



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
INSTITUTO DE QUÍMICA Y TECNOLOGÍA



Estudio de la composición físico-química, propiedades funcionales y nutricionales de almidones nativos y modificados extraídos de clones de diferentes variedades de musáceas.

TRABAJO DE ASCENSO
presentado ante la Ilustre Universidad Central de Venezuela, por la *M. Sc Shelly Edimar Alemán Guevara*, para optar al escalafón de Asistente.

Tutora: Dra. Alejandra Ramírez (UCV)

Abril, 2012.

Maracay, Venezuela.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| TABLA DE CONTENIDO | 2 |
| ÍNDICE DE FIGURAS | 5 |
| ÍNDICE DE TABLAS | 10 |
| RESUMEN | 12 |
| DEDICATORIA | 13 |
| AGRADECIMIENTOS | 14 |
| INTRODUCCIÓN | 16 |
| OBJETIVOS | 20 |
| II. REVISION BIBLIOGRÁFICA | 21 |
| 2.1. MUSÁCEAS | 21 |
| 2.1.1.- Clasificación de los bananos | 22 |
| 2.1.2.- Variedades de bananos presentes en Venezuela | 28 |
| 2.1.3.- Producción de bananos | 30 |
| 2.1.4.- Composición química y bioquímica en diferentes estados de madurez y productos | 36 |
| 2.1.5.- Importancia nutricional | 39 |
| 2.2.- GENERALIDADES DEL ALMIDÓN | 44 |
| 2.3.- ALMIDÓN DE MUSÁCEAS | 49 |
| 2.3.1.- PROPIEDADES FÍSICAS | 51 |
| 2.3.1.1.- Morfología y tamaño del gránulo | 51 |
| 2.3.2.- PROPIEDADES FUNCIONALES | 52 |
| 2.3.2.1.- Poder de Hinchamiento y Solubilidad | 52 |
| 2.3.2.2.- Perfil de gelatinización | 54 |
| 2.3.2.3.- Grado de sustitución | 57 |
| 2.4- ALMIDONES MODIFICADOS | 58 |
| 2.4.1.- Modificaciones Físicas | 59 |
| 2.4.2.- Modificación Química | 61 |
| 2.4.2.1. Modificación química por conversión o degradación | 62 |
| 2.4.2.2.- Modificación química por derivación o sustitución | 64 |
| 2.4.2.2.1.- Almidones Entrecruzados | 65 |
| 2.4.2.2.2.- Almidones Estabilizados o Eterificados | 66 |
| 2.4.2.2.3.- Almidones Esterificados | 67 |
| 2.4.3.2.4.- Almidones doblemente modificados o doble derivación | 76 |
| III.- MATERIALES Y MÉTODOS | 77 |

| | |
|--|-----------|
| 3.1.- Materiales | 77 |
| 3.1.1.- Lugar de investigación | 77 |
| 3.1.2.- Materia Prima | 77 |
| 3.1.3.- Plan de muestreo y análisis estadístico | 78 |
| 3.2.- Métodos | 78 |
| 3.2.1.- Extracción de almidón nativo | 78 |
| 3.2.2.- Modificación de los almidones nativos | 80 |
| 3.2.2.1.- Almidones modificados físicamente por tratamiento térmico. | 80 |
| 3.2.2.1.1.- Obtención de almidones pre-gelatinizados por doble tambor. | 80 |
| 3.2.2.2.- Almidones modificados químicamente por derivación o sustitución. | 81 |
| 3.2.2.2.1.- Obtención de almidones fosfatado-acetilado. | 81 |
| 3.3.- Cálculo del rendimiento de los almidones obtenidos | 83 |
| 3.4. Caracterización de los almidones nativos y modificados de plátano y cambur verde | 83 |
| 3.4.1.- Grado de sustitución (GS) de los almidones modificados fosfatados-acetilados | 83 |
| 3.4.2.- Análisis morfológico de los gránulos de almidón | 85 |
| 3.4.2.1.- Microscopía electrónica de barrido (SEM) | 85 |
| 3.4.2.2.- Microscopía óptica | 85 |
| 3.4.2.3.- Tamaño de partícula | 85 |
| 3.4.3.- Propiedades físicas, químicas y funcionales | 86 |
| 3.4.3.1.- Determinación de la pureza | 86 |
| 3.4.3.2.- Color | 86 |
| 3.4.4.- Propiedades funcionales | 88 |
| 3.4.4.1.- Perfil amilográfico | 88 |
| 3.4.4.2.- Índice de absorción de agua, sólidos solubles y poder de hinchamiento | 88 |
| 3.4.4.3.- Solubilidad en agua fría | 90 |
| 3.4.4.4.- Estabilidad y claridad de las pastas | 90 |
| 3.4.4.5.- Estabilidad al congelamiento-deshielo: | 91 |
| 3.4.4.6.- Viscosidad Aparente | 91 |
| 3.4.5.- Propiedades Nutricionales | 92 |
| 3.4.5.1.- Digestibilidad in vitro del almidón | 92 |
| 3.4.5.2.- Almidón resistente | 92 |

| | |
|--|------------|
| IV.- RESULTADOS Y DISCUSIONES | 93 |
| 4.1.- Rendimiento de los procesos de obtención de los almidones nativos y modificados de musáceas. | 93 |
| 4.2 Grado de sustitución (GS) de los almidones modificados fosfatados-acetilados ... | 95 |
| 4.3.- Análisis morfométrico de los gránulos de almidón | 97 |
| 4.3.1.- Microscopía electrónica de barrido (SEM) | 97 |
| (C) | 98 |
| 4.3.2.- Microscopía óptica | 104 |
| 4.3.2.1.- Microscopia de luz polarizada (MLP) | 104 |
| 4.3.3 Tamaño de partícula | 110 |
| 4.4.- Composición física y química de los almidones de plátano (Musa AAB subgrupo Plátano “Hartón”) y cambur (Musa AAA sub grupo “pineo gigante”; Musa AAAB “FHIA-01” y Musa AAAB “FHIA-02”). | 112 |
| 4.4.1.- Composición química | 112 |
| 4.4.2.- Composición física | 127 |
| 4.4.2.1.- Color | 131 |
| 4.4.4.2.- Almidón dañado | 135 |
| 4.5.- Propiedades Reológicas | 137 |
| 4.5.1.- Índice de absorción de agua, solubilidad y poder de hinchamiento | 137 |
| 4.5.2.- Solubilidad en agua fría | 146 |
| 4.5.3.- Estabilidad y claridad de las pastas. | 149 |
| 4.5.4.- Estabilidad al congelamiento y deshielo | 154 |
| 4.5.5.- Consistencia del gel | 159 |
| 4.5.6.- Viscosidad aparente | 161 |
| 4.5.7.- Perfil amilográfico | 165 |
| 4.6.- Propiedades Nutricionales | 190 |
| 4.6.1.- Digestibilidad “in vitro” de los almidones nativos y modificados de plátano y cambur verde | 190 |
| 4.6.2.- Almidón resistente | 196 |
| V.- CONCLUSIONES | 200 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 202 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----------------------|
| Figura 1. Grupo Callimusa | 2523 |
| Figura 2. Grupo Rhodochlamys. | 2523 |
| Figura 3. Grupo Eumusa..... | 2624 |
| Figura 4. Principales países productores de plátanos para el año 2009..... | 3334 |
| Figura 5. Principales países productores de bananos para el año 2009..... | 3432 |
| Figura 6. Superficie cosechada (Ha) de plátanos y bananos en Venezuela 2000-2010. | 3634 |
| Figura 7. Componentes del almidón; (A) amilosa: α -D-glucopiranosas unidas por enlaces α (1,4); (B) conformación helicoidal de la amilosa; (C) amilopectina: α - D-glucopiranosas unidas por enlaces α (1,4) y ramificaciones en α (1,6); (D) estructura molecular de la amilopectina..... | 4644 |
| Figura 8. Micrografía del almidón de plátano | 5250 |
| Figura 9. Reacción química para el enlace cruzado de trimetafosfato de sodio St= polímero de almidón..... | 6866 |
| Figura 10. Reacciones propuesta en la fosfatación del almidón..... | 6967 |
| Figura 11. Gránulo de almidón (A) nativo y (B) acetilado mostrando la acción bloqueadora (\approx) de los grupos acetilos (+) introducidos; ataque del anhídrido acético en el gránulo de almidón de garbanzo (C)..... | 7270 |
| Figura 12. Reacciones químicas que ocurren durante la acetilación del almidón..... | 7374 |
| Figura 13. Esquema tecnológico para la extracción y purificación del almidón nativo. | 7977 |
| Figura 14. Esquema tecnológico de la modificación por deshidratación con doble tambor..... | 8078 |

| | |
|---|------------------------|
| Figura 15. Esquema tecnológico de la modificación fosfatado-acetilado..... | 8280 |
| Figura 16. Microscopía electrónica de barrido de gránulos de almidón de plátano (<i>Musa</i> AAB subgrupo Plátano “Hartón”). (A)= Almidón nativo; (B)= Almidón modificado por doble tambor; (C)= Almidón fosfatado-acetilado. | 9896 |
| Figura 17. Microscopia electrónica de barrido de gránulos de cambur (<i>Musa</i> AAA subgrupo Cavendish "pineo gigante"),. (A)= Almidón nativo; (B)= Almidón modificado por doble tambor; (C)= Almidón modificado fosfatado-acetilado..... | 9997 |
| Figura 18. Microscopia electrónica de barrido de gránulos de almidón de cambur (<i>Musa</i> AAAB "FHIA-01"). (A)= Almidón nativo; (B)= Almidón modificado por doble tambor; (C)= Almidón modificado fosfatado-acetilado. | 10098 |
| Figura 19. Microscopia electrónica de barrido de gránulos de almidón de cambur (<i>Musa</i> AAAB "FHIA-02"). (A)= Almidón nativo; (B)= Almidón modificado por doble tambor; (C)= Almidón modificado fosfatado-acetilado. | 10199 |
| Figura 20. Microscopia de luz polarizada de gránulos de almidón de plátano (<i>Musa</i> AAB subgrupo Plátano “Hartón”). (A)= Almidón nativo; (B)= Almidón modificado por doble tambor; (C)= Almidón modificado fosfatado-acetilado..... | 105403 |
| Figura 21. Microscopia de luz polarizada de gránulos de almidón de cambur (<i>Musa</i> AAA subgrupo Cavendish "pineo gigante"). (A)= Almidón nativo; (B)= Almidón modificado por doble tambor; (C)= Almidón modificado fosfatado-acetilado..... | 106404 |
| Figura 22. Microscopia de luz polarizada de gránulos de almidón de cambur (<i>Musa</i> AAAB "FHIA-01"). (A)= Almidón nativo; (B)= Almidón modificado por doble tambor; (C)= Almidón modificado fosfatado-acetilado. | 107405 |
| Figura 23. Microscopia de luz polarizada de gránulos de almidón de cambur (<i>Musa</i> AAAB "FHIA-02"). (A)= Almidón nativo; (B)= Almidón modificado por doble tambor; (C)= Almidón modificado fosfatado-acetilado. | 108406 |
| Figura 24. Porcentaje de almidón dañado en muestras de almidones nativos y modificados de plátano (<i>Musa</i> AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (<i>Musa</i> AAA Sub grupo Cavendish “pineo gigante”) “PG”; (<i>Musa</i> AAAB “FHIA-01”) | |

“F1” y (*Musa* AAAB “FHIA-02”) “F2”. cultivados del banco de germoplasma del INIA-Maracay. [136134](#)

Figura 25. Poder de Hinchamiento de los almidones nativos, pregelatinizados y fosfatado-acetilado de plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pinoe gigante”) “PG”; (*Musa* AAAB “FHIA-01”) “F1” y (*Musa* AAAB “FHIA-02”) “F2”. [138136](#)

Figura 26. Índice de Solubilidad de los almidones nativos, pregelatinizados y fosfatado-acetilado de plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pinoe gigante”) “PG”; (*Musa* AAAB “FHIA-01”) “F1” y (*Musa* AAAB “FHIA-02”) “F2”. [139137](#)

Figura 27. Índice de absorción de agua de los almidones nativos, pregelatinizados y fosfatado-acetilado de plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pinoe gigante”) “PG”; (*Musa* AAAB “FHIA-01”) “F1” y (*Musa* AAAB “FHIA-02”) “F2”. [140138](#)

Figura 28. Solubilidad en agua fría de los almidones nativos, pregelatinizados y fosfatado-acetilado de plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pinoe gigante”) “PG”; (*Musa* AAAB “FHIA-01”) “F1” y (*Musa* AAAB “FHIA-02”) “F2”. [147145](#)

Figura 29. Claridad (% T a 650 nm) a temperatura ambiente (A) y 4 °C (B) de los almidones nativos, pregelatinizados y fosfatado-acetilado de plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pinoe gigante”) “PG”; (*Musa* AAAB “FHIA-01”) “F1” y (*Musa* AAAB “FHIA-02”) “F2”. [150148](#)

Figura 30. Estabilidad al congelamiento y deshielo de los almidones nativos, pregelatinizados y fosfatado-acetilado de plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pinoe gigante”) “PG”; (*Musa* AAAB “FHIA-01”) “F1” y (*Musa* AAAB “FHIA-02”) “F2”. [156154](#)

Figura 31. Consistencia del gel de los almidones nativos, pregelatinizados y fosfatado-acetilado de plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde

(*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pineo gigante”) “PG”; (*Musa* AAAB “FHIA-01”) “F1” y (*Musa* AAAB “FHIA-02”) “F2”..... [160458](#)

Figura 32. Viscosidad Aparente a 30 °C y 50 °C de los almidones nativos, pregelatinizados y fosfatado-acetilado de plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pineo gigante”) “PG”; (*Musa* AAAB “FHIA-01”) “F1” y (*Musa* AAAB “FHIA-02”) “F2”..... [162460](#)

Figura 33. Perfil viscoamilográfico obtenido para una suspensión de almidón nativo de plátano verde (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” al 7 %..... [167465](#)

Figura 34. Perfil viscoamilográfico obtenido para una suspensión de almidón pregelatinizado de plátano verde (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” al 7 %..... [168466](#)

Figura 35. Perfil viscoamilográfico obtenido para una suspensión de almidón fosfatado-acetilado de plátano verde (*Musa* AAB subgrupo plátano “Hartón”) “HC” al 7%. [169467](#)

Figura 36. Perfil viscoamilográfico obtenido para una suspensión de almidón nativo de cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pineo gigante”) “PG” al 7%... [170468](#)

Figura 37. Perfil viscoamilográfico obtenido para una suspensión de almidón pregelatinizado de cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pineo gigante”) “PG” al 7%. [171469](#)

Figura 38. Perfil viscoamilográfico obtenido para una suspensión de almidón fosfatado-acetilado de cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pineo gigante”) “PG” al 7%..... [172470](#)

