

CAMBIOS FISICOS Y QUIMICOS DURANTE LA MADURACION DE CAMBURES Y PLATANOS^a

EOVALDO HERNANDEZ^b

RESUMEN

Se hace una revisión de los cambios físicos y químicos que ocurren durante la maduración de cambures y plátanos. Se revisan, en particular, los cambios químicos que ocurren en carbohidratos (azúcares, almidón, celulosa y hemicelulosa), lignina, pectinas, proteínas, aminoácidos, pigmentos, compuestos fenólicos, compuestos volátiles, lípidos y ácidos orgánicos. También se discuten las enzimas que participan en estas transformaciones.

PHYSICAL AND CHEMICAL CHANGES DURING THE RIPENING OF BANANAS AND PLANTAINS. (a review)

EOVALDO HERNANDEZ

ABSTRACT

Physical and chemical changes taking place during the ripening of bananas and plantains are reviewed. Chemical changes in carbohydrates (sugars, starch, cellulose and hemicellulose), lignin, pectins, proteins, aminoacids, phenolic compounds, pigments, volatile compounds, lipids and organic acids are particularly reviewed. Some of the enzymes participating in these changes are also discussed.

INTRODUCCION

En este trabajo se discuten los cambios físicos y químicos que ocurren durante la maduración de cambures y plátanos y el efecto de esos cambios sobre la textura, color, aroma y sabor del fruto. La mayor parte de los datos presentados se refieren a cambures, ya que sobre ellos existe más información, pero también se presentan algunas observaciones sobre plátanos. Las revisiones de Marriott (21), Forsyth (11) y Palmer (27) han sido las principales fuentes consultadas para esta discusión.

COMPOSICION DEL FRUTO VERDE^c

Morfología del fruto

El fruto de cambures y plátanos está formado por dos partes: la piel, concha o cáscara (exocarpio) y la pulpa. La proporción del fruto que es piel es alta: 80, 40 y 33 por ciento del peso fresco del fruto juvenil, del fruto fisiológicamente maduro y del fruto nutricionalmente maduro, respectivamente.

a. Recibido para su publicación el 25-10-85.

b. Profesor de Bioquímica, Ph.D., Facultad de Agronomía, Universidad del Zulia, Apartado 526, Maracaibo, Venezuela.

c. En este trabajo se denominará verde al fruto fisiológicamente maduro, pero nutricionalmente inmaduro.

La piel está formada por una cutícula externa y por la epidermis, varias capas de parénquima hipodermal (conteniendo cloroplastos y rafidios) y una ancha región de células de parénquima entremezcladas con vasos laticíferos, haces vasculares y espacios de aire. Las células hipodermales y las células más internas, células iniciadoras de la pulpa, tienden a ser más pequeñas y a estar más compactadas que las demás células de la piel. También en la piel hay granos de almidón.

La estructura de la pulpa es menos conocida que la de la piel. En los frutos preclimáticos, fisiológicamente maduros, las células están oscurecidas por un gran número de granos de almidón. Con la maduración, las células de la pulpa van perdiendo el almidón y sus detalles se hacen más visibles.

Otro cambio que ocurre durante la maduración es la coagulación y oscurecimiento del contenido de los vasos laticíferos.

Aunque la contribución de la piel al metabolismo global del fruto es significativa, particularmente en lo relacionado con el equilibrio hídrico (27), la mayor parte de la información en la literatura se refiere a la pulpa.

Composición del fruto verde

La composición de algunas variedades de cambures verdes y maduros se presenta en la Tabla 1.

Todos los frutos de cambur para la exportación se cosechan verdes y se transportan en buques refrigerados a temperaturas entre 11°C y 13,5°C, manteniendo las concentraciones de etileno lo más bajas posible, de tal modo que el fruto llegue verde a los locales de maduración.

MADURACION DE CAMBURES Y PLATANOS

Iniciación de la Maduración

Los estudios sobre el comienzo de la maduración han sido dirigidos mayormente a investigar el papel del etileno en el proceso, ya que este gas, además de iniciar la maduración de cambures y plátanos, se produce de un modo natural en estos frutos (27). En el momento de la cosecha el fruto verde contiene unas 0,2 ppm de etileno. Antes de iniciarse la maduración la concentración de etileno aumenta abruptamente, llegando a unas 0,5 ppm al inicio de la maduración (5). La aplicación de 0,1 ppm de etileno o más a frutos verdes acelera el establecimiento del climaterio. Concentraciones de 1 ppm o más inducen el climaterio en menos de 12 horas. La temperatura altera marcadamente el efecto del etileno.

TABLA 1. Composición de algunas variedades de cambures verdes y maduros*

Componente	Variedad Verde			Variedad Madura		
	"Pachabale" ("Cavendish Gigante")	"Rajabale"	"Rasable" ("Seda")	"Pachabale"	"Rajabale"	"Rasable"
	AAA	Grupo AAA	AAB	AAA	Grupo AAA	AAB
Relación pulpa/piel	1,34	1,75	2,27	2,17	2,19	4,32
Firmeza de la pulpa (kg/cm ²)	3,6	4,5	3,7	0,4	0,4	0,4
Almidón (%)	15,5	19,5	18,0	1,5	2,5	2,5
Azúcares reductores (%)	0,2	0,2	0,2	11,5	15,0	13,5
Acidez (meq/100 g)	2,0	2,0	3,0	4,0	4,2	6,5
Acido ascórbico (mg/100 g)	0,4	1,5	5,0	1,0	2,0	5,0
Clorofila en la piel (µg/g)	93	54	84	0,0	0,0	0,0
Carotenoides en la piel (µg/g)	12	9	10,5	14	9	11

a. Tomado de la referencia 21.

