	ADEVA														
r	6,00	FV	gl	SC	CM	Fcal	F0,05	F0,01	PRUEBA DE LA SEPARACIÓN DE MEDIAS (DMS)							
n	24,00	Total		23,00	596873,96	25951,04			Pandela	Sajama	Kancolla	Real blanca				
Ex	35125,00	tratamiento		3,00	590728,13	196909,38	640,79	3,10	4,94	c	c	b	a			
Ex ²	52003775,00	error		20,00	6145,83	307,29				1260,83	1400,83	1500,83	1691,67			
FC	51406901,04	Fcal < F0,05: no hay diferencias estadísticas								430,83	290,83	190,83				
SCT	596873,96	Fcal > F0,05: si hay diferencias significativas								240,00	100,00					
Sct	590728,13	Fcal > F0,01: hay diferencias altamente significativas								140,00						
SCE	6145,83	CV=(raíz CME/media general)*100								1,20	t student=	2,5280				
		x media= Ex/n								1463,54	Sdx=	10,12				
											DMS= t*Sdx	25,59				

b) Explicación de la resolución del ejercicio

El ejercicio evaluó el rendimiento de cuatro variedades de quinua (Real blanca, Kancolla, Sajama y Pandela) en condiciones de agricultura familiar del altiplano boliviano, bajo un diseño completamente al azar con seis repeticiones por tratamiento, donde cada repetición es una parcela de 1000 m² manejada por agricultores. Los datos de rendimiento (kg/ha) se organizaron y analizaron mediante un análisis de varianza (ADEVA) para determinar si existían diferencias atribuibles al efecto de la variedad, comparándose el valor de F calculado con los valores críticos de F a los niveles de significancia del 5 % y 1 %. Al hallar diferencias altamente significativas, se aplicó la prueba de Diferencia Mínima Significativa (DMS), la cual permitió comparar las medias de cada tratamiento y determinar grupos estadísticamente distintos. Los resultados indicaron que la variedad Real blanca presentó el mayor rendimiento promedio, mientras que Pandela registró el menor, evidenciando que la elección de la variedad influye significativamente en el rendimiento de la quinua.

c) Interpretación

Los resultados del ADEVA mostraron que el valor de F calculado fue mayor que el valor crítico al 0.01, lo que demuestra la existencia de diferencias altamente significativas entre las variedades evaluadas. Es por ello por lo que se procedió a realizar la prueba de Diferencia Mínima Significativa (DMS) para comparar las medias de rendimiento entre variedades. Logrando establecer qué variedades presentaron diferencias estadísticas reales y agruparlas según su similitud. La separación de

medias evidenció que la variedad Real blanca alcanzó un alto rendimiento promedio, seguida por Kancolla, Sajama y, finalmente, Pandela, la cual presentó el menor desempeño productivo. Por lo cual se recomienda en base al diseño experimental la utilización de la variedad Real blanca, a que demostró un alto rendimiento (kg/ha), permitiendo una mayor producción.

8.4 Conclusión

El diseño de experimentos aplicado en poscosecha permite que en base a observaciones empíricas previamente estudiadas o obtenidas a partir de datos científicos se pueda realizar evaluaciones para conseguir productos de calidad, de las cuales encontramos a evaluaciones de calidad del producto final, análisis del rendimiento real de la unidad experimental (producto), incluso para toma de decisiones para el mercado.

Los diseños de experimentos permiten mejorar desde la calidad del producto hasta la comercialización de este, ya que al realizar un análisis del producto con la ayuda de diseños experimentales como el “análisis de variancia”, “diseño completamente al azar”, etc. Permite observar si la composición del producto es rentable en el mercado y aceptada por el consumidor, entre otros aspectos.

Capítulo IX

9. Calidad, vida útil, pérdida postcosecha: indicadores y métricas

Cuando nos referimos a la alimentación en toda su cadena de producción, hay tres conceptos fundamentales: el tiempo que se mantendrá en buenas condiciones, la calidad y las pérdidas que suceden después de ser cosechados. La calidad se refiere a todos los aspectos que hacen que un alimento sea apto para el consumo: su sabor, su apariencia, su textura, sus propiedades nutricionales y la ausencia de microorganismos perjudiciales. La vida útil es, en esencia, el periodo de tiempo durante el cual el producto se conserva seguro y en condiciones adecuadas, siempre que lo transportemos y almacenemos correctamente (Fusades, 2024).

Por otra parte, las pérdidas posteriores a la cosecha son el total y la calidad que se pierde desde la cosecha hasta el momento en que llega al consumidor. Esto ocurre debido a una mala gestión, ya que puede deteriorarse por hongos o bacterias, por golpes en el transporte o simplemente por las condiciones del medio ambiente. Para controlar esto, empleamos diversos parámetros: los análisis químicos y físicos, los conteos de microorganismos, las pruebas de sabor y aspecto, y los porcentajes de pérdida. Todo esto nos ayuda a saber qué tan bien estamos haciendo las cosas y en qué aspectos podemos mejorar para desperdiciar menos comida (Fusades, 2024).

9.1 Calidad en la agroindustria

Cuando nos referimos a que algo tiene "calidad", estamos diciendo que satisface las expectativas del consumidor. Esto abarca el sabor, la textura (si es dura o suave), la apariencia (el color, la forma, si tiene brillo) y el valor nutricional. Para determinar si un alimento es de buena calidad, examinamos varios aspectos: su valor nutricional (azúcares, grasas, vitaminas y minerales), qué tan atractivo es para el consumidor potencial (tamaño, apariencia y sabor) y que cumpla con las regulaciones de seguridad, por ejemplo, mantener la cadena de frío cuando sea necesario o tener correctamente colocada la fecha de producción y vencimiento (Fusades, 2024).

a) Vida útil

Cuando nos referimos a la vida útil, nos referimos en realidad a la "época dorada" de un alimento: el periodo durante el cual es seguro, nutritivo y agradable al gusto. Este periodo se inicia cuando se elabora y dura hasta que los factores externos comienzan a afectar su condición. No obstante, no existe una regla universal; Chavarrias (2015) indica que la duración real depende de la composición del producto y también de la responsabilidad que tenemos al almacenarlo. Cumplir las indicaciones de la etiqueta no es simplemente un procedimiento, sino el elemento esencial para garantizar que la comida que llega a la mesa sea exactamente como la imaginamos.

b) Qué afecta la vida útil de un alimento

Un alimento debe atravesar una auténtica carrera de obstáculos para poder conservarse fresco. Elementos que parecen ser comunes, como la luz solar o el aire que respiramos, pueden iniciar procesos que lo

deterioran. No obstante, el crecimiento de microorganismos perjudiciales y bacterias que se benefician de cualquier negligencia para progresar es el verdadero protagonista en este proceso. Como señala Chavarrias (2015), el destino de un producto se determina en varias fases: partiendo desde su composición original y el proceso que ha seguido, hasta el tipo de empaque que lo resguarda y la ubicación donde al final lo almacenamos. Comprender que el embalaje y la preservación son los "escudos" de los alimentos nos permite apreciar cada fase de su gestión con mayor profundidad.

9.2 Pérdidas postcosechas

Las pérdidas postcosecha son uno de los retos más grandes para la seguridad alimentaria, porque incluyen todas las reducciones que experimentan los productos agrícolas desde el instante en que salen del campo hasta que alcanzan la mesa del comprador. Estas pérdidas no son simplemente cifras; se presentan de tres maneras cruciales: físicas, cuando el producto ve reducido su volumen o peso; económicas, cuando su valor en el mercado disminuye; y nutricionales, tal vez la más severa, cuando las proteínas y vitaminas fundamentales se deterioran. Según Carvajal (2012), este fenómeno es particularmente sensible en productos que se descomponen rápidamente, como las verduras, los granos y las frutas, que son la base de nuestra alimentación.

Las razones de esta degradación son múltiples. Por un lado, se encuentran los elementos biológicos y físicos, por ejemplo, las lesiones mecánicas (golpes) que ocurren en el transporte, la acción de patógenos (bacterias y hongos) y procesos fisiológicos naturales como la

transpiración y la respiración del producto. Por otro lado, el ambiente tiene un rol clave: una mala conservación, marcada por temperaturas altas, ventilación inadecuada o humedad descontrolada, funciona como un catalizador que hace que la descomposición se acelere de manera inexorable (Carvajal, 2012).

No obstante, el problema no es únicamente ecológico, sino también humano y tecnológico. La ausencia de entrenamiento del personal, el empleo de empaques que no resguardan el producto y la falta de infraestructura apropiada para la conservación empeoran las cosas.

Es esencial poner en marcha estrategias integrales para revertir esta tendencia:

- Para asegurar calidad y resistencia, coseche en el momento ideal de madurez.
- Mejorar la logística a través de una gestión cuidadosa y del empleo de empaques diseñados para proteger.
- Invertir en tecnología de preservación, conservando condiciones de humedad y frío controladas.
- Asegurar la inocuidad a través de estrictas prácticas de higiene.

Como Carvajal (2012) concluye de manera acertada, adoptar estas buenas prácticas es una exigencia para extender la vida útil de los alimentos y garantizar que su calidad inicial perdure sin cambios hasta el final.

9.3 Indicadores cuantitativos de calidad postcosecha

Estos indicadores son instrumentos que posibilitan la evaluación objetiva de un producto después de su cosecha. Son útiles para observar las alteraciones químicas, físicas y fisiológicas que determinan si el producto es aceptado o no, su valor y su duración (Arboleda et al., 2024).

A través de parámetros como el pH, los sólidos solubles, el color, la firmeza y la pérdida de peso, podemos evaluar cuán deteriorado está y si las medidas que estamos tomando para preservarlo son efectivas. El empleo de estos indicadores nos permite tomar decisiones técnicas más acertadas para mejorar la conservación, reducir las pérdidas y garantizar la calidad hasta el momento del consumo (Arboleda et al., 2024). Estos indicadores son mencionados por Arboleda (2024):

Pérdida de peso (%): Mide la cantidad de masa que pierde el producto a lo largo del tiempo debido a la transpiración y la respiración. Es uno de los más utilizados para observar la deshidratación.

Fórmula:

$$\text{Pérdida de peso (\%)} = (\text{peso inicial} - \text{peso final}) / \text{peso inicial} \times 100$$

Textura o firmeza: Se mide con un penetrómetro para determinar su resistencia a la deformación. Cuando pierde firmeza, quiere decir que está envejeciendo o que sus tejidos se están descomponiendo. El promedio de múltiples mediciones es el único valor que se informa, y se expresa en kg o Newton (N).

Contenido total de sólidos solubles (°Brix): Los azúcares y otros compuestos solubles se reflejan en él; nos señala de manera indirecta su

madurez y sabor. Si disminuye, puede estar deteriorándose. Se mide con un refractómetro, y el resultado se expresa directamente en °Brix.

Acidez y pH: Estos parámetros químicos nos indican la manera en que cambia la acidez durante el almacenamiento, lo cual está vinculado con la maduración y el deterioro. El pH se determina con un medidor de pH calibrado y se comunica su valor directamente.

Para la acidez se usa:

$$\text{Acidez (\%)} = (V \times N \times \text{Eq}) / (\text{Peso de muestra}) \times 100$$

Donde V es el volumen de NaOH gastado

N la normalidad del NaOH

Eq el equivalente del ácido predominante.

Color (L, a, b): Un colorímetro permite la medición de variaciones cromáticas que son relevantes para que las verduras y las frutas tengan una buena apariencia. Se reportan como promedio los valores de luminosidad (L*), verde-rojo (a*) y azul-amarillo (b*).

Índice de calidad global: Es un valor que mezcla diversos atributos químicos y físicos (sabor, color, firmeza) para determinar de manera integral la condición del producto. Se determina otorgando puntajes a olor, firmeza, daño y color. Un valor más alto señala un mayor deterioro.

Producción de etileno y nivel de respiración: Se mide la cantidad de CO₂ que produce o de etileno que libera en un periodo determinado; esto nos indica su actividad metabólica tras la recolección.

Fórmula:

Respiración = CO_2 producido / (peso \times tiempo)

Se expresa generalmente en $\text{mg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$.

Porcentaje de frutos dañados: Es la proporción de unidades que ya no se pueden vender por golpes, enfermedades o defectos.

Fórmula:

Frutos dañados (%) = (Número de frutos dañados / número total) \times 100

Información nutricional: Es posible determinar la cantidad de nutrientes (como las vitaminas y los compuestos fenólicos) que se conserva durante el almacenamiento mediante análisis químicos (por ejemplo, HPLC).

Para calcular la retención:

Retención (%) = (contenido final / contenido inicial) multiplicado por 100

Gracias a todos estos indicadores, tenemos la posibilidad de evaluar la calidad de manera objetiva, contrastar las distintas maneras de manejo (como por ejemplo el embalaje, la temperatura y la atmósfera controlada) y determinar cómo conservar mejor los productos y reducir las pérdidas.

9.4 Modelación y cálculo de la vida útil poscosecha

Modelar la vida útil implica emplear modelos de estadística y matemáticas para pronosticar y describir cómo los parámetros de calidad, como el color, la firmeza, el peso o las características microbiológicas y sensoriales cambian a lo largo del tiempo bajo determinadas circunstancias.

Se utilizan varios modelos predictivos para predecir con precisión el comportamiento de los alimentos. Estos pueden ser probabilísticos, como la distribución de Weibull; cinéticos, como los de primer orden o la ecuación de Arrhenius que evalúan la velocidad de reacción; o incluso enfoques innovadores fundamentados en inteligencia artificial a través de redes neuronales. Según Hernández (2010), estas herramientas posibilitan calcular, con una exactitud sin igual, el periodo en el que un producto mantendrá sus características de calidad bajo condiciones de almacenamiento ya establecidas.

1. Determinar la vida útil

Comienza con encontrar un "punto crítico" o límite de aceptación, que podría ser una firmeza mínima tolerable, una pérdida de peso máxima o un umbral sensorial determinado. Cuando calculamos el tiempo que toma al producto llegar a este límite, adquirimos información estratégica de un valor incalculable. Wang (2022) indica que estos datos no solamente mejoran la logística y la venta de productos perecederos, sino que también son fundamentales para reducir pérdidas económicas y garantizar que el consumidor final obtenga un alimento seguro y de alta calidad.

García et al (2010) cita los siguientes procedimientos:

2. Método cinético de orden cero

Este método parte del supuesto de que el producto se degrada a un ritmo constante, sin tener en cuenta el valor inicial del parámetro de calidad. Se emplea para caracterizar variaciones en la pérdida de peso, el color o los sólidos solubles, y hace posible calcular

la vida útil al llegar a un límite crítico.

Ecuación:

$$C = C_0 - kt$$

Donde C_0 es el valor inicial, C es el valor del indicador en el tiempo t y k es la constante de deterioro.

Cálculo de vida útil:

$$t = (C_0 - C_{cr}) / k$$

3. Método cinético de primer nivel

Ten en cuenta que la rapidez del deterioro es proporcional al valor del indicador, por lo cual el cambio es exponencial. Se emplea con frecuencia para modelar la pérdida de firmeza, el deterioro de los nutrientes y la proliferación de microorganismos.

Fórmula:

$$\ln(C) = \ln(C_0) - kt$$

Cálculo de la vida útil:

$$t = \ln(C_0) - \ln(C_{cr})$$

4. Método de Arrhenius (influencia de la temperatura)

La velocidad de deterioro se vincula con la temperatura de almacenamiento: cuanto más alta es la temperatura, más rápidamente se descompone. Para prever la duración de vida a distintas temperaturas, en especial en refrigeración y ensayos acelerados, es crucial. Ecuación:

$$k = k_0 e^{(-E_a/RT)}$$

Después, se utiliza el modelo cinético para determinar la vida útil. A temperaturas más bajas, k disminuye y la vida útil se incrementa.

5. Método de Weibull basado en probabilidades

Es un método estadístico que calcula la vida útil dependiendo de la probabilidad de que el producto sea rechazado o pierda calidad. Es útil en frutas y vegetales, donde existe una gran variabilidad biológica, y se utiliza cuando el deterioro no es lineal. Fórmula:

$$F(t) = 1 - e^{-(t/\alpha)^\beta}$$

Donde la probabilidad de rechazo es $F(t)$, β es el parámetro de forma y α es el parámetro de escala.

6. Método de microbiología

Estima la vida útil tomando en cuenta el crecimiento de microorganismos que dañan el producto o lo vuelven inseguro. El tiempo que tarda la carga microbiana en llegar al límite máximo tolerado

se conoce como vida útil. Es fundamental cuando la inocuidad es el aspecto más relevante.

7. Fórmula (de crecimiento exponencial):

$$\ln(N) = \ln(N_0) + \mu t$$

N es la carga microbiana, N_0 es la carga inicial y μ es la tasa de crecimiento.

8. Método sensorial

Se fundamenta en lo que percibe y acepta el consumidor: gusto, olor, apariencia y textura. Cuando un panel sensorial rechaza el producto, la vida útil finaliza. Posibilita calcular una vida útil comercial real, a pesar de tener un elemento subjetivo.

Ecuación:

Cuando P es menor que P_{cr} , la vida útil es igual a t.

9. Método fisicoquímico

Emplea parámetros que se puedan medir, como el pH, la firmeza, el color o la acidez, para describir el deterioro durante el almacenamiento. Se combina con modelos cinéticos y es utilizado ampliamente debido a su capacidad de reproducirse y su exactitud.

Ecuación:

$$C = C_0 - kt$$

10. Método rápido

Se trata de someter el producto a condiciones más rigurosas (altas temperaturas) con el objetivo de acelerar el deterioro y disminuir la duración de la evaluación. Se extrapolan los resultados a situaciones normales utilizando modelos matemáticos. Es eficaz para productos con una vida útil prolongada. Se estima a altas temperaturas y se extrapola con Arrhenius.

9.5 Análisis estadístico de pérdidas poscosecha

El análisis estadístico de las pérdidas postcosecha implica, más allá de simplemente recopilar cifras, un proceso de diagnóstico integral que tiene como objetivo descubrir, contar y, principalmente, entender la raíz de las mermas en el sector agrícola. Para que esta evaluación sea eficaz, tiene que reflejar lo complejo de la realidad rural: desde la variada gama de productos hasta los numerosos pasos de la cadena, como son el secado, el transporte, la cosecha, el almacenamiento y el procesamiento.

Este análisis tiene que tener en cuenta, tal como la FAO (s.f.) indica, una perspectiva de 360° que incluya factores técnicos fallidos, presiones económicas, causas biológicas y variables ambientales. La fortaleza real de esta herramienta no está en los datos que se han acumulado en el campo, sino en su interpretación estratégica. Con el fin de identificar con exactitud los "puntos críticos" donde se pierde la mayor cantidad de producto, estos datos se convierten en información que puede ser utilizada. Esto posibilita que las empresas y los productores dejen de especular y empiecen a concentrar sus recursos y tácticas de disminución de pérdidas en aquellos lugares donde realmente tendrán un impacto positivo.

Los pasos del análisis son:

1. Determinar qué se desea examinar

- Calcular el porcentaje de pérdidas que se producen en el almacenamiento
- Comparar las pérdidas entre distintos métodos de gestión, tiempos o circunstancias (como la humedad, la temperatura o el empaque).

2. Diseño del muestreo

- Elegir el producto agrícola (granos, fruta, verdura)
- Determinar el número de repeticiones y la dimensión de la muestra
- Definir tratamientos (por ejemplo: refrigerado frente a no refrigerado)

3. Obtención de datos

Evaluar variables cuantitativas como:

- Peso al principio y al final
- Volumen de producto afectado
- Pérdidas debido a descomposición, putrefacción o deshidratación
- Duración del almacenamiento

4. Cálculo de pérdidas postcosecha

El método más frecuente es:

$\text{Pérdidas (\%)} = (\text{número de unidades perdidas} / \text{número inicial de unidades}) \times 100$

5. Análisis descriptivo de datos estadísticos

Para sintetizar la información, se emplean estadísticas elementales:

- Media (promedio)
- Desviación típica
- Valores más bajos y más altos

Esto posibilita el conocimiento de la variabilidad de las pérdidas.

6. Análisis inferencial de datos estadísticos

En función del estudio, se utilizan ensayos como:

- ANOVA: con el fin de comparar las pérdidas entre múltiples tratamientos
Prueba t: para cotejar dos conjuntos
- Regresión: con el fin de analizar la relación existente entre el tiempo, la temperatura o la humedad y las pérdidas

Esto establece si las disparidades detectadas tienen significación estadística.

7. Análisis de resultados

- Se detectan las fases críticas con pérdidas más grandes.

- Se analiza qué prácticas postcosecha disminuyen las pérdidas.
- Se sugiere optimizar el manejo, la conservación o el transporte.

8. Exposición de los resultados

Los datos se exhiben a través de:

- Tablas
- Gráficos de líneas o columnas
- Porcentajes de pérdida por fase

Capítulo X

10. Operaciones unitarias en post cosecha de productos agrícolas

10.1 Operaciones unitarias

Las operaciones unitarias son aquellas que implican tratamientos físicos a la materia prima con el objetivo de obtener los productos deseados a partir de esta. Todas estas operaciones obedecen las leyes de la conservación de la masa y la energía, así como también la cantidad de movimiento (Vega, 2010).

Estas operaciones facilitan el transporte de la materia prima (este en estado líquido, sólido o gaseoso) hacia los reactores, así como su calentamiento o enfriamiento. También favorecen la separación efectiva de un componente específico de una mezcla de productos (Grolleaud, s. f.).

10.1.1 Operaciones principales en plantas empacadoras de frutas y hortalizas

La FAO define “Poscosecha” como el momento en el que la recolección de frutas u hortalizas es separada de la planta, para ser preparado para el consumo y finaliza cuando este alimento entra en posesión del consumidor en los mercados (FAO,2011).

En un sentido amplio, es el tiempo entre la recolección y el consumo, incluyendo las etapas de preconservación, industrialización, transporte y comercialización. En general, el funcionamiento de cada línea de

envasado depende de los procesos asociados a cada tipo de producto, pero todos siguen una línea de base técnica que se puede resumir en tres apartados principales: selección o clasificación, limpieza, desinfección y ex post facto. Es una tendencia. Procesamiento-Procesamiento de la cosecha (Arboleda Álvarez et al., 2023).

a) Limpieza y lavado:

El lavado es para eliminar cualquier agente que perjudique la calidad de la fruta como la tierra o polvo o residuos químicos que pueden haberse depositado durante su misma recolección y se pueden eliminar mediante un lavado o un cepillado con una máquina, cada operación es con el mayor cuidado para evitar cualquier daño en la fruta o hortaliza porque cualquier daño puede acelerar el deterioro de esta. Se recomienda en su lavado jabones con características acidas, para lograr la eliminación de cualquier suciedad de fruto y otros residuos. El lavado se efectúa con agua potable para evitar que la fruta sea expuesta a contaminantes que puedan causar putrefacción acelerada del producto por eso se evita el agua reutilizada o estancada (Arboleda Álvarez et al., 2023).

b) Desinfección

Se considera importante porque es un aspecto para garantizar la higiene del producto. La desinfección incluye el tratamiento posterior a la cosecha, el uso de desinfectantes con ácido peroxiacético reduce el potencial de transmisión de patógenos a través del agua desinfectada, cura las heridas y cortes de la fruta y transmite estos organismos.