Figura 39. Perfil viscoamilográfico obtenido para una suspensión de almidón nativo de cambur verde (*Musa* AAA “FHIA-01”) “F1” al 7%..... [173471](#)

Figura 40. Perfil viscoamilográfico obtenido para una suspensión de almidón pregelatinizado de cambur verde (*Musa* AAA “FHIA-01”) “F1” al 7%. [174472](#)

Figura 41. Perfil viscoamilográfico obtenido para una suspensión de almidón fosfatado-acetilado de cambur verde (*Musa* AAA “FHIA-01”) “F1” al 7%..... [175473](#)

| | |
|---|------------------------|
| Figura 42. Perfil viscoamilográfico obtenido para una suspensión de almidón nativo de cambur verde (<i>Musa</i> AAA “FHIA-02”) “F2” al 7%..... | 176174 |
| Figura 43. Perfil viscoamilográfico obtenido para una suspensión de almidón pregelatinizado de cambur verde (<i>Musa</i> AAA “FHIA-02”) “F2” al 7%. | 177175 |
| Figura 44. Perfil viscoamilográfico obtenido para una suspensión de almidón fosfatado-acetilado de cambur verde (<i>Musa</i> AAA “FHIA-02”) “F2” al 7%..... | 178176 |
| Figura 45. Perfil viscoamilográficas obtenido para las suspensiones de los almidones extraídos de plátano (<i>Musa</i> AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (<i>Musa</i> AAA Sub grupo Cavendish “pineo gigante”) “PG”; (<i>Musa</i> AAAB “FHIA-01”) “F1” y (<i>Musa</i> AAAB “FHIA-02”) “F2”..... | 179177 |
| Figura 46. Digestibilidad “in vitro” del almidón de los almidones nativos, pregelatinizados y fosfatado-acetilado de plátano (<i>Musa</i> AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (<i>Musa</i> AAA Sub grupo Cavendish “pineo gigante”) “PG”; (<i>Musa</i> AAAB “FHIA-01”) “F1” y (<i>Musa</i> AAAB “FHIA-02”) “F2”..... | 192190 |
| Figura 47. Contenido de almidón resistente de los almidones nativos, pregelatinizados y fosfatado-acetilado de plátano “HC” y cambur verde (<i>Musa</i> AAA Sub grupo Cavendish “pineo gigante”) “PG”; (<i>Musa</i> AAAB “FHIA-01”) “F1” y (<i>Musa</i> AAAB “FHIA-02”) “F2”..... | 197195 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|------------------------|
| Tabla 1.- Clasificación taxonómica de los clones colectados por Haddad y Borges (1973) para Venezuela..... | 2928 |
| Tabla 2.- Clones que constituyen el grupo diploides de la colección de Musas de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela..... | 3130 |
| Tabla 3.- Clones que constituyen los grupos triploides y tetraploides de la colección de Musas de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela..... | 3130 |
| Tabla 4 .- Composición química y bioquímica de banano y plátanos en diferentes estados de madures y productos por 100 gramos. | 3837 |
| Tabla 5.- Composición química de bananas (porción comestible) en diferentes etapas de maduración (expresados como % en base seca)..... | 3938 |
| Tabla 6. Composición del Almidón de plátano verde. | 5150 |
| Tabla 7. Análisis físicos, químicos y funcionales. | 8685 |
| Tabla 8. Rendimiento de los almidones nativos y modificados de plátano y cambur verde. | 9493 |
| Tabla 9. Determinación del contenido de fósforo (%p/p) y grado de sustitución (GS) en almidones de plátano y cambur verde nativo y modificado. | 9594 |
| Tabla 10. Determinación del % de Acetilo y grado de sustitución (GS) en muestras de almidones de plátano y cambur verde modificado. | 9695 |
| Tabla 11. Tamaño de partículas de los almidones nativos y modificados de plátano (<i>Musa</i> AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (<i>Musa</i> AAA Sub grupo Cavendish “pineo gigante”) “PG”; (<i>Musa</i> AAAB “FHIA-01”) “F1” y (<i>Musa</i> AAAB “FHIA-02”) “F2”..... | 111410 |
| Tabla 12. Composición química de los almidones nativos y modificados de plátano (<i>Musa</i> AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (<i>Musa</i> AAA Sub grupo | |

Cavendish “pineo gigante”) “PG”; (*Musa* AAAB “FHIA-01”) “F1” y (*Musa* AAAB “FHIA-02”) “F2”..... [113+12](#)

Tabla 13. Valores de densidad relativa, pH y acidez titulable obtenidos para los almidones nativos y modificados de plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pineo gigante”) “PG”; (*Musa* AAAB “FHIA-01”) “F1” y (*Musa* AAAB “FHIA-02”) “F2”. [129+28](#)

Tabla 14. Índice de luminosidad (L), coordenadas de cromaticidad (a y b), e índice de blancura (WI), obtenidos para los almidones nativos y modificados de plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pineo gigante”) “PG”; (*Musa* AAAB “FHIA-01”) “F1” y (*Musa* AAAB “FHIA-02”) “F2”..... [133+32](#)

Tabla 15. Propiedades viscoamilográficas de los almidones extraídos de plátano (*Musa* AAB subgrupo plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pineo gigante”) “PG”; (*Musa* AAAB “FHIA-01”) “F1” y (*Musa* AAAB “FHIA-02”) “F2”..... [166+65](#)

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue el estudio de almidones extraídos de la parte comestible de dos clones triploides de musáceas, variedades plátano (*Musa* AAB) y cambur verde (*Musa* AAA Cavendish “pineo gigante”) y dos clones tetraploides (*Musa* AAAB “FHIA-01”) y (*Musa* AAAB “FHIA-02”), mediante técnicas analíticas de caracterización e identificación como: viscoamilografía rápida, microscopía electrónica de barrido, digestibilidad *in vitro* de almidón, almidón resistente, entre otras. Se evaluó la composición química y propiedades físicas y funcionales de los almidones de plátano y cambur verde, así como, de dos almidones modificados obtenidos mediante pregelatinización, tratamiento de fosfatación y acetilación (fosfatado-acetilado), con el fin de sugerir su posible uso en la elaboración de alimentos. Para cumplir con este objetivo se estudiaron los parámetros: color, pH, acidez, viscosidad, composición proximal, contenido de amilosa, índice de absorción y solubilidad en agua, poder de hinchamiento, solubilidad en agua fría, estabilidad y claridad de las pastas y estabilidad al congelamiento. Se obtuvieron almidones nativos y modificados de gran pureza, con diferencias significativas al estudiar sus propiedades reológicas. La capacidad de absorción de agua, solubilidad y poder de hinchamiento se incrementaron con las modificaciones físicas; los almidones modificados tuvieron menor tendencia a la retrogradación, medida como porcentaje de transmitancia, lo que se traduce en una mayor estabilidad y claridad de las pastas, principalmente aquellas obtenidas a partir de almidones fosfatado-acetilados; además la estabilidad al congelamiento-deshielo también fue mejorada con el tratamiento térmico. Con base en estos resultados, los almidones pregelatinizados de plátano y cambur verde presentan características propias para su uso en alimentos instantáneos y los almidones fosfatado-acetilado en sistemas alimenticios que requieran viscosidad constante durante el tiempo de cocción. Este estudio representa un aporte relevante e innovador en el área de Tecnología de Alimentos, específicamente en la utilización de fuentes amiláceas no convencionales para la producción y desarrollo de alimentos.

Palabras claves: *Musa* (spp), *Hartón común*, plátano, cambur verde, FHIA-01, FHIA-02, modificación, pregelatinizados, fosfatación, acetilación.

DEDICATORIA

*A DIOS y a mi madre **Gertrudis María Guevara (†)**, quien fue la luz que
guió mi camino, enseñándome la importancia de la perseverancia, la responsabilidad
y la amistad con su dedicación y amor.*

A ella todos mis triunfos y mis alegrías, a ella mis éxitos y esfuerzo.

*A la **Dra Emperatriz Pacheco de Delahaye (†)**, por su amistad, amor y
dedicación*

A ellos con todo mi amor y agradecimiento eterno, este logro alcanzado.

AGRADECIMIENTOS

Estos últimos años han sido para mí unos de los más importantes, intensos y fascinantes de mi trayectoria profesional. En este tiempo he tenido la enorme suerte y satisfacción de conocer, compartir y de trabajar con personas que me han ayudado de una u otra forma en la consecución de un esfuerzo de investigación, y a las que les estoy profundamente agradecido. Aunque el hecho de exponer una lista de personas siempre supone un riesgo de olvidar a alguna de ellas, si quisiera hacer una especial mención de agradecimiento para las siguientes:

A mi tutora Dra. Alejandra Ramírez por todo su apoyo, paciencia y por sus valiosos consejos diarios, que además de transmitir sus conocimientos me mostró muchas enseñanzas de vida.

A la Dra. Elevina Pérez, por su inmensa ayuda tanto a nivel profesional como personal, por toda la confianza que depositó en mí y por brindarme su amistad, en los buenos y malos momentos, una vez más mil gracias.

Edward Manzanilla y al personal del banco de germoplasma del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA), quienes suministraron las muestras para llevar a cabo esta investigación.

Rosaura Istúriz, Profesora de la Universidad Central de Venezuela, con una alta calidad de investigación y quién me ayudó con sus valiosos consejos. Gracias por su amistad, apoyo y cariño incondicional.

Dr. Romel Guzman, profesor y amigo, que me prestó su ayuda incondicional en el transcurso del desarrollo de esta investigación y que con su amor, dedicación y amistad siempre me ha apoyado en todo tanto profesional como personalmente y me insita a seguir adelante. Romel, mil gracias por tu amor y amistad.

Jóse Escalona, Gloria de Pinto, Boni Escorche, Julia Parra, Hazel Román, Nelys Leonardes e Isaias Caballero, quienes fueron grandes colaboradores, en torno a esta investigación.

A mis grandes amigas Kenia Siso y Rosmar Narcise quienes con su amistad siempre me brindan su apoyo.

A las Profesoras: Nora Techerira, Yasmín Román, Gladiana Praderes, Audrey Suárez, Brunilda Perdomo; por creer en mi capacidad y por darme su apoyo profesional.

INTRODUCCIÓN

Las plantas de musáceas crecen extensivamente en regiones tropicales y subtropicales y son un importante cultivo alimenticio. El término banano es usado para identificar a las especies o híbridos de las plantas que pertenecen al género *Musa* de la familia *Musaceae* (Haddad y Borges, 1973). El fruto del banano es una baya cuya forma y tamaño dependen del genotipo y cultivar de origen y su nombre común varía de acuerdo a las regiones que se cultivan; es por ello, que su clasificación y nomenclatura es un tema complejo. El término plátano; por ejemplo, es usado comúnmente en América Latina para designar a los bananos que se consumen cocidos, sin embargo, los plátanos son un tipo específico de los bananos de cocción que forman un grupo de clones triploides. En general, como banano se designa a la fruta de consumo fresca. En Venezuela, el uso de los términos *plátano* y *cambur* son para designar la especie de cocción y de consumo fresco, respectivamente.

Es importante señalar que, el fruto del cultivar de la *Musa spp* se caracteriza por ser climatérico y se consume usualmente en casi todas las regiones del mundo en el estado madurez fisiológico y de consumo, sin embargo puede prepararse salcochado o frito, lo cual realza su características sensoriales (García *et al.*, 2007).

El género musáceas representa la cuarta fuente de energía para países en vías de desarrollo después del maíz, arroz y trigo. El cultivo de las musáceas comestible en América Latina tiene una importancia especial y esto se debe a que no sólo forma parte de la dieta de la población sino también a sus beneficios económicos derivados de esta actividad que genera fuentes de trabajo (Laborem *et al.*, 2001; Vuylsteke *et al.*, 1999; Alemán *et al.*, 2011).

En Venezuela el primer renglón frutícola lo constituyen las musáceas comestibles como el plátano ‘Hartón Común’ (*Musa* AAB), cambur (*Musa* AAA) subgrupo Cavendish ‘Pineo Gigante’, ‘Williams’, ‘Valery’, ‘Brasileño’, cambur ‘Manzano’ (*Musa* AAB), y topocho (*Musa* AAB); y su contribución en el volumen total de frutas producidas en el país para el año 2010 fue el 28,70% (FEDEAGRO, 2010); de allí que este renglón posee una importancia económica significativa para la economía agroalimentaria del país; esta preferencia se debe a muchos factores, de los cuales el principal es la accesibilidad, caracterizada no sólo por la oferta sino por su bajo costo, siendo alcanzable incluso por aquellos estratos poblacionales de menores ingresos; además, constituyen un componente básico en la dieta de nuestra población (Pacheco y Testa, 2005; Nava, 1980; Tezenas, 1985; Sandoval *et al.*, 1991; Martínez *et al.*, 2004; Martínez *et al.*, 2008; Alemán *et al.*, 2011).

En la actualidad, se ha dado mayor énfasis a la investigación con relación a las propiedades genéticas y agronómicas de los cultivos tropicales, pero poco se ha estudiado sobre darles valor agregado; por ejemplo, la producción de almidones es una de las actividades agroindustriales más importantes en el ámbito mundial, su aplicación no sólo se extiende a la industria de alimentos, sino también a otras industrias tales como textil, papel, fármacos, petroleros, entre otros. En la industria de alimentos el almidón es importante porque ofrece una amplia gama de propiedades funcionales que determinan la calidad del producto final, por lo que la tendencia actual es buscar fuentes alternativas para la obtención de almidón. Sin embargo, el almidón en su forma nativa o natural, presenta ciertas desventajas al ser aplicados a nivel industrial, debido a que son menos eficientes por su baja resistencia a esfuerzos de corte, propiedades espesantes limitadas, descomposición térmica, alto nivel de retrogradación y sinéresis. Por tanto, se

han estudiado estrategias para mejorar sus propiedades funcionales, por lo cual una vez aislado el almidón debe ser modificado por métodos físicos, químicos y/o enzimáticos. (Bello-Pérez *et al.*, 2002; Bello-Pérez *et al.*, 2001; Nocelo y Betancur, 2005; Manrique *et al.*, 2007; Pérez *et al.*, 1999; Satín, 1999; Amani *et al.*, 2005).