La iniciación de la maduración puede retrasarse usando atmósferas controladas con concentraciones bajas de O_2 y altas de CO_2 (27). Se pueden lograr efectos similares mediante aireación a presiones subatmosféricas.

Se ha reportado que una irradiación con 25-35 Krads retrasa la iniciación de la maduración "natural" sin interferir con la maduración inducida por el etileno.

Respiración Climatérica

La maduración del cambur presenta un tipo de respiración climatérica. Desde el momento de la cosecha, a 20°C, cuando la rata de respiración en el fruto verde es de unos 20 mg CO_2 /kg/hora, ésta se eleva hasta unos 125 mg CO_2 /kg/hora en el pico climatérico para luego descender a unos 100 mg CO_2 /kg/hora a medida que prosigue la maduración. La respiración aumenta con la temperatura, con un Q_{10} (°C) de aproximadamente 2,2. Aparentemente, el ciclo de Krebs está operando, ya que durante el climaterio, se pueden aislar mitocondrias funcionales (12). Haard (12) ha sugerido que el climaterio en cambures y plátanos implica la activación de enzimas mitocondriales ya existentes.

Cambios Físicos

Permeabilidad. La permeabilidad de la pulpa de cambures y plátanos aumenta durante el climaterio. Un aumento significativo en la permeabilidad precede al climaterio en unos dos días y en el pico climatérico todas las células son totalmente permeables a los solutos por simple difusión (31).

Firmeza. Finney et al (10) sugirieron el uso del "módulo de elasticidad de Young" como una definición objetiva de la firmeza de los frutos de cambur, encontrando que el ablandamiento del fruto durante la maduración iba asociado a una disminución del módulo de Young, de 272×10^5 dinas/cm² en frutos verdes a 85×10^5 dinas/cm² en frutos amarillos. Esta disminución estuvo correlacionada con la hidrólisis del almidón a azúcares.

Relaciones Hídricas. Los estomas se encuentran en la superficie de la piel del fruto maduro en cantidades de unos 480/cm². La transpiración es relativamente constante en los frutos verdes (fisiológicamente maduros). Una vez iniciada la maduración, la variación de la rata de transpiración con el tiempo es similar a la curva climatérica para la respiración. A pesar de las pérdidas por transpiración, el contenido de humedad de la pulpa aumenta normalmente durante la maduración. El agua formada por el metabolismo de los carbohidratos contribuye a este aumento neto. Probablemente más significativa es la remoción osmótica de agua de la piel. La presión osmótica preclimatérica de la piel y de la pulpa es de unas 6 atm. La presión de la piel aumenta muy poco durante el climaterio, pero sube a unas 11,5 atm al madurar el fruto completamente. La presión de la pulpa aumenta a unas 6,5 atm durante el climaterio para subir luego abruptamente, llegando a 25-27 atm en el fruto completamente maduro. Este aumento en la presión osmótica de la pulpa está relacionado con el aumento en la concentración de azúcar como consecuencia de la hidrólisis del almidón. Esta transferencia osmótica de humedad se refleja en la relación peso de la pulpa a peso de la piel que es de 1,2 - 1,6 en frutos verdes para subir a 2,0 - 2,7 en frutos completamente maduros.

Cambios Químicos y Bioquímicos

Carbohidratos (Almidón y Azúcares)

Entre 20 y 25 por ciento de la pulpa del fruto verde fresco es almidón. En aproximadamente una semana, período del proceso de maduración, este almidón se hidroliza casi completamente, de tal modo que la pulpa de cambur maduro contiene entre uno y dos por ciento de almidón (Tabla 2). Los azúcares, que constituyen normalmente 1 a 2 por ciento de la pulpa de los cambures verdes, aumentan hasta 15-20 por ciento en la pulpa madura. Los carbohidratos totales disminuyen entre 2 y 5 por ciento durante la maduración, supuestamente al ser utilizados para respirar.

TABLA 2. Cambios en la composición de carbohidratos durante la maduración de cambures y plátanos (g/100 g peso fresco)^a

	Cambur		Plátano	
	Verde 20-25 (pulpa) 3 (piel)	Maduro 1-2	Verde 30	Maduro 5-10
Almidón				
Azúcares	1-2	15-20	1-2	15-20
Sacarosa 70% de los azúcares totales				
Glucosa 15%				
Fructosa 15%				
Maltosa Trazas				
β - Fructosilsacarosa Trazas				

a. Tomado de las referencias 21, 22 y 27.

La piel verde contiene un 3 por ciento de almidón, la mayor parte en células adyacentes a la pulpa. Este almidón también se hidroliza durante la maduración. Los plátanos tienen un mayor contenido de almidón en la pulpa que los cambures: 30 por ciento en el momento de la cosecha y 5-10 por ciento cuando están maduros. El contenido de azúcares de los plátanos es similar al de los cambures (Tabla 2). La hidrólisis del almidón y la acumulación de azúcares es más lenta en los plátanos que en los cambures (22). Los principales azúcares en la pulpa de cambures y plátanos son sacarosa, glucosa y fructosa. También se han reportado trazas de maltosa y β-fructosilsacarosa (11). La sacarosa constituye aproximadamente un 70 por ciento de los azúcares totales en cambures y plátanos y alrededor de un 50 por ciento en frutos sobremadurados (22). La relación glucosa/fructosa está alrededor de uno, tanto en plátanos como en cambures, durante todas las etapas del proceso de maduración (22). El contenido de carbohidratos en plátanos verdes y maduros se presenta en la Tabla 3.