Funciona al reducir las pérdidas poscosecha (Arboleda Álvarez et al., 2023).

c) Cera

Consiste en la aplicación de un recubrimiento, los recubrimientos de cera para frutas y verduras son barreras comestibles destinadas a reducir la velocidad de la respiración y evitar la deshidratación de las frutas, semipermeables al gas y al vapor de agua. Evitando su deshidratación, reductoras pérdidas de rigidez, supresión del pardeamiento enzimático y reacciones metabólicas asociadas con la maduración (maduración retrasada), mantenimiento de las propiedades sensoriales y deterioro por microorganismos patógenos Controla, mejora la apariencia y prolonga la vida útil de la fruta (Arboleda Álvarez et al., 2023).

d) Selección

Los frutos recolectados se seleccionan para separar aquellos que no presentan las condiciones apropiadas para su comercialización; se descartan para el mercado los frutos que presentan daños mecánicos, deshidratación, ausencia de pedúnculo, manchas causadas por agentes biológicos y defectos físicos y fisiológicos. El sitio destinado para la selección debe tener buena ventilación, estar protegido de los rayos solares y alejado de fuentes de contaminación como agroquímicos, abonos y fertilizantes o animales, entre otros (Arboleda Álvarez et al., 2023).

e) Clasificación

Una vez se efectúa la selección del producto, se procede a su clasificación, con el fin de unificar la calidad, de acuerdo con una o varias características, como color, tamaño, peso y sanidad. La clasificación conduce a conformar categorías o clases comerciales del producto. Se puede hacer manual o mecánica, pero generalmente se combinan ambos métodos (Arboleda Álvarez et al., 2023).

f) Tratamientos especiales:

Algunos productos reciben un trato especial. El procesamiento principal es el siguiente.

- a. Fumigación:** Diseñado para combatir plagas como la *Drosophila*. Es esencial para las exportaciones en muchos países y es necesario equipos y conocimiento sobre fumigación.
- b. Maduración artificial de las frutas:** Tiene una duración de varios días y requiere procesar la fruta con gas etileno en un almacén aislado en condiciones especiales. Al mantener los alimentos frescos fríos y secos, protegerlos de daños y enviarlos al mercado rápidamente, puede minimizar las pérdidas durante el trabajo posterior a la cosecha (Arboleda Álvarez et al., 2023).

g) Empaque:

Una vez se hayan realizado las operaciones de selección se procede a empacar la fresa. Las condiciones y el tipo de empaque utilizado son factores determinantes a la hora de comercializar un fruto de calidad, reduciendo los daños que sufren durante esta etapa.

En el mercado para el transporte y distribución a granel se deben utilizar empaques lisos que no causen daños al fruto, lavables y apilables, se recomienda el uso de canastillas plásticas desinfectadas con capacidad para 10 kilos, las medidas recomendadas, son 60 cm x 40 cm x 13 cm. Si se empaca a granel se debe llenar la canastilla hasta 8 cm de altura como máximo. Para mercados más exigentes se utilizan las cajas de plástico con o sin perforaciones en su tapa, las cuales brindan excelentes condiciones y favorecen la vida útil del producto; la capacidad de éstas varía desde los 150 a los 500 gramos, siendo las más comercializadas las de 250 y 500 gramos (Arboleda Álvarez et al., 2023).

h) Transporte

El proceso de comercialización requiere ser realizado en corto tiempo, generalmente en vehículos o medios de transporte adecuados a nuestras condiciones de producción y en ocasiones a través de una red especializada de comerciantes en este campo. El sistema de transporte utilizado debe garantizar rapidez y calidad del producto entregado (Arboleda Álvarez et al., 2023).

i) Almacenamiento

El sistema de transporte utilizado debe garantizar rapidez y calidad del producto entregado (Arboleda Álvarez et al., 2023).

10.1.2 Diagrama operaciones de una planta empacadora de frutas y hortalizas

Figura 10.1. Diagrama de operaciones

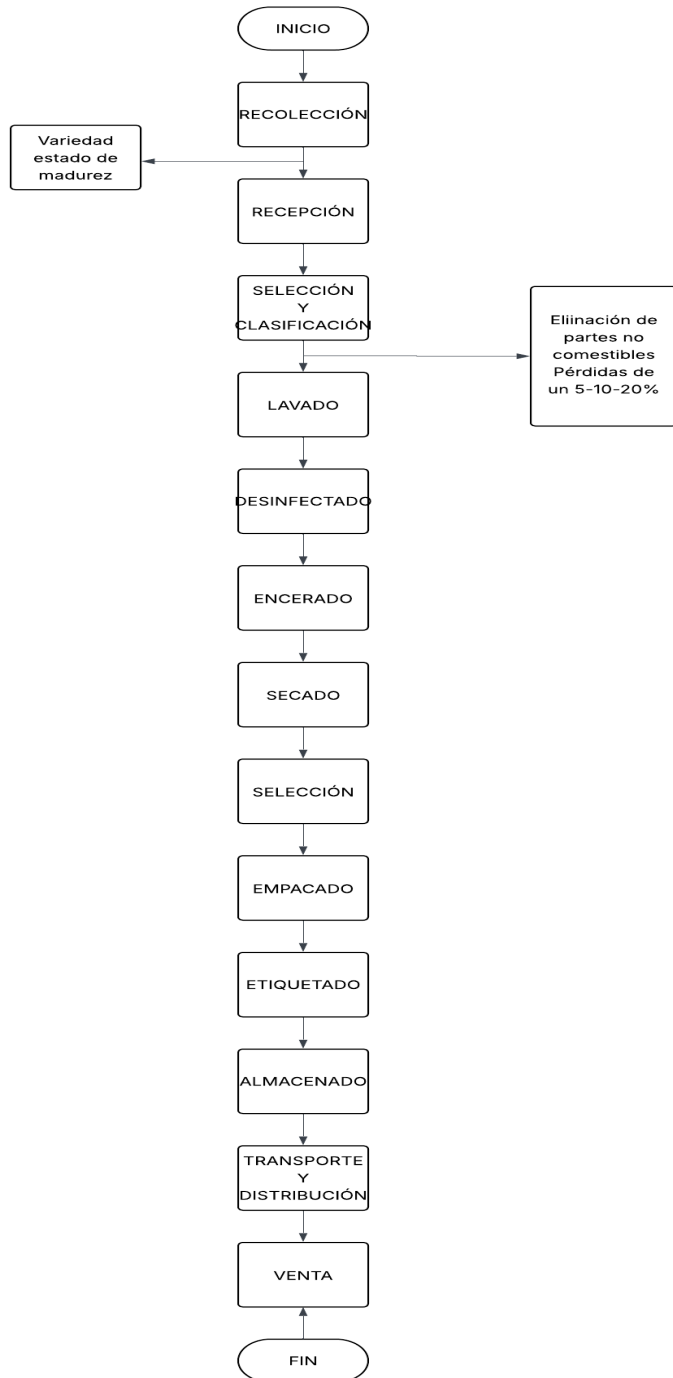
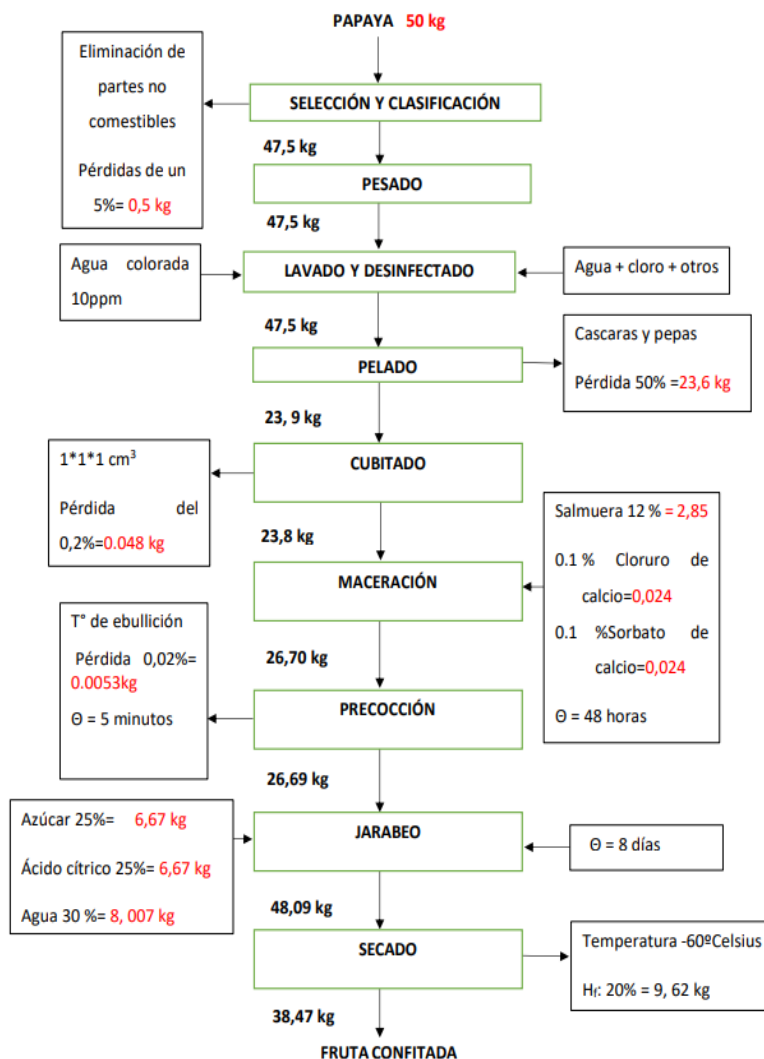


Figura 10.2. Diagrama de flujo de operaciones de la elaboración de fruta confitada



10.2 Operaciones al realizar en la postcosecha de la fresa

Postcosecha es importante conocer la diferencia en los procesos de limpieza y desinfección que se deben aplicar a todos los elementos y establecer un producto que permita aplicarse a las diferentes etapas del

proceso, como: preparación de equipos, manipulación para la cosecha, clasificación, empaque, almacenamiento y transporte (Martínez-González et al., 2017b).

10.2.1 Limpieza

Es el proceso u operación de eliminación de residuos de alimentos u otras materias extrañas o indeseables. Se deben limpiar superficies, equipos, canastillas, herramientas, pisos, mesas de trabajo y demás utensilios que se requieran para la comercialización del producto, utilizando detergentes neutros, según las especificaciones de los fabricantes (Fragaria, 2025).

10.2.2 Desinfección

Es la labor que se realiza posterior a la limpieza, cuya finalidad es destruir los microorganismos patógenos o dañinos. Se deben desinfectar igualmente superficies, pisos, canastillas, herramientas, mesas, ambientes, entre otros. Para el proceso de desinfección se utilizan principalmente sustancias cloradas, yodadas o a base de amonio cuaternario. Es importante tener en cuenta, que se debe hacer rotación de desinfectantes para no crear resistencia de los microorganismos, dicha rotación se puede realizar una vez al mes con un desinfectante con principio activo diferente al de uso cotidiano (Fragaria, 2025).

10.2.3 Empaque

Una vez se hayan realizado las operaciones de selección se procede a empaclar la fresa. Las condiciones y el tipo de empaque utilizado son

factores determinantes a la hora de comercializar un fruto de calidad, reduciendo los daños que sufren durante esta etapa (Tozer, 2012).

En el mercado para el transporte y distribución a granel se deben utilizar empaques lisos que no causen daños al fruto, lavables y apilables, se recomienda el uso de canastillas plásticas desinfectadas con capacidad para 10 kilos, las medidas recomendadas, son 60 cm x 40 cm x 13 cm. Si se empaca a granel se debe llenar la canastilla hasta 8 cm de altura como máximo. Para mercados más exigentes se utilizan las cajas de plástico con o sin perforaciones en su tapa, las cuales brindan excelentes condiciones y favorecen la vida útil del producto, la capacidad de éstas varía desde los 150 a los 500 gramos, siendo las más comercializadas las de 250 y 500 gramos (*Client Challenge*, s. f.-b).

Se han comprobado que los empaques tradicionales de cajas de madera de capacidad de 10 a 15 kilos favorecen el deterioro del producto aumentando los daños físicos, la presencia de hongos, contribuyen a generar pérdidas y daños, y en la mayoría de los casos se llega a la pérdida total del producto, debido a los golpes de los frutos durante el transporte o la fermentación durante el almacenamiento. (*Client Challenge*, s. f.-b)

Cuando se trabaja con empaques plásticos pequeños, se debe disponer de cajas adecuadas para su almacenamiento, evitando el movimiento de los empaques y facilitando su transporte, estas cajas pueden ser de cartón corrugado con o sin etiqueta, o canastillas plásticas (*Client Challenge*, s. f.-b).

10.2.4 Transporte

Para un transporte adecuado de la fresa se recomienda utilizar camiones refrigerados para preservar la fruta; no es recomendable el uso de vehículos de carpa o camionetas en las que no cuenta con condiciones higiénicas ni controladas (Universidad Francisco de Paula Santander, 2021).

10.2.5 Almacenamiento

El almacenamiento permite tener productos durante periodos posteriores a la cosecha, es de especial cuidado el almacenamiento de los frutos, ya que factores como la humedad relativa, la temperatura, el flujo del aire y la presencia de etileno pueden afectar la calidad de fruto ya empacado. Normalmente el almacenamiento de la fresa se hace bajo refrigeración, pero sin control de las variables antes mencionadas, la vida útil de esta oscila entre cuatro y seis días, limitando fuertemente su comercialización (*Manejo En la Postcosecha de Moras y Fresas*, s. f.).

Cuando se almacena la fruta por periodos de tiempo prolongados se recomienda el uso de atmosferas modificadas con un alto contenido de CO₂ y bajo de oxígeno, para retardar la tasa de respiración y la maduración del fruto; acompañado con una reducción en la temperatura que ayuda a la disminución de la actividad metabólica y al retardo en la reproducción bacteriana, principales causas de deterioro y ablandamiento del fruto durante el almacenamiento (Yahia y Gola, 2011).

El almacenamiento se debe realizar en cavas limpias, desinfectadas y libres de otros compuestos químicos. Esta fruta se puede almacenar sin

problemas con mora, uva, cereza y maracuyá, ya que presentan características fisiológicas similares (Tozer et al., 2015).

10.3 Resumen de proceso de postcosecha

Una vez cosechada la fruta debe ser transportada a "packing" ingresándolas a cámaras frigoríficas dentro de las 3 h siguientes, con alta humedad relativa ya que al presentar una baja humedad por un periodo extenso aumentará la pérdida de peso afectando la apariencia de la fruta, adicionalmente la temperatura debe ser cercana a 0 °C Además se debe mantener la cadena de frío hasta el lugar de venta (Zhang et al., 2016).

Para la venta o exportación se usan envases de plástico transparente de 300 o 500 g, con tapa, perforados para un buen enfriamiento y evitar la condensación. Los envases deben ser rotulados o etiquetados en un lugar visible y de difícil remoción (García-Ramos et al., 2014).

10.3.1 Problemas en poscosecha

a) Deshidratación o pérdida de peso

La fresa tiene alto porcentaje de pérdida de agua debido a su alta tasa respiratoria y a su piel delgada, la cual puede ser acelerada por alta temperatura en la cosecha. La pérdida de un 4% de su peso se distingue en la piel, la cual pierde el brillo y se arruga. Pérdidas mayores al 5% de humedad hacen que la fruta no sea comerciable, además provoca un descenso importante de la calidad sensorial al afectar la apariencia y textura del fruto y una disminución en la calidad nutricional (Londoño, 2013).

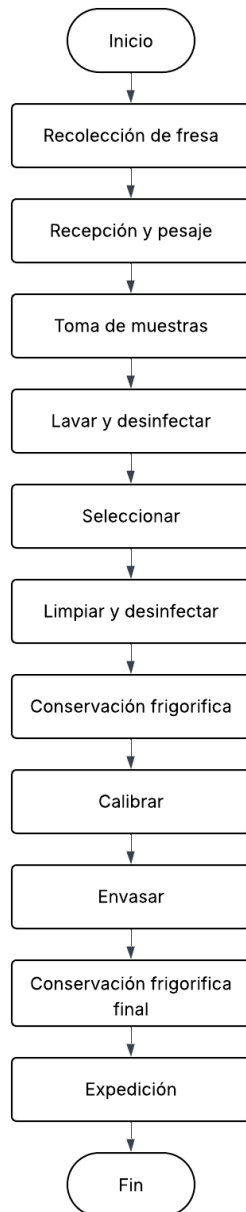
b) Daño mecánico

La estructura de la frutilla la hace muy susceptible a este daño (cutícula delgada, pulpa blanda, etc.), golpes, heridas abiertas, heridas cicatrizadas, o presión de los dedos al cosechar la fruta, son frecuentes de observar y aunque no sean notorios se hacen evidentes en el almacenamiento o en la comercialización (Hernández, 2017).

c) Enfermedades

Una fuente importante de deterioro de la fresa son los organismos que actúan sobre la fruta descomponiéndola, por lo tanto, son la principal causa de pérdida en postcosecha. En esta etapa no se aplican fungicidas a la fruta, por lo tanto, el inmediato enfriamiento (0 °C) y la prevención de daños físicos y el embarque con dióxido de carbono (CO₂) son los mejores métodos para el control de enfermedades (Lianou et al., 2016). La pudrición por *Botrytis* o moho gris causada por *Botrytis cinerea* es la mayor causa de pérdidas postcosecha en fresas. El tejido afectado se caracteriza por presentar micelio blanco que se torna gris cuando se produce la esporulación. Este hongo continúa creciendo aún a 0 °C, aunque muy lentamente (Mercer, 2014).

Figura 10.3. Diagrama de flujo post cosecha de la fresa



1. Hay que arrancar los frutos de la planta con el **pedicelo intacto**.
2. Clasificación: Teniendo en cuenta el **color**.
3. Temperatura: **30 °C**

4. Humedad: **Entre 90 y 95%**
5. Se deben lavar con agua para quitarles toda la tierra sin cortar las hojas, después se enjuagan con **jabón líquido neutro** disuelto en agua.
6. Teniendo en cuenta su **color, tamaño, peso y tolerancia**.
7. Con un cepillo o una esponja verde se frota cada fresa, se vuelven a enjuagar y se colocan en un recipiente de agua con **lejía (cloro) durante 20 minutos**.
8. Regulan la **respiración** de la fruta para alargar su **vida útil** mediante depuradoras de dióxido de carbono, humidificadores y catalizadores.
9. Vendrá determinado por el **diámetro máximo** de la sección ecuatorial.
10. En cajas o bandejas con un contenido máximo de **5 kg netos**.
11. **Entre 2 y 4 grados Celsius**, y duran en perfecto estado **4 o 5 días**.
12. La duración de la puesta en el mercado de la fresa se sitúa normalmente **entre 2 y 4 días**. (*Client Challenge*, s. f.-b).

10.3.2 Aplicación de balance masa

a) Recolección de la fresa

Entradas

- Fresas en planta (1000 kg)

Salidas

- Fresas cosechadas aptas (950 kg)
- Fresas dañadas (magulladas, sobre maduras) (50 kg)

- Pérdidas por caída o manipulación (30 kg)

Ecuación

$$M_{entrada} = M_{apta} + M_{dañada} + M_{pérdidas}$$

$$1000 \text{ kg} = 930 \text{ kg} + 50 \text{ kg} + 20 \text{ kg}$$

Porcentaje de merma

$$\% \text{ Merma} = \frac{M_{dañada} + M_{pérdidas}}{M_{entrada}} \times 100$$

$$\% \text{ Merma} = \frac{50 \text{ kg} + 20 \text{ kg}}{1000 \text{ kg}} \times 100$$

$$\% \text{ Merma} = 7 \%$$

b) Recepción de la fresa

Rechazo inicial 5%

Fresa rechazada

$$1000 \times 0,05 = 50 \text{ kg}$$

Fresa aceptada

$$1000 - 50 = 950 \text{ kg}$$

Balance de masa

$$1000 = 950 + 50$$

c) Limpieza y selección

Fresa dañada + residuo = 8 % de la fresa aceptada

$$950 \times 0,8 = 76 \text{ kg}$$

Fresa apta

$$950 - 76 = 874 \text{ kg}$$

$$950 = 874 + 76$$

d) Lavado

Absorción de agua 2% del peso de la fresa

Agua absorbida

$$874 \times 0,02 = 17,5 \text{ kg}$$

Fresa húmeda

$$874 + 17,5 = 891,5 \text{ kg}$$

$$874 \text{ kg} + 17,5 \text{ kg} = 891,5 \text{ kg}$$

e) Secado

80 % del agua absorbida

Agua eliminada

$$17,5 \times 0,80 = 14 \text{ kg}$$

Agua remanente

$$17,5 - 14 = 3,5 \text{ kg}$$

Fresa escurrida

$$874 + 3,5 = 877,5 \text{ kg}$$

$$891 = 877,5 + 14$$

f) Clasificación

Grado 1: 80 %
20%

Grado 2: 30 %

Descarte:

Grado 1

$$877,5 \times 0,70 = 614,3 \text{ kg}$$

Grado 2

$$877,5 \times 0,20 = 175,5 \text{ kg}$$

Descarte

$$877,5 \times 0,10 = 87,7 \text{ kg}$$

$$877,5 = 614,3 + 175,5 + 87,7$$

g) Empaquetado

Todo el grado 1 y 2 se empaqueta.
peso del producto

Peso del empaque 5 % del

Fresa empaquetada

$$614,3 + 175,5 = 789,8 \text{ kg}$$

Material del empaque

$$789,8 \times 0,05 = 39,5 \text{ kg}$$

Empaque total

$$789,8 + 39,5 = 829,3 \text{ kg}$$

h) Almacenamiento

3 % Perdidas por respiración y deshidratación

Pérdida en almacenamiento

$$789,8 \times 0,03 = 23,7 \text{ kg}$$

Producto final comercializable

$$789,8 - 23,7 = 766,1 \text{ kg}$$

10.4 Indicadores de eficiencia y pérdidas postcosecha

10.4.1 Merma total post cosecha

$$\% \text{ Merma} = \frac{M_{\text{entrada}} + M_{\text{pérdidas}}}{M_{\text{entrada}}} \times 100$$

$$\% \text{ Merma} = \frac{1000 - 766,1}{1000} \times 100$$

$$\% \text{ Merma} = 23,4 \%$$

10.4.2 Rendimiento post cosecha

$$R = \frac{M_{final}}{M_{entrada}} \times 100$$

$$R = \frac{766,1}{1000} \times 100$$

$$R = 76,6 \%$$

10.4.3 Perdidas por etapa

$$\%P_{etapa} = \frac{M_{perdida\ etapa}}{M_{entrada}} \times 100$$

Recepción

$$\frac{50}{1000} \times 100 = 5 \%$$

Limpieza y selección

$$\frac{76}{1000} \times 100 = 7,6 \%$$

Clasificación (descarte)

$$\frac{87,7}{1000} \times 100 = 8,8 \%$$

Almacenamiento

$$\frac{23,7}{1000} \times 100 = 2,4 \%$$

10.4.4 Eficiencia del proceso post cosecha

$$\eta = \frac{M_{comercializable}}{M_{entrada}} \times 100$$

$$\eta = 76,6 \%$$

10.4.5 Índice de pérdidas post cosecha

$$IP = \frac{M_{perdidas}}{M_{final}}$$

$$IP = \frac{233,9}{766,1}$$

$$IP = 0,31 \text{ kg}$$

Cada 1 kg de fresa comercial se pierden 0,31 kg.