Debido a que el almidón es el polisacárido más utilizado como ingrediente funcional (espesante, estabilizante y gelificante) en la industria alimentaria, es necesario buscar nuevas fuentes alternativas de extracción (Hernández *et al.*, 2008), como por ejemplo el plátano y el cambur, los cuales son de interés por ser una fuente potencial para la alimentación con propósitos industriales, desde el punto de vista de su composición química, estos frutos en su madurez fisiológica (verdes) son fuentes de carbohidratos; principalmente almidón, que pueden ser explotados comercialmente, considerando que este componente experimenta cambios importantes durante la maduración, por lo que se ha aislado a escala de laboratorio y piloto estudiando las propiedades químicas y funcionales (Lii *et al.*, 1982; Chiang *et al.*, 1987; Pérez, 1996; Bello-Pérez *et al.*, 1999), este procedimiento además de dar valor agregado, contribuye a disminuir las pérdidas post-cosecha y a obtener un material amiláceo que puede llegar a sustituir insumos convencionales importados. Sin embargo, hay que realizar estudios en la búsqueda de los procesos apropiados como la obtención de harinas y almidones, así como su posible aplicación en el campo de alimentos, para formular y desarrollar nuevos productos con las características apropiadas para la elaboración de productos adecuados destinados a aquellas personas que presentan algún régimen especial, y de esta manera satisfacer las exigencias del público consumidor (Villarroel *et al.*, 2000; Pacheco *et al.*, 2004; Daramola y Osanyinlusi, 2006; Rodríguez *et al.*, 2008; Hernández

et al., 2008; Da Mota y col., 2000; Gonzáles y Pacheco, 2006; Pérez y Lares, 2004; Hoover, 2001; Chiun *et al.*, 2001).

Dadas estas premisas, se ha propuesto en este trabajo de investigación evaluar las propiedades físico-químicas, propiedades funcionales y nutricionales de almidones nativos y modificados física y químicamente extraídos de diferentes clones de musáceas, de cuatro variedades del cultivar *Musa spp* del Banco de Germoplasma del INIA, específicamente clones AAB (plátano verde) y AAA y AAAB (Cambur verde).

OBJETIVOS

GENERAL:

Evaluar la composición físico-química, propiedades funcionales y nutricionales de almidones nativos y modificados extraídos de clones de diferentes variedades de musáceas, plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) y cambur verde (*Musa* AAA subgrupo Cavendish “pineo gigante”; *Musa* AAAB “FHIA-01” y “FHIA-02”) del Banco de Germoplasma del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA).

ESPECÍFICOS:

- ❖ Extraer el almidón a partir de la parte comestible de los clones de *Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”; *Musa* AAA subgrupo Cavendish “pineo gigante”; *Musa* AAAB “FHIA-01” y “FHIA-02”.
- ❖ Obtener a partir del almidón nativo, almidón modificado físicamente por doble tambor, (almidón pregelatinizado).
- ❖ Obtener a partir del almidón nativo, almidón modificado mediante el método químico doblemente modificado (fosfatado-acetilado).
- ❖ Evaluar morfológicamente los almidones nativos y modificados.
- ❖ Evaluar la composición química, propiedades físico y químicas de los almidones nativos y modificados.
- ❖ Determinar las propiedades funcionales de los almidones nativos y modificados.
- ❖ Estudiar las propiedades nutricionales de los almidones nativos y modificados.

II. REVISION BIBLIOGRÁFICA

2.1. MUSÁCEAS

Esta especie es originaria de Asia, de la región Indo / Malaya. Para el siglo 3 A.C. en el mediterráneo solamente se conocía de la fruta por referencia. Se cree que llegó a Europa en el siglo 10 D.C. y que marinos portugueses la trajeron a Sudamérica desde África occidental o el este de Indonesia (Rodríguez, 1994).

Desde el punto de vista botánico el género *Musa* se divide en seminíferos (variedades no comestibles de frutas) y en partenocárpicas (variedades de frutas carnosas sin semillas). El término banano es empleado para identificar a las especies o híbridos de plantas que pertenecen al género *Musa*, subfamilia *Musoideae*, familia *Musaceae*. La familia de las Musáceas se encuentra dentro del orden *Zingiberales*, clase *Mymphaeopsida*, subdivisión *Magnoliophytina*, división *Macrophyllphytiva* (Champion, 1968; López, 1989; Lescot, 2008).

Los bananos son plantas herbáceas de gran tamaño, que pueden llegar a medir hasta 15 m de altura. Están constituidas por un tallo corto subterráneo (rizoma), que recibe el nombre de "cormo". Las hojas son grandes, ovales de hasta 3 m de longitud, de base obtusa, ápice agudo, margen entero y color verde oscuro o amarillento. Las extremidades de los pecíolos o vainas se solapan fuertemente de manera helicoidal conformando un pseudotallo cilíndrico. La inflorescencia que emerge del centro de la copa foliar, puede alcanzar entre 50 y 150 cm, está cubierta de brácteas dispuestas a manera de espiral, y cada una recubre un grupo de flores desprovistas de brácteas

individuales y situadas en dos filas apretadas e imbricadas. Estos grupos de flores reciben el nombre de “manos”. Las manos comprenden flores femeninas y masculinas. Todo el conjunto de manos conforman lo que se conoce como “racimo”. El fruto es una baya, su forma y tamaño varían dependiendo del genotipo y del cultivar (Champion, 1968; López, 1989; INIBAP/IPGRI, 1998; González, 2004).

En concordancia con el empleo del término “manos” para los grupos de flores y frutos, es común denominar a estos últimos como “dedos”.

2.1.1.- Clasificación de los bananos

A escala mundial existen alrededor de 1000 tipos de bananos diferentes, por lo que su clasificación y nomenclatura es un tema complejo (INIBAP, 2005).

La primera clasificación que se hizo del género *Musa* se debe a Linneo, quien empleó el término científico de *Musa paradisiaca* Linn. en su libro “Species Plantarum” publicado en 1753, basando su descripción en un cultivo de plátano de frutos largos y delgados que permanecen amiláceos aún después de madurar y que son cocidos antes de ser consumidos. En 1759 Linneo en su libro “Systema Naturae” emplea el término *Musa sapientum* Linn. para describir una banana de postre cuyos frutos son dulces y son consumidos frescos después de madurar (Valmayor *et al.*, 2000). El término de *Musa paradisiaca* correspondería a lo que en Venezuela se conoce como “plátano Dominicó” y el de *Musa sapientum* al “cambur Manzano” (Haddad y Borges, 1973). Estos términos se emplean desde entonces y aún en la actualidad son de uso frecuente para clasificar a las bananas. Sin embargo, esta nomenclatura presenta serios inconvenientes; por ejemplo, muchos cultivos son clasificados con un propósito dual, ya que son

consumidos frescos o cocidos. Existen variedades de bananas que se consumen cocidas, y que son diferentes a los plátanos, por lo que no pueden ser clasificadas como *Musa paradisiaca*, a esto se suma la variedad de bananas de postre que en términos de tamaño de la planta, tamaño y color del fruto, va más allá de la simple clasificación como *Musa sapientum* (Valmayor *et al.*, 2000).

A la problemática antes señalada hay que agregar el uso de nombres comunes que le son asignados a las variedades de banano de acuerdo a las regiones donde se cultivan. Esto origina en muchos casos múltiples nombres para una misma variedad. Como ejemplo de esto se puede citar una variedad de banano cultivada en Venezuela, que de acuerdo a Haddad y Borges (1973), se le asigna los nombres de “Pineo Enano”: Enano, Pineo, Agachado, Gacho, Sentado y Ñato; y en otros países: Pigmeo, Indio, Enano (Colombia); Chino (Jamaica); Guineo Enano (Puerto Rico); Cavendish (Hawai); y Dwarf Cavendish (Simmonds, 1966).

Cheesman (1948) y Simmonds y Shepherd (1955), explicaron el origen de las bananas comestibles y propusieron una nueva clasificación que sucediera a la utilizada por Linneo. Simmonds y Shepherd (1995), concluyeron que los nombres científicos de *Musa paradisiaca* y *Musa sapientum* se basaron en cultivos híbridos, y en consecuencia recomendaron su eliminación. Ellos determinaron que la bananas comestibles se originaron de dos especies silvestres y seminíferas *Musa acuminata* Colla y *Musa balbisiana* Colla, las cuales son endémicas del sureste de Asia. Cheesman (1948), reconoció tres grupos de cultivos morfológicamente distintos: el primer grupo muestra una predominancia de las características botánicas de *Musa acuminata*, mientras que el segundo exhibe las características morfológicas de *Musa balbisiana*, el tercer grupo

posee características que combinan los caracteres morfológicos de las dos especies y son considerados como sus híbridos naturales (Valmayor *et al.*, 2000).

De acuerdo a Haddad y Borges (1973), los trabajos de Simmonds y Shepherd (1955) y Cheesman (1948), modificaron la clasificación intragenérica, dividiendo el género *Musa* en cuatro grupos:

1. Australimusa, presenta un número cromosómico básico de $X=10$.
2. Callimusa, presenta un número cromosómico básico de $X=10$.
3. Rhodochlamys, presenta un número cromosómico básico de $X=11$.
4. Eumusa, presenta un número cromosómico básico de $X=11$.

La sección Australimusa está comprendida por cinco especies, pero solamente una de ellas tiene importancia económica (*Musa textiles* L.), ya que produce fibras utilizadas en la fabricación de textiles y cuerdas, también se encuentra la especie *Musa fei* Bert (Banano fei), el único banano comestible de este grupo (López, 1989; Nava, 1997). Estos cultivares se distinguen por su tallo erecto y la savia de los racimos de color rojo y se encuentran casi exclusivamente en la región del Pacífico.

El grupo Callimusa comprende cinco especies, todas ellas empleadas como plantas ornamentales, entre ellas destaca la especie *Musa coccinea*, cuyas brácteas son de color escarlata, Figura 1 (López, 1989; Nava, 1997).



M. peekelii Frutas de color rojo en la madurez con brillantes pulpa amarilla (INIBAP, 2001)



M. angustigemma (INIBAP, 2001)



M. textiles, conocido como abacá o Manilla de cáñamo (INIBAP, 2001)

Figura 1. Grupo Callimusa

La sección *Rhodochlamys* tiene especies de interés ornamental, por ejemplo la especie *Musa ornata* Roxb que se distingue por sus brácteas rosa-violeta pálido y por sus flores de color amarillo vivo, Figura 2 (López, 1989; Nava, 1997).



M. ornata



M. velutina



M. laterita

Figura 2. Grupo *Rhodochlamys*.

El grupo *Eumusa* es el más grande e importante del género y se encuentra ampliamente distribuido en las zonas tropicales. Su importancia radica en el hecho de haber dado origen a la inmensa mayoría de los bananos comestibles. Dentro de este

grupo se encuentran las especies diploides: *Musa acuminata* y *Musa balbisiana*. De estas especies silvestres y seminíferas, originarias del sudeste asiático, se derivaron los híbridos comestibles de bananos, Figura 3 (López, 1989; Nava, 1997).



M. acuminata



M. balbisiana

Figura 3. Grupo Eumusa.

Los cultivares comestibles se originaron mediante la hibridación interespecífica de *Musa acuminata* y *Musa balbisiana*. La haploidía y el genomio de cada cultivar está representado con A para indicar la procedencia de *M. acuminata* y con B para la *M. balbisiana*, de esta manera las letras A y B se utilizan para la clasificación e identificación de los diferentes cultivares, dependiendo de la constitución genómica que aporte cada especie parental (González, 2004).

Haddad y Borges (1973), y Navas (1997), indican que la clasificación de los bananos comestibles de acuerdo a la obra de Simmonds (1966), puede esquematizarse de la siguiente manera:

➤ Clones con genomas acuminata:

❖ Diploides (AA).

➤ Clones con genomas acuminatas y balbisiana:

- ❖ Diploides (AB).
- ❖ Triploides con dominancia acuminata (AAB)
- ❖ Triploides con dominancia balbisiana (ABB)
- ❖ Tetraploides (ABBB).

Zhang *et al.*, (2005) indican que los híbridos clasificados por Linneo como *M. paradisiaca* y *M. sapientum*, son miembros del grupo triploides con dominancia acuminata (AAB). INIBAP (2005), clasifica los cultivares de bananos comestibles de acuerdo a Simmonds:

- ❖ AA Principalmente bananos dulces pequeños.
- ❖ ABB-dessert: Bananos de postre, como el Cavendish, la principal variedad de exportación.
- ❖ ABB-cooking: Grupo especial de los bananos de altiplanos de África Oriental.
- ❖ AAB-dessert: Bananos de postre de sabor “dulce-ácido”, populares en Brasil e India.
- ❖ AAB-cooking: Plátanos verdaderos, comunes en África Occidental y América latina.
- ❖ ABB-cooking: Comunes en el Sudeste de Asia.

El término plátano es usado comúnmente en América latina para designar a los bananos que se consumen cocidos. Sin embargo, los plátanos son un tipo específico dentro de los bananos de cocción, que forman un subgrupo dentro del grupo de clones triploides con dominancia acuminata (AAB) (Haddad y Borges, 1973; Nava, 1997; INIBAP, 2005).

2.1.2.- Variedades de bananos presentes en Venezuela

Las variedades de banano existentes en Venezuela se han documentado de acuerdo a Haddad y Borges (1973), en varias ocasiones. Por primera vez en el año 1877; mediante la obra “El Agricultor Venezolano” de J. A. Díaz, en la que se hace mención a algunos tipos de musáceas existentes en el país. En el año 1921, L. Alvarado señaló la existencia de diversas variedades de cambures. Para 1926, H. Pittier destaca la existencia de varios tipos de plátanos. Haddad y Borges (1973), concluyen que los distintos autores mencionaban aproximadamente las mismas variedades, con algunas modificaciones en sus nombres.

Haddad y Borges (1973), publicaron resultados de un extenso trabajo de investigación, en el cual recolectan, propagan, identifican y clasifican de acuerdo al sistema de Simmonds (1966), los bananos comestibles existentes en el país, los autores presentan las características morfológicas y taxonómicas, la ubicación geográfica de las variedades, y la importancia del cultivo, además, indican cuales son los nombres comunes que recibe cada variedad de acuerdo a la región donde se cultiva, y realizan la homologación con las variedades conocidas en otros países.

La tabla 1, presenta los clones colectados por Haddad y Borges (1973), de acuerdo a su clasificación taxonómica.

Nava (1997), estudió el cultivo de los híbridos AAB de Venezuela, principalmente dentro del subgrupo Plátanos, indicando que en el país se encuentran generalmente sembrados con interés comercial dos clones con características similares:

Tabla 1.- Clasificación taxonómica de los clones colectados por Haddad y Borges (1973) para Venezuela

| Identificación (nombre común) | Grupo | Sub-grupo | Identificación (nombre común) | Grupo | Sub-grupo |
|--------------------------------------|--------------|------------------|--------------------------------------|--------------|------------------|
| Titiaro | AA | --- | Plátano hartón | AAB | Plátano |
| Cuyaco | ABB | --- | Hartón enano | AAB | Plátano |
| Pineo enano | ABB | Cavendish | Plátano dominico | AAB | Plátano |
| Pineo gigante | ABB | Cavendish | Domínico topocho | AAB | Plátano |
| Pineo martinico | ABB | Cavendish | Cambur ácido | AAB | --- |
| Concha verde* | ABB | Cavendish | Cambur manzano | AAB | --- |
| Valery | ABB | Cavendish | Tornasol | AAB | --- |
| Cuyaco-pineo* | ABB | Cavendish | Mysore | AAB | --- |
| Gigante o Lacatan | ABB | Cavendish | Topocho verde | ABB | --- |
| Cambur morado | ABB | Morado | Topocho cenizo | ABB | --- |
| Morado verde o injerto | ABB | Morado | Topocho enano | ABB | --- |
| Cambur negro o criollo | ABB | --- | Ice cream | ABB | --- |
| --- | --- | --- | Topocho pelpita | ABB | --- |

* Clones afines a Pineo martínico

Fuente: Haddad y Borges, (1973).