TABLA 3. Carbohidratos en plátanos verdes y maduros (g/100 g peso seco)^a

Componente	Piel		Pulpa	
	Verde	Madura	Verde	Madura
Glucosa	1,6	9,0	0,4	5,6
Fructosa	0,6	19,0	0,7	9,0
Sacarosa	0,7	2,2	0,7	2,4
Maltosa	-	Trazas	-	-
Azúcares totales	3,0	31,6	1,3	17,3
Almidón	50,0	35,0	83,2	66,4
Celulosa	9,0	10,5	1,6	1,3
Hemicelulosa	12,4	14,0	1,9	0,8

a. Tomado de la referencia 16.

Se han estudiado algunas enzimas del metabolismo de los carbohidratos. Sornsrivichai (35) detectó en la pulpa de cambur 7 enzimas que hidrolizan el almidón: dos alfa-amilasas, dos beta-amilasas y tres fosforilasas. La actividad de las isoenzimas aumentó durante la fase inicial de la maduración, predominando la actividad de la alfa-amilasa (19,35). Las enzimas que participan en la interconversión sacarosa-almidón en la pulpa de cambur han sido estudiadas por Shukla et al (34). Ellos reportaron la presencia de las siguientes actividades: Sacarosa sintetasa, sacarosa-fosfato sintetasa, invertasas ácida y neutra, ADPG-pirofosforilasa, almidón fosforilasa, beta-amilasa, hexokinasa, glucosa-fosfato isomerasa y fosfatatasas ácida y neutra. Singh y Sanwal (35) encontraron 3 fosforilasas

en la pulpa de cambures maduros, pero solamente 2 en la pulpa del fruto verde. Salminen y Young (32) encontraron fosfofructokinasa, aldolasa y glucosa-6-fosfato deshidrogenasa en la pulpa de los frutos durante la maduración. La concentración de fructosa-1, 6-difosfato aumentó 20 veces en el pico climaterico, mientras que los otros derivados fosfatados de azúcares sólo aumentaron unas 2,5 veces. La actividad de la fosfofructokinasa aumentó unas 2,5 veces, mientras que la actividad de las otras enzimas cambió poco. Se ha reportado la presencia de dos formas de la fosfofructokinasa durante la maduración (25). Se ha propuesto que el aumento en unas 5 veces de la respiración durante el climaterio se debe a la activación de esta enzima.

Celulosa, Hemicelulosa y Lignina

En el momento de la cosecha, la pulpa de cambur contiene entre 2 y 3 por ciento de celulosa que luego, durante la maduración, disminuye ligeramente. La hemicelulosa constituye 8-10 por ciento de la pulpa del fruto verde, disminuyendo a alrededor del 1 por ciento al madurar (11). El contenido de lignina es de aproximadamente 0,5 por ciento en el fruto maduro (11). El posible papel de estos polímeros en la textura del fruto se discute más adelante. Las enzimas que, en cambures y plátanos, participan en la hidrólisis de estos polímeros no han sido estudiadas.

Pectinas

En la pulpa de cambur, la protopectina insoluble disminuye de 0,5 a aproximadamente 0,3 por ciento, mientras que la pectina soluble en agua aumenta en una cantidad equivalente. En cambures se ha reportado la presencia de pectina-metil esterasa (13) y pectinesterasa (2). Las actividades de estas enzimas permanecen constantes durante la maduración. Utilizando electroforesis en gel de almidón se han detectado en cambures seis formas de pectinesterasa (20).

Textura del fruto y contenido de celulosa, hemicelulosa, lignina y pectina

Choo y Choon (6) encontraron una alta correlación entre el contenido de sólidos insolubles en alcohol y la textura de frutos de cambur. La mayor parte de estos sólidos es celulosa, hemicelulosa y pectinas y la alta correlación indica que estos polímeros probablemente contribuyen significativamente a la textura de cambures y plátanos. Según Barnell (1), el contenido de hemicelulosa es importante en cuanto a la textura de la pulpa. El cambio en la textura durante la maduración va acompañado de la hidrólisis de los poligalacturónidos, celulosas y hemicelulosas insolubles de las paredes celulares y de la lámina media.

Choo y Choon (6) también encontraron una baja correlación entre los sólidos totales y la textura, lo que indica que los otros componentes de los sólidos totales (azúcares, almidón, proteínas, lípidos y minerales) probablemente no contribuyen significativamente a la textura del fruto de cambur.

Proteínas y Aminoácidos

El contenido de proteína de la pulpa del fruto de cambur verde varía entre 0,5 y 1,6 por ciento. La cantidad neta de proteína no cambia durante la maduración. Al comienzo del climaterio la rata de síntesis de proteínas aumenta, para disminuir posteriormente (25-40 horas después de la aplicación de etileno). No hay, sin embargo, aumento en la síntesis de ribosomas al comienzo del climaterio. Los mitocondrios permanecen intactos y bioquímicamente funcionales, lo que sugiere que la maduración es un proceso organizado y no el resultado de la pérdida del control celular (12). El aumento en la síntesis de proteínas al comienzo del climaterio ha sido relacionado con la producción de enzimas que son activas durante la maduración (9). Sin embargo, Brady y O'Connell (3) concluyeron que la respuesta de la pulpa de cambur al etileno es un aumento en la rata de transformación (turnover rate) de las proteínas solubles y que no hay evidencia de que la síntesis de proteínas particulares, previamente no existentes, sea iniciada por el etileno y conduzca a la maduración.

En la Tabla 4 se presenta el contenido de aminoácidos libres en la pulpa de cambures preclimatericos y climatericos. La histidina es el aminoácido más abundante, constituyendo el 31 por ciento de los aminoácidos libres totales. Las dos enzimas claves en el proceso de transaminación, glutamato-oxalacetato-transaminasa (GOT) y glutamato-piruvato-transaminasa (GPT), presentan su máxima actividad durante el climaterio (Tabla 5). Parece que los aminoácidos producen, por transaminación, intermediarios del ciclo de Krebs que son oxidados.