10.4.6 Pérdida económica

\$1,50/ kg

$$P_{económica} = M_{perdidas} \times \text{Precio unitario}$$

$$233,9 \times 1,50 = \$ 350,85$$

10.5 Balance de energía

10.5.1 Recepción

$$Q = m \times c_p \times \Delta T$$

$$Q = 1000 \times 3,8 \times (30 - 20)$$

$$Q = 38000 \text{ kJ}$$

10.5.2 Enfriamiento

$$Q_{enfriamiento} = m \times c_p \times (T_{inicial} - T_{final})$$

$$Q = 766,1 \times 3,8 \times (30 - 5)$$

$$Q = 72279,5 \text{ kJ}$$

72279,5 kJ

Es la energía que el sistema de refrigeración debe restirar.

10.5.3 Respiración de la fruta

r= tasa de respiración aproximadamente 0,15 kJ/kg h

t= tiempo de almacenamiento (24 h)

$$Q_{resp} = m \times r \times t$$

$$Q_{resp} = 766,1 \times 0,15 \times 24$$

$$Q_{resp} = 2757,9 \text{ kJ}$$

Proceso post cosecha

$$Q_{total} = Q_{enfriamiento} + Q_{resp}$$

$$Q_{total} = 72\,279,5 + 2\,757,9$$

$$Q_{total} = 75\,037,4 \text{ kJ}$$

Conversión

$$1 \text{ kWh} = 3600 \text{ kJ}$$

$$Q = \frac{75\,037,4 \text{ kJ}}{3600}$$

$$Q = 20,8 \text{ kWh}$$

(Ramírez-Castrillón et al., 2022)

Capítulo XI

11. Diseño ingenieril de atmósferas controladas

11.1 Aplicaciones en postcosecha agroindustrial

El diseño ingenieril de atmósferas controladas (AC) representa una de las tecnologías más avanzadas y efectivas para la conservación de productos agrícolas en la etapa postcosecha. Esta tecnología se fundamenta en la modificación precisa de la composición gaseosa del ambiente de almacenamiento, reduciendo los niveles de oxígeno (O_2) y elevando las concentraciones de dióxido de carbono (CO_2), con el objetivo de ralentizar los procesos metabólicos de los productos hortofrutícolas y, consecuentemente, prolongar su vida útil comercial. La implementación de sistemas de atmósferas controladas ha demostrado ser particularmente efectiva en la reducción de pérdidas postcosecha, que a nivel global representan entre el 25% y 50% de la producción total de frutas y hortalizas (Yahia et al., 2019). En el contexto de la agroindustria moderna, donde la competitividad y la sostenibilidad son factores determinantes, el dominio de esta tecnología resulta fundamental para profesionales del sector, permitiendo no solo extender la vida útil de los productos, sino también mantener sus atributos de calidad, reducir el uso de agroquímicos y optimizar la cadena de distribución (Saltveit, 2016).

11.2 Fundamentos científicos de las atmósferas controladas

11.2.1 Fisiología de la respiración y maduración

Los productos hortofrutícolas, tras su cosecha, continúan siendo organismos vivos que mantienen procesos metabólicos activos, siendo la respiración el más significativo desde el punto de vista de la conservación. La respiración aeróbica consume oxígeno y sustratos energéticos (principalmente carbohidratos, ácidos orgánicos y lípidos) mientras produce CO₂, agua y energía en forma de calor. La tasa respiratoria es un indicador crítico de la velocidad de deterioro del producto, ya que, a mayor respiración, más rápido es el consumo de reservas y el envejecimiento del tejido (Kader, 2013). Los productos hortofrutícolas se clasifican en dos categorías según su patrón respiratorio: climatéricos y no climatéricos. Los climatéricos, como manzanas, peras, tomates, bananas y aguacates, presentan un incremento marcado en la tasa respiratoria durante la maduración, asociado con la producción autocatalítica de etileno. Los no climatéricos, como cítricos, uvas, fresas y pimientos, no exhiben este pico respiratorio y su producción de etileno es mínima (Watkins, 2006). El etileno (C₂H₄), conocido como la "hormona de la maduración"; desempeña un papel central en la regulación de procesos como el ablandamiento, cambios de color, desarrollo de sabor y aroma, y senescencia. Su acción puede ser modulada mediante el control atmosférico, lo que constituye uno de los principios fundamentales del diseño de sistemas AC (Saltveit, 2016).

11.2.2 Principios de control atmosférico

El control atmosférico se basa en la manipulación de tres variables principales: concentración de oxígeno, concentración de dióxido de carbono y temperatura de almacenamiento. La reducción de O₂ desde

niveles atmosféricos normales (21%) hasta rangos de 1-5% disminuye la tasa de respiración aeróbica y la producción de etileno, retrasando los procesos de maduración y senescencia. Simultáneamente, la elevación de CO₂ desde 0.03% atmosférico hasta niveles de 3-10% ejerce efectos supresores adicionales sobre la respiración, la acción del etileno y el desarrollo de patógenos (Thompson, 2010). Sin embargo, el diseño de atmósferas controladas debe considerar cuidadosamente los límites de tolerancia de cada producto. Concentraciones excesivamente bajas de O₂ (por debajo del límite anaeróbico) pueden inducir respiración anaeróbica, resultando en la acumulación de metabolitos tóxicos como etanol y acetaldehído, que causan malos sabores y daños fisiológicos irreversibles. De manera similar, niveles excesivos de CO₂ pueden provocar desórdenes como pardeamiento interno, zonas necróticas y pérdida de firmeza (Yahia et al., 2019). La temperatura es un factor sinérgico crítico; la efectividad del control atmosférico se maximiza cuando se combina con temperaturas óptimas de refrigeración, típicamente en el rango de 0-10°C según el producto. Cada grado Celsius de incremento puede duplicar o triplicar la tasa metabólica, por lo que el diseño térmico es inseparable del diseño atmosférico (Kader, 2013).

11.2.3 Mecanismos de extensión de vida útil

Los mecanismos por los cuales las atmósferas controladas extienden la vida útil postcosecha son múltiples y sinérgicos. Primero, la reducción en la disponibilidad de O₂ limita directamente la tasa de reacciones oxidativas, incluyendo aquellas catalizadas por enzimas como polifenol oxidasa y lipoxigenasa, responsables del pardeamiento y la oxidación

lipídica respectivamente. Segundo, el ambiente de AC suprime la biosíntesis y percepción de etileno, retrasando los procesos dependientes de esta hormona. Tercero, las concentraciones elevadas de CO₂ ejercen efectos fungistáticos y bacteriostáticos, reduciendo la incidencia de enfermedades postcosecha causadas por patógenos como *Botrytis cinerea*, *Penicillium* spp. y *Colletotrichum* spp. (Romanazzi et al., 2016). Cuarto, el control atmosférico modula la actividad de enzimas relacionadas con el ablandamiento, como poligalacturonasa y pectinmetilesterasa, preservando la firmeza y textura del producto. Quinto, se reduce la pérdida de compuestos nutricionales y bioactivos, incluyendo vitamina C, carotenoides, compuestos fenólicos y antioxidantes. Y sexto, se minimiza la deshidratación y pérdida de peso al reducir la tasa transpiratoria, lo que es especialmente relevante en productos de alto valor comercial (Saltveit, 2016; Watkins, 2006). La comprensión profunda de estos mecanismos permite al ingeniero agroindustrial diseñar sistemas optimizados para cada tipo de producto y condiciones operativas específicas.

11.3 Diseño de sistemas de atmósferas controladas

11.3.1 Componentes y equipamiento

El diseño de un sistema de atmósfera controlada requiere la integración de múltiples componentes tecnológicos que funcionan de manera coordinada. Los elementos esenciales incluyen: cámaras herméticas construidas con materiales de baja permeabilidad a gases, sistemas de refrigeración para control térmico preciso, generadores de nitrógeno para reducción de O₂, sistemas de eliminación o adición de CO₂,

sensores y analizadores de gases de alta precisión, sistemas de control automatizado, y equipos de circulación y distribución de aire (Thompson, 2010). Las cámaras de almacenamiento deben cumplir especificaciones estrictas de hermeticidad, con tasas de intercambio de gases inferiores a 0.5-2.0% del volumen total por día. Los paneles suelen ser tipo sándwich con núcleos de poliuretano de alta densidad y barreras de vapor. Los generadores de nitrógeno más comunes emplean tecnología PSA (Pressure Swing Adsorption) o membranas semipermeables para separar el N₂ del aire, alcanzando purezas de 95-99.5%. La eliminación de CO₂ se realiza mediante sistemas de scrubbers que utilizan hidróxido de calcio (cal hidratada) o carbón activado. Los sistemas modernos incorporan analizadores paramagnéticos para O₂ e infrarrojos para CO₂, con precisiones de ±0.1% (Yahia et al., 2019). El sistema de control PLC (Programmable Logic Controller) integra todas las variables mediante algoritmos que ajustan continuamente las concentraciones gaseosas según los setpoints programados. La inversión inicial en estos sistemas es considerable, oscilando entre 200-400 USD/m³ de capacidad, pero el retorno se justifica mediante la extensión de vida útil, reducción de pérdidas y acceso a mercados premium.

11.3.2 Criterios de diseño por producto

El diseño de atmósferas controladas debe ser específico para cada producto, considerando su fisiología, tasa respiratoria, sensibilidad a gases y desórdenes potenciales. Para manzanas, una de las aplicaciones más exitosas de AC, las condiciones típicas son 1-3% O₂, 1-5% CO₂ y temperaturas de 0-4°C, permitiendo almacenamientos de 6-12 meses según la variedad. Las variedades como Granny Smith toleran

condiciones más extremas (1% O₂) mientras que otras como Fuji requieren niveles más conservadores (2-3% O₂) para evitar desórdenes fermentativos (Watkins, 2006). Las peras requieren protocolos diferenciados; las variedades europeas como Conference se benefician de atmósferas de 2-3% O₂ y 0.5-1% CO₂ a 0°C, mientras que las asiáticas necesitan mayores niveles de O₂ (3-5%) para prevenir pardeamiento interno (Kader, 2013). Los kiwis responden excelentemente a AC con 1-2% O₂ y 3-5% CO₂ a 0°C, extendiendo su vida de 2-3 meses en refrigeración convencional a 5-6 meses bajo AC. Los aguacates presentan un reto especial por ser climatéricos sensibles al frío; se almacenan a 5-13°C según madurez, con 2-5% O₂ y 3-10% CO₂. Los frutos rojos como fresas y arándanos, extremadamente perecederos, se benefician de atmósferas con 5-10% O₂ y 15-20% CO₂, que además ejercen efectos fungistáticos significativos contra *Botrytis cinerea* (Romanazzi et al., 2016). Los cítricos, siendo no climatéricos, requieren enfoques menos agresivos: 5-10% O₂ y 0-5% CO₂ a 5-15°C según especie, siendo más efectivos para control de patógenos que para retardar maduración. Las hortalizas de hoja como lechuga y espinaca requieren O₂ mínimo de 1-3% pero CO₂ muy bajo (<0.5%) para evitar daños por CO₂ (russet spotting). El brócoli y coliflor toleran hasta 10-15% CO₂, lo que ayuda a retener el color verde y prevenir amarillamiento (Saltveit, 2016).

11.3.3 Protocolos de establecimiento y monitoreo

El establecimiento de la atmósfera controlada es un proceso crítico que determina el éxito del almacenamiento. Una vez que el producto se carga en la cámara refrigerada y alcanza la temperatura objetivo (proceso de

preenfriamiento que toma 12-48 horas), se inicia el pull-down o descenso de O₂. Este puede realizarse mediante dos estrategias: pull-down rápido, donde se alcanza la concentración objetivo en 1-3 días mediante inyección directa de N₂ o evacuación parcial seguida de llenado con N₂, o pull-down gradual, donde se permite que la respiración del producto consuma naturalmente el O₂ mientras se complementa con N₂, tomando 7-10 días (Thompson, 2010). La primera estrategia es preferida para productos con alto metabolismo y riesgo de deterioro temprano, mientras que la segunda puede ser apropiada para productos menos perecederos. Durante el almacenamiento, el monitoreo continuo es esencial. Los sistemas modernos registran O₂, CO₂, temperatura y humedad relativa cada 15-30 minutos, con alarmas automáticas ante desviaciones. La calibración de sensores debe realizarse al menos mensualmente usando gases certificados de referencia. Es fundamental también el monitoreo de indicadores de calidad del producto mediante muestreos periódicos: firmeza con penetrómetros, color con colorímetros, sólidos solubles con refractómetros, y evaluaciones sensoriales (Yahia et al., 2019). Los registros históricos de cada lote permiten ajustes finos en protocolos futuros y son esenciales para certificaciones de calidad y trazabilidad. El mantenimiento preventivo del sistema incluye verificación de hermeticidad anual mediante pruebas de decay rate, inspección de compresores y válvulas, limpieza de intercambiadores de calor, y renovación de materiales absorbentes en scrubbers de CO₂.

11.4 Tecnologías avanzadas y tendencias emergentes

11.4.1 Atmósferas controladas dinámicas

Las atmósferas controladas dinámicas (DCA, Dynamic Controlled Atmospheres) representan la evolución tecnológica más significativa en el campo, superando las limitaciones de las atmósferas controladas estáticas tradicionales. El sistema DCA ajusta continuamente las concentraciones de O₂ en respuesta a señales fisiológicas del producto, manteniéndolo en el límite anaeróbico sin sobrepasarlo, maximizando así los beneficios del bajo O₂ mientras se evitan daños fermentativos (Zanella, 2003). Existen tres variantes principales de DCA. La DCA basada en fluorescencia de clorofila (DCA-CF) utiliza sensores que detectan la emisión fluorescente de las moléculas de clorofila en el tejido vegetal; cuando el O₂ cae por debajo del límite anaeróbico, se produce un incremento abrupto en la señal fluorescente, lo que activa una inyección controlada de aire para elevar el O₂ ligeramente, en un proceso de ajuste continuo. La DCA basada en producción de etanol (DCA-RQ) monitorea la concentración de etanol en la atmósfera de la cámara; cuando comienza la fermentación, el etanol aumenta, señalizando que se debe incrementar el O₂. La DCA basada en cociente respiratorio (DCA-RQ) calcula continuamente la relación CO₂/O₂ producido/consumido; cuando el cociente supera 1.0-1.3, indica metabolismo anaeróbico incipiente (Bessemans et al., 2016). Los sistemas DCA han demostrado superioridad sobre AC estática en múltiples aspectos: manzanas almacenadas bajo DCA-CF mantienen firmeza 15-25% superior, menor incidencia de escaldado superficial (40-60% de reducción), mejor retención de acidez y menor pardeamiento interno comparado con AC convencional (Zanella et al., 2015). El costo adicional de los sistemas DCA (20-30% sobre AC estática) se compensa rápidamente con productos de mayor calidad,

menor tasa de descarte y posibilidad de almacenamientos ultra-largos (12-15 meses para manzanas).

11.4.2 Tratamientos con atmósferas extremas

Complementario a las atmósferas controladas de largo plazo, se han desarrollado tratamientos de corta duración con atmósferas extremas que inducen respuestas beneficiosas en los productos. La anoxia inicial controlada (ICA, Initial Controlled Anoxia) consiste en exponer el producto recién cosechado a condiciones anóxicas ($O_2 < 0.5\%$) durante períodos breves de 4-10 días antes de trasladarlo a AC convencional o refrigeración normal. Este pretratamiento induce mecanismos de aclimatación al estrés que resultan en mayor resistencia a desórdenes fisiológicos posteriores, particularmente efectivo en peras para prevenir pardeamiento de corazón y cavidades (Veltman et al., 2003). Las atmósferas insecticidas con alto CO_2 (40-60%) durante 24-96 horas a temperaturas de 20-25°C han demostrado eficacia en control de plagas cuarentenarias como moscas de la fruta (Tephritidae) y polillas (Lepidoptera), ofreciendo una alternativa ambientalmente preferible al bromuro de metilo, ahora prohibido (Yahia et al., 2019). Los tratamientos hiperbáricos con O_2 elevado (60-100 kPa) a temperaturas bajas se están investigando para productos altamente susceptibles a atmósferas de bajo O_2 ; aunque contraintuitivo, han mostrado en ciertas hortalizas de hoja la capacidad de mantener metabolismo aeróbico completo minimizando fermentación y malos olores. El choque de CO_2 ultra-alto (30-50%) por 12-48 horas antes de AC convencional ha probado eficacia en reducción de patógenos de postcosecha en frutos rojos, actuando como fungistático efectivo (Romanazzi et al., 2016).

Estos tratamientos requieren equipamiento especializado y protocolos muy precisos, pero representan herramientas valiosas en el arsenal del ingeniero agroindustrial para situaciones específicas donde la AC convencional resulta insuficiente.

11.4.3 Integración con otras tecnologías postcosecha

La maximización de beneficios en postcosecha se logra mediante la integración sinérgica de atmósferas controladas con otras tecnologías de conservación. El 1-metilciclopropeno (1-MCP), inhibidor competitivo de los receptores de etileno, aplicado en concentraciones de 0.3-1.0 $\mu\text{L/L}$ durante 12-24 horas, potencia dramáticamente los efectos de la AC en productos climatéricos. La combinación 1-MCP + AC en manzanas permite reducciones adicionales de 50-70% en pérdida de firmeza, menor desarrollo de desórdenes de senescencia y almacenamientos comerciales extendidos hasta 18 meses (Watkins, 2006). Los recubrimientos comestibles basados en polisacáridos, proteínas o lípidos crean microatmósferas modificadas en la superficie del producto, complementando el efecto de la AC macroambiental. La combinación de AC con encerado en cítricos reduce la pérdida de peso en 40-60% adicional comparado con AC sola (Yahia et al., 2019). Los tratamientos térmicos de acondicionamiento, como heat shock (38-40°C por 2-4 días) previo a AC, inducen proteínas de choque térmico que confieren mayor tolerancia a estrés oxidativo y bajas temperaturas, particularmente valioso en productos tropicales sensibles al frío que requieren almacenamiento a temperaturas subóptimas. La irradiación UV-C en dosis bajas (0.5-8 kJ/m^2) aplicada antes de AC estimula mecanismos de defensa natural, incrementando compuestos antioxidantes y resistencia

a patógenos sin efectos deletéreos en calidad. Los sistemas de ozono (O_3) en concentraciones de 0.05-0.3 ppm dentro de cámaras de AC proporcionan sanitización ambiental continua, reduciendo carga microbiana y retardando pudriciones, aunque requieren compatibilidad con materiales resistentes a la oxidación (Romanazzi et al., 2016). El diseño de estrategias integradas debe considerar interacciones entre tecnologías, costos incrementales, regulaciones de inocuidad alimentaria y análisis costo-beneficio específico para cada cadena de valor.

11.5 Aspectos económicos y de sostenibilidad

La viabilidad económica de los sistemas de atmósferas controladas debe evaluarse mediante análisis financieros robustos que consideren inversiones, costos operativos y beneficios tangibles e intangibles. La inversión inicial típica para una instalación de AC comercial oscila entre 200-450 USD/m³ de capacidad, dependiendo del nivel de sofisticación tecnológica, grado de automatización y requisitos específicos del producto. Para una cámara de 500 m³ (aproximadamente 100 toneladas de manzanas), la inversión total puede alcanzar 100,000-200,000 USD, incluyendo obra civil, equipamiento, instalación y puesta en marcha (Thompson, 2010). Los costos operativos anuales incluyen energía eléctrica (principal componente, representando 40-50% del total), mantenimiento preventivo y correctivo, materiales consumibles (principalmente cal hidratada para scrubbers de CO₂), mano de obra especializada, calibraciones y certificaciones, seguros y depreciación del equipamiento. El costo operativo total se estima en 15-25 USD/tonelada/mes de almacenamiento. Sin embargo, los beneficios

económicos son sustanciales y múltiples. La extensión de vida útil permite almacenamiento estratégico y comercialización en ventanas de mayor precio, con diferenciales de 30-100% sobre precios de cosecha. La reducción de pérdidas postcosecha del 25-40% en refrigeración convencional a 5-10% bajo AC representa recuperación de producto con valor de 200-500 USD/tonelada según producto y mercado. El mantenimiento de atributos de calidad premium (firmeza, color, sabor) permite acceso a mercados selectos y exportación, con premios de 20-50% sobre producto estándar. La reducción o eliminación de aplicaciones químicas postcosecha (fungicidas, reguladores de crecimiento) disminuye costos directos y mejora la percepción del consumidor (Yahia et al., 2019). Los análisis de retorno de inversión (ROI) en operaciones bien diseñadas típicamente muestran períodos de recuperación de 3-7 años, con TIR (Tasa Interna de Retorno) de 15-30%, dependiendo de volúmenes, productos y gestión comercial. Desde la perspectiva de sostenibilidad, las AC contribuyen significativamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de Naciones Unidas, particularmente ODS 2 (Hambre Cero) mediante reducción de pérdidas alimentarias, ODS 12 (Producción y Consumo Responsables) al optimizar el uso de recursos, y ODS 13 (Acción por el Clima) mediante disminución de emisiones asociadas a desperdicio. El ahorro de recursos es considerable: cada tonelada de producto salvado del desperdicio evita las emisiones de GEI (gases de efecto invernadero) asociadas a su producción (estimadas en 0.5-2 toneladas CO₂ equivalente según producto), el agua virtual embebida (500-2000 litros/kg) y la tierra agrícola utilizada (Saltveit, 2016). La reducción en uso de agroquímicos postcosecha disminuye residuos y riesgos para operarios y

consumidores. El menor recambio de producto y descarte reduce significativamente la generación de residuos orgánicos. Estas externalidades positivas, aunque difíciles de monetizar completamente, incrementan el valor social de la tecnología y justifican en muchos casos subsidios o incentivos gubernamentales para su adopción.

Capítulo XII

12. Aplicaciones en transporte refrigerado

12.1 Carga térmica del producto (banano)

Masa transportada:

$$m = 18\,000\text{ k}$$

Calor específico del banano:

$$c_p = 3.6\text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

Si por una falla la temperatura sube de 4°C a 8°C :

$$Q = mc_p\Delta T$$

$$Q = 18\,000 \times 3.6 \times 4 = 259\,200\text{ kJ}$$

Eso equivale a:

$$Q = \frac{259\,200}{3600} = 72\text{ kWh}$$

El sistema de refrigeración deberá extraer 72 kWh adicionales para recuperar la temperatura.

12.2 Simulación de flujo de aire

Con un ventilador que mueve:

$$\dot{V} = 1.8 \text{ m}^3/\text{s}$$

y sección efectiva:

$$A = 0.7 \text{ m}^2$$

La velocidad media:

$$v = \frac{\dot{V}}{A} = 2.57 \text{ m/s}$$

Las simulaciones muestran que si la velocidad baja a menos de 0.5 m/s en zonas traseras, la diferencia térmica puede alcanzar:

$$\Delta T_{local} \approx 2^\circ\text{C}$$

generando puntos de maduración acelerada.

12.3 Índice ODP

El índice de potencial de destrucción de la capa de ozono (ODP, por sus siglas en inglés) es una medida de la cantidad de daño que un refrigerante puede causar a la capa de ozono. Un ODP más bajo es deseable, ya que indica que el refrigerante es menos dañino para la capa de ozono. El ODP se expresa en términos de una relación comparativa

con respecto a un refrigerante de referencia, el cloro-fluorocarbono (CFC) R-11, que tiene un ODP de 1.0.

El uso de refrigerantes con un ODP más bajo se ha vuelto cada vez más importante debido a la necesidad de proteger la capa de ozono y reducir el impacto ambiental de la refrigeración y el aire acondicionado. Por lo tanto, se han desarrollado y están disponibles refrigerantes con un ODP mucho más bajo, incluso cero (ASHRAE,ISO, 2009).