Plátano Hartón común (Nombre técnico: Musa AAB Plátano cv Hartón), que presenta un pseudotallo verde; y Plátano Hartón negro, que presenta un pseudotallo morado o negro en diferentes tonalidades, también reporta la existencia de otros clones de plátano (AAB) como: el plátano Dominico (mutación reversible del plátano Hartón), el Dominico-Hartón y el falso Hartón, los cuales tienen poca importancia comercial.

Debido a la presencia de diferentes problemas patológicos (tales como la Sigatoca Negra y Amarilla, el nematodo barrenador, y el Hereque o Moko), las pérdidas de fruta y los costos de producción se han elevado. Esto ha llevado a diferentes países a desarrollar programas de investigación y mejoramiento genético para obtener clones resistentes a estos patógenos. El INIBAP y otras organizaciones han mantenido, desde 1984, un programa de mejoramiento genético recurriendo a diferentes fuentes para la selección de materiales con adecuadas características en cuanto a su comportamiento agronómico, calidad de fruta y resistencia a los patógenos más importantes, llegando hasta la obtención de tetraploides (AAAB) con racimos dentro del tipo Subgrupo Plátano (Nava, 1997).

De acuerdo a Haddad (2000), el germoplasma existente en la colección de de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela está constituido por clones diploides, triploides y tetraploides.

La Tabla 2 y 3 presentan los clones identificados que constituyen los grupos diploides, triploides y tetraploides dentro de la referida colección. De acuerdo a Haddad (2000) los clones de los grupos ABB y AAB están perfectamente identificados taxonómicamente y se han caracterizado en cuanto a resistencia/susceptibilidad a los patógenos causantes de la Sigatoka Negra, Sigatoka Amarilla y Hereque.

2.1.3.- Producción de bananos

El banano se cultiva en todas las regiones tropicales y es el cuarto cultivo alimentario más importante del mundo, después del arroz, el trigo y el maíz. Es un

Tabla 2.- Clones que constituyen el grupo diploides de la colección de Musas de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela.

| Haploidia | Grupo | Nombre | Genoma |
|-----------|-------|--|---------------------------|
| Diploides | AA | Titiaro | AAcv ^{&} |
| | | Alto Orinoco | AAcv |
| | | Pisang Mas (ITC 0653) | AAcv |
| | | Pisang Lilin (ITC0001) | AAcv |
| | | Pisang Berlin (ITC 0611) | AAcv |
| | | Pisang Mas (Colombia) | AAcv |
| | | Tuugía (ITC0612) | AAcv |
| | | Mambu Thu (ITC0612) | AAcv |
| | | Musa acuminata | AAw ^{&&} |
| | | M. acuminata sibs. Malaccedis (ITC 0689) | AAw |
| | | M. balbisna | BBw |

Fuente: Haddad (2000)
[&]Cultivar (cv) ^{&&}Silvestre

Tabla 3.- Clones que constituyen los grupos triploides y tetraploides de la colección de Musas de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela.

| Haploidia | Grupo | Subgrupo | Clones | Haploidia | Grupo | Subgrupo | Clones | |
|------------|-------|-----------------|--------|--------------|-------|----------|------------------|---------------|
| Triploides | ABB | Gros Michel | 5 | Triploides | | Mysore | 1 | |
| | | Cavendish | 30 | | | ABB | Blugoe (topocho) | 8 |
| | | Red | 1 | | | | Awak | 1 |
| | | Red/Green | 1 | | | | Pelpita | 2 |
| | | Ibota | 2 | | | BBB | --- | Lep Chang Kut |
| | | Lujugira | 1 | | | | --- | Saba |
| | | Mutila/Lujugira | 2 | Tetraploides | ABBA | --- | FAGRO-07 | |
| | AAB | Plátanos | 25 | | | --- | FAGRO-149 | |
| | | Silo | 1 | | AAAB | --- | FHIA-01 | |
| | | Pisang Rajah | 1 | | | --- | FHIA-02 | |
| | | Pisang Kelat | 2 | | | --- | FHIA-021 | |
| | | Pome | 1 | | AABB | --- | FHIA03 | |
| | | Manzano | 6 | | | | Ngoen | |

Fuente: Haddad (2000).

alimento básico y un producto de exportación. Como alimento básico, los bananos, incluidos los plátanos y otros tipos de bananos de cocción, contribuyen a la seguridad alimentaria de millones de personas en gran parte del mundo en desarrollo y proporcionan ingreso y empleo a las poblaciones rurales. Como producto de exportación, el banano contribuye de forma decisiva a las economías de muchos países. Es la fruta fresca más exportada del mundo en cuanto a volumen y valor (Arias *et al.*, 2004).

Los plátanos constituyen la mayor producción de frutas y el mayor comercio internacional, por encima de la manzana, uva, naranja y el melón. Son cultivados en más de 120 países en los 5 continentes en las regiones subtropicales (Bakry *et al.*, 2008).

La mayor parte de la producción mundial de plátano va dirigida al consumo interno de los países. Se estima que sólo el 1% del total producido en el mundo es comercializado internacionalmente, esto es especialmente válido para los países africanos, los cuales, a pesar de ser los mayores productores mundiales, tienen una participación muy discreta en el mercado global, debido a la alta demanda interna de sus países. Históricamente el mayor consumo per cápita (FAO, 2009), ha sido África (61%), seguido de Suramérica (15%), el Caribe (12%), Centro América (9%), y un grupo de países (3%) entre los cuales se encuentran Sri Lanka, Myanmar, Macedonia e Irlanda. Entre los países africanos, se destacan Uganda, Rwanda, Gabón, Ghana, Costa de Marfil y otros no menos importantes como Kenya, El Congo, Nigeria, Tanzania, Liberia, Malawi, Sierra Leona Guinea, Camerún.

En la Figura 4, se observa para el año 2009, que el país con mayor producción a nivel mundial de plátanos es Uganda con una producción 1.472.871 miles de dólares internacionales y una producción en toneladas métricas de 9.512.000 mientras que República Democrática del Congo tuvo una producción de 247.749 miles de dólares internacionales y una producción en toneladas métricas de 1.200.000, según estimaciones de la FAO (2009) la República Bolivariana de Venezuela tiene una producción de 95.073 miles de dólares internacionales y una producción en toneladas métricas de 480.000.

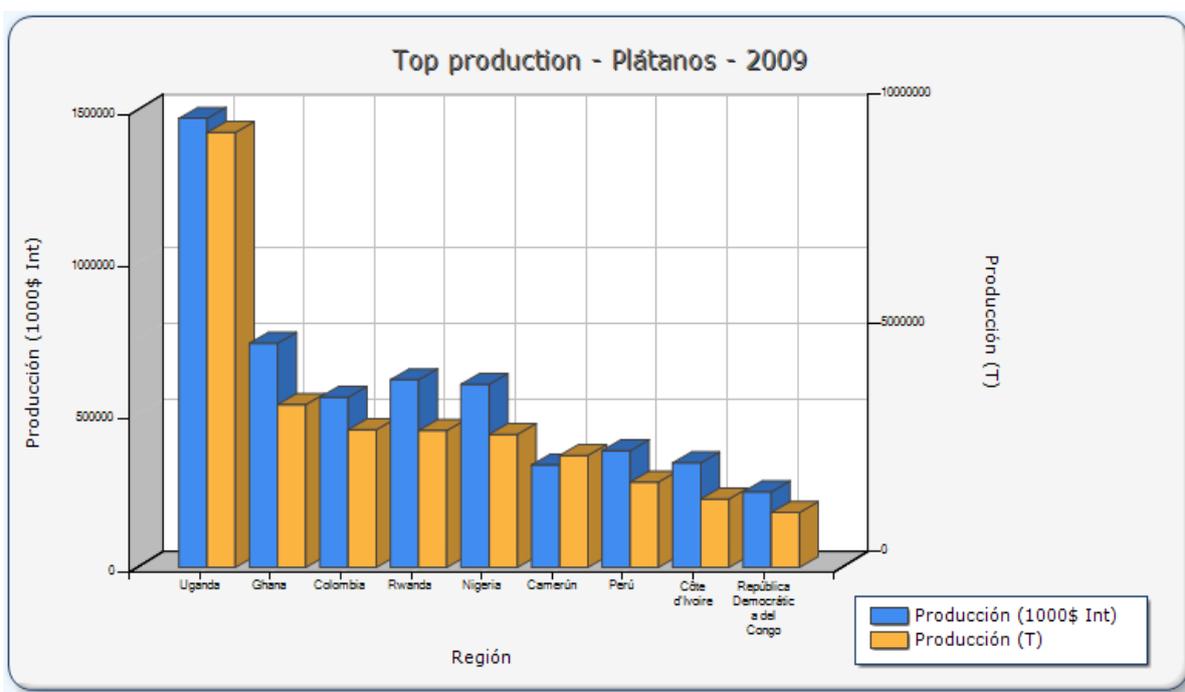


Figura 4. Principales países productores de plátanos para el año 2009.

Fuente: FAO, (2009).

En la Figura 5, se observa para el año 2009 que el país con mayor producción a nivel mundial de bananos es India con una producción 7.603.079 miles de dólares internacionales y una producción en toneladas métricas de 26.469.500 mientras que

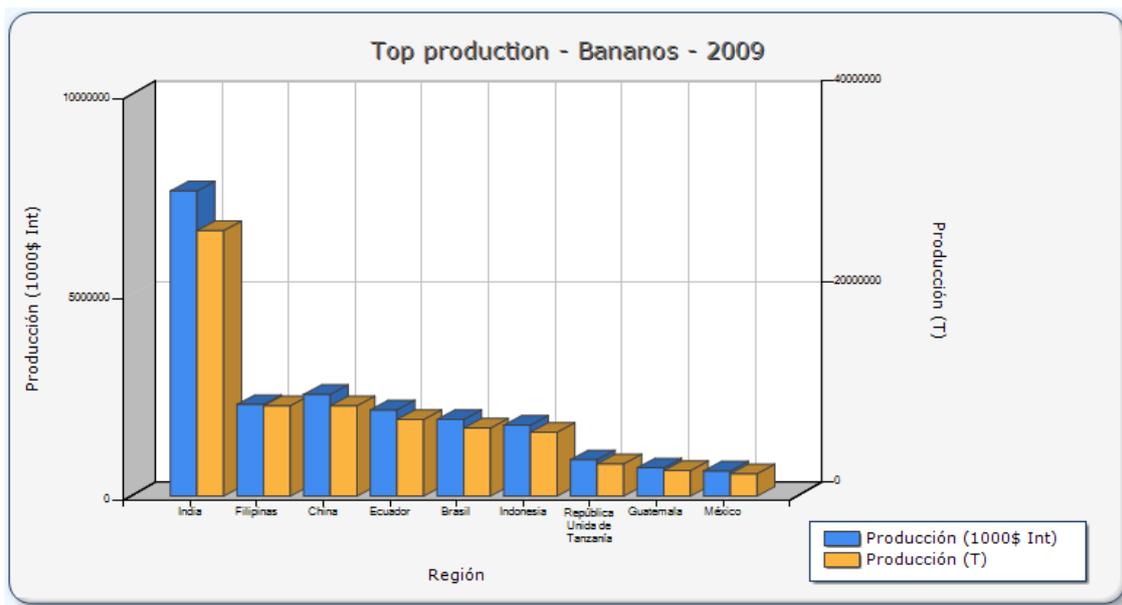


Figura 5. Principales países productores de bananos para el año 2009.

Fuente: FAO, (2009).

Costa Rica tuvo una producción de 652.108 miles de dólares internacionales y una producción en toneladas métricas de 1.588.740.

El valor total del comercio internacional de banano oscila entre 4.500 y 5.000 millones de dólares/Año. En el año 2000, se cultivó una superficie de alrededor de 9 millones de hectáreas, siendo el promedio de la producción mundial anual entre 1998 y 2000 de 92 millones de toneladas métricas; y en el año 2003 se estimó en 102 millones de toneladas, de las cuales 68% se clasificaron como bananos y 32% como plátanos (Arias *et al.*, 2004).

Las principales regiones productoras de bananos para cocción son África, América Latina, y Asia. En África y América Latina se producen principalmente plátanos, mientras que en África y Asia se cultivan otros tipos de bananos para cocción. En cuanto a los bananos de postre, estos se cultivan en América Latina y Asia. El

principal productor mundial de bananos Cavendish es la India, seguida de Ecuador, China, Colombia y Costa Rica. Estos 5 países en conjunto abarcan más de la mitad de la producción mundial de Cavendish (Arias *et al.*, 2004).

En Venezuela la producción de bananas de postre y de cocción, cambures y plátanos, durante la década de los noventa constituyó aproximadamente el 70% de la producción de frutas, alrededor de un millón de toneladas métricas para el año 1997 (Salazar, 1999). El cultivo del cambur se concentra (50% aproximadamente) en los estados Aragua, Carabobo, Yaracuy, Mérida, Trujillo, Táchira, Zulia y Miranda. En el País tradicionalmente se ha plantado cambur. El cultivo se inició con Gros Michel (ABB), luego se sustituyó por Cavendish enano (ABB), y hoy día se explota el cultivar Grand Naine (Subgrupo Cavendish, ABB) en Aragua y Carabobo, para el consumo nacional. El cambur manzano (AAB) es cultivado en Yaracuy y la cuenca del Lago de Maracaibo tanto para consumo nacional como para exportación (Nava, 1999; Salazar, 1999).

La producción de plátano en Venezuela durante el año 2007 fue de 390.319 toneladas (FEDEAGRO, 2009). El principal clon cultivado en el país es el Hartón (AAB) en los estados Zulia, Trujillo, Mérida y Táchira (zona Sur del Lago de Maracaibo), en Yaracuy, Miranda, Barinas, Apure y Monagas y Delta Amacuro. Alrededor del 60% de la producción nacional se concentra en la zona Sur del Lago de Maracaibo (Nava, 1997; Nava, 1999).