TABLA 4. Contenido de aminoácidos en pulpa de cambur^a

	Micromoles/g peso fresco de pulpa		Climaterio
	Preclimaterio I	II	
Acido aspártico	2,44	2,61	3,70
Asparragina	3,33	4,52	3,99
Treonina	0,36	0,38	0,86
Serina	0,55	0,58	0,62
Acido glutámico	1,35	0,43	0,85
Glutamina	4,27	3,48	2,00
Prolina	0,18	0,18	0,17
Glicina	0,55	0,55	0,65
Alanina	0,56	0,54	0,15
Valina	0,11	0,16	0,18
Isoleucina	0,12	0,12	0,15
Leucina	0,20	0,21	0,31
Tirosina	0,07	0,10	0,07
Fenilalanina	0,10	0,13	0,10
Acido gamma-aminobutírico	0,55	0,41	1,25
Lisina	1,07	1,22	1,40
Ornitina	0,05	0,05	0,04
Histidina	6,09	7,53	9,08
Arginina	1,25	1,16	1,08

a. Tomado de la referencia 4.

TABLA 5. Cambios en las actividades de GOT, GPT y aldolasa y en el contenido de proteína, fenoles, clorofila y almidón en la pulpa y en la cáscara del fruto de cambur durante su desarrollo y en el pseudotallo^a

Relación piel/pulpa	Actividad, unidades/mg proteína			Peso Seco (%)	mg/g peso seco			
	GOT	GPT	Aldolasa		Proteína	Fenoles	Clorofila	Almidón
PULPA								
4,42	6,7	4,2	198	7,1	38,9	25,6		91,5
3,85	7,0	5,5	139	7,3	582	18,1		169,8
3,30	6,7	5,6	110	9,6	55,8	11,3		132,0
2,90	9,4	5,3	117	9,0	59,2	16,2		185,5
1,57	9,7	3,1	138	9,1	549	12,5		382,2
1,48	10,5	8,5	142	13,4	36,6	6,2		520,1
1,28	9,8	8,5	150	13,7	35,5	7,5		530,0
0,54	9,4	12,2	155	23,7	20,7	3,1		764,5
0,30	13,7	19,2	198	28,7	15,3	2,6		880,8
0,28	18,3	24,2	380	25,5	9,0	2,2		402,3
0,22	24,8	30,5	432	29,9	7,0	2,5		374,9
0,20	29,6	49,7	447	25,7	5,0	1,2		16,3
0,19	27,4	52,0	450	25,0	5,6	1,5		11,2
PIEL								
4,42	2,62	2,62	135	7,1	59,3	30,6	0,085	94,8
3,85	2,22	2,40	117	7,1	64,6	22,5	0,253	164,9
3,30	3,0	3,0	90	8,1	72,8	22,8	0,296	134,7
2,90	3,3	3,6	75	7,2	97,2	21,7	0,333	152,4
1,57	5,4	5,1	108	8,4	60,5	20,9	0,190	166,3
1,48	5,3	4,8	109	9,2	54,3	12,5	0,920	169,0
1,28	5,4	5,7	111	9,1	58,7	12,3	0,800	285,2
0,54	4,2	9,0	103	10,5	47,6	10,8	0,810	206,9
0,30	6,4	10,3	121	9,1	49,1	13,1	0,890	297,7
0,28	6,6	7,3	130	9,3	44,1	12,6	0,709	106,7
0,22	11,1	12,9	172	9,3	30,8	10,2	0,860	106,0
0,20	15,3	33,3	225	16,0	8,3	7,0	0,137	31,4
0,19	16,3	35,6	236	17,7	7,5	7,3	0,130	23,4
Pseudotallo	11,2	25,6	277	4,6	17,2	11,8		36,6

a. Tomado de la referencia 21: GOT = Glutamato-oxalacetato-transaminasa; GPT = Glutamato-piruvato-transaminasa

Pigmentos

Los principales pigmentos del fruto de cambures y plátanos son clorofila, xantofila y caroteno (Tabla 6). El contenido de clorofila de la piel llega al máximo cuando el fruto alcanza la madurez fisiológica y disminuye marcadamente al iniciarse la maduración (Tabla 5), con lo que el caroteno y la xantofila se hacen evidentes.

TABLA 6. Pigmentos de la piel de cambures y plátanos*

	µg/g peso fresco	
	Verde	Maduro
Clorofila	50-100	0
Xantofila	5-7	5-7
Caroteno	1,5-3,5	1,5-3,5

a. Tomado de la referencia 21.

La actividad de la clorofilasa aumenta al comienzo del climaterio, alcanzando un pico que coincide con el pico climatérico y disminuyendo hasta cero en el período postclimatérico. La clorofilasa cataliza la hidrólisis de la clorofila para dar clorofilido (chlorophyllide) y fitol. El etileno parece estar implicado en la expresión de los genes que codifican esta enzima (33).

Los cambures durante su maduración contienen pigmentos insolubles en agua con un peso molecular superior a 4000 y con un espectro de fluorescencia idéntico al de lipofuscina (18). Se ha sugerido que estos pigmentos son productos resultantes de la peroxidación de la lipoproteína de la membrana.