Nombres: Juan Asaquibay y Gloria Paltan

12.4 Simulación de cadenas de frío

La cadena de frío es un componente esencial para la seguridad alimentaria, y su objetivo es mantener la temperatura de ciertos productos estable y controlada a lo largo de su cadena de suministro, sin romper ningún eslabón, desde la postcosecha hasta llegar al consumidor final Bernad (2023)

La cadena de frío en productos alimenticios representa un sistema integral y continuo de control térmico diseñado para preservar la calidad, seguridad microbiológica y propiedades organolépticas de los alimentos perecederos desde su producción inicial hasta el consumo final por el consumidor. Como ingeniero en agroindustria con enfoque en tecnologías poscosecha y microbiología de alimentos, profundizo en este método reconociendo que su esencia radica en el mantenimiento ininterrumpido de temperaturas específicas generalmente entre 0-4°C para refrigeración, -18°C o inferiores para congelación, y rangos ultrabajos como -70°C en casos especializados a lo largo de todas las etapas

logísticas, lo que implica no solo refrigeración física sino también monitoreo riguroso mediante sensores IoT, registradores de datos y protocolos de trazabilidad para detectar y corregir cualquier desviación térmica que pueda activar reacciones enzimáticas, proliferación bacteriana (como *Listeria* o *Salmonella*) o cambios fisicoquímicos no deseados, como pardeamiento o pérdida de textura en frutas y hortalizas.

Desde la perspectiva técnica, la cadena de frío se desglosa en fases críticas que demandan integración ingenieril: inicia en el almacenamiento primario poscosecha o procesamiento industrial, donde cámaras frigoríficas con control de humedad relativa (85-95%) y sistemas de ventilación forzada evitan puntos calientes y condensación; prosigue con el transporte en vehículos refrigerados equipados con unidades de enfriamiento autónomas, GPS y alertas en tiempo real para gestionar fluctuaciones durante rutas largas; incluye almacenamiento intermedio en centros de distribución con registradores autónomos que validan cumplimiento normativo (como el Reglamento CE 852/2004 en la UE o estándares locales en Ecuador para exportación de banano y flores); y culmina en la exposición minorista y entrega al consumidor, donde la rotura por ejemplo, apertura prolongada de puertas o fallos eléctricos puede multiplicar riesgos microbiológicos exponencialmente, reduciendo la vida útil del producto hasta en un 50% según estudios en cadenas lácteas o cárnicas, por lo que se enfatiza en embalajes aislantes como poliestireno expandido o contenedores eutécticos para buffers térmicos.

Profundizando en su optimización agroindustrial, este método no es meramente reactivo sino proactivo, incorporando modelado predictivo

basado en curvas de enfriamiento (como las de Plank o hiperbólicas para predecir tiempos de 达到 de temperatura núcleo) y análisis de HACCP para puntos críticos de control, permitiendo en contextos como el ecuatoriano donde la altitud de Cuenca afecta tasas de transpiración en poscosecha diseñar cadenas híbridas que combinen pre-enfriamiento rápido (hidro o forzado) con blockchain para trazabilidad, minimizando pérdidas estimadas en 20-30% globalmente por fallos térmicos y alineándose con bioeconomía sostenible mediante eficiencia energética en refrigerantes ecológicos (R744 o hidrocarburos) que reducen huella de carbono mientras extienden mercados de exportación para productos como pitahaya o aguacate

12.4.1 Principios de modelado

Los principios de modelado de la cadena de frío se centran en garantizar la integridad de los productos sensibles a la temperatura (alimentos) mediante un control estricto y continuo de temperatura a lo largo de proceso logístico desde la producción hasta el consumidor final.

a) Conservación de la energía y transferencia de calor

El modelado de la cadena de frío se fundamenta en los principios de la termodinámica, los cuales describen el intercambio de energía térmica entre el producto y el entorno durante la refrigeración. En este proceso, el calor se desplaza principalmente por mecanismos de conducción, convección y, en menor medida, radiación dentro de los sistemas de enfriamiento. El análisis de estos fenómenos permite estimar y comprender la evolución de la temperatura del alimento a lo largo del tiempo.

b) Relación tiempo–temperatura y deterioro

La calidad del producto no depende solo de una temperatura fija, sino del tiempo que permanece expuesto a determinadas condiciones térmicas. A mayor temperatura y duración, más rápido se aceleran los procesos de descomposición y crecimiento microbiano.

c) Validación con datos reales

Todo modelo debe compararse con mediciones obtenidas en condiciones reales, como registros de sensores térmicos en cámaras o vehículos refrigerados. Esta verificación garantiza que las simulaciones representen fielmente el comportamiento del sistema en la práctica

12.4.2 Aplicaciones en transporte refrigerado

a) Carga térmica del producto (banano)

Masa transportada:

$$m = 18\,000\text{ k}$$

Calor específico del banano:

$$c_p = 3.6\text{ kJ/kg} \cdot K$$

Si por una falla la temperatura sube de $4^\circ C$ a $8^\circ C$:

$$Q = mc_p \Delta T$$

$$Q = 18\,000 \times 3.6 \times 4 = 259\,200\text{ kJ}$$

Eso equivale a:

$$Q = \frac{259\,200}{3600} = 72 \text{ kWh}$$

El sistema de refrigeración deberá extraer 72 kWh adicionales para recuperar la temperatura.

b) Simulación de flujo de aire

Con un ventilador que mueve:

$$\dot{V} = 1.8 \text{ m}^3/\text{s}$$

y sección efectiva:

$$A = 0.7 \text{ m}^2$$

La velocidad media:

$$v = \frac{\dot{V}}{A} = 2.57 \text{ m/s}$$

Las simulaciones muestran que si la velocidad baja a menos de 0.5 m/s en zonas traseras, la diferencia térmica puede alcanzar:

$$\Delta T_{local} \approx 2^\circ\text{C}$$

generando puntos de maduración acelerada.

12.4.3 Optimización y casos prácticos dentro del transporte de frutas y hortalizas

La mejora del transporte refrigerado de frutas y hortalizas tiene como finalidad reducir al mínimo el deterioro del producto y el gasto energético, asegurando que la temperatura se mantenga dentro de los valores adecuados para su conservación. Desde una perspectiva de ingeniería, este objetivo se alcanza optimizando el aislamiento térmico, el flujo y la distribución del aire, la duración del traslado y el dimensionamiento correcto del sistema de refrigeración.

12.5 Sistemas de refrigeración

- Los sistemas de refrigeración transfieren calor usando un refrigerante que absorbe calor en un evaporador y lo libera en un condensador.
- Existen varios tipos de refrigeración, siendo la refrigeración por compresión la más común para edificios y vehículos, basada en el ciclo de Carnot.
- Se diseñará el cuarto de refrigeración utilizando el refrigerante R-134^a, considerando que la prerefrigeración se realiza a 2-6°C y que la refrigeración comercial opera entre -18°C y 20°C.

12.5.1 Refrigerantes

- Los refrigerantes son sustancias que transfieren calor, siendo los más comunes CFCs, HCFCs y HFCs, aunque se promueven alternativas naturales como NH₃, CO₂ y propano por ser más eficientes y amigables con el medio ambiente.
- El índice de seguridad de un refrigerante (figura 1.4.) indica su estabilidad, flamabilidad o toxicidad, siendo los A1 los de menor peligrosidad.
- Los aislantes térmicos reducen la transferencia de calor por conducción, convección y radiación, siendo el poliuretano el material más común en cuartos de refrigeración, a menudo en paneles tipo sándwich.

12.5.2 Sistemas de almacenamiento y transporte

- Las rosas requieren estructuras de almacenamiento y transporte optimizadas para la circulación del aire y una refrigeración adecuada, como se muestra en la figura 1.6.
- En el mercado nacional de refrigeración (Benchmarking), existen sistemas de refrigeración al vacío, sistemas con evaporador y condensador, y sistemas compactos.
- Las estructuras de almacenamiento de manufactura nacional incluyen opciones fijas y móviles.

12.5.3 Tipos de refrigeración

Existen varios tipos de refrigeración, cada uno con sus propias características y aplicaciones.

a) Refrigeración por compresión:

Es el método más comúnmente utilizado para enfriar edificios, vehículos y otros sistemas. Consiste en la compresión de un gas refrigerante, lo que aumenta su temperatura, seguido de la liberación de la energía térmica en un intercambiador de calor, lo que permite enfriar el ambiente.

b) Refrigeración por absorción:

Utiliza una solución absorbente y un generador de vapor para enfriar. Es menos comúnmente utilizado que la refrigeración por compresión, pero es útil en aplicaciones donde no se puede utilizar electricidad, como en sistemas de refrigeración de barcos y caravana.

c) Refrigeración por enfriadores de líquido:

Utiliza un enfriador de líquido (como un intercambiador de calor) para transferir el calor del ambiente interior al exterior. Es comúnmente utilizado en sistemas de refrigeración de procesos industriales y en equipos de refrigeración de laboratorio.

d) Refrigeración por enfriadores de aire:

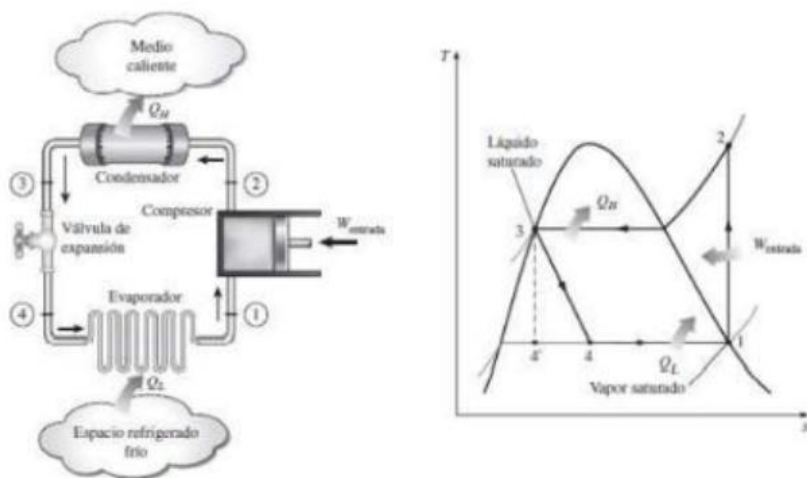
Utiliza un enfriador de aire (como un ventilador o una serpentina de enfriamiento) para transferir el calor del ambiente interior al exterior. Es comúnmente utilizado en sistemas de refrigeración de procesos industriales y en equipos de refrigeración de laboratorio.

e) Principios de la refrigeración por compresión

La refrigeración por compresión se basa en el ciclo de Carnot representada esquemáticamente en la figura 1, en el cual un fluido

refrigerante (generalmente un gas) es comprimido, calentado y luego expandido para enfriar un ambiente. El proceso comienza con el compresor, el cual comprime el gas refrigerante, aumentando su temperatura y presión. El gas caliente entonces pasa a través de un condensador, donde se libera la energía térmica al ambiente exterior y se condensa el gas a líquido. El líquido refrigerante entra a una válvula de expansión, donde se reduce su presión y se expande, lo que causa una disminución en su temperatura. El líquido enfriado entra al evaporador, donde se evapora y absorbe el calor del ambiente interior para enfriarlo. El gas refrigerante vaporizado vuelve al compresor para iniciar el ciclo de nuevo. Es importante que el refrigerante utilizado cumple con las regulaciones ambientales y tenga un buen rendimiento (Cengel, 2009).

Figura 12.1. Ciclo de Carnot






El Ciclo de Carnot es un ciclo termodinámico ideal y reversible que describe el funcionamiento de una máquina térmica teórica, propuesta por Sadi Carnot, para convertir calor en trabajo con la máxima eficiencia

posible entre dos depósitos de temperatura, uno caliente (T_H) y uno frío (T_C). Consiste en dos transformaciones isotérmicas (a temperatura constante) y dos adiabáticas (sin intercambio de calor), y es fundamental para establecer el límite teórico de eficiencia de cualquier máquina térmica real, según la Segunda Ley de la Termodinámica.

12.6 Estructura de almacenamiento:

Para el adecuado almacenamiento y disposición de producto se hace uso de estructuras generalmente metálicas, las alternativas se presentan a continuación en la Figura 12.2

Figura 12.2. Prerrefrigeración

<p>a)</p> 	<p>Ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Almacenamiento ágil • Riesgo de personal bajo • Mejor rendimiento térmico 	<p>Desventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Alto Costo • Baja capacidad • Ocupación de espacio alto
<p>b)</p> 	<p>Ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mayor Capacidad • Almacenamiento optimizable • Mejora el rendimiento térmico • Bajo costo 	<p>Desventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Riesgo de personal alto • Requiere de esfuerzo humano • Requiere un camino óptimo
<p>c)</p> 	<p>Ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gran Capacidad • Riesgo de personal bajo • Fácil organización • Bajo costo 	<p>Desventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Perdida de rendimiento térmico • Menor agilidad de almacenamiento

La prerefrigeración es un proceso que se realiza antes del almacenamiento a largo plazo de las rosas. Consiste en exponer las flores a temperaturas bajas (entre 2-6°C) durante un periodo de tiempo determinado para prevenir daños en las flores y mejorar su vida útil. Esta técnica se utiliza para inducir un estado de tolerancia al frío y para reducir la respuesta metabólica y fisiológica de las rosas durante el almacenamiento. La duración y la intensidad de la prerefrigeración varían según la variedad de rosas y su destino final. La prerefrigeración correcta puede aumentar la calidad y prolongar la vida de las rosas después de la cosecha (Namesny,2005).

12.6.1 Refrigeración comercial

Se define como refrigeración comercial a un sistema que se encuentra en un rango de temperatura entre -18/20°C, haciendo uso de refrigerantes amigables con el medio ambiente como CO₂ o NH₃ (Danfoss,2018).

12.6.2 Refrigerantes

Los refrigerantes son sustancias utilizadas en los sistemas de refrigeración y aire acondicionado para transferir calor del lugar que se desea enfriar al exterior. Los refrigerantes tienen la capacidad de absorber el calor mediante el proceso de evaporación y luego liberarlo mediante el proceso de condensación.

Existen varios tipos de refrigerantes, véase la figura 3, pero los más comunes son los refrigerantes mecánicos que utilizan compresión mecánica para funcionar. Entre los refrigerantes mecánicos más

utilizados se encuentran los clorofluorocarbonos (CFCs), hidroclorofluorocarbonos (HCFCs) y los hidrofluorocarbonos (HFCs). Los CFCs y los HCFCs son conocidos por tener un efecto dañino en la capa de ozono, por lo que se han prohibido en varios países. Los HFCs, son considerados como alternativas más seguras para el medio ambiente, pero tienen un alto potencial de calentamiento global.

En la actualidad, se están desarrollando nuevos refrigerantes naturales como el amoníaco (NH₃), el CO₂ y el propano (R290) entre otros, considerados como opciones más eficientes y amigables con el medio ambiente. Sin embargo, es importante tener en cuenta que todos los refrigerantes tienen cierto grado de impacto ambiental, y se están promoviendo programas de reciclaje y recuperación para minimizar su impacto en el medio ambiente (Mundo HVACR 2010).

Figura 12.3. Refrigerantes



12.6.3 Índice de seguridad

El índice de seguridad de un refrigerante es un indicador que señala la estabilidad, mabilidad o toxicidad de un refrigerante donde los

refrigerantes ubicados en la zona A1 son las que tienen menor peligrosidad para las personas y el medio ambiente, véase la figura 1., sin embargo, existen otros índices que se deben tener en cuenta al momento de seleccionar un refrigerante, (ASHRAE,2009).

12.6.4 Índice GWP

El índice de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) es una medida del impacto de un refrigerante en el cambio climático. Se refiere a la cantidad de calor que una cantidad dada de refrigerante retiene en la atmósfera en comparación con una cantidad igual de dióxido de carbono. Un GWP más bajo es deseable, ya que indica que el refrigerante es menos perjudicial para el medio ambiente. El GWP se expresa en términos de una relación comparativa con respecto a un refrigerante de referencia, el dióxido de carbono (CO₂), que tiene un GWP de 1.0.

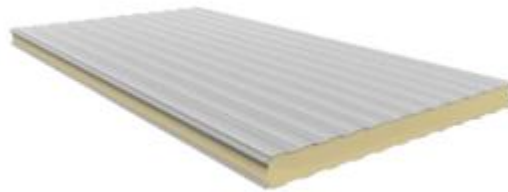
El uso de refrigerantes con un GWP más bajo se ha vuelto cada vez más importante debido a la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar el cambio climático. Por lo tanto, se han desarrollado y están disponibles refrigerantes con un GWP mucho más bajo, incluso cero, lo que los hace una opción más sostenible y ecológica (ASHRAE, ISO, 2009).

12.6.5 Aislantes térmicos

Los aislantes térmicos son materiales que reducen la transferencia de calor mediante la reducción de la conducción, la convección y la radiación térmica. La selección del material aislante depende de factores como el uso previsto, la ubicación, el tipo de edificio o estructura y la

fuente de calor o frío. El material más empleado en cuartos de refrigeración es el poliuretano, el cual comercialmente viene en forma de sandwich como el visto en la figura 4 con un material estructural como aluminio o acero.

Figura 12.4. Panel tipo sandwich



12.6.6 Influencia de la temperatura ambiente

La temperatura ambiente puede afectar un cuarto de refrigeración de varias maneras, incluyendo:

Aumento de la demanda de refrigeración: una temperatura ambiente más alta requiere más energía para mantener la temperatura interna del cuarto de refrigeración en el nivel deseado. Mayor desgaste del equipo: una temperatura ambiente más alta puede hacer que el equipo de refrigeración trabaje más duro, lo que puede causar un mayor desgaste y un aumento de la frecuencia de mantenimiento.

Reducción de la eficiencia energética: una temperatura ambiente más alta puede reducir la eficiencia energética del cuarto de refrigeración, lo que aumentará los costos de energía.

12.7 Sistemas de almacenamiento y transporte

Como ejemplo tenemos las rosas requieren de un sistema de almacenamiento y transporte, se tratan de estructuras en las cuales se disponen los productos para optimizar espacios permitiendo la buena circulación de aire, por ende, una buena refrigeración como el mostrado en la Figura 12.5., las estructuras deben tener la capacidad de carga necesaria para soportar la distribución del producto, así como, las temperaturas de trabajo que se manejan dentro de los cuartos de refrigeración. Las capacidades de las estructuras dependen principalmente de sus materiales de construcción y dimensionamiento. El empaquetado en la PYME será manual, empleando cartón corrugado para una sencilla y eficiente movilidad del producto.

Figura 12.5. Estructura de almacenamiento



12.7.1 Maquinaria y estructuras disponibles en el mercado (Benchmarking)

El reconocimiento de la oferta en el mercado nacional o extranjero de los equipos, maquinaria y componentes es fundamental para observar las ventajas y desventajas de un diseño particular.

a) Sistema de refrigeración de manufactura nacional

En el mercado nacional existen varias empresas dedicadas al diseño e instalación de sistemas de refrigeración, los cuales dimensionan y seleccionan los componentes necesarios para una determinada carga térmica. Los componentes no son de producción nacional por lo que son adquiridos en empresas importadoras de variedad de marcas extranjeras.

Tipo	Descripción
<p>a)</p> 	<p>La refrigeración al vacío es un sistema que ofrece un incremento en el rendimiento térmico del sistema, este sistema utiliza el vacío como medio para la refrigeración sin necesariamente deshumidificar las rosas, este tipo de sistema de refrigeración es ofrecido por la empresa Columbec, ubicado en la ciudad de Quito.</p>
<p>b)</p> 	<p>El sistema más común en la refrigeración comercial es mediante el uso del ciclo de refrigeración de Carnot, el cual utiliza la convección del aire como medio para la refrigeración de los productos, este sistema permite refrigerar variados metros cúbicos de espacios. Una empresa reconocida en el mercado nacional es la empresa Cora, ubicada en Quito, que ofrece este tipo de diseños térmicos.</p>
<p>c)</p> 	<p>Una alternativa para la refrigeración es mediante un sistema compacto donde se integran todos los componentes para cumplir con el ciclo de refrigeración de Carnot, una limitante de este tipo de sistemas es su reducido volumen de refrigeración. Este igualmente es proveído por diferentes empresas destacando la empresa Cora.</p>

b) Estructuras de almacenamiento de manufactura nacional

En la industria nacional se puede encontrar empresas dedicadas al diseño y construcción de estructuras de almacenamiento, algunas incluyen el tratamiento necesario para evitar la corrosión de los elementos en ambientes húmedos o salinos, sin embargo, la materia prima no es conseguida localmente, por lo que se recurre a las empresas importadoras de los materiales utilizados en la construcción de estas.

Tabla 12.1. Estructura de almacenamiento en el mercado. a) Estructura Fija (Grupobran, 2018). b) Estructura móvil (Diagnhos, 2018).

Tipo	Descripción
a)  Una estructura fija de almacenamiento con estanterías blancas y estantes azules, diseñada para ser instalada en un espacio fijo.	Las estructuras fijas como su nombre lo indica son estructuras que toman un espacio por un largo periodo con el fin de establecer vías de despacho de productos, estas son diseñadas y construidas por varias empresas en el país.
b)  Una estructura móvil de almacenamiento con estanterías grises y estantes azules, diseñada para ser movida y utilizada en diferentes sitios.	Una estructura móvil permite movilizar los productos a diferentes sitios con el fin de aligerar cargas al personal. Estos diseños son distribuidos por varias empresas a nivel nacional.

En síntesis, la cadena de frío emerge como el eje vertebral de la agroindustria moderna para productos alimenticios perecederos, integrando desde el preenfriamiento postcosecha hasta la dispensación minorista un control térmico ininterrumpido que no solo frena dinámicas microbiológicas adversas y reacciones enzimáticas sino que optimiza la

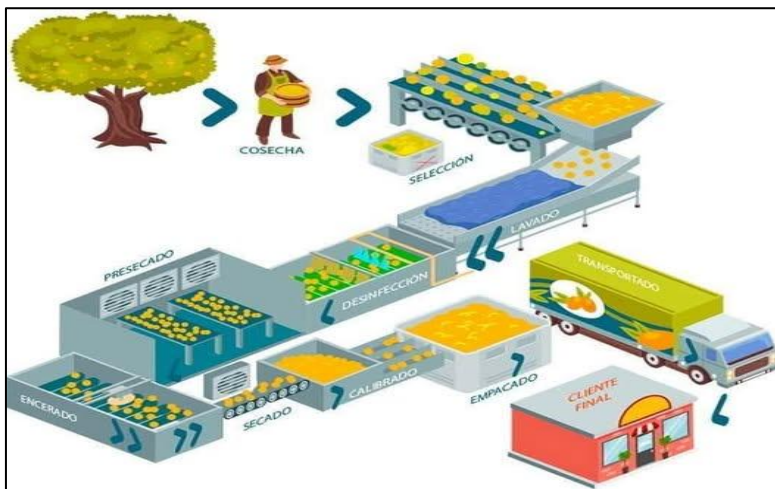
trazabilidad y sostenibilidad bioeconomía mediante sensores IoT que habilitan monitoreo predictivo y respuestas en tiempo real, reduciendo mermas globales estimadas en 20-40% y alineándose con normativas rigurosas para mercados exportadores como los de Ecuador en frutas tropicales. Esta metodología, al potenciar eficiencia energética con refrigerantes ecológicos y algoritmos de IA, redefine la competitividad agroindustrial al extender la vida útil comercial, garantizar inocuidad alimentaria y fomentar cadenas de valor circulares que minimizan el impacto ambiental mientras maximizan rentabilidad en contextos logísticos desafiantes como los de altitud variable

Capítulo XIII

13. Optimización de líneas de clasificación y empaque

El proceso de optimización en las líneas de clasificación, empaque, limpieza y calibrado de los productos poscosecha es una serie de pasos que garantiza el producto desde su recolección hasta llegar a la mesa del consumidor. Esta serie de pasos busca que el producto cumpla con los estándares de calidad que rigen en cada país para que pueda ser apto hacia el público. Estos procesos se han realizado en un inicio de manera manual, pero en los últimos años se ha ido mecanizando con el objetivo de optimizar recursos para una mayor rentabilidad para las industrias alimenticias como se muestra en la Figura 13.1 (Chimborazo Pinguil, 2022).