En la Figura 6, se muestra las hectáreas cosechadas en la República Bolivariana de Venezuela de plátano y banano para el período 2000-2010, según FEDEAGRO,

Superficie Cosechada (Ha) de plátanos y bananos de Venezuela (2000-2010)

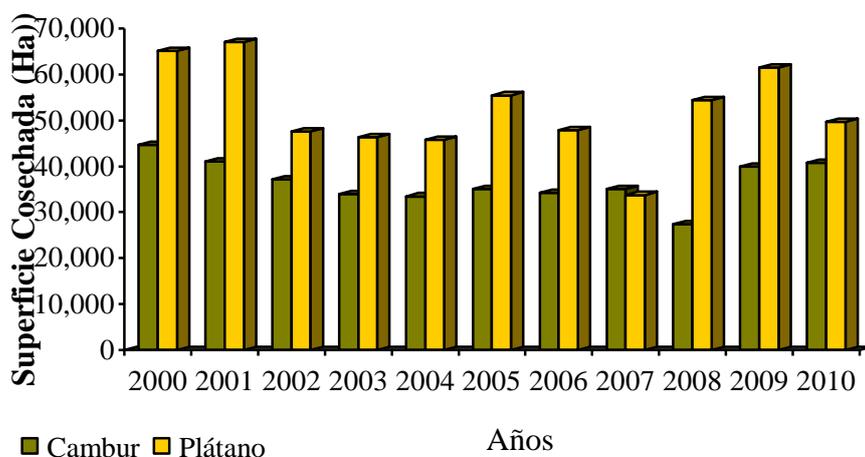


Figura 6. Superficie cosechada (Ha) de plátanos y bananos en Venezuela 2000-2010.

Fuente: FEDEAGRO, (2012).

(2012) las musáceas constituyen el 34,60% de la superficie cosechada (Ha), con un rendimiento de Kg/Ha de 13,81% con respecto a otras frutas como aguacate, naranja, lechosa, entre otros.

2.1.4.- Composición química y bioquímica en diferentes estados de madurez y productos

La composición química de las musáceas cambia drásticamente durante la maduración del fruto, cuando este se encuentra inmaduro o verde presenta un alto contenido de almidón y un bajo contenido de azúcar, mientras que al estar maduro ocurre lo contrario (Happi *et al.*, 2007).

El plátano verde está constituido principalmente por almidón, el cual representa el 70% de su peso seco, por pequeñas cantidades de carbohidratos simples como la glucosa, fructosa y sacarosa; proteínas y lípidos en pequeña escala y una importante

proporción de vitaminas y minerales además es una fuente importante de polifenoles compuestos que se usa como fuente de antioxidantes (Vergara *et al.*, 2007; Flores *et al.*, 2004; Bello *et al.*, 2006).

Zhang *et al.* (2005) encontraron que la pulpa del plátano verde presenta 0,24% de azúcares reductores, 1,23% sacarosa, 5,30% de proteínas, 0,78% de grasa, 0,49% de fibra, 62% de almidón mientras que la pulpa del plátano maduro presenta 33,6% de azúcares reductores, 53,2% de sacarosa, 5,52% de proteínas, 0,68% de grasa, 0,30% de fibra, 2,58% de almidón.

Otros de los componentes químicos de gran importancia presentes en las musáceas son los ácidos orgánicos y los compuestos fenólicos, los cuales contribuyen a las propiedades o atributos sensoriales. En los plátanos, el ácido orgánico de mayor importancia es el ácido cítrico (8,7 mg/100 g), además posee un contenido de vitamina E de 0,10 mg/100 g y de fenoles totales de 2,31 mg EAG/g. (Robles *et al.*, 2007).

Estos compuestos fenólicos presentes en las musáceas como el plátano, son los responsables de las reacciones de oscurecimiento enzimático catalizadas por la polifenoloxidasas, que ocurren en el fruto debido a la eliminación de la cáscara; por lo tanto su tasa de oscurecimiento es proporcional a los niveles de compuestos fenólicos (Flores *et al.*, 2004).

La composición de las Musas es muy variable y generalmente incluye un alto contenido de carbohidratos (Tabla 4), lo que convierte a este género en un recurso básico de calorías para más de 500 millones de habitantes de los países tropicales (Guyllène *et al.*, 2009).

Tabla 4 .- Composición química y bioquímica de banano y plátanos en diferentes estados de madures y productos por 100 gramos.

| Componente | unidad | Cambur | | | | Plátano | |
|--------------------|--------|--------|--------|---------|--------|-----------|----------|
| | | Verde | Maduro | Secados | Harina | Verde | Maduro |
| Energía | Kcal | 89,0 | 110,0 | 257,0 | 340,0 | 91,0 | 122,0 |
| Agua | g | 74,0 | 69,0 | 28,0 | 3,0 | 63,0 | 65,0 |
| Proteína | g | 1,1 | 1,4 | 3,0 | 3,9 | 0,8 | 1,3 |
| Lípidos | g | 0,3 | 0,2 | 1,0 | 1,8 | 0,1 | 0,37 |
| Carbohidratos | g | 21,8 | 28,7 | 63,0 | 82,1 | 24,3 | 32,0 |
| Fibra dietaria | g | 2,0 | 0,5 | 5,5 | 7,6 | 5,4 | 2,0-3,4 |
| Minerales | | | | | | | |
| Sodio | mg | 1,0 | -- | 8,0 | 3,0 | -- | 4,0 |
| Potasio | mg | 385,0 | -- | 1150,0 | 1491,0 | -- | 500,0 |
| Calcio | mg | 8,0 | 8,0 | 20,0 | 22,0 | 7,0 | 3,0 |
| Magnesio | mg | 30,0 | -- | 90,0 | 108,0 | 33,0 | 35,0 |
| Fosforo | mg | 22,0 | -- | 75,0 | 74,0 | 35,0 | 30,0 |
| Hierro | mg | 0,42 | 0,9 | 1,3 | 1,15 | 0,5 | 0,6 |
| Cobre | mg | 0,11 | -- | 0,4 | 0,39 | 0,16 | -- |
| Zinc | mg | 0,18 | -- | 0,5 | 0,61 | 0,1 | -- |
| Vitaminas | | | | | | | |
| Eq-β caroteno | μg | 68,0 | 48,3 | 150,0 | 183,0 | 0,03-1,20 | 390-1035 |
| E | mg | 0,29 | -- | 0,6 | -- | -- | -- |
| C | mg | 11,7 | 31,0 | 4,0 | -- | 20,0 | 20,0 |
| Tiamina | mg | 0,04 | 0,04 | 0,1 | 0,18 | 0,05 | 0,08 |
| Riboflavina | mg | 0,07 | 0,02 | 0,18 | 0,24 | 0,05 | 0,04 |
| Niacina | mg | 0,61 | 0,6 | 2,0 | 2,8 | 0,7 | 0,6 |
| Aminoácidos | | | | | | | |
| Isoleucina | mg | 34,0 | -- | -- | 167,0 | -- | -- |
| Leucina | mg | 71,0 | -- | -- | 359,0 | -- | -- |
| Lisina | mg | 50,0 | -- | -- | 162,0 | -- | -- |
| Metionina | mg | 14,0 | -- | -- | 74,0 | -- | -- |
| Cistina | mg | 20,0 | -- | -- | 63,0 | -- | -- |
| Fenilalanina | mg | 41,0 | -- | -- | 201,0 | -- | -- |
| Tirosina | mg | 26,0 | -- | -- | 121,0 | -- | -- |
| Treonina | mg | 36,0 | -- | -- | 171,0 | -- | -- |
| Triptofano | mg | 13,0 | -- | -- | -- | -- | -- |
| Valina | mg | 49,0 | -- | -- | 282,0 | -- | -- |
| Arginina | mg | 57,0 | -- | -- | 176,0 | -- | -- |
| Histidina | mg | 86,0 | -- | -- | 333,0 | -- | -- |
| Alanina | mg | 43,0 | -- | -- | 222,0 | -- | -- |
| Ácido aspart | mg | 120,0 | -- | -- | 503,0 | -- | -- |
| Ácido glutám | mg | 115,0 | -- | -- | 399,0 | -- | -- |
| Prolina | mg | 43,0 | -- | -- | 229,0 | -- | -- |
| Serina | mg | 49,0 | -- | -- | 226,0 | -- | -- |

Fuente: Guylène (2009)

Li *et al.*, (1982) estudiaron los cambios en la propiedades físicas y químicas de la banana durante la maduración, para ello clasificaron este proceso en los ocho estados de maduración descritos por Von Loesecke (1950). La maduración fue lograda mediante el empleo de 0,1% de etileno a 20°C, con una humedad relativa de 90 a 95%, los resultados obtenidos por Lii *et al.*, (1982) se muestran en la tabla 5.

Tabla 5.- Composición química de bananas (porción comestible) en diferentes etapas de maduración (expresados como % en base seca)

| Estado | Humedad | Ceniza | Proteína | Grasa | Almidón | Az. Reductor | Sacarosa |
|--------|---------|--------|----------|-------|---------|--------------|----------|
| 0 | 27,02 | 3,28 | 5,30 | 0,78 | 62,23 | 0,24 | 1,23 |
| 1 | 23,89 | 3,31 | 5,62 | 0,80 | 59,07 | 1,30 | 6,01 |
| 2 | 18,64 | 3,53 | 4,88 | 0,75 | 43,02 | 10,76 | 18,42 |
| 3 | 17,60 | 3,54 | 4,93 | 0,73 | 40,40 | 11,45 | 21,35 |
| 4 | 11,76 | 3,58 | 5,38 | 0,74 | 38,27 | 12,39 | 27,88 |
| 5 | 1,02 | 3,90 | 5,77 | 0,76 | 10,48 | 25,00 | 53,07 |
| 6 | 0,01 | 3,73 | 5,65 | 0,71 | 6,79 | 31,22 | 51,89 |
| 7 | 0,09 | 4,05 | 5,60 | 0,83 | 3,63 | 33,82 | 51,98 |
| 8 | 3,04 | 4,09 | 5,52 | 0,68 | 2,88 | 33,57 | 53,22 |

Fuente: Lii *et al.*, (1982).

2.1.5.- Importancia nutricional.

El plátano en su estado de inmadurez presenta una fracción considerable de almidón resistente; a la vez que puede ser una fuente de compuestos antioxidantes. Entre los efectos asociados a esta fracción tenemos: (Laurentin y Edwards, 2005; Bello *et al.*, 2006)

- Efecto prebiótico en la microbiota del colon.
- Alteración en el metabolismo de lípidos.

- Reducción del riesgo de colitis ulcerativa y cáncer de colon.

Para medir estos aspectos nutricionales existen métodos de digestión *in vitro* los cuales proveen una relación tiempo-costo beneficiosos para este tipo de estudios. Estas digestiones *in vitro* indican como son adsorbidos estas sustancias en el organismo, simulando procesos y condiciones fisiológicas que ocurren en la boca, estómago e intestino delgado (Woolnough *et al.*, 2010).

Varios estudios han reportado propiedades benéficas a la salud humana debido al consumo del plátano en su estado verde, por su alto contenido de almidón resistente (RS), entre 47-57% (Faisant *et al.*, 1995). Recientemente fue reportado 73,4% de almidón total, 17,5% de RS y 14,5% de fibra dietaria en harina de plátano verde (Juárez *et al.*, 2006).

Galeno (2006), comparó parámetros que caracterizan la digestibilidad *in vitro* con la biodisponibilidad en almidones nativos y modificados de apio y plátano, obteniendo diferencias significativas de los parámetros *in vitro* evaluados entre las especies estudiadas obteniendo menor tasa de digestibilidad en el plátano. Adicionalmente en el bioensayo llevado a cabo, obtuvo diferencias importantes en los marcadores evaluados; como una mayor supervivencia y ganancia de peso en los individuos alimentados con apio, por otro lado en los insectos alimentados con las muestras procesadas de ambas especies (extruidas y deshidratadas), observó un mejor aprovechamiento en los contenidos de agua, grasa y nitrógeno corporal en comparación con los alimentados con las muestras nativas. Finalmente sus resultados en actividad de α -amilasa y excreción de ácido úrico le permitieron clasificar a los almidones utilizados de acuerdo a su calidad nutricional.

Martín (2010), también compara los parámetros que caracterizan la digestibilidad *in vitro* con la biodisponibilidad de almidones de plátanos, utilizando el bioensayo del gorgojo del arroz. El mismo encontró que los parámetros de digestibilidad *in vitro* evaluados (almidón potencialmente disponible, almidón resistente total y tasa de α -amilólisis *in vitro*) concordaron con la baja digestibilidad generalmente atribuida a almidones nativos de plátanos, esto debido al contenido de AR (55 %) encontrado en las muestras. Adicionalmente señaló que los biomarcadores (grasa corporal y actividad similar a α -amilasa) se relacionaron con el contenido de almidón resistente total por lo que concluye que estos son los mejores estimadores de la biodisponibilidad.

La harina de plátano representa una fuente alternativa de carbohidratos indigestibles, principalmente AR y fibra dietaria, además de contener polifenoles que actúan como antioxidantes, con un poder reductor y capacidad para quelar los iones ferrosos de 0,881 mmoles Fe/100g (Rodríguez *et al.*, 2008; Araya *et al.*, 2006). Estudios previos en ratas indican que la ingesta de harina de plátano verde (17% de almidón resistente) puede reducir los niveles de colesterol y triglicéridos en sangre (Pacheco *et al.*, 1998).

Delpretti *et al.* (2004), indica que en medicina infantil el topocho verde ha sido ampliamente utilizado para la alimentación del niño con diarrea, por ser ricos en carbohidratos, se emplean tradicionalmente en sopas y papillas, de esta manera se logra la disminución de la frecuencias de las evacuaciones y mejoría en las consistencia de las heces.

Robles *et al.* (2007) determinaron la capacidad antioxidantes de las diferentes partes del plátano verde como lo es el fruto y la cáscara, resultando estos compuestos polifenólicos totales más abundantes en la cáscara (907 mg/ 100 gramos de muestra seca) que en la pulpa (232 mg/100 g en muestra seca), ofreciendo esta musácea efectos protectores contra enfermedades como el cáncer y enfermedades cardiovasculares.

Asimismo, Rodríguez *et al.* (2008); estudiaron la capacidad antioxidante mediante el método de DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidracil), de un polvo rico en fibra preparado por licuefacción de la harina de plátano verde, donde observaron que tiene una capacidad antioxidante del 90% que se mantiene después de 10 minutos de reacción, la cual es mayor que la observada en maíz por Salinas *et al.*, (2006). Concluyen los autores que los compuestos fenólicos de este polvo tiene mayor capacidad antioxidante que el maíz blanco, actuando más rápidamente en los radicales libres, ya que estos constituyen una buena fuente de ácido ascórbico, vitamina B₆ y potasio (Laborem *et al.*, 2001; Jiménez *et al.*, 2001; Machado *et al.*, 2007; Saura y Goñi, 2006).