Compuestos Fenólicos

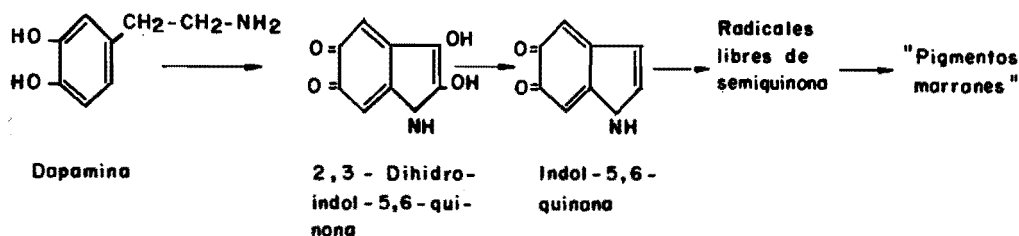
Los compuestos fenólicos se encuentran a su más alta concentración en la pulpa del fruto joven. Con la maduración, los fenoles disminuyen (Tabla 5). En plátanos y cambures se encuentran los siguientes compuestos fenólicos: dopamina (3,4-dihidroxifenil etilamina), serotonina (5-hidroxitriptamina), norepinefrina, salsolinol y delfinidina. Los fenoles están en los vasos laticíferos de la pulpa y de la piel y en pequeñas células dispersas de las regiones medias exteriores de la piel. La cantidad de fenoles es más alta en la piel que en la pulpa; el contenido de dopamina en la cáscara de frutos verdes es 1,0-1,2 mg/g peso fresco, mientras que la pulpa contiene 8 µg/g peso fresco (27). El contenido de dopamina en la piel del fruto maduro es 30-60 por ciento mayor que en el fruto verde.

Riggin et al (30) encontraron que el salsolinol (1-metil-6,7-dihidroxi-1,2,3,4-tetrahidroisoquinolina), un metabolito que se forma al reaccionar la dopamina con el acetaldehído, se produce únicamente durante el período postclimatérico.

En cambures, la fenilalanina no se convierte en tirosina o dopamina, sino que origina otros compuestos fenólicos, tres de los cuales han sido identificados como ácidos ferúlico, p-cumárico y cafeico (27). Forsyth (11) ha reportado la concentración en cambures de siete metabolitos de triptófano y tirosina.

Los compuestos fenólicos se relacionan con tres características de cambures y plátanos: color, astringencia y presencia de aminas fisiológicamente activas.

Color. La dopamina, pasando a 2,3-dihidroindol-5,6-quinona e indol-5,6-quinona, es oxidada para dar pigmentos de color marrón; la reacción es catalizada por la enzima polifenoloxidas (PPO),



el pH óptimo es 7,0; la K_m para dopamina es $6,3 \times 10^{-4} M$. Los agentes quelantes, los compuestos reductores y los análogos estructurales inhiben la reacción. Un inhibidor particularmente potente de la PPO de bananas es la sal sódica del mercapto benzotiazol (27). El oscurecimiento (browning) está limitado por la concentración endógena de dopamina, pero no por la actividad de la PPO (40). El ácido ascórbico también afecta la reacción, puesto que puede reducir la forma quinónica de la dopamina a la forma dihidroxilada inicial, con lo que no ocurre oscurecimiento; al agotarse el ácido ascórbico, la dopamina puede ser oxidada y el oscurecimiento continúa. Otro factor que favorece las reacciones de oscurecimiento es el aumento del contacto entre PPO y dopamina, como consecuencia del aumento de permeabilidad y de la rotura de algunas membranas durante la maduración (este oscurecimiento es bastante evidente en el daño causado por el frío, que se discutirá más adelante).

En cambures, la mayor parte de la PPO está en la pulpa y solamente una pequeña fracción en la piel (26). La PPO parece ser un complejo enzimático; se han detectado nueve isoenzimas en la pulpa y diez en la piel de cambures (23). La PPO es activada al irradiar frutos preclimáticos y existe una correlación entre la actividad de la PPO y el oscurecimiento de la piel de cambures irradiados (21).

Aunque el oscurecimiento se considera indeseable, algunos compuestos que contribuyen al aroma también se forman durante la oxidación de los fenoles.

Astringencia. La pulpa del fruto verde es notablemente astringente, pero esta astringencia se reduce durante la maduración. Esta disminución parece deberse a una disminución de los compuestos fenólicos, ya que éstos se polimerizan durante la maduración (27).

Catecolaminas. Además de causar oscurecimiento y astringencia en cambures y plátanos, algunos compuestos fenólicos, tales como la serotonina, la dopamina y la norepinefrina, son también aminas fisiológicamente activas.

Daño causado por el frío.

El daño causado por el frío (chilling injury) implica cambios de fase de los lípidos de la membrana, lo cual ocasiona la rotura de la integridad de la misma y la alteración de sus funciones (28). Los frutos sometidos a bajas temperaturas acumulan acetaldehído y etanol en la cáscara y en la pulpa y alfaetoácidos en la pulpa (24). Los cambios en la concentración de acetaldehído y etanol se presentan en la Tabla 7. Debido al mayor contenido de acetaldehído, la producción de salsolinol en frutos dañados por el frío pudiera ser mayor que en frutos sanos. Durante el almacenaje refrigerado de cambures la piel se vuelve verde-marrón y cuando las temperaturas son muy bajas llega a ponerse marrón y finalmente negra. Aparentemente, la rotura de los sistemas membranosos debido al daño causado por el frío permite el contacto de sustratos y enzimas, en este caso dopamina y PPO, resultando en la formación de compuestos marrones.

TABLA 7. Cambios en el contenido de acetaldehído y etanol (mg/100 g) en frutos de cambur sanos y dañados por el frío*

Tejido	Frutos verdes		Frutos amarillos	
	aldehído	etanol	aldehído	etanol
Piel sana	0,0	0,0	0,6-2,9	15,0
dañada por frío	1,9	8,0	4,8	70,0
Pulpa sana	0,6	5-10	1,6	63,0
dañada por frío	3,0	15-60	11,8	100-250

a. Tomado de la referencia 24.

Compuestos Volátiles.