Figura 13.1. Representación gráfica de un proceso poscosecha



Fuente: Chimborazo Pinguil. 2022.

13.1 Limpieza de productos

a) Recepción e inspección

La recepción e inspección de productos constituye una etapa clave dentro del proceso logístico, en la cual se realiza la recepción física de las mercancías y su posterior verificación, con el fin de confirmar que las cantidades recibidas y las características de calidad coincidan con lo establecido en la orden de compra y la documentación de despacho correspondiente. Este procedimiento permite comprobar que los productos cumplen con los estándares técnicos y de calidad definidos por la organización antes de su incorporación al inventario. Asimismo, la correcta ejecución de esta etapa contribuye a la detección temprana de errores, daños, faltantes o productos defectuosos, reduciendo riesgos operativos y asegurando la eficiencia, confiabilidad y continuidad de las operaciones logísticas (Chimborazo Pinguil, 2022).

b) Limpieza seca

Procedimiento técnico orientado a la remoción de partículas sólidas no deseadas, tales como polvo, restos de suelo, residuos vegetales y posibles trazas de agroquímicos adheridos a los productos agrícolas, incluyendo frutas, hortalizas y granos, sin la utilización de agua. Este proceso se lleva a cabo mediante la aplicación de métodos mecánicos, como el uso de zarandas, sistemas de ventilación forzada, cepillos rotatorios u otros dispositivos similares, con el propósito de mejorar la presentación y preservar la calidad del producto. La correcta ejecución de esta práctica contribuye a minimizar daños físicos, disminuir el riesgo de contaminación e infecciones, y reducir pérdidas durante el almacenamiento y la comercialización. Asimismo, la limpieza en seco

debe realizarse en áreas protegidas, preferentemente bajo sombra o en instalaciones techadas, con el fin de evitar la exposición directa al sol, la cual podría afectar negativamente la integridad y las características fisiológicas del producto (Alemán Mancheno , 2021).

c) Limpieza húmeda

Consiste en la aplicación controlada de agua, sola o combinada con agentes detergentes y desinfectantes autorizados, con el objetivo de remover suciedad superficial, restos de suelo, residuos orgánicos, contaminantes químicos y microorganismos presentes en productos agrícolas como frutas, hortalizas y granos. Este procedimiento se realiza mediante diversas técnicas, entre las que se incluyen el lavado por inmersión, el lavado a presión, la aspersion y los sistemas de hidrogenfriamiento, contribuyendo significativamente a la mejora de la inocuidad, la calidad visual y la prolongación de la vida útil del producto antes de su consumo o procesamiento industrial. Para garantizar la eficacia del proceso y evitar efectos adversos, resulta fundamental controlar parámetros operativos como la calidad microbiológica del agua, su temperatura, el tiempo de exposición y la concentración de los productos utilizados, ya que una gestión inadecuada puede provocar daños físicos, estrés fisiológico o favorecer el desarrollo microbiano, especialmente en productos altamente sensibles (Vaca Granda, 2023).

d) Desinfección

La desinfección en la etapa de poscosecha constituye un procedimiento fundamental orientado a la reducción o eliminación de microorganismos patógenos, tales como bacterias, hongos y virus, presentes en frutas y

hortalizas una vez finalizada la cosecha. Este proceso se lleva a cabo mediante la aplicación controlada de agentes desinfectantes de naturaleza química o física, entre los que se incluyen soluciones sanitizantes convencionales y tecnologías alternativas como el uso de ozono, con el objetivo de garantizar la inocuidad y preservar la calidad del producto. La desinfección se realiza posteriormente a la limpieza inicial, utilizando sistemas como duchas sanitarias (drencher) o equipos de lavado, y resulta esencial para prevenir la contaminación cruzada, minimizar las pérdidas poscosecha y prolongar la vida útil de los productos. Asimismo, una correcta implementación de este proceso contribuye a mantener las características sensoriales, tales como sabor, textura y apariencia, asegurando la protección del consumidor y el cumplimiento de los estándares de calidad e inocuidad alimentaria (Vaca Granda, 2023).

e) Secado

El secado en la etapa de poscosecha corresponde a un proceso técnico mediante el cual se realiza la eliminación controlada de la humedad residual presente en frutas, hortalizas y granos, con el fin de disminuir la actividad de agua del producto. Esta reducción de humedad resulta fundamental para inhibir el desarrollo de microorganismos como bacterias y mohos, prolongar la vida útil y preservar las características físicas, químicas y organolépticas del alimento. El proceso de secado puede llevarse a cabo mediante métodos naturales, como la exposición controlada al aire y a la radiación solar, o mediante sistemas artificiales, tales como secadores mecánicos o deshidratadores, que permiten un mayor control de parámetros como temperatura, tiempo y flujo de aire.

Una correcta aplicación del secado facilita la preparación de los productos para su almacenamiento y posterior comercialización, contribuyendo a la reducción de pérdidas poscosecha y al mantenimiento de estándares de calidad e inocuidad (Hernández , Quinto, & Aguilar , 2022).

13.2 Clasificación y selección

La clasificación y separación de productos en la etapa de poscosecha constituyen operaciones fundamentales para la reducción de pérdidas y el aseguramiento de la calidad comercial de frutas y hortalizas. Estas actividades se basan en la evaluación de diversos criterios técnicos, tales como tamaño, peso, color, grado de madurez y estado sanitario del producto, considerando la ausencia de daños mecánicos, signos de pudrición o presencia de plagas. Los procesos de clasificación pueden realizarse de manera manual o mediante el uso de tecnologías especializadas, como sistemas mecánicos u ópticos, que permiten una selección más precisa y eficiente. A través de estas etapas, se diferencian los productos destinados al mercado en fresco los cuales requieren condiciones controladas de temperatura y humedad para su conservación de aquellos que serán destinados a procesos de transformación industrial. Posteriormente, cada grupo es sometido a prácticas específicas de manejo poscosecha, tales como lavado, encerado, enfriamiento y empaque adecuado, ajustadas a las características particulares de cada tipo de vegetal o fruta, ya sean hojas, raíces, tubérculos o frutos, con el fin de preservar su calidad, prolongar su vida útil y cumplir con los estándares de comercialización (Tierra Daqui, 2023).

13.3 Recolección cuidadosa

Las técnicas de recolección y manejo inicial en la etapa de poscosecha están orientadas a preservar la integridad física y la calidad de los productos agrícolas desde el momento de su cosecha. Estas prácticas incluyen un manejo cuidadoso, ya sea de forma manual o mediante el uso de equipos mecánicos adecuados, con el fin de evitar golpes, caídas y daños mecánicos que puedan afectar la vida útil del producto. Asimismo, se contempla una selección temprana en campo o en el área de acopio, mediante la cual se identifican y descartan aquellos productos que presentan daños visibles, defectos o signos de deterioro (García Yanchatuña, 2021).

13.3.1 Tipos de recolección

a) Manual vs. mecanizada

La recolección de productos agrícolas puede realizarse mediante métodos manuales o mecanizados, dependiendo del tipo de cultivo, su grado de delicadeza y el destino final del producto. La cosecha manual se caracteriza por permitir un manejo más cuidadoso y selectivo, lo que resulta especialmente adecuado para frutas y hortalizas que presentan mayor susceptibilidad a daños mecánicos y requieren conservar su integridad física y calidad comercial. Este método facilita además una selección inmediata del producto en el momento de la recolección. Por otra parte, la recolección mecanizada se lleva a cabo mediante el uso de cosechadoras y otros equipos especializados, y se emplea principalmente en cultivos extensivos como los granos. Este sistema se destaca por su alta eficiencia operativa, ya que permite realizar de

manera simultánea operaciones como el corte, la recolección y el desgrane, reduciendo tiempos y costos de producción. Sin embargo, su aplicación requiere condiciones específicas del cultivo y del terreno, así como una adecuada regulación de la maquinaria para minimizar pérdidas y asegurar la calidad del producto obtenido como se muestra en la Figura 13.2 (Santillan Martínez, 2023).

Figura 13.2. Representación de la recolección de frutas



Fuente: Santillan Martínez, 2023.

b) Momento óptimo

La determinación del momento óptimo de cosecha constituye un factor clave para preservar la calidad y la vida útil de los productos agrícolas. En general, se recomienda realizar la recolección durante las primeras horas del día, al amanecer, o en el transcurso del atardecer, cuando las temperaturas ambientales son más bajas y el estrés térmico sobre los productos es mínimo. Estas condiciones favorecen la conservación de la frescura, reducen la pérdida de humedad y disminuyen el riesgo de daños fisiológicos. En determinados casos, especialmente cuando el destino del producto implica transporte inmediato o de larga distancia, la cosecha puede programarse en las últimas horas del día, con el fin de

facilitar el traslado durante la noche y aprovechar temperaturas más favorables. La elección del horario de cosecha debe ajustarse al tipo de cultivo, a sus características fisiológicas y al destino final del producto, ya sea para mercado en fresco, almacenamiento o procesamiento, con el objetivo de optimizar la calidad y reducir las pérdidas poscosecha (Vásquez Arroyo, 2024).

c) Manipulación suave

La manipulación cuidadosa de los productos agrícolas durante las etapas de cosecha y poscosecha es esencial para preservar su integridad física y calidad comercial. Se debe evitar en todo momento lanzar, dejar caer o golpear los productos, ya que estas acciones generan daños mecánicos que pueden no ser visibles de forma inmediata, pero que aceleran el deterioro, favorecen la aparición de pudriciones y reducen la vida útil. En superficies duras, la altura de caída permitida debe ser mínima, recomendándose que no supere los 15 centímetros, con el fin de disminuir el impacto y prevenir lesiones internas en el producto. La implementación de prácticas de manipulación suave, junto con el uso de recipientes adecuados y superficies acolchadas, contribuye significativamente a la reducción de pérdidas poscosecha y al mantenimiento de la calidad, asegurando que los productos lleguen en condiciones óptimas a las etapas de almacenamiento, transporte y comercialización (Narvaez, Chilito, & Bastidas, 2024).

d) Instrumentos

El uso adecuado de instrumentos durante la cosecha resulta fundamental para garantizar una recolección eficiente y minimizar los daños físicos

en los productos agrícolas. Se recomienda emplear herramientas apropiadas para realizar el corte y levantamiento del producto, en lugar de extraerlo mediante arranque manual, ya que esta práctica puede provocar desgarros, lesiones en el tejido vegetal y un deterioro prematuro. La selección de cuchillos, tijeras de poda u otros implementos específicos debe ajustarse al tipo de cultivo y a sus características morfológicas. En determinados frutos, como la fresa, es conveniente dejar un pedúnculo corto durante el corte, lo que contribuye a reducir daños en la superficie del fruto, disminuir el riesgo de contaminación y prolongar su vida útil. La correcta utilización y mantenimiento de los instrumentos de cosecha forman parte de las buenas prácticas agrícolas y permiten preservar la calidad del producto desde su recolección hasta las etapas posteriores de manejo poscosecha (Chillagana Alomoto, 2023).

13.4 Transporte y recepción

El transporte y la recepción de productos en la etapa de poscosecha constituyen fases determinantes para la conservación de la calidad, frescura e inocuidad de frutas y hortalizas. Estas operaciones están orientadas a trasladar los productos desde el lugar de cosecha hasta el punto de comercialización o consumo final, procurando reducir al máximo las pérdidas mediante el control adecuado de variables como la temperatura, la humedad relativa y la prevención de daños mecánicos. Para ello, se emplean sistemas de embalaje apropiados, se optimizan los tiempos de tránsito y se implementa una logística eficiente que abarca desde la manipulación inicial hasta la entrega final del producto. Por su parte, la etapa de recepción incluye un proceso de inspección detallada

y un manejo cuidadoso al momento de recibir la mercancía, con el objetivo de verificar el cumplimiento de los estándares de calidad establecidos y asegurar su correcta derivación hacia las áreas de almacenamiento o procesamiento, manteniendo en todo momento condiciones ambientales óptimas como se muestra en la Figura 13.3 (Jarrin Bravo, 2023).

Figura 13.3. Representación de la recolección y transporte de productos en el Ecuador



Fuente: Jarrin Bravo, 2023.

Presión soportada por bandejas o cajas: Evitar daños y pérdidas.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Donde:

- σ = tensión sobre el producto (Pa)
- F = fuerza aplicada (N)

- $A = \text{área de contacto (m}^2\text{)}$

Esto ayuda a diseñar embalajes que no aplasten los productos.

13.4.1 Selección (Descarte)

- **Eliminación de defectos**

La eliminación de defectos es una práctica esencial dentro del manejo poscosecha, que consiste en la identificación y retiro oportuno de aquellos productos que presentan daños visibles o alteraciones que afectan su calidad. Esto incluye productos con perforaciones, síntomas de enfermedades, deformaciones, daños ocasionados por plagas o presencia de magulladuras y golpes mecánicos. La correcta separación de estos productos evita la propagación de patógenos, reduce el riesgo de contaminación cruzada y contribuye a mantener la calidad del lote, optimizando los procesos de almacenamiento, transporte y comercialización (Flores Buitron , 2021).

- **Detección de Contaminación**

La detección de contaminación durante el manejo poscosecha consiste en la identificación temprana de productos que presentan signos de moho, hongos u otros agentes contaminantes. La separación inmediata de estos productos resulta fundamental para prevenir la propagación de microorganismos al resto del lote, lo cual podría comprometer la calidad, la inocuidad y la vida útil de los productos sanos. Este control contribuye a reducir pérdidas, mantener condiciones higiénicas adecuadas y asegurar el cumplimiento de los estándares de calidad

establecidos para su almacenamiento y comercialización (Izquierdo Rodas , 2020).

Formula del modelo de crecimiento exponencial: Estimar deterioro por hongos o bacterias.

$$N_t = N_o * e^{ut}$$

Donde:

- N_t = número de microorganismos después de tiempo t
- N_0 = número inicial
- μ = tasa de crecimiento (1/h)
- t = tiempo (h)

Permite predecir cuánto tiempo se puede almacenar el producto según temperatura y humedad.

13.4.2 Clasificación (Graduación)

- **Por Tamaño/Calibre**

La clasificación por tamaño o calibre es un procedimiento técnico que permite agrupar los productos agrícolas de acuerdo con sus dimensiones y peso, con el fin de obtener lotes homogéneos. Este proceso puede realizarse mediante el uso de mallas clasificadoras, calibradores mecánicos o sistemas ópticos automatizados, los cuales garantizan mayor precisión y eficiencia. La correcta clasificación por calibre facilita el manejo posterior, mejora la presentación comercial del

producto y permite cumplir con los requisitos y estándares exigidos por los distintos mercados (Alcivar Cevallos , 2020).

- **Por Color/Madurez**

La clasificación de productos agrícolas por color y grado de madurez es un procedimiento esencial para garantizar que los lotes cumplan con los estándares de calidad requeridos por el mercado. Este proceso permite agrupar los productos de acuerdo con su coloración, firmeza y nivel de desarrollo fisiológico, asegurando que aquellos destinados al consumo inmediato, almacenamiento o procesamiento se encuentren en condiciones óptimas. La evaluación del color y la madurez se realiza de manera manual o mediante sistemas ópticos automatizados, lo que facilita la uniformidad del lote, mejorando su apariencia comercial y contribuyendo a prolongar la vida útil, reduciendo pérdidas poscosecha y asegurando la satisfacción del consumidor final (Alcivar Cevallos , 2020).

- **Por forma y consistencia**

La clasificación de productos agrícolas por forma y consistencia permite organizar los lotes según sus características físicas, como tamaño, simetría y textura, asegurando que los productos presenten uniformidad dentro de cada grupo. Este proceso facilita un envasado más eficiente, evita daños durante el transporte y mejora significativamente la apariencia visual del producto, aspectos que resultan fundamentales para su aceptación en el mercado. Además, la agrupación por estas características contribuye a optimizar la presentación comercial, incrementar la competitividad del producto y mantener su calidad

durante almacenamiento, distribución y exhibición al consumidor final (Alcivar Cevallos , 2020).

13.4.3 Métodos de conservación del producto

- **Tratamientos Poscosecha (Opcional)**

Los tratamientos poscosecha constituyen intervenciones opcionales pero estratégicas que se aplican a los productos agrícolas, especialmente a frutas, con el objetivo de prolongar su vida útil, mantener su calidad y reducir el deterioro durante almacenamiento y transporte. Entre estos tratamientos se incluyen la aplicación de ceras comestibles que mejoran la apariencia y reducen la pérdida de humedad, el uso de fungicidas autorizados para prevenir el desarrollo de enfermedades fúngicas, y tratamientos con sales de calcio que fortalecen la estructura celular y disminuyen la incidencia de daños fisiológicos (Garay Mejia & Saldarriaga Alcívar , 2021).

- **Enfriamiento (Preenfriado)**

El enfriamiento o preenfriado es una etapa fundamental en el manejo poscosecha que consiste en disminuir de manera rápida y controlada la temperatura de frutas, hortalizas y otros productos agrícolas recién cosechados. Este procedimiento busca ralentizar los procesos metabólicos, como la respiración y la maduración, lo que ayuda a prolongar la vida útil y mantener la calidad del producto durante almacenamiento y transporte. El preenfriado puede realizarse mediante distintas técnicas, como la circulación de aire frío forzado o la inmersión en agua fría, dependiendo del tipo de producto y sus características

fisiológicas. Además de conservar la frescura, este proceso contribuye a reducir la pérdida de peso, minimizar el riesgo de deterioro fisiológico y asegurar que los productos lleguen al mercado o al consumidor final en condiciones óptimas, cumpliendo con los estándares de calidad (García Yanchatuña, 2021).

- **Empaque y embalaje**

El empaque y embalaje representan etapas críticas dentro del manejo poscosecha, ya que permiten proteger los productos agrícolas previamente clasificados durante su almacenamiento, transporte y comercialización. Este proceso consiste en colocar los productos en materiales que amortigüen golpes, eviten daños mecánicos y preserven sus propiedades físicas y organolépticas. Además, los envases deben contar con sistemas de ventilación adecuados para mantener la circulación de aire, controlar la humedad y prevenir la acumulación de gases que puedan acelerar la maduración o el deterioro. El etiquetado correcto de los paquetes proporciona información sobre el producto, su origen, fecha de cosecha y condiciones de conservación, lo que facilita la trazabilidad, asegura el cumplimiento de normas de calidad y mejora la presentación comercial, incrementando su valor y aceptación en el mercado (García Yanchatuña, 2021).

13.4.4 Factores claves a controlar

- **Temperatura**

La temperatura constituye uno de los factores más determinantes en el manejo poscosecha, ya que influye directamente en la velocidad de los

procesos metabólicos de frutas, hortalizas y otros productos agrícolas. Un control adecuado de la temperatura permite regular la respiración, ralentizar la maduración y minimizar el deterioro fisiológico, lo que contribuye significativamente a prolongar la vida útil del producto. Además, mantener rangos de temperatura óptimos durante almacenamiento, transporte y exhibición reduce la pérdida de humedad, previene el desarrollo de microorganismos y asegura que los productos lleguen al consumidor final en condiciones de calidad y frescura óptimas. Por estas razones, la gestión térmica constituye un componente esencial dentro de las prácticas de poscosecha y de los sistemas de conservación modernos considerando los rasgos de temperatura para frutas y hortalizas, como se presenta en la tabla 1 (Maridueña Moran, 2024).

Fórmula básica de energía a remover (transferencia de calor)

$$Q = m * c * \Delta T$$

Q = energía a remover (J)

m= masa de producto (kg)

c= capacidad calorífica específica del producto (J/kg·°C)

$$\Delta T = T_{\text{inicial}} - T_{\text{final}}$$

Tabla 13.1. Temperaturas tolerantes para mantener algunas frutas y hortalizas en buenas condiciones

Producto	Temperatura de almacenamiento (°C)	Comentarios / Observaciones
Manzana	0 – 4	Mantener alta humedad relativa (90–95%) para evitar arrugamiento.
Fresa	0 – 2	Muy sensible; refrigerar inmediatamente después de la cosecha.
Tomate	10 – 13	Evitar temperaturas inferiores a 10°C para prevenir daños por frío.
Lechuga	0 – 2	Alta humedad; sensibles a marchitez y daños mecánicos.
Pimiento	7 – 10	Evitar temperaturas demasiado bajas para prevenir lesiones por frío.
Plátano / Banana	13 – 15	No refrigerar; temperaturas bajas causan pardeamiento del fruto.
Papa	7 – 10	Evitar exposición a luz y temperaturas muy bajas para prevenir germinación y pardeamiento.

Zanahoria	0 – 1	Mantener alta humedad relativa para evitar deshidratación.
------------------	-------	--

- **Humedad relativa**

La humedad relativa constituye un factor crítico en la conservación poscosecha de frutas, hortalizas y otros productos agrícolas, ya que influye directamente en la pérdida de agua y en la actividad microbiana. Mantener niveles adecuados de humedad evita la deshidratación de los tejidos, lo que se traduce en la prevención de la marchitez y el arrugamiento de los productos, preservando su firmeza y apariencia. Además, una gestión controlada de la humedad relativa contribuye a limitar el crecimiento de patógenos, como mohos y bacterias, que pueden acelerar el deterioro y generar pérdidas durante almacenamiento y transporte. Por ello, ajustar y monitorear la humedad relativa en cámaras de conservación y sistemas de transporte es fundamental para garantizar la calidad, frescura y vida útil de los productos hasta su llegada al consumidor final (Maridueña Moran, 2024).

Fórmula de pérdida de agua por hora (evaporación):

$$m_w = k * A * (P_s - P_a)$$

Donde:

- m_w = masa de agua perdida (kg/h)
- k = coeficiente de transferencia de masa (kg/m²·h·Pa)

- A = área de superficie del producto (m^2)
- P_s = presión de vapor saturado a la temperatura del producto (Pa)
- P_a = presión de vapor en el aire circundante (Pa)
- **Atmósfera controlada/Modificada**

La aplicación de atmósferas controladas o modificadas en productos agrícolas poscosecha es una técnica avanzada que permite regular de manera precisa las concentraciones de gases, principalmente oxígeno, dióxido de carbono y, en algunos casos, etileno, dentro de los espacios de almacenamiento o transporte. Ajustar estos parámetros gasométricos reduce la velocidad de respiración y la maduración de frutas y hortalizas, prolongando significativamente su vida útil y preservando sus características organolépticas, como sabor, textura y color. Además, el manejo de la atmósfera ayuda a minimizar el desarrollo de microorganismos y la aparición de deterioro fisiológico, contribuyendo a mantener la calidad durante períodos más largos. Esta técnica es especialmente útil para productos sensibles, como manzanas y peras, requieren un monitoreo constante y controlado para asegurar que las condiciones se mantengan dentro de los rangos óptimos establecidos para cada tipo de cultivo (Maridueña Moran, 2024).