2.1.6.- Características generales de consumo

En términos culinarios, cultivares de banano se puede dividir en dos grupos principales: los bananos de postre o dulce, y los plátanos para cocinar (Champion, 1963; Lescot, 1990; Marchal, 1993; Marriott y Lancaster, 1983; Nakasone y Paull, 1999; Turner,1994).

En términos de uso y consumo, los plátanos son:

- ✓ Un alimento básico consumido fresco o cocido. De manera de postre es principalmente consumido en su estado natural (crudo). Inmaduros, que se necesitan ser cocinados antes de su consumo. Verde o maduros, que representan una parte importante de la alimentación básica para en los países productores.
- ✓ Materias primas en una gran variedad de productos (Adams, 1980; Akubor, *et al.*, 2003; Carreño y Aristiza, 2003; Davies, 1993) enteros, pelados y secos los plátanos; plátanos cocidos (cocidos, patatas fritas, fritos); preparativos (buñuelos, confituras, vinos, cerveza); doméstica artesanales y la harina, el almidón de plátano verde; puré; alcohol, cerveza, vino, vinagre, néctar; trozos purés y como ingredientes en preparaciones culinarias (dulces, postres, helados, sorbetes y productos de nata). Muy pocos de estos productos se encuentran en la occidental Tipo de mercado de masas, mostrando la importancia y el consumo formas comparables a los productos de naranja y manzana.
- ✓ Una fuente de energía para los deportistas: El concepto de plátanos productos adecuados para la práctica de deportes ha recibido solicitudes y aprovechada por un procesador de alimentos, en la producción de las bebidas energizantes y barras de plátanos secos para los atletas. Su valor energético, en combinación con vitaminas y minerales (K, Mg) evita las contracciones musculares (Roubert, 2005).
- ✓ La alimentación del ganado. Sin pelar los plátanos verdes se utilizan como una la alimentación animal, especialmente para los cerdos.

- ✓ La transformación industrial de los plátanos se está desarrollado. Un mejor uso de los bananos y plátanos se puede lograr mediante la investigación de su idoneidad para diferentes tipos de transformación. Innovaciones serán posible sobre la base de un mejor conocimiento de las variedades, su composición, condiciones de cultivo sus efectos en la calidad fisiológica de las etapas de tratamiento y recolección, así como tecnológico habilidades.

2.2.- GENERALIDADES DEL ALMIDÓN

El almidón es un carbohidrato de reserva presente en grandes cantidades de raíces y tubérculos, cereales, semillas y en algunas frutas en estado verde o inmaduro, bajo la fórmula de gránulos, cuya forma y tamaño varía según el origen botánico. En los cereales se encuentra principalmente en productos como el maíz, el trigo y el arroz en concentraciones que oscilan de 30 a 80%, en las semillas de algunos frijoles, chicharos o habas se encuentran de 25 a 50%, en las raíces y tubérculos, tales como yuca, papa, batata, y ñame, el almidón representa de 60 a 90%, así como de algunas frutas tropicales como el plátano que oscila de 50 a 60% y el mango se encuentra de 30 a 50% en peso seco (Luallen, 1985; Ellis *et al.*, 1998; García y Walter, 1998; Bello y Paredes, 1999; Alemán *et al.*, 2011).

Desde el punto de vista de su estructura química, esta constituido por amilosa y amilopectina, polisacáridos formados por unidades de anhidroglucosa, unidas entre sí mediante enlaces glucosídicos α (1-4) y/o α (1-6), bajo una estructura semicristalina altamente organizada; además se ha reportado la existencia de un tercer componente conocido como material intermedio. La variación en el contenido de amilosa, amilopectina y del material intermedio, modifica las propiedades físico-químicas y

funcionales de los gránulos de almidón, y en consecuencia su utilización en alimentos y aplicaciones industriales (Wang y White, 1994; Bello *et al.*, 2002; Gallant *et al.*, 1997; Buleón *et al.*, 1998).

La amilosa contiene en promedio desde 500 hasta 2000 unidades de D-glucosa repetidas en un número de cadenas que va desde 1 a 20, cada cadena presenta un grado de polimerización promedio de 500 Daltón (Da), y debido a su carácter esencialmente lineal y a la presencia de enlaces α (1-4) (Figura 7A) (Freitas *et al.*, 2004; Roger y Colonna; 1992; Ellis *et al.*, 1998; Sasaki *et al.*, 2002). Ésta es lineal, aunque existen investigaciones que indican la presencia de algunas ramificaciones, las cuales por encontrarse en forma espaciada y por ser poco frecuentes, no afectan su comportamiento lineal, presenta conformación helicoidal tridimensional (Figura 7B), en cada vuelta de la hélice hay seis unidades de anhidroglucosa (UAG), el interior de la hélice es lopofílico, mientras que el exterior es hidrofílico, es por esto que la amilosa es susceptible a formar complejos con moléculas hidrofóbicas como el yodo, los ácidos grasos y los hidrocarburos (Thomas y Atwell, 1999).

El material intermedio se ha descrito como una estructura similar a la amilopectina, pero con ramificaciones más cortas, que depende del contenido de amilosa, aunque varía considerablemente en diversas especies de almidones y además este es mayor en los almidones del tipo amilo (Wang *et al.*, 1993; Wang y White, 1994).

La amilopectina es el componente de mayor proporción en el almidón, es una molécula ramificada constituida por enlaces α (1-4) y α (1-6) (Figura 7C), cuyo grado de ramificación es de 20.000 ramas promedio en una molécula o aún más. La

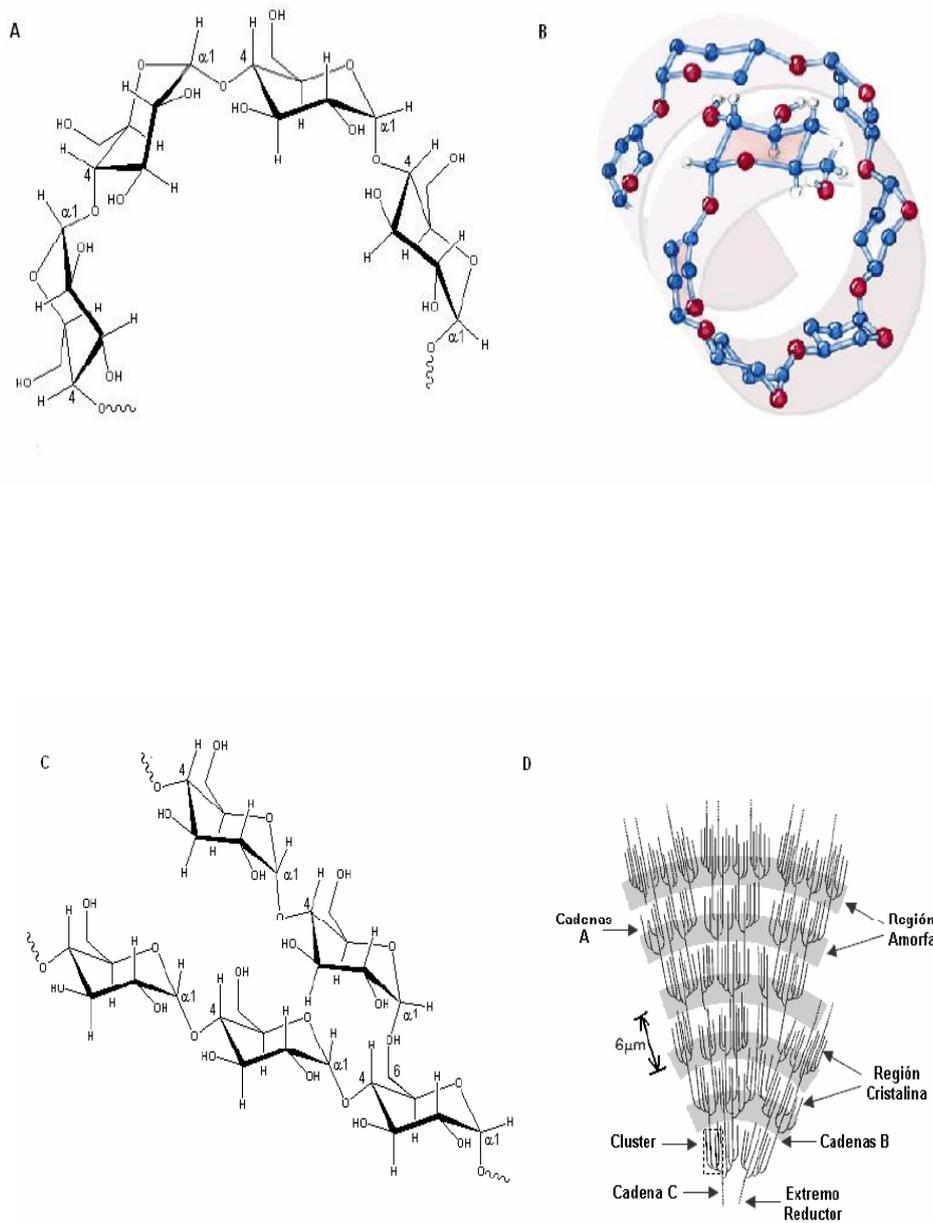


Figura 7. Componentes del almidón; (A) amilosa: α -D-glucopiranosas unidas por enlaces α (1,4); (B) conformación helicoidal de la amilosa; (C) amilopectina: α -D-glucopiranosas unidas por enlaces α (1,4) y ramificaciones en α (1,6); (D) estructura molecular de la amilopectina propuesta por Myers *et al.*, (2000).

organización básica de la amilopectina puede explicarse en tres tipos de cadenas (Figura 7D) : cadenas cortas (A), con DP de 14-18, enlazadas a través de un extremo reductor; cadenas largas (B) con DP de 45-55, se enlaza con una o varias cadenas A o B en grupos hidrófilos primarios; y un extremo reductor (C). Las cadenas A y B racimos asociados, responsables de las regiones cristalinas (Clúster) y las áreas amorfas contienen enlaces α (1-6), presentándose en intervalos de 0,6-0,7 nm (Myers *et al.*, 2000; Thomas y Atwell, 1999; Tester *et al.*, 2004; Mali *et al.*, 2004; Singh *et al.*, 2007; Kasemsuwan y Jane, 1994).

La molécula de amilopectina es menos susceptible al proceso de retrogradación, debido a su estructura ramificada, la cual inhibe la reordenación de sus moléculas en la etapa de enfriamiento de una disolución. No obstante, en condiciones de temperatura elevada y a altas concentraciones, la fracción ramificada de amilopectina puede retrogradar (Swinkels, 1987; Karim *et al.*, 2000; Martín y Smith, 1993; Fredriksson *et al.*, 1998; Kong *et al.*, 2008).

La funcionabilidad, forma y tamaño del almidón depende del peso molecular, relación de la amilosa y amilopectina, así como de la organización molecular de estos glucanos dentro del gránulo, además del origen botánico (Van Der Burgt *et al.*, 1999; Yuan *et al.*, 2007; Ellis *et al.*, 1998; Mali *et al.*, 2004; Blazer *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2006).

Los almidones nativos se utilizan porque regulan y estabilizan las texturas y por sus propiedades espesantes y gelificantes. Sin embargo, la estructura nativa del almidón puede ser menos eficiente debido a que las condiciones del proceso (temperatura, presión y pH) reducen su uso en otras aplicaciones industriales, debido a baja

resistencia a esfuerzos de corte, descomposición térmica, alto nivel de retrogradación y sinéresis (Bello *et al.*, 2002; Liu *et al.*, 2008; Pérez y Pacheco, 2005; Pérez, 1997; Zhang *et al.*, 2005; Yu *et al.*, 1999; Zamudio *et al.*, 2007).

Asegura Asp *et al.* (1996), que el almidón se consideraba como un carbohidrato disponible, completamente digerido y absorbido en el intestino delgado. Sin embargo, una fracción del almidón resiste la hidrólisis por las enzimas digestivas humanas sigue su tránsito por el intestino grueso donde es fermentado por la microflora del colón.

Hernández *et al.* (2008), indican que la digestibilidad de este polisacárido varía extensamente, dicha variación es atribuible a las características químicas, estructurales del almidón y ciertas características del alimento, la forma del arreglo supramolecular del almidón, el grado de cristalinidad y la retrogradación, se han identificado como determinantes importantes del grado de la digestión del almidón y absorción en el intestino delgado.

Es importante señalar que existen varios factores que influyen en la hidrólisis *in vitro* de los almidones, quizás el procesamiento es en parte responsable, ya que cuando no se lleva a cabo la gelatinización completa del almidón ocasiona con ello un aumento en la cristalinidad del almidón, atribuible también a la relación amilosa/amilopectina, a la formación de enlaces glucosídicos diferentes a los enlaces α (1-4) ó α (1-6) y enlaces cruzados, la posible encapsulación de los gránulos de almidón, podría ser responsable de su baja digestibilidad y las posibles interacciones o complejos que puedan existir del almidón con lípidos, proteínas y polifenoles, disminuyen su disponibilidad para las enzimas amilolíticas (Franco *et al.*, 2002; Aparicio *et al.*, 2005; Asp y Bjöck, 1992 ; Zhang *et al.*, 2005).

Pacheco (2001), asegura que el almidón de musáceas muestra una alta resistencia a la digestión *in vitro* como *in vivo*, la cual puede ser explicada por varios factores como grado y tipo de cristalinidad, contenido de amilosa, morfología del gránulos del almidón y proceso calórico.

De forma general, la digestibilidad *in vitro* del almidón depende de la fuente botánica, del procesamiento de los alimentos y del almacenamiento, además la integridad de la célula vegetal hace más lenta la digestión del almidón, debido a que es una barrera física a la gelatinización, disminuyendo la sensibilidad a la hidrólisis enzimática (Tovar *et al.*, 2005).

2.3.- ALMIDÓN DE MUSÁCEAS

Milan *et al.* (2005), aislaron almidones de fuentes no convencionales entre los cuales se encontraban la banana (*Musa paradisiaca* de la variedad Macho) para determinar sus características moleculares y estructurales. Estos autores consiguieron que los gránulos de almidón tienen una forma elipsoidal con un tamaño entre 8 y 20 μm , los mismos presentaron en su conformación la cruz de malta. Además de esto, el patrón de difracción de rayos X conseguido fue tipo A y B, con una alta temperatura (77,6°C) y una alta entalpía (15 J/g) de gelatinización, lo cual puede estar relacionado a su patrón de difracción y a su tamaño.

Los almidones de plátano presentan moléculas de amilosa cuyo peso molecular es 270.000 dalton encontrándose en una proporción del 10 a 11%, mientras que la molécula de amilopectina de cadenas laterales cortas, se encuentran con un grado de polimerización de 15 a 45 DP con un cociente molar 1:6; además las musáceas

contienen entre 50 y 60 % del almidón de lo que se conoce como almidón resistente. (Zhang *et al.*, 2005; Nuñez *et al.*, 2004; Bello *et al.*, 2000; Pérez, 1997).