Los compuestos volátiles de cambures y plátanos son una mezcla compleja de ésteres, pero también se encuentran presentes alcoholes, aldehídos, cetonas y compuestos aromáticos. Tressl et al (38) han separado 350 compuestos volátiles, de los cuales identificaron 183:80 ésteres, 23 compuestos carbonilos, 40 alcoholes y 4 fenol-éteres. En base a tres impresiones sensoriales generales, los principales compuestos volátiles del fruto del cambur han sido clasificados como acamburados, frutales y verdes, amaderados o mohosos (Tabla 8). Palmer (27) llegó a la conclusión que el aroma del cambur maduro se debe a una mezcla de unos 20 acetatos, propionatos y butiratos saturados, junto con n-hexanal. Yabumoto et al (42) cuantificaron los siete principales constituyentes; éstos son, en orden de concentración decreciente: acetato de isoamilo, acetato de isobutilo, acetato de n-butilo, butirato de isoamilo, butirato de isobutilo, alcohol isoamílico y butirato de butilo.

TABLA 8. Impresiones sensoriales de los principales compuestos volátiles del cambur*.

Como cambur	Frutal	Verde, amaderado o mohoso
Acetato de isoamilo	Acetato de butilo	Acetato de metilo
Acetato de amilo	Butirato de butilo	Pentanona
Propionato de amilo	Acetato de hexilo	Alcohol butílico
Butirato de amilo	Butirato de amilo	Alcohol amílico

a. Tomado de la referencia 27.

La biosíntesis de los compuestos volátiles durante la maduración de cambures tiene lugar en la fase final del climaterio. Se han establecido tres rutas para la biosíntesis de estos compuestos en cambures: a) la conversión de aminoácidos, tales como leucina y valina, a ácidos y alcoholes; b) la producción de ácidos, alcoholes, ésteres y cetonas por la ruta del metabolismo de los ácidos grasos, y c) la rotura oxidativa de los ácidos linoleico y linolénico a aldehídos y cetoácidos C_6 , C_9 y C_{12} (21). El alcohol amílico y el acetato de amilo se derivan de la L-leucina. La valina es el precursor del alcohol isobutílico y del acetato de isobutilo. Algunos fenol-éteres, tales como el eugenol, el eugenol metil éter y la eliminina se forman a partir de la fanilaianina. Los ésteres de acetato y butirato se producen en ciclos durante la maduración y los dos ciclos están desfasados (37). Los ésteres de acetato y butirato constituyen alrededor del 70 por ciento de los compuestos volátiles de los cambures maduros. Los cambures verdes sintetizan principalmente aldehídos y cetoácidos C_9 a partir de ácido linolénico, mientras que los cambures maduros sintetizan principalmente aldehídos C_6 y cetoácidos C_{12} a partir de ácido linoleico. Se ha sugerido que la primera de estas reacciones comprende la oxidación del ácido linolénico a un hidroperoxiácido por medio de una lipoxigenasa y la rotura de este ácido por una aldehído liasa, pero no se conoce bien la síntesis enzimática de los compuestos volátiles de cambures y plátanos.

Lípidos.

Los lípidos constituyen entre el 0,2 y el 0,5 por ciento del peso fresco de la pulpa de cambur. Los principales ácidos grasos de la pulpa son los ácidos palmítico, oleico, linoleico y linolénico. En la piel predominan los ácidos palmítico, linoleico y linolénico. Durante la maduración el contenido de lípidos es constante (Tabla 9), pero ocurren cambios en la composición de ácidos grasos. El efecto neto es una pérdida del 20 por ciento de los ácidos totales y un aumento del grado de insaturación de los ácidos grasos. Estos cambios tienen lugar únicamente en la fracción de fosfolípidos. La insaturación total se mantiene virtualmente constante durante el período preclimaterio. Los ácidos linoleico y linolénico libres aumentan al comenzar el climaterio y antes de llegar al pico, para luego disminuir. Todo esto está de acuerdo con la hidrólisis y resíntesis de lípidos durante el proceso de maduración.

TABLA 9. Ácidos grasos en cambures (mg/10 g peso seco)*

Acido	Pulpa		Piel	
	Madura	Verde	Madura	Verde
14:0	0	0	1,35	1,43
15:0	0,33	Trazas	0	0
16:0	10,89	11,92	56,30	62,80
16:1	2,21	0,84	0	0
16:2	1,16	Trazas	0	0
18:0	0,63	1,68	7,32	6,46
18:1	4,44	4,08	8,70	9,50
18:2	12,85	4,88	38,00	26,70
18:3	6,08	6,84	19,80	18,40
Total saturados	11,85	13,60	64,97	70,69
Total insaturados	26,47	16,64	66,50	54,60

a. Tomado de la referencia 27.

Los lípidos de la pulpa de cambur contienen alrededor del 25 por ciento de material insaponificable. Se han identificado los triterpenos cicloartenol, cicloeucaenol y 24-metilen-ciclo-artenol; este último es el principal triterpeno en la pulpa. Los esteroides de la piel y de la pulpa son los mismos, pero su concentración relativa es diferente. Los tres esteroides presentes son campesterol, beta-sitosterol y estigmasterol. En la piel, el principal esteroide es el estigmasterol, mientras que en la pulpa el beta-sitosterol constituye el 72 por ciento de la fracción de esteroides. En la pulpa se ha encontrado escualeno a muy baja concentración, 0,1 a 0,2 ppm (11). En la piel la mayor parte de los triterpenos están esterificados con ácidos grasos de cadena larga, mientras que los esteroides se encuentran en forma libre. En la pulpa, sin embargo, tanto los triterpenos como los esteroides se encuentran en forma libre.

Como en la nutrición de los seres humanos el beta-sitosterol parece interferir con la absorción del colesterol, la presencia de beta-sitosterol en la pulpa de cambur pudiera ayudar al mantenimiento de bajos niveles de colesterol en el suero.