Velocidad de respiración (para calcular O_2 y CO_2 a controlar):

Ajustar gases para alargar la vida útil.

$$R = K_r * (Co_2 - Co_{2eq})$$

Donde:

- R = tasa de consumo de oxígeno (mol/s)
- k_r = coeficiente de transferencia (mol/(s·Pa))
- C_{O_2} = concentración de O₂ en atmósfera
- $C_{O_2,eq}$ = concentración de equilibrio

Permite dimensionar sistemas de ventilación o almacenamiento con gas controlado.

- **Higiene**

La higiene en la etapa poscosecha es un componente fundamental para garantizar la inocuidad y la calidad de los productos agrícolas. La implementación de Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) asegura que todas las operaciones, desde la manipulación hasta el envasado, se realicen en condiciones sanitarias adecuadas, minimizando riesgos de contaminación física, química o microbiológica. Además, el establecimiento de sistemas de gestión como HACCP (Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control) permite identificar, evaluar y controlar los posibles riesgos asociados a cada etapa del proceso, asegurando que se cumplan los estándares de seguridad alimentaria. La correcta aplicación de estas prácticas y sistemas contribuye a reducir pérdidas poscosecha, mantener la calidad del producto y proteger al consumidor final, garantizando que los alimentos lleguen en condiciones óptimas desde la cosecha hasta la venta (Maridueña Moran, 2024).

- **Tratamientos especiales**

Los tratamientos especiales aplicados en la etapa de poscosecha comprenden un conjunto de técnicas y procedimientos destinados a conservar, mejorar y prolongar la calidad, la inocuidad y la vida útil de los productos agrícolas una vez finalizada la cosecha. Estas prácticas tienen como objetivo principal el control de enfermedades, la reducción de la incidencia de plagas y la mitigación del deterioro fisiológico que puede producirse durante el almacenamiento, el transporte y la comercialización. Los tratamientos pueden incluir métodos de tipo físico, como la aplicación de calor controlado, el uso de atmósferas modificadas o la irradiación; métodos de naturaleza química, como la aplicación regulada de fungicidas y otros agentes autorizados; así como técnicas innovadoras y específicas para determinados productos, entre ellas procesos diferenciados como el método Honey utilizado en el beneficio del café. La correcta selección e implementación de estos tratamientos resulta fundamental para garantizar que los productos mantengan condiciones óptimas hasta su llegada al consumidor final, cumpliendo con los estándares de calidad, seguridad alimentaria y exigencias del mercado (Serna Escolano, 2021).

Formula por pérdida de peso y transpiración

$$\%Perdida = \frac{W_i - W_f}{W_i} * 100$$

- W_i = peso inicial
- W_f = peso final

Permite cuantificar cuánto pierde un producto por deshidratación, útil para ajustar humedad relativa.

13.5 Calibrado de productos

El calibrado de productos poscosecha es el proceso mediante el cual los frutos, hortalizas o granos se clasifican según su tamaño, peso, forma o calibre, con el objetivo de agruparlos de manera uniforme. Esta etapa permite optimizar el envasado, transporte y almacenamiento, reduciendo daños y pérdidas. Además, asegura que los productos cumplan con los estándares de calidad del mercado y mejoren su presentación comercial. Se puede realizar de forma manual o mediante equipos mecánicos y sistemas automatizados, dependiendo del tipo de producto. El calibrado contribuye a una maduración más homogénea y a prolongar la vida útil del lote (Vera Torres , 2023).

13.5.1 Métodos de calibrado

- **Manual**

Este método se emplea principalmente en frutas delicadas, como fresas, cerezas o frambuesas, que requieren un manejo extremadamente cuidadoso para evitar magulladuras o daños superficiales. Los trabajadores seleccionan y clasifican los productos uno por uno, basándose en su experiencia y criterio, utilizando herramientas sencillas como bandejas, pinzas o guantes para manipularlos con suavidad. Además de permitir una selección precisa según tamaño, color o madurez, la clasificación manual garantiza que los frutos que no cumplen los estándares de calidad sean retirados antes del envasado, contribuyendo a mantener la uniformidad del lote y prolongar su vida útil. Este método es especialmente útil en productos destinados a venta

en fresco o mercados de alta calidad, donde la apariencia y la integridad del fruto son factores decisivos (Vera Torres , 2023).

- **Mecánico / Automático**

Este método se aplica principalmente a productos más resistentes como granos, manzanas, naranjas o tubérculos, que pueden soportar un manejo más intensivo sin dañarse. Se utilizan equipos especializados, como cribas, rodillos calibradores, cintas transportadoras y sistemas ópticos o electrónicos, que permiten separar los productos de manera rápida y precisa según su tamaño, peso, forma o incluso color. Este tipo de calibrado automatizado no solo mejora la uniformidad del lote, sino que también incrementa la eficiencia y reduce el tiempo de procesamiento en comparación con la selección manual. Además, permite procesar grandes volúmenes de producto, manteniendo estándares de calidad consistentes y facilitando el envasado y transporte seguro hacia el mercado o almacenamiento prolongado como se muestra en la Figura 13.4 (Vera Torres , 2023).

Figura 13.4. Mallas o cribas por separan por diámetro



Fuente: Vera Torres, 2023.

Este método consiste en el uso de mallas o cribas con orificios de distintos tamaños para clasificar los productos según su diámetro. Los frutos, granos o tubérculos pasan a través de estas estructuras, de modo que los que son demasiado grandes quedan en la parte superior y los más pequeños atraviesan los agujeros, logrando una separación precisa y uniforme. Este sistema es muy útil para garantizar la homogeneidad de los lotes, optimizar el envasado y facilitar la comercialización, ya que los productos del mismo tamaño tienen un mejor aspecto visual y se conservan de manera más uniforme. Además, al automatizarse con cintas transportadoras o vibradores, permite procesar grandes volúmenes de manera rápida y eficiente, reduciendo tiempos de manipulación y riesgos de daños, como se muestra en la Tabla 13.2, donde se detallan los tamaños de los tamices para diferentes productos (Vera Torres , 2023).

Tabla 13.2. Tamaño de los tamices para los diferentes productos

Producto	Tamaño de tamiz / malla	Diámetro de producto (mm)	Uso / Comentario
Granos de maíz	6 – 12 mm	6 – 12	Separación por tamaño para venta y procesamiento industrial
Trigo	2 – 5 mm	2 – 5	Para limpieza y homogeneidad en molienda
Arroz	2 – 4 mm	2 – 4	Selección de granos enteros y descarte de fragmentos
Manzanas	60 – 120 mm	60 – 120	Para clasificación según calibre para comercialización
Naranjas	50 – 100 mm	50 – 100	Separación por tamaño para embalaje y transporte
Fresas	15 – 25 mm	15 – 25	Solo tamices finos en procesos manuales o semi-automáticos

Tomates	30 – 80 mm	30 – 80	Clasificación por tamaño y madurez
Papas / Tubérculos	40 – 90 mm	40 – 90	Para selección de calibres homogéneos antes de embalaje

13.5.2 Calibradores mecánicos: Rodillos o cintas con espacio ajustable

Este método utiliza rodillos, cintas transportadoras o tambores con espacios ajustables para clasificar los productos según su tamaño o calibre. Los productos se desplazan sobre los rodillos o cintas y, dependiendo de su diámetro o grosor, pasan a diferentes canales o se detienen en puntos específicos, logrando una separación precisa y uniforme. Este sistema es especialmente útil en frutas y tubérculos medianos o grandes, ya que permite manejar volúmenes importantes sin comprometer la integridad del producto. Además, facilita la estandarización de los lotes, optimiza el envasado y transporte, y reduce la necesidad de intervención manual, aumentando la eficiencia y asegurando que los productos lleguen al mercado con apariencia y calidad homogénea (Romo Sunta, 2024).

13.5.3 Sistemas ópticos o electrónicos: Detectan tamaño, color y forma automáticamente

Estos sistemas utilizan cámaras, sensores y software especializado para analizar automáticamente características de los productos como tamaño, color, forma e incluso defectos superficiales. A medida que los

productos pasan por la línea de clasificación, los sensores detectan las diferencias y los desvían hacia canales específicos según los criterios preestablecidos, logrando una selección precisa y homogénea. Este método es especialmente útil en frutas y hortalizas destinadas a mercados de alta calidad o exportación, donde la uniformidad y apariencia visual son fundamentales. Además, permite procesar grandes volúmenes con rapidez y reducir la intervención manual, lo que disminuye riesgos de daño y errores humanos, asegurando productos consistentes y manteniendo su vida útil durante almacenamiento y transporte como se muestra en la Figura 13.5 (Lojano Angamarca , 2023).

Figura 13.5. Formas de empaque y embalaje



Fuente: Lojano Angamarca. 2023.

13.6 Ejercicio práctico

13.6.1 Proceso poscosecha integral de manzanas

Empresa: FRUTAS ANDINAS S.A.

Provincia: Pichincha, Ecuador

Variedad: Red Delicious

Cantidad cosechada: 2.000 kg

Proceso poscosecha integral de manzanas, considerando recolección, limpieza, enfriamiento, conservación, clasificación, empaque y transporte.

a) Recolección y transporte

Cálculo de tensión en embalajes

Datos:

$$A = 0.4 \text{ m}^2$$

$$F = 80 \text{ N}$$

Fórmula:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Donde:

- σ = tensión sobre el producto (Pa)
- F = fuerza aplicada (N)
- A = área de contacto (m^2)

Cálculo:

$$\sigma = 80 / 0.4 = 200 \text{ Pa}$$

Resultado: $\sigma = 200 \text{ Pa}$

b) Limpieza y desinfección

Cálculo de crecimiento microbiano

Datos:

$$N_0 = 120 \text{ UFC/g}$$

$$\mu = 0.03 \text{ h}^{-1}$$

$$t = 12 \text{ h}$$

Fórmula:

$$N_t = N_0 * e^{\mu t}$$

Donde:

- N_t = número de microorganismos después de tiempo t
- N_0 = número inicial
- μ = tasa de crecimiento (1/h)
- t = tiempo (h)

Cálculos:

$$\mu t = 0.36$$

$$e^{(0.36)} = 1.4333$$

$$N_t = 120 \times 1.4333 = 172 \text{ UFC/g}$$

Resultado: $N_t = 172 \text{ UFC/g}$

c) Enfriamiento y conservación

Temperatura de almacenamiento

Se recomienda de $0 - 4^\circ\text{C}$ con humedad relativa del 90-95%, según la tabla 1 sobre las temperaturas tolerantes para mantener algunas frutas y hortalizas en buenas condiciones. Si se usa temperatura inferior a 0°C , se producirán daños por frío; si es superior a 4°C , se acelerará la maduración.

Cálculo de energía para enfriamiento

Datos:

$$m = 2.000 \text{ kg}$$

$$T_1 = 26 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$c = 3.6 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$$

Fórmula:

$$Q = m * c * \Delta T$$

Donde:

- Q = energía a remover (J)
- m = masa de producto (kg)
- c = capacidad calorífica específica del producto (J/kg $\cdot^\circ\text{C}$)
- $\Delta T = T_{\text{inicial}} - T_{\text{final}}$

Cálculo

$$\Delta T = 24 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Q = 2.000 \times 3.6 \times 24 = 172.800 \text{ kJ}$$

Resultado: $Q = 172.800 \text{ kJ}$

Cálculo de pérdida de agua por evaporación

Datos:

$$k = 0.00002 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}$$

$$A = 15 \text{ m}^2$$

$$P_s = 2.339 \text{ Pa}$$

$$P_a = 2.105 \text{ Pa}$$

Fórmula:

$$m_w = k * A * (P_s - P_a)$$

Donde:

- m_w = masa de agua perdida (kg/h)
- k = coeficiente de transferencia de masa ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}$)
- A = área de superficie del producto (m^2)
- P_s = presión de vapor saturado a la temperatura del producto (Pa)
- P_a = presión de vapor en el aire circundante (Pa)

Cálculos:

$$\Delta P = 0.234 \text{ Pa}$$

$$m_w = 0.00002 \times 15 \times 0.234 = 0.0000702 \text{ kg/h}$$

Resultado: 0.0702 g/h

Cálculo de tasa de respiración**Datos:**

$$k_r = 0.00005 \text{ mol/s} \cdot \text{Pa}$$

$$C_{O_2} = 21.278 \text{ Pa}$$

$$C_{O_2eq} = 2.127.8 \text{ Pa}$$

Fórmula:

$$R = K_r * (C_{O_2} - C_{O_2eq})$$

Donde:

- R = tasa de consumo de oxígeno (mol/s)
- k_r = coeficiente de transferencia (mol/(s·Pa))
- C_{O_2} = concentración de O_2 en atmósfera
- $C_{O_2,eq}$ = concentración de equilibrio

Cálculo:

$$R = 0.00005 \times 19.150.2 = 0.9575 \text{ mol/s}$$

Resultado: $R = 0.9575 \text{ mol/s}$

Cálculo de pérdida de peso

Datos:

$$W_i = 2.000 \text{ kg}$$

$$W_f = 1.960 \text{ kg}$$

Fórmula:

$$\%Perdida = \frac{W_i - W_f}{W_i} * 100$$

- W_i = peso inicial
- W_f = peso final

Cálculo:

$$\%P = (40/2.000) \times 100 = 2\%$$

Resultado: 2%

d) Clasificación y calibrado

Tamaño de tamiz

Tamaño de tamiz = 60 – 120 mm

Diámetro del producto = 60 – 120 mm

e) Empaque y transporte

Condiciones finales de transporte:

Temperatura = 2 °C

Humedad relativa = 92%

13.7 Conclusión

El ejercicio aplicó todos los cálculos para optimizar el proceso poscosecha de 2,000 kg de manzanas. Se calculó la tensión de 200 Pa en embalajes para evitar daños mecánicos y reducir pérdidas. El crecimiento microbiano de 172 UFC/g se determinó para justificar la desinfección y cumplir normativas de inocuidad. La energía de 172,800 kJ para enfriamiento se calculó para dimensionar equipos y prolongar la vida útil de 21 a 35 días. La pérdida de agua de 0.0702 g/h se estimó para ajustar la humedad relativa y evitar arrugamiento. La tasa de consumo de oxígeno de 0.9575 mol/s se calculó para configurar una atmósfera controlada que reduzca la respiración en un 65%, mientras que la pérdida de peso del 2% se midió para confirmar que las condiciones de conservación son óptimas para la comercialización.

Capítulo XIV

14. Cálculo de vida útil mediante cinética de deterioro

14.1 Vida útil y parámetros críticos de calidad de un alimento

La vida útil se define como el período de tiempo durante el cual un producto alimenticio permanece inocuo, conserva las características sensoriales, fisicoquímicas, microbiológicas y funcionales deseadas, y cumple cualquier declaración nutricional o de propiedades saludables que haga referencia al mismo, siempre que se respeten las condiciones de conservación recomendadas (Gutiérrez et al., 2020).

Por ello, para estimar la vida útil de un producto alimenticio es determinante conocer los diferentes mecanismos de alteración que conllevarán a su deterioro, incluyendo la pérdida de las características organolépticas que afectan a la calidad sensorial del alimento, la pérdida de las propiedades nutricionales y saludables declaradas y la pérdida de inocuidad del alimento (Gutiérrez et al., 2020).

Para realizar una evaluación de la calidad de los alimentos se aplican procesos y técnicas que miden los estándares establecidos (Control de Calidad de Alimentos: Cómo Evaluarlos, 2024). Podemos diferenciar entre las siguientes formas de evaluación en el control de calidad de alimentos:

- **Análisis sensorial:** esta técnica implica la evaluación de los alimentos utilizando los sentidos humanos: la vista, el olfato, el gusto y el tacto. Los paneles de degustación entrenados pueden identificar varias características del alimento como el sabor, su

textura, el aroma o la apariencia visual, algo que utilizan para determinar la calidad del producto (Análisis sensorial para control de calidad de los alimentos, 2020).

- **Análisis químico:** las pruebas químicas se aplican para detectar la presencia de sustancias no deseadas, por lo general, contaminantes o aditivos. Este procedimiento puede incluir análisis de nutrientes, detección de residuos o de pesticidas, composición de vitaminas y minerales (Control de Calidad de Alimentos: Cómo Evaluarlos, 2024).
- **Análisis microbiológico:** se realiza para identificar la presencia de microorganismos patógenos o indicadores de contaminación bacteriana en los alimentos. Gracias a este tipo de análisis se puede garantizar la seguridad de los alimentos y prevenir enfermedades transmitidas por alimentos (Basic Farm, 2021).
- **Pruebas físicas:** las pruebas físicas permiten evaluar la consistencia, la textura y todas las demás características físicas de un producto alimentario. Dentro de estos procedimientos también se añaden pruebas de resistencia a la compresión, viscosidad, humedad o cualquier otro elemento que se considere relevante (Control de Calidad de Alimentos: Cómo Evaluarlos, 2024).
- **Cinética de deterioro en los alimentos:** Los alimentos son sistemas fisicoquímicos y biológicamente activos, por lo que se conceptúa que su calidad es un estado dinámico que se mueve en forma continua a niveles más bajos (Terry, s.f.).

Esto indica que cada alimento tiene un periodo de tiempo determinado, después de su producción, durante el cual mantiene un nivel de calidades organolépticas, nutricionales y de seguridad (Terry, s.f.).

Por lo tanto, la cinética de deterioro estudia la velocidad a la que ocurren las reacciones físicas, químicas, bioquímicas y microbiológicas que provocan la pérdida de calidad, inocuidad o valor nutricional de un alimento durante su almacenamiento y distribución (Terry, s.f.).

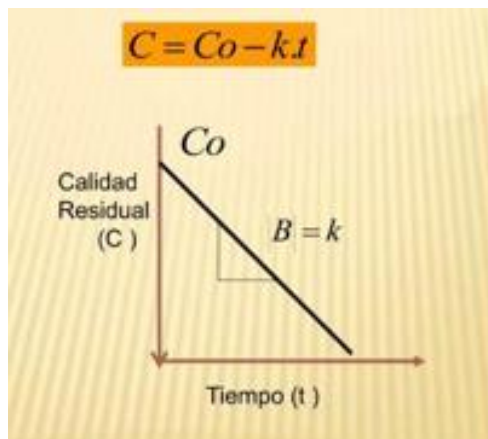
- **Órdenes de reacción aplicados en los alimentos:** Las órdenes de reacción aplicadas en los alimentos se utilizan para describir matemáticamente la velocidad con la que ocurre un proceso de deterioro (pérdida de calidad, nutrientes, color, textura o desarrollo de defectos) a lo largo del tiempo. Su finalidad principal es modelar el deterioro y estimar la vida útil de un alimento (Nuñez et al., 2017).
- **Reacciones de orden cero ($n=0$):** Son reacciones cuya velocidad no se ve afectada por la concentración o en la que las concentraciones de los reactivos no cambian con el tiempo. Así, la tasa de reacción permanece constante (Villota, 2018).

La velocidad de reacción es independiente de la concentración de la sustancia que reacciona, además la concentración de los productos aumenta linealmente con el tiempo, la gráfica se representará en base a la concentración de productos en relación con el tiempo que será una línea recta (Villota, 2018).

Hay dos condiciones que pueden dar lugar a una reacción de orden cero:

- La primera es cuando una pequeña parte de las moléculas reactivas se encuentra en el lugar/estado adecuado para reaccionar, y una vez que esa parte se agota, se repone inmediatamente a partir del "pool" total de moléculas (Reacción de orden cero, 2024)
- La segunda se produce cuando una pequeña concentración de reactivo reacciona con un catalizador heterogéneo o un reactivo con una concentración mucho mayor (Reacción de orden cero, 2024)

Figura 14.1. Ecuación y grafica de orden 0 (temperatura constante)

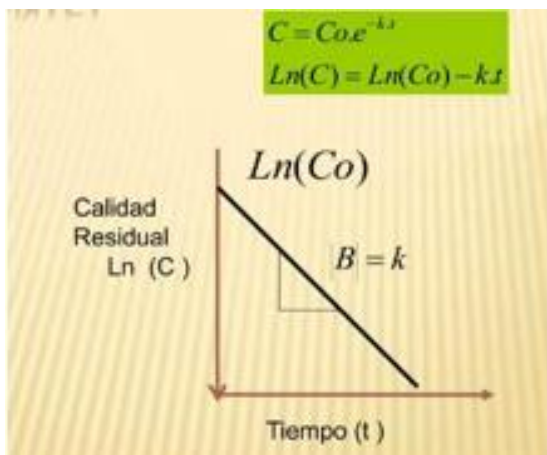


Fuente: <https://es.slideshare.net/slideshow/practica-4-cinetica-del-deterioro-de-alimentos-frescos/41534303#23>

- **Reacciones de primer orden (n=1):** La mayoría de las reacciones implicadas en el procesamiento y almacenamiento de los

alimentos siguen una cinética de reacción de primer orden ($n = 1$), la velocidad depende de la concentración del componente que se deteriora, como por ejemplo, la degradación de vitaminas, produciendo una disminución en el valor nutricional del alimento o la degradación de antocianinas durante el almacenamiento de alimentos coloreados, produciendo una pérdida en la apariencia del mismo (Estrada, 2022).

Figura 14.2. Ecuación y grafica de orden 1 (temperatura constante).



Fuente: <https://es.slideshare.net/slideshow/practica-4-cinetica-del-deterioro-de-alimentos-frescos/41534303#23>

- **Reacciones de segundo orden ($n=2$):** Su rapidez depende de la concentración de uno de los reactivos elevada a la segunda potencia o de la concentración de dos reactivos diferentes, cada uno elevado a la primera potencia (Cruz, s/f).

Reacciones de segundo orden se han reportado en los cambios de aminoácidos que participan en la reacción de Maillard. Un ejemplo de

ello es la pérdida de lisina en la leche en la leche tratada por altas temperaturas, (UHT), debido a la reacción de Maillard (Estrada, 2022).

- **Influencia de la temperatura en la vida útil:** La temperatura es el factor externo más influyente en la velocidad de las reacciones químicas y el crecimiento biológico que determinan el deterioro de un alimento. Un control inadecuado de este parámetro reduce drásticamente la vida útil y pone en riesgo la inocuidad (Aacore Supply, 2024).

14.2 Relación entre temperatura y reacciones de deterioro

- **Crecimiento microbiano:** La mayoría de los patógenos y microorganismos alterantes se multiplican rápidamente en la "Zona de Peligro" (entre 5°C y 60°C). Las temperaturas bajas (refrigeración) ralentizan este crecimiento, mientras que la congelación lo detiene casi por completo (Mendoza, s/f).
- **Reacciones químicas y enzimáticas:** Según la ley de Q10, por cada aumento de 10°C, la velocidad de las reacciones de deterioro (como la oxidación de grasas o el pardeamiento enzimático) puede duplicarse o triplicarse (Zumbado, 2022).
- **Degradación nutricional:** Las temperaturas elevadas aceleran la pérdida de vitaminas sensibles (como la vitamina C) y alteran las proteínas, afectando el valor nutricional del producto (Mendez, s/f).
- **La ecuación de Arrhenius:** La ecuación de Arrhenius expresa la influencia de la temperatura en la velocidad de reacción en los estudios de vida útil de los alimentos. Si se tiene en cuenta esta

ecuación, junto con las expresiones cinéticas de los distintos órdenes de reacción, se puede construir un modelo cinético-matemático que describa el deterioro de un alimento durante su almacenamiento, teniendo en cuenta la influencia que ejerce la temperatura sobre los distintos procesos de deterioro. El desarrollo de estos modelos permite la obtención de energías de activación de procesos concretos de deterioro a partir de valores experimentales de parámetros indicadores de estos procesos. Estos datos permiten la estimación de los tiempos de vida útil a diferentes temperaturas de almacenamiento (Ros et al., s/f).