Hernández *et al.* (2008), encontraron que el almidón de plátano contiene un alto contenido de amilosa entre 40 y 46%, lo cual concuerda con los valores reportados por Moorthy (2006), quién encontró que el contenido de amilosa para este almidón es de 40,7%, mientras que Bello *et al.* (2006) y Brouns *et al.* (2002) reportaron valores de amilosa de 37%, estos valores de amilosa superan a los encontrados en almidones normales de maíz y papa los cuales presentan valores entre 27 y 30% según Yoshimoto *et al.* (2000). En cuanto a la composición química del almidones de plátano se puede apreciar en la Tabla 6, que el contenido lipídico se encuentra entre 0,42 a 2, 31% (Bello *et al.*, 2006; Brouns *et al.*, 2002; Zamudio *et al.*, 2006; Bello *et al.*, 2002) similar a los encontrados en cereales, el cual oscila entre 1 y 2% según lo reportado por Bladwin (2001). Hecho atribuible a que durante la extracción de los lípidos se pudieron cuantificar algunos pigmentos (principalmente del tipo carotenoides). Pero estos valores son más similares al de almidones aislados de raíces y tubérculos (Alves *et al.*, 1999; Leonel *et al.*, 2003).

El contenido de proteína y cenizas oscilan en rangos de 1,03 a 1,7% y 0,25 a 0,45% respectivamente (Brouns *et al.*, 2002; Zamudio *et al.*, 2006; Bello *et al.*, 2002; Bello *et al.*, 2006); la extracción del almidón se hace lavando varias veces para lograr así un alto grado de pureza determinado como contenido de almidón total encontrándose este de 87 a 92%. No obstante, Bello y Paredes (1999), reportaron una pureza del almidón de 99%, (Tabla 6).

Tabla 6. Composición del almidón de plátano verde.

| Componente | Brouns <i>et al.</i> , 2002 | Zamudio <i>et al.</i> , 2006 | Bello <i>et al.</i> , 2006 | Bello <i>et al.</i> , 2002 |
|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Humedad | 4,89 ± 0,529 | 8,3 ± 1,7 | 4,9 ± 0,50 | 10,7 ± 0,30 |
| Lípidos | 2,31 ± 0,273 | 1,85 ± 0,11 | 2,31 ± 0,30 | 0,42 ± 0,06 |
| Proteína | 1,69± 0,120 | 1,69± 0,120 | 1,7± 0,10 | 1,03± 0,20 |
| Cenizas | 0,45± 0,070 | 0,45± 0,070 | 0,40± 0,10 | 0,25± 0,14 |
| Almidón | 92,52± 0,69 | 92,52± 0,69 | 92,5 ± 0,70 | 87,6 ± 0,70 |
| Amilosa Aparente | 37,03± 0,990 | ND | 37,0± 0,10 | ND |

2.3.1.- PROPIEDADES FÍSICAS

2.3.1.1.- Morfología y tamaño del gránulo

El almidón de plátano (*Musa paradisiaca* L.), así como los almidones de musáceas, difieren en forma y tamaño según el género y su estado de maduración, el conocimiento de estas diferencias permite determinar su capacidad de absorción de agua y a la susceptibilidad del gránulo frente a la acción de ciertos agentes físicos, químicos y enzimáticos (Texeira *et al.*, 1998).

Según Pérez (1997), los gránulos del almidón de plátano son de forma esferoide irregular y las formas alargadas son predominantes (Figura 8). El tamaño de los gránulos varió de 10 a 50 μm resultados similares fue encontrado por Kalenga *et al.*, (1990) para el almidón del plátano.

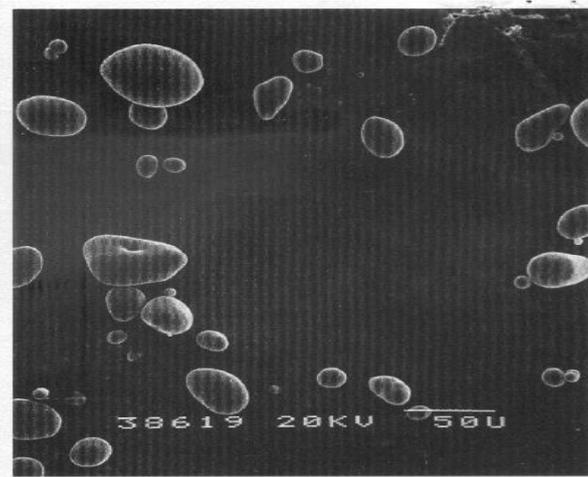


Figura 8. Micrografía del almidón de plátano

Fuente: Pérez, (1997).

2.3.2.- PROPIEDADES FUNCIONALES

2.3.2.1.- Poder de Hinchamiento y Solubilidad.

La capacidad de productos alimenticios que contienen almidón para formar pastas o geles está determinada por la capacidad de retención de agua, el poder de hinchamiento, la solubilidad en agua y la viscosidad, propiedades funcionales que determinan la textura y la calidad de los mismos (Niba *et al.*, 2001; Tester y Morrison, 1990; Defloor *et al.*, 1998; Singh y Singh 2007; Zeng *et al.*, 1997; Freitas *et al.*, 2004).

La capacidad de hinchamiento se ve afectada por las fuerzas de enlaces presentes en el interior del gránulo, por lo tanto, gránulos de almidón altamente asociados con una estructura micelar extensa y frecuentemente enlazada generalmente muestran una gran resistencia al hinchamiento. Aunado a esto, la presencia de lípidos puede inhibir el hinchamiento de los gránulos, debido a la formación de complejos insolubles con la fracción de amilosa (Tester y Morrison, 1990; Yoshimoto *et al.*, 2000).

El poder de hinchamiento y solubilidad en agua está influenciado por la relación amilosa-amilopectina y por las características de éstas en cuanto peso molecular, grado de ramificación, longitud de las ramificaciones, y conformación de moléculas complejas de lípidos, además las proteínas dentro de los gránulos de almidón juega un papel muy importante en el control del poder de hinchamiento de los mismos (Zhang *et al.*, 2005; Tsai *et al.*, 1997; Karlsson *et al.*, 2007; Sasaki y Matsuki, 1998).

El poder de hinchamiento y solubilidad de almidones de plátano, específicamente de almidones de *Musa paradisiaca* L. fueron determinados por Núñez *et al.* (2004); Zhang *et al.* (2005); De la Torre *et al.* (2008) y Pérez, (1997); quienes encontraron que los valores de absorción y solubilidad en agua aumentan a medida que se incrementa la temperatura; el poder de hinchamiento del almidón de plátano a temperaturas elevadas de 70, 80 y 90 °C, fue superior al valor obtenido para el almidón de maíz comercial ® (Indelma) ya que ésta tiene mayor poder de hinchamiento a partir de 60 °C pero menor solubilidad que el almidón de plátano, observándose en el almidón de plátano que a temperaturas mayores de los 70 °C la superficie exhibida es agrietada y ocurre hinchamiento, deformación y erosión debido a la ruptura de los enlaces de hidrógeno intramolecular en áreas amorfas, lo que permite la absorción progresiva e irreversible del agua en el gránulos de almidón. Esta diferencia entre el almidón de plátano y de maíz comercial ® es atribuible a que los gránulos de almidón de plátano presentan fuerzas de enlaces internas de mayor intensidad durante la cocción que aquellas presentes en el almidón de maíz comercial ®, lo cual es indicativo de diferencias leves en las áreas amorfas y cristalinas presentes en ambos gránulos de almidón (Pérez, 1997).

Por otro lado Aparicio *et al.* (2006), observaron que el poder de hinchamiento y solubilidad del almidón de plátano nativo son mayores que el almidón de plátano modificado por entrecruzamiento, mientras que Waliszewski *et al.* (2003), reportó que los almidones de plátano hidroxipropilados presentan mayor poder de hinchamiento y solubilidad que los entrecruzados y fosfatados.

De igual manera Aparicio *et al.* (2005), estudiaron el poder de hinchamiento y solubilidad de estos almidones linternizados y en autoclave, encontrando que la depolimerización de las cadenas de almidón, causado por los prolongados tratamientos con ácido lleva a un incremento de la solubilidad y el tratamiento en autoclave provoca que la estructura granular se pierda y sólo hay absorción parcial del agua, mientras durante la hidroxipropilación se produce repulsión entre los grupos modificados cargados positivamente en las moléculas del almidón, disminuyendo las fuerzas intramoleculares, mientras que los enlaces entrecruzados refuerzan la estructura del almidón y por lo tanto tienden a disminuir el hinchamiento de los gránulos de almidón, mientras que la solubilidad, para el almidón nativo fueron bajos en comparación con los almidones modificados en todas las temperaturas medidas (60 a 90 °C), aseguran que el trípolfosfato de sodio utilizado en el entrecruzamiento incrementa la solubilidad, ya que le este ocasiona que las moléculas de almidón sean más hidrofílica, por tanto las modificaciones permiten realzar las propiedades funcionales según las necesidades del mercado (Satín, 1999).

2.3.2.2.- Perfil de gelatinización.

De acuerdo a Zhang *et al.* (2005), la gelatinización del almidón se refiere al colapso del orden en el interior de los gránulos cuando estos son sometidos a calor en presencia de agua, ocasionando cambios irreversibles, entre los que se encuentra según

De la Torre *et al.* (2008), pérdida de su orden cristalino, aumento en el tamaño de los gránulos, birrefringencia y la solubilización del almidón.

El “Pasting” es el proceso seguido a la gelatinización, el cual involucra la disrupción de los gránulos de almidón y la exudación de los componentes moleculares del mismo, provocando eventualmente la total disolución de los gránulos, el “pasting” está influenciado por el tamaño del gránulo, la relación amilosa-amilopectina, características moleculares del almidón y las condiciones de los procesos térmicos utilizados para inducir la gelatinización (Zhou *et al.*, 1998; Liu *et al.*, 2002). No obstante, a pesar de que la definición de “pasting” está claramente diferenciada del significado de la gelatinización y se describe como un proceso secuencial de la misma, el hinchamiento granular y la pérdida de componentes moleculares son una continuación del estado de gelatinización (Thomas y Atwell, 1999; Singh y Singh, 2007; Ellis *et al.*, 1998).

El hinchamiento inicial probablemente se lleva a cabo en las regiones amorfas del gránulo, donde los polímeros son más susceptibles a la disociación. Cuando la estructura comienza a debilitarse, el gránulo se embebe en agua y se hincha. El sistema gelatinizado bajo ciertas condiciones puede experimentar cambios como la reorganización de las moléculas de almidón y convertirse en una estructura de gel rígido; esta secuencia de eventos se conoce como retrogradación (Huang y Rooney, 2001).

La presencia y el desarrollo de la retrogradación depende de la especie botánica, de la proporción de amilosa y amilopectina, del peso molecular de la amilosa y de la longitud de la cadena de amilopectina. Esta se puede ver como el fenómeno opuesto a

la gelatinización. Los polímeros solubles del almidón y los fragmentos granulares insolubles presentes se reasocian después del calentamiento. Eventualmente se forman agregados cristalinos, acompañados por un incremento gradual en la rigidez, una opacidad en la suspensión y la separación de fases entre el polímero y el solvente, fenómeno conocido como sinéresis, el cual ocurre después que los gránulos son gelatinizados por medio de la cocción en la presencia de estructuras tipo geles que afectan las propiedades funcionales y sensoriales de los alimentos ya que durante el almacenamiento en frío, la reorganización de las moléculas de almidón puede resultar en la liberación de agua (o sinéresis) (Huang y Rooney, 2001; Zheng y Sosulki, 1998; Karim *et al.*, 2000).

La temperatura de gelatinización inicial para el almidón de plátano nativo se encuentra en un rango de 71,6 °C a 78 °C, mientras que la temperatura de gelatinización final oscila entre 90 °C y 95 °C según lo reportan De la Torre *et al.* (2008); Nuñez *et al.* (2004) y Pérez (1997), estos autores al estudiar las propiedades funcionales del almidón de plátano, aseguran que es necesario aplicar elevadas temperaturas al almidón para asegurarse de que ocurra la gelatinización y el pasting, ya que los gránulos de almidón se hinchan muy poco y resisten la fragmentación mecánica, esto explica la ausencia de un pico de la viscosidad y un aumento leve en viscosidad durante cocción. A pesar que el almidón del plátano muestra una viscosidad mayor, presenta una consistencia más baja que el almidón de maíz, de esta manera resultan beneficioso para aquellos productos en los cuales se desea el pasting retrasado, tales como alimentos conservados, además tiene un alto grado de firmeza por lo cual es potencialmente utilizable en geles, mermeladas, caramelos y salchichas.

Del mismo modo Waliszewski *et al.* (2003) y Bello *et al.* (2002), reportaron una temperatura inicial de gelatinización inicial entre 69,5 °C a 73 °C y la temperatura de gelatinización final entre 83 °C y 90 °C, además observaron que en los almidones modificados de plátano var. *Valery* y almidones de plátano var. MACHO, hubo una tendencia al aumento de la absorción de agua aproximadamente del 50% cuando se incrementa la temperatura, siendo mayor que la del almidón nativo; del mismo modo afirman que la solubilidad aumenta al modificar químicamente el almidón, debido a la repulsión entre los grupos modificados de los gránulos de almidón cargados positivamente, logrando así disminuir las fuerzas intramoleculares y mejorar la gelatinización, además la modificación de los almidones permite obtener mejor claridad de las pastas y estabilidad al congelamiento y deshielo.

2.3.2.3.- Grado de sustitución

Bello *et al.* (2002), evaluaron el rendimiento de extracción de almidón de plátano verde modificado por acetilación y un tratamiento alcohólico-alcalino, encontrando que el rendimiento de almidón acetilado a partir del almidón nativo fue 87,6%. El porcentaje de los grupos acetilos y el grado de sustitución fueron 1.1 y 0.04 para el almidón de plátano, y para el de maíz fueron 1,2 y 0,04, respectivamente. Valores similares han sido reportados con contenidos de grupos acetilos entre 0,94 y 2,48% para almidones acetilados de *Canavalia ensiformis* usando diferentes tratamientos.

2.4- ALMIDONES MODIFICADOS.

Los almidones nativos presentan ciertas desventajas al ser aplicados a nivel industrial, debido que son menos eficientes por su baja resistencia a esfuerzos de corte, propiedades espesantes limitadas, descomposición térmica, alto nivel de retrogradación y sinéresis (Amani *et al.*, 2005; Bello *et al.*, 2002; Montes *et al.*, 2008; Manrique *et al.*, 2007; Wurzburg, 1986 a,b).