Ácidos Orgánicos.

Los principales ácidos orgánicos en la pulpa de cambures y plátanos son los ácidos málico, cítrico y oxálico. Los ácidos málico y cítrico aumentan durante la maduración, mientras que el ácido oxálico es metabolizado y disminuye (11). En la pulpa de cambur se encuentran otros ácidos, particularmente cetoácidos, en cantidades trazas; entre ellos están los ácidos alfa-cetoglutarico, oxalacético, pirúvico, semialdehído succínico, beta-hidroxipirúvico, alfa-cetoisovalérico, glioxílico, alfa-cetoisocaproico, shikímico, quínico y tartárico. El aumento del ácido málico durante la maduración no parece ser general; algunas variedades de cambures son más dulces que otras, pudiendo deberse esta diferencia, al menos en parte, a su contenido de ácidos; parece que existen diferencias varietales.

Valor nutricional de cambures y plátanos.

El análisis proximal y el contenido de minerales y vitaminas de la pulpa de cambures maduros y de plátanos verdes se presenta en la Tabla 10. Los cambures y plátanos son principalmente una fuente de carbohidratos, pero existen otras características del fruto que son de interés. Puesto que el sodio se encuentra en cantidades muy bajas y la concentración de potasio es relativamente alta, los cambures pueden ser de interés en dietas bajas en sodio. Ellos pudieran ocupar un lugar en la alimentación de pacientes obesos y geriátricos, ya que se debe mantener el nivel de potasio de los pacientes obesos sometidos a dieta, para evitar alteración en la tolerancia a la glucosa. Corrientemente los cambures son el único fruto que se les permite a las personas que sufren de úlceras pépticas. También son recomendados para el tratamiento de la diarrea infantil, como fuente de carbohidratos en enfermedades del cilio y para aliviar la colitis. Los cambures reducen la incidencia de las úlceras gástricas producidas por drogas o por stress en conejillos de indias y en ratas. Se ha sugerido que la acción terapéutica de los cambures en condiciones tales como úlceras pépticas, enfermedades del cilio y constipación está de algún modo relacionada con su contenido de aminas fisiológicamente activas (catecolaminas), pero los ensayos clínicos no han podido confirmar ésto.

TABLA 10. Composición química de la pulpa de plátanos verdes y cambures maduros (para 100 g de porción comestible)*

Componente	Análisis proximal (g)		Elemento	Minerales (mg)		Vitamina	Vitaminas	
	Plátano	Cambur		Plátano	Cambur		Plátano	Cambur
Agua	67,0	70,7	Na	n.d. ^b	1	Retinol (µg)	0	0
Azúcares	0,8	16,2	K	n.d.	350	Caroteno (µg)	60	200
Almidón	27,5	3,0	Ca	7	7	Vitamina D (µg)	0	0
Fibra	5,8	3,4	Mg	33	42	Tiamina (mg)	0,05	0,04
N total	0,16	0,18	P	35	28	Riboflavina (mg)	0,05	0,07
Proteína (Nx6,25)	1,0	1,1	Fe	0,5	0,4	Acido nicotínico (mg)	0,7	0,6
Grasa	0,2	0,3	Cu	0,16	0,16	Acido ascórbico (mg)	20,0	10
			Zn	0,1	0,2	Vitamina E (mg)	n.d.	0,2
			S	15	13	Vitamina B ₆ (mg)	n.d.	0,51
			Cl	n.d.	79	Vitamina B ₁₂ (mg)	0	0
						Acido fólico libre (µg)	2	14
						Acido fólico total (µg)	16	22
						Acido pantoténico (mg)	0,37	0,26

a. Tomado de la referencia 21.

b. n.d. = no determinado.

Los cambures son una fuente relativamente rica de ácido ascórbico y vitamina B₆. El ácido ascórbico aumenta en la pulpa al comienzo del climaterio, disminuye gradualmente cuando el fruto se madura totalmente y luego se mantiene constante hasta el momento en que el fruto empieza a deteriorarse (27).

Ya se ha mencionado el posible papel de los cambures en la disminución del nivel de colesterol en los seres humanos, debido a su contenido de beta-sitosterol.

Además de las propiedades citadas, las dos características que hacen del cambur un fruto nutricionalmente atractivo son la textura y el sabor. Como dice Forsyth (11): "la suave textura de un cambur completamente maduro junto a su sabor distintivo hacen una combinación deliciosa".

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De la literatura revisada es evidente que la mayor parte de la información publicada se refiere a cambures, aunque en los últimos años han comenzado a aparecer trabajos sobre plátanos. Tanto en

cambures, como en plátanos, la mayor parte de la información se refiere a la pulpa, habiendo muy pocos datos sobre la piel. No existen trabajos sobre el posible papel de la piel en el proceso de maduración del fruto. Casi toda la literatura publicada tiene que ver con la maduración del fruto, siendo prácticamente inexistentes los trabajos sobre las etapas anteriores y posteriores a este proceso. Existe escasa información sobre los productos industriales que se pueden obtener del fruto. Esto quizá se deba a la pequeña cantidad de cambures y plátanos que se procesa industrialmente, no más de 100.000 toneladas de fruto fresco al año (7).

Desde el punto de vista fisiológico se requieren estudios sobre el desarrollo del fruto, desde la etapa de su iniciación hasta su madurez fisiológica, determinando no sólo la variación de almidón, azúcares, proteínas, celulosa, hemicelulosa, pectina y pigmentos, sino, particularmente, los cambios en la actividad de las enzimas que participan en el proceso de desarrollo del fruto.