La expresión de Arrhenius tiene en cuenta todos estos elementos y muestra cómo el parámetro k de la ecuación de velocidad de reacción varía con respecto a la temperatura (Ros et al., s/f). Según la expresión:

Figura 14.3. Ecuación de Arrhenius

"Orden cero":

$$Q = Q_0 - k_0 \cdot t \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right)$$

"Orden uno":

$$Q = Q_0 \cdot \exp\left[-k_0 \cdot t \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right)\right]$$

Fuente: file:///D:/USUARIO/Downloads/AETcinticoact2003%20(1).pdf

14.3 Propiedades mecánicas del alimento

13.7.1 Atributos mecánicos fundamentales

Estos parámetros representan la respuesta del alimento ante la aplicación de una fuerza, evaluando tanto su resistencia como su capacidad de recuperación (Castro, 2007):

Dureza: Es la fuerza necesaria para alcanzar una deformación dada. Sensorialmente, se define como la fuerza requerida para comprimir una sustancia entre los dientes molares (en sólidos) o entre la lengua y el paladar (en semisólidos) (Castro, 2007).

Cohesividad: Representa el grado en que se puede deformar una sustancia antes de que se rompa o se rompa por completo. Se relaciona directamente con la fuerza de los enlaces internos que mantienen la integridad de la estructura del alimento (Castro, 2007).

Viscosidad: Se define como la resistencia al flujo cuando se aplica un esfuerzo de corte. En la boca, se percibe como la fuerza necesaria para pasar un líquido desde una cuchara sobre la lengua, o para succionarlo a través de un sorbete (Castro, 2007).

Elasticidad: Es la rapidez con la que un material deformado vuelve a su condición original después de que se retira la fuerza que produce la deformación. Un ejemplo común es la sensación de recuperación de una gelatina o un pan al ser presionados (Castro, 2007).

Adhesividad: Es el trabajo necesario para superar las fuerzas de atracción entre la superficie del alimento y las superficies de otros materiales con los que el alimento entra en contacto (como la lengua, los dientes o el paladar) (Castro, 2007).

13.7.2 Parámetros secundarios (Compuestos)

Estos atributos son combinaciones de los parámetros fundamentales y suelen ser los que mejor describen la experiencia real al comer (Castro, 2007):

- **Fragilidad:** Se caracteriza por una dureza generalmente alta y una cohesividad baja. Es la fuerza con la que una muestra se rompe, agrieta o desmorona, lo cual ocurre antes de que se produzca una deformación plástica significativa (Castro, 2007).
- **Masticabilidad:** Es el parámetro aplicado específicamente a los productos sólidos. Se define matemáticamente como el producto de la dureza, la cohesividad y la elasticidad. Representa la energía requerida para desintegrar el alimento hasta un estado listo para ser tragado (Castro, 2007).
- **Gomosidad (Cuerosidad):** Es el parámetro aplicado a los productos semisólidos. Se define como el producto de la dureza por la cohesividad. Describe la persistencia de la estructura del alimento mientras se manipula en la boca antes de la deglución (Castro, 2007).
- **Daños mecánicos impacto, compresión y vibración:** Los daños mecánicos son alteraciones físicas en el tejido del fruto provocadas

por fuerzas externas. Estos daños no solo afectan la apariencia, sino que aceleran procesos fisiológicos como la respiración y la producción de etileno, reduciendo drásticamente la vida útil (Castro, 2011).

a) Daño por impacto (Golpes)

Es el tipo de daño más común y ocurre cuando el fruto choca contra una superficie dura o contra otros frutos (Castro, 2011).

- **Causas:** Caídas accidentales durante la cosecha, vertido brusco en contenedores o golpes en las líneas de clasificación y empaque (Vega, s/f).
- **Efecto:** Provoca magulladuras (bruising). Aunque la piel puede permanecer intacta, las células internas se rompen, liberando enzimas que causan el pardeamiento u oscurecimiento de la pulpa (Vega, s/f).
- **Consecuencia:** El tejido dañado se vuelve blando, cambia de color y sabor, y se convierte en una vía de entrada para patógenos (Al-Dairi et al., 2022).

b) Daño por compresión (Aplastamiento)

Ocurre cuando se aplica una presión constante o una carga estática sobre el fruto durante un tiempo prolongado (Castro, 2011).

- **Causas:** Sobrellenado de cajas, estiba excesiva (demasiadas cajas apiladas una sobre otra) o el propio peso de los frutos en la parte

inferior de un contenedor a granel (Al-Dairi et al., 2022).

- **Efecto:** Deformación permanente del fruto. Si la presión supera el límite elástico de las células, estas fallan y se produce un aplastamiento del tejido (Valdés, 2012).
- **Consecuencia:** Pérdida de firmeza, exudación de jugos y deformaciones que hacen que el producto sea rechazado comercialmente (Vega, s/f).

c) Daño por vibración (Fricción)

Se produce por el movimiento repetitivo del fruto, generalmente durante el transporte (Castro, 2011).

- **Causas:** Vibración del vehículo de transporte, especialmente si los frutos no están bien sujetos o el embalaje permite que se froten entre sí (Vega, s/f).
- **Efecto:** Abrasión o raspaduras en la piel. El roce constante elimina las ceras naturales de la cáscara y daña la epidermis (Vega, s/f).
- **Consecuencia:** Deshidratación acelerada (pérdida de peso) por la ruptura de la barrera protectora de la piel y aparición de manchas superficiales oscuras (Vega, s/f).

Capítulo XV

15. Ejercidos de aplicación

15.1 Fundamento teórico

El deterioro de la calidad en productos vegetales suele seguir una cinética de primer orden. La velocidad de cambio de la concentración de un atributo de calidad C respecto al tiempo t se define mediante la siguiente Ecuación Diferencial Ordinaria (EDO):

$$-dc = \frac{kc}{dt} (1)$$

Donde:

C : Concentración del atributo de calidad (ej. Vitamina C).

k : Constante de velocidad de deterioro (días⁻¹).

t : Tiempo (días).

a) Resolución de la ecuación diferencial

Para obtener el modelo predictivo de vida útil, resolvemos la EDO por el método de separación de variables:

$$-\frac{dc}{c} = -kdt (2)$$

Integrando ambos miembros desde un estado inicial ($t = 0, C = C_0$) hasta un estado final (t, C_t):

$$\int_{C_0}^{C(t)} \frac{1}{C} dC = -k \int_0^t dt$$

Aplicando la solución de la integral logarítmica:

$$\ln(C_t) - \ln(C_0) = -kt \Rightarrow \ln \frac{C_t}{C_0} = -kt(4)$$

15.1.1 Ejercicio Aplicado

En un lote de tomate riñón en Píllaro, se determina que la constante de degradación es $k = 0.045 \text{ días}^{-1}$. Se desea conocer la vida útil (t) si el producto se considera inaceptable al perder el 40% de su concentración inicial de Vitamina C ($C_0 = 25 \text{ mg}/100\text{g}$).

Datos

- $C_0 = 25 \text{ mg}/100\text{g}$
- $C_t = 25 \times 0.60 = 15 \text{ mg}/100\text{g}$ (Concentración remanente)
- $k = 0.045 \text{ días}^{-1}$

Cálculos

Sustituyendo en la ecuación integrada:

$$\ln \frac{15}{25} = -0.045 \cdot t$$

$$\ln(0.60) = -0.045 \cdot t$$

$$-0.5108 = -0.045 \cdot t$$

Despejando el tiempo:

$$t = \frac{-0.5108}{-0.045} = 11.35 \text{ días } (5)$$

Conclusión

La vida útil estimada bajo condiciones controladas es de 11.35 días. Es fundamental considerar que daños mecánicos por compresión o impacto pueden alterar la integridad celular, aumentando el valor de k y reduciendo significativamente este tiempo.

Cálculo de la vida útil del tomate mediante cinética de deterioro

a) **Introducción del ejercicio 2**

Los daños mecánicos ocasionados por impacto, compresión o vibración incrementan la tasa de pérdida de agua en productos hortícolas, acelerando su deterioro y reduciendo su vida útil. En el presente ejercicio se compara la vida útil del tomate fresco sano y del tomate con daño mecánico leve, utilizando el porcentaje de pérdida de agua como variable de deterioro y un modelo cinético de orden cero.

Datos experimentales

Los tomates fueron almacenados a 10 °C y 85–90% de humedad relativa.

Tomate sin daño mecánico

Tabla 15.1. Pérdida de agua del tomate sin daño

Tiempo (días)	Pérdida de agua (%)
0	0.0
3	1.2
6	2.4
9	3.6
12	4.9
15	6.3
18	7.8
21	9.4

Tomate con daño mecánico

Tabla 15.2. Pérdida de agua del tomate con daño mecánico

Tiempo (días)	Pérdida de agua (%)
0	0.0
3	2.0
6	4.1
9	6.5
12	9.0
15	11.8
18	14.7
21	17.9

15.2 Modelo cinético

Para ambos casos se adopta un modelo cinético de orden cero, dado que la pérdida de agua presenta un comportamiento aproximadamente lineal con el tiempo:

$$P = kt \quad (6)$$

donde

P es la pérdida de agua (%),

k la constante cinética (%·día⁻¹) y

t el tiempo (días).

15.2.1 Cálculo de las constantes cinéticas

Tomate sin daño

$$\text{Ecuación cinética: } k_{\text{sano}} = \frac{9.4 - 0}{21 - 0} = 0.448\% \cdot \text{día}^{-1} \quad (7)$$

$$P = 0.448 t \quad (8)$$

Tomate con daño

$$k_{\text{dañado}} = \frac{17.9 - 0}{21 - 0} = 0.852\% \cdot \text{día}^{-1} \quad (9)$$

Ecuación cinética:

$$P = 0.852 t$$

En ambos casos, el ajuste lineal presenta un coeficiente de determinación aproximado de $R^2 \approx 0.99$.

Determinación de la vida útil

Se establece como criterio de aceptabilidad una pérdida de agua crítica del 6%:

$$P_{\text{crítico}} = 6\% \quad (11)$$

Vida útil del tomate sin daño

$$t_{\text{vida.sano}} = \frac{6}{0.448} = 13.4 \text{ días} \quad (12)$$

Vida útil del tomate con daño

$$t_{\text{vida.dañado}} = \frac{6}{0.852} = 7.0 \text{ días} \quad (13)$$

6

Comparación de resultados

Tabla 15.3. Comparación de parámetros cinéticos y vida útil

Parámetro	Tomate sano	Tomate dañado
Constante cinética k (%·d ⁻¹ a ⁻¹)	0.448	0.852
Vida útil (días)	13.4	7.0
Reducción de vida útil (%)	–	47.8

Bibliografía

- Acuña, D., & Domper, A. (2018). Manual de pérdidas y desperdicios de alimentos. 5 al día. https://5aldia.cl/wp-content/uploads/2018/07/Manual_de_Perdida_y_Desperdicios_Alimentos-.pdf
- AGROCALIDAD. (2020, agosto 5). Gob.ec. <https://www.agrocalidad.gob.ec/wp-content/uploads/2020/05/manu3.pdf>
- Aguilar, C., Reyes, M., Garza, H., & Contreras, J. (1999). Aspectos bioquímicos de la relación entre el escaldado TB-TLY la textura de los vegetales procesados. Revista de la Sociedad Química de México, 43(2), 54-62.
- Aimplas (2024). Análisis de Ciclo de Vida: la herramienta para medir el impacto ambiental de los productos. Centro Tecnológico del Plástico. <https://www.aimplas.es/asesoramiento/analisis-ciclo-vida/>
- Ainia (2024). Eco-diseño de envases Sostenibilidad, seguridad (alimentaria) y rentabilidad. Centro Tecnológico Ainia. <https://www.ainia.com/servicios-tecnologicos/eco-diseno-envases/>
- Alimentarius, C. (2020). Principios generales de higiene de los alimentos. FAO/OMS, 1.

Almeida, D. P. (2023). Postharvest Biology and Technology of Horticultural Crops. CRC Press.

Altamirano, D., Robayo, D., Salazar, J., Sánchez, B., & Tusó, J. (2015). Determinación de la conductividad térmica en frutos [Informe de práctica]. Universidad Técnica de Cotopaxi. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/371449742/Informe-Frutas-Conductividad-Termica-1>

Alvarez J. (2025) Reducir un 40 % el consumo eléctrico es posible gracias a esta tecnología. Ecomercioagrario. <https://ecomercioagrario.com/reducir-un-40%E2%80%AF-el-consumo-electrico-es-posible-gracias-a-esta-tecnologia/>

Arboleda Álvarez, L. F., Guerrero Luzuriaga, S. A., Herrera Chávez, B. A., & Ricaurte Ortiz, P. S. (2024). Técnicas y tecnologías aplicadas en poscosecha [Libro]. CimoGsys – Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Arboleda Álvarez, L. F., Palmay Paredes, J. A., Hernández Maya, C. F., y Guerrero Luzuriaga, S. A. (2023). Manejo integral de la poscosecha aplicado a la ingeniería. Editorial InvestiGo / Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Argüello, D. A., García Rojas, N., & Contreras, N. J. (2017). Conducción de calor en frutas [Informe de laboratorio]. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería. Recuperado de

<https://es.scribd.com/document/404098849/CONDUCCIO-N-DE-CALOR-EN-FRUTAS-docx>

Arias Cardona, L. F. (2016). Efectos de los tratamientos térmicos sobre las propiedades nutricionales de las frutas y las verduras [Trabajo de grado, Universidad Autónoma de San Luis Potosí]. Studocu. Recuperado de <https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-autonoma-de-san-luis-potosi/calor-y-termodinamica/tratamientos-termicos-propiedades-frutas-verduras/6463522>

Arispe, I. &. (2007). Inocuidad y Calidad de los Alimentos. Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología, 5.

Arrieta, M. (2023, 14 de junio). Los envases alimentarios Biobasados: solución sostenible y funcional para la industria alimentaria. Sostenibilidad UPM. <https://sostenibilidad.upm.es/eps08-los-envases-alimentarios-biobasados-solucion-sostenible-y-funcional-para-la-industria-alimentaria/>

Azmin, S. N. H. M., Hayat, N. A., & Tampoco, M. S. M. (2020). Desarrollo y caracterización de películas bioplásticas para envases de alimentos a partir de celulosa de cáscara de vaina de cacao incorporada con fibra de bagazo de caña de azúcar. Journal of Bioresources and Bioproducts, 5, 248–255.

Barcelona Culinary Hub, (2024) LA IMPORTANCIA DE LA POST COSECHA PARA REDUCIR PÉRDIDAS Y CONSERVAR ALIMENTOS. Obtenido de:

<https://www.barcelonaculinaryhub.com/blog/post-cosecha-para-reducir-perdidas-conservar-alimentos>

Bessemans, N., Verboven, P., Verlinden, B. E., & Nicolai, B. M. (2016). A novel type of dynamic controlled atmosphere storage based on the respiratory quotient (RQ-DCA). *Postharvest Biology and Technology*, 115, 91-102.
<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.12.019>

Bhardwaj, R. L., Sharma, Y. y Vyas, L. (Eds.) (2022). *Manejo poscosecha de cultivos hortícolas*. CRC Press.

Biale, J. B., & Young, R. E. (1981). Respiration and ripening in fruits: Retrospect and prospect. En *Recent Advances in the Biochemistry of Fruits and Vegetables*. Academic Press.

Bisht, A. y Singh, S. P. (2024). Avances recientes e innovaciones en la manipulación, almacenamiento y tecnología poscosecha de hortalizas: una revisión. *Archives of Current Research International*, 25(2), 161–180.
<https://doi.org/10.9734/acri/2025/v25i21076>

Blueberries Magazine. (2018). *Manejo de cosecha y poscosecha de arándanos*.

BRCGS. (2022). *Global Standard Food Safety Issue 9*. BRCGS Publishing, 9.

Brookfield, H. (2012). *Postharvest Physiology of Seed and Grains*. Academic Press.

- Calero, F. A. (2006). El envasado en atmósfera modificada mejora la calidad de consumo de los productos hortofrutícolas y minimamente procesados en fresco. Hermosillo: Asociación Iberoamericana de Tecnología Postcosecha, S.C. Obtenido de Redalyc.or.
- Camelo, A. F. (2003). FAO. Obtenido de Food and Agriculture Organization:
<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/497a5e1c-4e41-4d44-a4bd-838b1f27f4cd/content>
- Carvajal Heredia, G. A. (2012). Evaluación de las pérdidas poscosecha tanto físicas y de calidad en el sistema de producción agrícola del CADET, Tumbaco, Pichincha (Tesis de grado, Universidad Central del Ecuador). Repositorio Digital UCE.
<https://www.dspace.uce.edu.ec/entities/publication/81fc33bf-0e49-4f6d-b526-80fc2d2ff6ec>
- Chavarrías Ferràs, M. (2015, 6 de agosto). Vida útil de los alimentos. Observatorio de alimentación – Escuela de Alimentación.
<https://observatorio.escueladealimentacion.es/entradas/innovacion-alimentaria/vida-util-de-los-alimentos>
- Chilean. (2020). Optimización de manejos tecnológicos de postcosecha para aumentar el potencial de almacenaje y mejorar la competitividad de arándanos de exportación.
- Choi, Y., & Okos, M. R. (2006). R09 SI: Thermal properties of foods [PDF]. ASHRAE Handbook—Refrigeration (SI). Recuperado de

https://docslib.org/doc/247697/r09-si-thermal-properties-of-foods?utm_source=chatgpt.com

CIMMYT, (2024). Poscosecha, qué es y algunas recomendaciones iniciales. Obtenido de:

<https://www.cimmyt.org/es/noticias/poscosecha-que-es-y-algunas-recomendaciones-iniciales/>

CIMMYT. (2024, 27 de mayo). Poscosecha, qué es y algunas recomendaciones iniciales.

<https://www.cimmyt.org/es/noticias/poscosecha-que-es-y-algunas-recomendaciones-iniciales/>

Client challenge. (s. f.).

<https://www.scribd.com/document/520052382/Poscosecha-Fresa>

Client challenge. (s. f.-b).

<https://www.scribd.com/document/421507815/Diagrama-de-Flujo-Post-Cosecha-Fresa>

Comisión del Codex Alimentarius. Textos básicos sobre higiene de los alimentos. 5a ed. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura; 2020. 124 p.

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA. (2023). Frutas [Documento digital]. Repositorio AGROSAVIA. Recuperado de

<https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/40392>

- Cruz Manrique, J. (2019). Ensayo: Transferencia de calor en los procesos agroindustriales [Ensayo]. Scribd. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/433616334/Ensayo-Transferencia-de-Calor>
- CTplas. (2025). Alternativas de packaging sostenible para la industria de alimentos en Uruguay. <https://ctplas.com.uy/wp-content/uploads/2025/09/FINAL-Alternativas-de-packaging-sostenible-para-la-industria-de-alimentos-en-Uruguay.pdf>
- De madurez adecuado, L. C. de L. R. de P. A. D. P. a. la O. de L. F. en E., Del mesocarpio, C. el F. de O. la M. C. de A., & ambientales y manejo agronómico., C. (2023, marzo 11). Cosecha y transporte de fruta fresca. Gob.ec. <https://tecnologia.iniap.gob.ec/wp-content/uploads/2023/11/cosecha-2.pdf>
- Domínguez, M. (2021). Parcelas divididas Diseños experimentales agrícolas. Obtenido de; https://tuaulavirtual.educatic.unam.mx/pluginfile.php/1760869/mod_resource/content/3/Parcelas%20divididas.pdf
- Dorighello, T. D. (2022). Estudio del comportamiento de la humedad relativa del aire en centros urbanos. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles.
- Emergentcold (2025). Huella de carbono en la industria alimentaria: principales impactos. Emergentcold, Latam <https://www.sostenibilidad-industrial.com/blog/huella-de-carbono-logistica-del-frio>

Escriche, I. &. (2015). Gestión de la seguridad alimentaria: ISO 22000 y APPCC. Editorial UPV., 23.

Estrada Mesa, E. M., Universidad Nacional de Colombia, Padilla Reyes, F., Márquez Cardozo, C. J., Universidad Nacional de Colombia, & Universidad Nacional de Colombia. (2015). Efecto de recubrimientos protectores sobre la calidad del mango (*Mangifera indica* L.) en poscosecha. *Revista Udeca Actualidad & Divulgación Científica*, 18(1), 181–188.
<https://doi.org/10.31910/rudca.v18.n1.2015.468>

Estrada-Pareja, M. M., Márquez-Girón, S. M., & Restrepo Betancur, L. F. (2019). Efecto de la temperatura y la humedad relativa en los parámetros productivos y la transferencia de calor en pollos de engorde. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 20(3), 288-303.

FAO (2023–2024). Cosecha, manejo poscosecha y agroindustria. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). <https://www.fao.org/family-farming/detail/en/c/1737526/>

FAO. (2011). Pérdidas y desperdicio de alimentos en el mundo: Alcance, causas y prevención. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org>

Ferroice. (2016, 26 de junio). Propiedades térmicas de los alimentos. Recuperado de

<https://www.wattco.com/es/2022/08/transfencia-de-calor-en-la-industria-alimentaria/>

Figuerola, F., Estévez, A. M., & Avendaño, O. (2020). Desarrollo de un alimento de humedad intermedia de fréjol (*Phaseolus vulgaris* L.). Archivos latinoamericanos de nutrición, 58(2), 193-200.

Florkowski, W. J., Shewfelt, R. L., Brueckner, B., & Prussia, S. E. (2014). Postharvest Handling: A Systems Approach. Academic Press.

Food., I. (2023). Standard for auditing product and process compliance in relation to food safety and quality. IFS Food., 4.

Fragaria, G. (2025, 9 junio). Manejo Postcosecha en Frutilla: Guía Completa para Maximizar Vida Útil - Grupo Fragaria. Grupo Fragaria. <https://grupofragaria.com/articulos/postcosecha-frutilla/>

Fundación Global Nature. (2021). GUÍA PARA LA GESTIÓN DE LOS RESIDUOS AGRARIOS. Fundación Global Nature y SIGFITO. <https://fundacionglobalnature.org/wp-content/uploads/2021/07/Guia-Residuos-Agrarios.pdf>

FUSADES. (2024, 29 de agosto). Calidad y manejo postcosecha en la agricultura. PROINNOVA. https://fusades.org/publicaciones/Postcosecha_ago24.pdf

FUSADES. (2024, junio). Inocuidad y calidad en la agroindustria [Boletín]. FUSADES. https://fusades.org/publicaciones/Boletinjun24_InocCali.pdf

García Martínez, E. M., & Fernández Segovia, I. (2012). Determinación de la humedad de un alimento por un método gravimétrico indirecto por desecación.

García Martínez, E. M., & Fernández Segovia, I. (2019). Determinación de la humedad de un alimento por un método gravimétrico indirecto por desecación.

García Mogollón, C., Cury Regno, K. I., & Dussán Sarria, S. (2010). Evaluación poscosecha y estimación de vida útil de guayaba fresca utilizando el modelo probabilístico de Weibull. *Acta Agronómica*, 59(3), 347-355.
https://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-28122010000300010

García Muñoz, M. C., Romero Barrera, Y. y Pedroza Berrío, K. J. (2023). Cosecha, poscosecha y transformación del mango y aprovechamiento de la biomasa residual. *AGROSAVIA*.
<https://hdl.handle.net/20.500.12324/40951>

García Viacava, M. I. (2022). Estudio de la obtención del porcentaje de humedad usando propiedades dieléctricas de alimentos pequeños por radiación electromagnética.