A medida que se industrialice el fruto, principalmente el plátano, comienza a cobrar interés la posible utilización de los residuos. Esto hace interesante el estudio de los componentes de la piel, tanto en el fruto como después de separarla de él, con el objeto de su posible utilización en alimentación animal.

LITERATURA CITADA

1. BARNELL, H. R., *Ann Bot. (London)* **4**: 39. 1940.
2. BRADY, C. J. *Aust. J. Plant Physiol.* **3**: 163. 1976.
3. BRADY, C. J. and O'CONNELL, P. H. B., *Aust. J. Plant Physiol.* **3**: 301. 1976.
4. BRADY, C. J., PALMER, J. K., O'CONNELL, P. B. H. Y SMILLIE, R. M., *Phytochemistry* **9**: 1037. 1970.
5. BURG, S. P. and BURG, E. A., *Bot. Gaz.* **126**: 200. 1965.
6. CHOO, C. G. and CHOON, S. C. *Malays. Agric. Res.* **1**: 118. 1972.
7. CROWTHER, P. C., *The processing of banana products for food. Trop. Prod. Inst. (London). Publ. G122.* 1979.
8. DESAI, B.B. and DESHPANDE, P.B. *Mysore J. Agric. Sc.* **12**: 193. 1978.
9. DILLEY, D. R., *Enzymes. In The biochemistry of fruits and their products*, A.C. Hulme (ed.), Academic Press, London. 1970.
10. FINNEY, E.E., BEN-GERA, I and MASSIE, D.R. *J. Food Sci.* **32**: 642. 1967.
11. FORSYTH, W. G. C. *Banana and plantain. In Tropical and subtropical fruits*, S. Nagy and P.E. Shaw (eds.), Avi Publishing Co. 1980.
12. HAARD, N. F. *The isolation and partial characterization of the mitochondria from the pulp of the ripening banana*, Ph. D. Thesis, University of Massachusetts. (Citado en ref. 27). 1967.
13. HULTIN, H.O. and LEVINE, A.S., *J. Food Sci.* **30**: 917. 1965.
14. HULTIN, H.O. and PROCTOR, B.E., *Food Technol.* **15**: 440. 1961.
15. KAYISU, K. HOOD, L.F. and VANSOEST, P. J., *J. Food Sci.* **46**: 1885. 1981.
16. KETIKU, A. O., *J. Sci. Food Agric.* **24**: 703. 1973.
17. LAL, R. K., GARG, M. and KRISHNAN, P. S., *Phytochemistry* **13**: 2365. 1974.
18. MAGUIRE, Y. P. and HAARD, N.F., *J. Food Sci.* **41**: 551. 1976.
19. MAO, W. W. and KINSELLA, J. E., *J. Food Sci.* **46**: 1400. 1981.
20. MARKOVIC, O., HEINRICHOVA, K. and LENKEY, B., *Collect. Czech. Chem. Commun.* **40**: 769. 1975.

21. MARRIOTT, J., Bananas: Physiology and Biochemistry of Storage and Ripening for Optimum Quality. *Crit. Rev. Food Sci. and Nutrition* **13**: 41. 1980.
22. MARRIOTT, J., ROBINSON, M. and KARIKARI, S.K., *J. Sc. Food Agric.* **32**: 1021. 1981.
23. MONTGOMERY, M. W. and SGARBIERI, V. C., *Phytochemistry* **14**: 1245. 1975.
24. MURATA, T., *Physiol. Plant.* **22**: 401. 1969.
25. NAIR, P.N. and DARAK, B.G., *Phytochemistry* **20**: 605. 1981.
26. PADRON, M.P., LOZANO, J.A. and GONZALEZ, B.G., *Phytochemistry* **14**: 1959. 1975.
27. PALMER, J.K. The Banana. In *The biochemistry of fruits and their products*. A.C. Hulme (ed.), Academic Press, London. 1971.
28. RAISON, J.K. LYONS, J.M. and THOMSON, W.W., *Arch. Biochem. Biophys.* **142**: 83. 1971.
29. RAMIREZ-MARTINEZ, J. R. LEVI, A., PADUA, H. and BAKAL, A. *J. Food Sci.* **42**: 1201. 1977.
30. RIGGIN, R.M., MCCARTHY, M.J. and KISSINGER, P.T. *J. Agric. Food Chem.* **24**: 189. 1976.
31. SACHER, J.A., *Pl. Physiol. Lancaster* **41**: 701. 1966.
32. SALMINEN, S.O. and YOUNG, R.E., *Plant Physiol.* **55**: 45. 1975.
33. SCHWIMMER, S., *Source Book of Food Enzymology*, Avi Publishing Co. 1981.
34. SHUCKLA, R.N., SINGH, S., DAS, N., BAIJAL, M. and SANWAL, G.G., *Phytochemistry* **12**: 979. 1973.
35. SINGH, S. and SANWAL, G.G., *Phytochemistry* **14**: 113. 1975.
36. SORNSRIVICHAI, P., *Diss. Abstr. Int. B* **37**: 2606. 1976.
37. TRESSL, R. and JENNING, W.G., *J. Agric. Food Chem.* **20**: 189. 1972.
38. TRESSL, R., DRAWERT, F. and HEIMAN, W., *Z./Lebensm./Unters. Forsch.* **142**: 249. 1970.
39. VIQUEZ, F., LASTRETO, C. and COOKE, R. D., *J. Food Technol.* **18**: 115. 1981.
40. WEAVER, C. and CHARLEY, H., *J. Food Sci.* **39**: 1200. 1974.
41. WILSON, R. J., *Trop. Prod. Inst. (London) Publ. G103*. 1975.
42. YABUMOTO, K., JENNINGS, W.G. and PANGBORN, R.M., *J. Food Sci.* **40**: 105. 1975.