García Viacava, M. I. (2024). Método de determinación del porcentaje de humedad de un contenedor de alimentos pequeños mediante un sistema de microondas.

García, E., Gago, L., & Fernández, J. L. (2006). *Tecnología de envasado en atmósfera protectora*. Madrid: CEIM.

- García, M. (2014). Agricultura de precisión como estrategia de manejo agronómico en plantaciones de palma africana. (Trabajo Grado-Pasantía). Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Obtenido de <http://repository.unad.edu.co/handle/10596/2489>
- García-Ramos, F. J., Ortiz-Cañavate, J., y Ruiz-Altisent, M. (2014). Decisive factors in the design of a sorting system for pears based on internal quality. *Biosystems Engineering*, 124, 43-52. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.06.006>
- Gianella, T., Pinzás, T., Dorrego, A., Maza, C., Romero, D., & Jurado, C. (2021). Agroecología e investigación participativa: experiencias en los Andes marzo volumen 37, número. *Leisa-al.org*. <https://leisa-al.org/web/wp-content/uploads/vol37n1.pdf>
- Giovannoni, J. J. (2004). Genetic regulation of fruit ripening and flowering. *Visualizing Plant Biology*, 23(1), 1-15.
- Gómez Villalba, L. S., López-Arce, P., Zornoza-Indart, A., Álvarez de Buergo, M., & Fort González, R. (2011). Evaluación del tratamiento de consolidación de dolomías mediante nanopartículas de hidróxido de calcio en condiciones de alta humedad relativa.
- González, I. (2020). Diseño de experimentos y su aplicación en la industria. Edu.Mx. <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/sahagun/n1/e1.html>

Grolleaud, M. (s. f.). CAPITULO 2. EL SISTEMA POST-COSECHA y LAS PERDIDAS ALIMENTARIAS. <https://www.fao.org/4/ac301s/ac301s03.htm>

Grup Giró. (2022, 22 de julio). La evolución de los envases para respetar el medioambiente. Poscosecha.com. <https://www.poscosecha.com/grup-giro/la-evolucion-de-los-envases-para-respetar-el-medioambiente>

Henaó González, C. M. (2020). Cálculo de la humedad relativa con la ecuación básica psicrométrica de acuerdo con la norma técnica colombiana NTC-4505 para la calibración de termohigrómetros y demás dispositivos que miden humedad relativa, en el laboratorio del Instituto de Metrología Biomédica.

Hernández, F. (2017). Tecnología de productos agrícolas: Procesos postcosecha. Trillas.

Hernández, M., García, M., & Martínez, J. (2010). Evaluación poscosecha y estimación de la vida útil de guayaba fresca utilizando el modelo probabilístico de Weibull. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas, 4(3), 351-360.

Hiwasa-Tanase, K., & Ezura, H. (2014). Fruit Ripening: Physiology, Signalling and Genomics. Springer.

Huertas, L. (2020). El control ambiental en invernaderos: humedad relativa. Hortícola, 205, 52-54.

Infoberry. (2007). Cosecha y postcosecha de arándanos. Ed. DISTRI.

- Intagri. (2020). Manejo y Tecnología Postcosecha de Berries.
- Kader, A. A. (2011). Postharvest Technology of Horticultural Crops. UC ANR Publication.
- Kader, A. A. (2013). Postharvest technology of horticultural crops (3rd ed.). University of California Agriculture and Natural Resources.
- Knee, M. (2002). Fruit Quality and its Biological Basis. Sheffield Academic Press.
- Ladaniya, M. S. (2008). Citrus Fruit: Biology, Technology and Evaluation. Elsevier.
- Larrosa, V. J., Lorenzo, G., Zaritzky, N. E., & Califano, A. N. (2016). Modelado matemático del secado de pastas libres de gluten en relación a la temperatura y humedad relativa del aire.
- Lelièvre, J. M., Latché, A., Marchand, B., & Pech, J. C. (1997). Ethylene and fruit ripening. *Physiologia Plantarum*, 101(4), 727-739.
- Lianou, A., Panagou, E. Z., y Nychas, G.-J. E. (2016). Microbiological spoilage of foods and beverages. En *International Journal of Food Microbiology*. Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.08.012>
- Londoño, M (2013). Manual de manejo poscosecha de productos agrícolas. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria.
<https://repository.agrosavia.co/server/api/core/bitstreams/8f5556f6-6353-4830-b661-a9b4e1c69c87/content>

- Luning, P. A. (2009). Food Quality Management: Technological and Managerial Principles and Practices. Wageningen Academic Publishers, 3-4.
- Maier, D. E. (2021). Grain Drying, Handling, and Storage. American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Manejo en la Postcosecha de Moras y Fresas. (s. f.). <https://extension.psu.edu/manejo-en-la-postcosecha-de-moras-y-fresas>
- Marín, E., Lemus, R., Flores, V., & Vega, A. (2019). La rehidratación de alimentos deshidratados. Revista chilena de nutrición, 33(3), 527-538.
- Marmolejo, J. (2020). 5 PASOS PARA DESARROLLAR UN DISEÑO DE EXPERIMENTOS DOE. Obtenido de: <https://spcgroup.com.mx/los-5-pasos-para-desarrollar-un-diseno-de-experimentos-doe/>
- Martínez-González, M. E., Morales, R. B., Alia-Tejacal, I., Cortes-Cruz, Mg. A., Palomino-Hermosillo, Y. A., & López-Gúzman, G. G. (2017b). Postcosecha de frutos: maduración y cambios bioquímicos. Revista Mexicana de Ciencias gAgrícolas, 19, 4075-4087. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i19.674>
- Medrano, S. (2020). Medición de humedad relativa con psicrómetro. Boletín periódico del laboratorio de metrología. México.

- Mejia-Carmona, K., García-García, G., & Martínez-Hernández, E. (2023). Environmental life cycle assessment of fruit supply chains: A review of postharvest stages and logistics. *Journal of Cleaner Production*, 385, 135678.
- Mendiburu, F. (2007). *Diseño y Análisis de experimentos Aplicados en investigación Agrícola*. Edu.pe.
<http://tarwi.lamolina.edu.pe/~fmendiburu/index-filer/Presentations/DiadelEstadistico2007.pdf>
- Mercer, D. G. (2014). An alternative approach to determining the activation energy of a food drying process. *Journal of Food Engineering*, 123, 40-45.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.09.014>
- Millán, F. R., Roa, V., & Tapia, M. S. (2015). Modelado matemático de isoterma de adsorción de humedad en alimentos usando redes neuronales artificiales. *Interciencia*, 26(5), 190-194.
- Minitab. (2025). Diseños de parcelas divididas en el diseño de experimentos. Obtenido de; <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/supporting-topics/factorial-and-screening-designs/split-plot-designs-in-design-of-experiments/>
- Morales, A. (2017). *Manual de manejo agronómico del arándano*. Instituto de Desarrollo Agropecuario (INIA).

Mutiara, W., Putra, A., & Affan, M. (4 de Abril de 2024). journal.umy.ac.id. Obtenido de Journal UMY: <https://journal.umy.ac.id/index.php/pt/article/view/17855>

Navarro, S. B. (2012). Fisiología de Postcosecha. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura.

Notagud, M. (2025). 16 ventajas y desventajas de la investigación experimental. Obtenido de: <https://psicologiaymente.com/miscelanea/ventajas-desventajas-investigacion-experimental>

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (s.f.). Inventario y análisis de las pérdidas post-cosecha. En Inventario y análisis de las pérdidas post-cosecha (Cap. 3). FAO. Recuperado de <https://www.fao.org/4/ac301s/ac301s04.htm>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura; Organización Mundial de la Salud. Codex Alimentarius: ¿Qué es el Codex? [Internet]. Roma: FAO/OMS; 2024 [citado 6 ene 2026]. Disponible en: <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/about-codex/es/>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2003). Manual de prácticas de manejo poscosecha de productos hortofrutícolas para pequeñas explotaciones. Capítulo 4: Embalaje y empaque. Recuperado de <https://www.fao.org/4/y4893s/y4893s04.htm>

Organización Mundial del Comercio. El Acuerdo sobre la Aplicación de Medidas Sanitarias y Fitosanitarias (MSF) [Internet]. Ginebra: OMC; 2023 [citado 6 ene 2026]. Disponible en: https://www.wto.org/spanish/tratop_s/sps_s/spsagr_s.htm

Ortega, G., Valverde, Y., Castro, C., Indacochea, B., Alcívar, J., Vera, M., & Vera, R. (2022). Diseños experimentales: Teoría y práctica para experimentos agropecuarios. Mawil Publicaciones de Ecuador, 2022.

Ortolá, M. (2020). riunet.upv.es. Obtenido de Universidad Politécnica de Valencia (UPV): <https://riunet.upv.es/server/api/core/bitstreams/85cb9ea8-7868-419c-a371-4e96b3f9f788/content>

Paliyath, G., Murr, D. P., Handa, A. K., & Lurie, S. (2008). Postharvest Biology and Technology of Fruits, Vegetables, and Flowers. Wiley-Blackwell.

PILAR SANTACOLOMA, R. C. (2007). MANUAL DE CAPACITACIÓN- HERRAMIENTAS GERENCIALES COSTO- EFECTIVAS PARA MEJORAR LA CALIDAD Y ASEGURAR LA INOCUIDAD DE LOS ALIMENTOS. ROMA: FAO.

Portilla, C. (s. f.). Cálculo de Q10 para frutas [Informe]. Scribd. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/408961328/Calculo-de-q10>

- Poscosecha.com. (2025, 21 de octubre). El gran desafío global del desperdicio poscosecha y sus causas estructurales. <https://www.poscosecha.com/el-gran-desafio-global-del-desperdicio-poscosecha-y-sus-causas-estructurales>
- Puerta, G. I. (2013). La humedad controlada del grano preserva la calidad del café. Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé).
- Ramírez-Castrillón, G., Sánchez-Cortés, M. S., Rosero-García, J. J., y García-Martínez, J. B. (2022). Sustainable management of cocoa pod husk (CPH): A review on the synthesis of high-added value products and their applications. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6, 100221. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100221>
- Ramos, E., & Zúñiga, D. (2018). Efecto de la humedad, temperatura y pH del suelo en la actividad microbiana a nivel de laboratorio. *Ecología aplicada*, 7(1-2), ág-123.
- Reid, M. S. (2002). Ethylene in postharvest technology. En *Postharvest Technology of Horticultural Crops*. University of California.
- Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas. (2019). Pérdidas y desperdicios de alimentos: un reto para la seguridad alimentaria. <https://remca.umet.edu.ec/index.php/REMCA/article/view/296>
- Rodríguez, A. (2023) Economía circular y residuos en el sector agroalimentario. *Barcelona School Of Management*

<https://www.gestionambiental.es/noticias/economia-circular-industria-agroalimentaria>

Romanazzi, G., Lichter, A., Gabler, F. M., & Smilanick, J. L. (2016). Recent advances on the use of natural and safe alternatives to conventional methods to control postharvest gray mold of table grapes. *Postharvest Biology and Technology*, 63(1), 141-147. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.06.013>

Ruiz-Ochoa, M. A., Torres-Corredor, J. S., Vargas-Corredor, Y. A., & Orduz-Amaya, L. P. (2023). Variabilidad climática (precipitación, temperatura y humedad relativa) para la gestión hídrica del departamento del Casanare, Colombia. *Información tecnológica*, 34(5), 47-60.

Saltveit, M. E. (2016). Respiratory metabolism. In K. C. Gross, C. Y. Wang, & M. Saltveit (Eds.), *The commercial storage of fruits, vegetables, and florist and nursery stocks* (pp. 68-84). United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service.

Saltveit, M. E. (2019). Respiratory metabolism. En *Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables*. Elsevier.

Sánchez, E. (2022). Manual técnico para el manejo de experimentos agropecuarios. Researchgate.net. https://www.researchgate.net/publication/365687646_Manual_tecnico_para_el_manejo_de_experimentos_agropecuarios

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019, 14 de noviembre). ¿Qué es la poscosecha y por qué es importante? Gobierno de

México. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/que-es-la-poscosecha-y-por-que-es-importante>

Siddiqui, M. W. (2015). Postharvest Biology and Technology of Horticultural Crops: Principles and Practices. Apple Academic Press.

Sistemas De Cosecha. (2024, primavera 8). StudySmarter ES. <https://www.studysmarter.es/resumenes/ingenieria/ingenieria-agricola/sistemas-de-cosecha/>

Smith M. Normativas internacionales en la seguridad alimentaria global. En: García J, editor. Tecnología y seguridad agroindustrial. 3a ed. Madrid: Editorial Acribia; 2022. p. 45-68.

Tecnología Hortícola. (2020, 7 de octubre). ACV, un método para cuantificar el impacto ambiental en los suelos de las actividades humanas. <https://www.tecnologiahorticola.com/es/acv-un-metodo-para-cuantificar-el-impacto-ambiental-en-los-suelos-de-las-actividades-humanas>

Thompson, A. K. (2010). Controlled Atmosphere Storage of Fruits and Vegetables. CABI.

Thompson, A. K. (2010). Controlled atmosphere storage of fruits and vegetables (2nd ed.). CABI Publishing.

Tozer, P. R. (2012). Influence of plant traits on production costs and profitability of perennial fruit crops. Agricultural Systems, 106(1), 23-32. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2011.10.005>

Tozer, P. R., Galinato, S. P., Ross, C. F., Miles, C. A., y McCluskey, J. J. (2015). Sensory analysis and cost-benefit of different types of strawberry mulch. *European Journal of Agronomy*, 63, 14-20.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.11.001>

Trazable. (2024). Qué es un Análisis de Ciclo de Vida (ACV).
<https://trazable.io/blog/que-es-un-analisis-de-ciclo-de-vida-acv/>

Trienekens, J. &. (2008). Quality and safety standards in the food industry, developments and challenges. *International Journal of Production Economics.*, 8.

Tuero Suárez, L., Hernández González, A., & Ramírez Beltrán, J. (2016). Sistema para la medición de la humedad relativa usando un DSSP. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 37(2), 1-14.

Uchenna, E., & Abiodun, O. (16 de Abril de 2024). researchgate.net. Obtenido de ResearchGate:
https://www.researchgate.net/publication/379853456_Physiological_Processes_Affecting_Postharvest_Quality_of_Fresh_Fruits_and_Vegetables

Ulloa, L., Saénz, M., Castro, J., & Ramírez, M. (23 de Junio de 2020). Redalyc.org. Obtenido de Realdyc.org:
<https://www.redalyc.org/journal/436/43670175008/html/>

Universidad Francisco de Paula Santander. (2021, 18 marzo). Guía para los productores de fresa poscosecha. Studocu. Recuperado el 10 de enero de 2026, de

<https://www.studocu.com/co/document/universidad-francisco-de-paula-santander/poscosecha/guia-para-los-productores-de-fresa-poscosecha/14883293>

Valdivia, V. (2008). Diseños experimentales. Selección según objetivo de la investigación. Slideshare.net.

<https://es.slideshare.net/slideshow/disenos-experimentales/26802700>

Valencia, Z. D. (30 de Noviembre de 2023). Universidad Agraria. Obtenido de Universidad Agraria:

<https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/BAUTISTA%20VALENCIA%20ZUMIKO%20DOMINIC.pdf>

Valero, D., & Serrano, M. (2010). Postharvest Biology and Technology for Preserving Fruit Quality. CRC Press.

Vega Vega, L. S. (2010, 22 de septiembre). Operaciones post cosecha [Diapositivas]. SlideShare.

<https://es.slideshare.net/slideshow/operaciones-post-cosecha/5244810>

Vega, A., & Lemus, R. (2018). Importancia de las Isotermas en los Alimentos. Revista Indualimentos, 8(35), 71-74.

Veltman, R. H., Lenthéric, I., Van der Plas, L. H. W., & Peppelenbos, H. W. (2003). Internal browning in pear fruit (*Pyrus communis* L. cv Conference) may be a result of a limited availability of energy and antioxidants. *Postharvest Biology and Technology*, 28(2), 295-302. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(02\)00198-4](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(02)00198-4)

- Villamizar de Borrero, F., & Ospina Machado, J. E. (2000). Frutas y hortalizas: Manejo tecnológico postcosecha. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA. <https://repository.agrosavia.co/server/api/core/bitstreams/b9da71d0-fd6f-4fea-b198-bc6ca929f04c/content>
- Villarruel-Fuentes, M., Garay-Peralta, I., & Chávez-Morales, R. (2024). Fundamentos Didácticos para el Diseño de Experimentos en las Ciencias Agrícolas. *Estudios y Perspectivas Revista Científica y Académica*, 4(4), 317–338. <https://doi.org/10.61384/r.c.a..v4i4.671>
- Wang, J., Nakano, K., & Ohashi, S. (2022). Cambios de calidad y modelo de predicción de la vida útil de productos poscosecha. *Journal of Food Engineering*, 315, 110802.
- Watkins, C. B. (2006). The use of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on fruits and vegetables. *Biotechnology Advances*, 24(4), 389-409. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2006.01.005>
- Wattco. (2022, agosto). Transferencia de calor en la industria alimentaria. Recuperado de <https://www.wattco.com/es/2022/08/transferencia-de-calor-en-la-industria-alimentaria/>
- Wills, R. B., & Golding, J. B. (2016). *Postharvest: An Introduction to the Physiology and Handling of Fruit and Vegetables*. CABI.
- Yahia, E. M. (2019). *Postharvest Technology of Perishable Horticultural Commodities*. Woodhead Publishing.

- Yahia, E. M. (2019). *Postharvest Technology of Perishable Horticultural Commodities*. Woodhead Publishing.
- Yahia, E. M., Carrillo-López, A., & Bello-Perez, L. A. (2019). *Postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables*. Woodhead Publishing.
- Yahia, E. M., y Gola, J. (2011). Strawberry. En E. M. Yahia (Ed.), *Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits: Cocona to Mango* (Vol. 3, pp. 419-453). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857092816.419>
- Yajamín Quisilema, J. A. (2023). Diseño de la cadena de frío post-cosecha para conservar rosas de exportación: diseño del cuarto de preenfriamiento. Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/24352>
- Yang, S. F., & Hoffman, N. E. (1984). Ethylene biosynthesis and its regulation in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology*, 35, 155-189.
- Yentzen. (2018). Sacudida manual de arándanos: un eficaz sistema de cosecha mecanizado. Portal Frutícola.
- Zanella, A. (2003). Control of apple superficial scald and ripening—a comparison between 1-methylcyclopropene and diphenylamine postharvest treatments, initial low oxygen stress and ultra low oxygen storage. *Postharvest Biology and Technology*, 27(1), 69-78. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(02\)00187-X](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(02)00187-X)

- Zanella, A., Rossi, O., Pangrazzi, P., & Cazzanelli, P. (2015). Fruit fluorescence response to low oxygen stress: Modern storage technologies compared to 1-MCP treatment of apple. *Acta Horticulturae*.
- Zhang, M., Xiao, G. N., Peng, J., y Saldaña, M. D. (2016). Effects of ultrasound on the drying kinetics and quality of strawberries. *Biosystems Engineering*, 142, 111-120.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.12.008>
- Zribi, W., Faci, J. M., & Aragüés, R. (2011). Efectos del acolchado sobre la humedad, temperatura, estructura y salinidad de suelos agrícolas. *Información técnica económica agraria*, 107(2), 148-162.



Ingeniería y tecnología de la poscosecha principios, procesos y aplicaciones en la agroindustria, se publicó en el mes de mayo de 2026.

ISBN: 978-9907-802-09-2

**Grupo Editorial BLR
Ecuador
Cel: +593 98 320 4362
<https://grupobl.com/>
publicaciones@grupobl.com**

BIOGRAFÍA DE LOS AUTORES

Washington Xavier Carrera Borja:

Ingeniero en Alimentos de la Universidad Técnica de Ambato, Magíster en Ciencia de los Alimentos de la Universidad Técnica de Ambato, actualmente trabajo como Docente Investigador en la Universidad Técnica de Cotopaxi – Extensión La Maná, me he desempeñado como Coordinador de Vigilancia y Control Sanitario de Cotopaxi, Analista de control de calidad de embutidos La Madrileña, Analista de control de Calidad en Tesalia CBC y Jefe de Calidad en Healthy Leben.

Erick Adrián López Pillajo:

Ingeniero magíster, docente universitario y especialista en alimentos, agroindustria, legislación alimentaria, cárnicos, análisis sensorial e investigación. Destaca por su enfoque técnico, académico y emprendedor, integrando docencia, desarrollo curricular, calidad alimentaria, innovación productiva y proyectos aplicados al contexto ecuatoriano

César Antonio Peña Har:

Nació el 31 de marzo de 1980 en la ciudad de Guayaquil, provincia del Guayas, Ecuador. Creció en la ciudad de Ventanas, donde desarrolló sus primeros años de formación personal y académica. Realizó sus estudios secundarios en el Colegio Nacional Técnico “Humberto Moreira Márquez”, donde adquirió las bases de su formación técnica. Posteriormente, continuó su preparación profesional en la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, donde obtuvo el título de Ingeniero Agrónomo. Motivado por su interés en el manejo eficiente de los recursos hídricos, cursó estudios de posgrado en la Universidad Agraria del Ecuador, donde alcanzó el título de Magíster en Riego y Drenaje. A lo largo de su trayectoria profesional, se ha desempeñado tanto en el sector privado como en el ámbito académico. Formó parte de importantes empresas del sector agrícola como Agripac S.A. y Fertisa, donde consolidó su experiencia técnica. Además, cuenta con más de 20 años de experiencia como docente en la Universidad Agraria del Ecuador, contribuyendo a la formación de nuevos profesionales en el área agronómica.

INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA DE LA POSCOSECHA PRINCIPIOS, PROCESOS Y APLICACIONES EN LA AGROINDUSTRIA

Estimado lector, el marco fundamental de la ingeniería y tecnología de la poscosecha, una disciplina crítica que abarca todas las operaciones y manejos aplicados a los productos agrícolas desde el momento exacto de su recolección hasta que llegan al consumidor final. A lo largo del texto, se destaca que el objetivo primordial de esta área es preservar la calidad intrínseca, el valor nutricional y la inocuidad de los alimentos, enfrentando de manera directa la problemática global de las altas tasas de pérdidas poscosecha causadas por infraestructuras deficientes o un manejo inadecuado.

Para resolver estos desafíos, el autor plantea un enfoque multidisciplinario donde se conjugan principios de la biología, la química y la ingeniería tradicional, orientados a optimizar procesos clave como el almacenamiento, el control ambiental y el transporte. Finalmente, se argumenta que la eficiencia en los sistemas de poscosecha es un pilar indispensable para la seguridad alimentaria y la sostenibilidad, ya que permite incrementar la disponibilidad real de alimentos y mejorar los ingresos de los productores sin la necesidad de expandir la frontera agrícola ni sobreexplotar los recursos naturales.

Agradecemos a todos los lectores que se acercan a esta obra con ánimo de aprender, aplicar y transformar.



Grupo Editorial BLR
Ecuador
Cel: +593 98 320 4362
[https://grupobl.com/
publicaciones@grupobl.com](https://grupobl.com/publicaciones@grupobl.com)

ISBN: 978-9907-802-09-2



9 789907 1802092