Esta marcada tendencia de los almidones nativos a disminuir su viscosidad cuando son sometidos a calentamiento, limita su uso bajo ciertas condiciones del proceso como temperatura, pH, presión. Por lo tanto, desde el año 1940, la industria de alimentos se ha visto en la necesidad de recurrir al uso de almidones modificados, los cuales según Pacheco y Alemán (2010); Colonna y Mercier (1984); Rogols (1986), se pueden definir como cualquier producto derivado del almidón cuya preparación involucre la modificación de una o más propiedades del mismo, producto de la transformación de su estructura básica, que puede involucrar un cambio en la forma física, una degradación controlada y/o la introducción de grupos químicos.

Con la modificación del almidón se logra optimizar la capacidad de retención de agua, aumentar la estabilidad al congelamiento, mejorar la capacidad de dispersión, incrementar la resistencia a la retrogradación y mejorar la estabilidad a los ciclos de congelamiento-deshielo, lo cual se ha logrado por las modificaciones físicas, químicas o genéticas de los almidones nativos (BeMiller, 1997; Bello *et al.*, 2002; Shujun *et al.*, 2007; Manrique *et al.*, 2007; Wang y White, 1994; Singh y Singh, 2005; Schmitz *et al.*, 2006).

2.4.1.- Modificaciones Físicas.

Estas técnicas de modificación permiten obtener diferentes tipos de almidones de acuerdo a las condiciones específicas de cada alimento. La mayoría de estas modificaciones han surgido por la necesidad de impartir grados de viscosidad, ser resistentes a condiciones ácidas y aumentar la estabilidad en el congelamiento y deshielo, de esta manera se le confieren propiedades funcionales al almidón que le permiten actuar como espesantes-gelificantes en flanes, natillas, puddings, colados y sopas; como coadyudante para la retención de agua en productos cárnicos; recubrimiento en confitería; sustitutos de grasa como en mayonesa, en bebidas instantáneas para mejorar la solubilidad y facilitar la dispersabilidad, gelatina y pastelería, entre otros usos. Las modificaciones físicas generalmente conducen a la pregelatinización del almidón, proceso en el cual los gránulos de almidón nativo se rompen, incrementando su capacidad de solubilizarse en agua fría, lo que permite también su empleo en alimentos de rápida preparación, tales como rellenos y salsas espesas como las utilizadas en la cocina china, además en la elaboración de yogures y de conservas vegetales (Shing *et al.*, 2007; Amani *et al.*, 2005; Bello *et al.*, 2002; Núñez *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2005; Agboola *et al.*, 1991).

Entre los tratamientos físicos más utilizados se encuentran la irradiación (radiaciones γ , radiaciones ultra violeta y microondas), los tratamientos térmicos (deshidratación por doble tambor rotatorio “drum drying”, deshidratación por rociado “spray dryer” y presión de vapor) y térmicos-mecánicos (extrusión) (Thomas y Atwell, 1999; Bello *et al.*, 2000; Amani *et al.*, 2005; Martínez *et al.*, 2005; González y Pérez, 2003; Moorthy, 2002; Zhang *et al.*, 1999; Pérez y Pacheco, 2005). Estos métodos se fundamentan en el uso de calor seco o húmedo, con o sin acomplejamiento, a fin de

producir cambios en los diferentes niveles de organización estructural del almidón (molecular, cristalino y granular), y así modificar sus propiedades funcionales (Pérez, 1996, Gunaratne y Hoover, 2002).

Los tratamientos calóricos húmedos provocan cambios en la estructura cristalina de los almidones, los cuales los hacen más susceptibles a las hidrólisis o modificaciones químicas y enzimáticas. Estos cambios ocurren principalmente a nivel de las regiones amorfas donde se encuentran ubicadas las moléculas de amilosa; por lo tanto, la sensibilidad de los diversos tipos de almidón a estos tratamientos es diferente, y depende principalmente de su contenido en amilosa (Zhang *et al.*, 1999).

Los tratamientos térmicos generalmente ocasiona una degradación severa en los gránulos de almidón y aumentan la cantidad de sólidos solubles, el producto resultante se dispersa muy bien en agua fría y como consecuencia se desarrolla una viscosidad considerable, la cual se incrementa a medida que aumenta el tiempo de exposición al tratamiento térmico (Martínez *et al.*, 2005). Del mismo modo las modificaciones por tratamientos térmicos mecánicos como lo es la extrusión logran la pre-gelatinización del almidón utilizando energía térmica y mecánica, bajo condiciones de procesamiento estrictamente controladas, para mejorar el proceso de gelatinización del almidón, logrando de esta manera aumentar las propiedades funcionales del almidón como la absorción y solubilidad en agua, debido a que durante este proceso la estructura granular se pierde, los cristales nativos se funden y sus componentes (amilosa y amilopectina) son parcialmente desordenados dando como resultado un estado amorfo que indica la gelatinización casi completa del almidón, sin embargo durante el enfriamiento se pueden formar estructuras que resistan la hidrólisis por las enzimas digestivas (Colonna *et al.*, 1989; Moorthy, 2002; Vasanthan *et al.*, 2001; Unlu y Faller, 1998).

Cabe destacar que, el grado de gelatinización durante este proceso de extrusión está determinado por la acción combinada de presión, temperatura y esfuerzo de corte, además las transformaciones que sufre el almidón dentro del extrusor se pueden analizar a nivel granular, cristalino o molecular (Wen *et al.*, 1990).

Manrique *et al.* (2007), obtuvieron almidones pregelatinizados (AP), a partir de fuentes no convencionales de almidón, como el plátano y el mango, haciendo uso de un extrusor de doble tornillo con diferentes condiciones, se observó que el proceso de extrusión desorganizó toda la estructura cristalina de los almidones, resultado similar fue reportado por Bello *et al.* (2006), sin embargo al evaluar las propiedades y las condiciones de formación de almidón resistente (AR), a partir de estos almidones pregelatinizados, en un extrusor de un sólo tornillo, encontraron que los almidones de plátano presentaron mayor contenido de almidón resistente mientras que los almidones de mango tuvieron mayor índice de absorción y solubilidad de agua.

2.4.2.- Modificación Química

La modificación química generalmente se realiza en un medio acuoso. Una suspensión de almidón, usualmente de 30 a 40% de sólidos, se trata con el reactivo químico bajo condiciones apropiadas de agitación, temperatura y pH. Cuando la reacción se completa, el almidón se lleva al pH deseado con un agente neutralizante, se purifica por subsecuentes lavados con agua y se seca, hasta obtener el almidón deshidratado. La modificación generalmente es expresada por el grado de sustitución (DS) cuando el grupo sustituyente (por ejemplo acetato o fosfato) reacciona con el grupo hidroxilo de la unidad D-Glucopiranosil. La sustitución molar (MS) se utiliza

cuando el grupo sustituyente puede reaccionar con el reactivo para formar un sustituyente polimérico (Thomas y Atwell, 1999; Singh *et al.*, 2007).

Según Light (1990), Wurzburg (1986b) y Thomas y Atwell (1999), clasificaron las técnicas de modificación química en dos grandes categorías: las de conversión o degradación y las de derivación o sustitución.

2.4.2.1. Modificación química por conversión o degradación.

Esta modificación consiste en la degradación de las moléculas de almidón a fin de disminuir la viscosidad de la suspensión. La degradación incluye la escisión de algunos enlaces glucosídicos, y dependiendo del método utilizado para la modificación, pueden incluirse alteraciones químicas, tales como la oxidación de algunos de los grupos hidroxilo, aldehídos, cetonas y carbonilos. Esta modificación tiene como objetivo, permitir el uso de elevadas concentraciones de almidón, incrementar la solubilidad en agua fría, controlar la fuerza del gel y conferir estabilidad a las suspensiones de almidón (Wang *et al.*, 2003).

Los métodos más comunes de conversión utilizados en la industria de alimentos incluyen la hidrólisis ácida (tratamiento con ácido hidroclohídrico, orto fosfórico o sulfúrico), la oxidación (tratamiento con peróxido de hidrógeno, hipoclorito o cloruro de sodio, dióxido de sulfuro, permanganato de potasio), dextrinización (piridextrinas, preparadas por tostado seco del almidón acidificado) y la conversión enzimática (tratamiento solución acuosa a temperaturas inferiores al punto de gelatinización con una o más enzimas amilolíticas grado alimenticio); todos éstos métodos modifican las propiedades morfológicas, cristalinas y de gelatinización, afectando las temperaturas de

transición y las entalpías de gelatinización, así como las propiedades viscoelásticas en el almidón modificado (Olayide, 2004; Shujun *et al.*, 2007; Pérez y Pacheco, 2005; Wurzburg, 1986; Singh *et al.*, 2007).

El procedimiento tradicional para obtener almidones por modificación ácida consiste, en términos generales, en tratar una suspensión concentrada de almidón a una temperatura menor que la temperatura de gelatinización con un ácido mineral generalmente HCL ó H₂SO₄, durante cierto período de tiempo, de esta manera se generan reacciones del tipo reversión (ocurre en las primeras etapas e involucra eliminación de agua) y transglucosidación (ocurre en las etapas finales y no involucra la salidad de agua), estas ocurren en las regiones amorfas de los gránulos permaneciendo las cristalinas relativamente intactas, produciendo cadenas lineales o escasamente ramificadas, las cuales favorecen la retrogradación y a su vez la formación de almidón resistente (Paredes *et al.*, 1994; Pérez, 1996; Wurzburg, 1986; Wang *et al.*, 2003; Shin *et al.*, 2004).

Entre los métodos mencionados anteriormente, la modificación ácida es una de las más utilizadas en la industria de obtención de almidones modificados destinados a la industria de alimentos, papelera y textil; cabe mencionar algunos trabajos como el de Aparicio *et al.* (2005), quienes obtuvieron almidón de plátano modificado por hidrólisis ácida, Jayakody *et al.* (2007), quienes evaluaron los efectos de la hidrólisis ácida en almidones de *D. esculenta* y *D. alata* y Atichokudomchai *et al.* (2000), quienes estudiaron el efecto de la modificación ácida sobre almidones de yuca.

Otra de estas modificaciones es la de almidones granulares solubles en agua fría, los cuales se están desarrollando en la actualidad para poder extender el uso de los almidones en aplicaciones industriales, ya que estos confieren propiedades funcionales importantes en muchos alimentos instantáneos, proporcionándoles una mayor viscosidad, textura suave y propiedades similares a la de los almidones pregelatinizados (Chen y Jane, 1994a). Estos almidones se pueden producir por un tratamiento del almidón en una solución acuosa de alcohol, con alta temperatura y presión, mediante un proceso de secado por aspersión en un sistema de doble boquilla y por un tratamiento alcohólico-alcalino, tal como lo reportó Bello *et al.* (2002) que obtuvieron almidones de plátano modificados mediante un tratamiento alcohólico-alcalino, al igual que Chen y Jane, (1994b) en almidón de maíz.

2.4.2.2.- Modificación química por derivación o sustitución.

Consiste en incorporar grupos químicos a las unidades de glucosa, los cuales van a sustituir a los grupos hidroxilo. Las propiedades del almidón derivado dependen de la naturaleza de la derivación y del grado de sustitución. Cuando el grado de sustitución es bajo (hasta 0,1 moles de grupos incorporados por mol de glucosa), los grupos sustituyentes rompen la linealidad de la molécula donde son incorporados, disminuyendo su tendencia a asociarse, previniendo la retrogradación. Sin embargo, elevados niveles de sustitución (desde 0,8 hasta 1 moles) hacen a los almidones solubles en agua fría (Wurzburg, 1986b).

Thomas y Atwell (1999), definen el grado de sustitución como la medición del número promedio de grupos hidroxilos en cada unidad de D- glucopiranososa (comúnmente llamada una unidad anhídridoglucosa UAG) que son derivadas por grupos sustituyentes. Debido a que la mayoría de la UAG en el almidón tiene tres

grupos hidroxilos disponibles para sustitución, el máximo grado de sustitución posible es 3.

La modificación química por derivación incluye el entrecruzamiento (“crosslinked”), la estabilización y la incorporación de grupos funcionales (Light, 1990).

2.4.2.2.1.- Almidones Entrecruzados.

El entrecruzamiento es un proceso que consiste en suspender el almidón en un medio acuoso y alcalino, con un agente químico polifuncional, el cual puede reaccionar con dos o más grupos hidroxilos presentes en la molécula de almidón. El entrecruzamiento permite controlar el grado de hinchamiento granular y proporciona almidones resistentes a altas temperaturas, agitación constante y condiciones extremas de acidez, así como mejorar las propiedades funcionales y la estabilidad de las pasta de almidón, ya que tiene como objetivo reforzar los puentes de hidrógeno responsables de la integridad del gránulo, con puentes químicos enlazados a los grupos hidroxilo de otras moléculas de almidón adyacentes; así minimiza y evita la ruptura de los gránulos de almidón por efecto del calentamiento, permitiendo que los geles formados tengan una mejor cohesividad y una buena textura (Mali *et al.*, 2001; Wurzburg, 1986b; Thomas y Atwell, 1999; Woo y Seib, 2002).

El almidón de enlace cruzado, es manufacturado típicamente reaccionando una suspensión alcalina (pH 7,5-12) de almidón nativo (30-45% de sólidos) con un reactivo para enlaces cruzados aprobado (frecuentemente en presencia de sal). Entre los agentes químicos aprobados y más utilizados para producir entrecruzamiento son el oxiclorigenolato de sodio, el trimetafosfato de sodio y las mezclas de anhídrido acético y/o anhídrido

adípico. La temperatura de reacción se encuentra entre los 25 y 30°C, mientras que el tiempo requerido para el proceso de entrecruzamiento puede variar desde 30 minutos hasta 24 horas dependiendo del protocolo, después de completada la reacción, el almidón es ajustado a pH neutro, filtrado, lavado y secado (Light, 1990; Wurzburg, 1986b; Singh *et al.*, 2007).

Hoover y Sosulski (1986), reportaron que el entrecruzamiento ocurre en las regiones amorfas del gránulo del almidón, mientras que otros autores como Jane *et al.* (1992) y Kasemsuwan y Jane (1994), indican que las moléculas de amilopectina son más entrecruzadas que la amilosa y Hood y Mercier (1978), señalan que los sitios de mayor entrecruzamiento están localizados en las regiones amorfas de la amilopectina.

Tanto el tratamiento con trimetafosfato de sodio, como con el tratamiento con oxiclورو de fósforo, el producto de la reacción de enlace cruzado es un di-almidón fosfato (enlace ester). Sin embargo con el trimetafosfato de sodio se requiere de un tiempo de reacción mucho más largo que con el oxiclورو de fósforo, debido a la naturaleza del reactivo, no obstante, el producto posee propiedades similares a aquellas del almidón entrecruzado con oxiclورو de fósforo (Woo y Seib, 2002; Mali *et al.*, 2001)

2.4.2.2.2.- Almidones Estabilizados o Eterificados.

La eterificación es uno de los tipos de derivación más utilizadas, y ésta consiste en hacer reaccionar una suspensión de almidón al 30 a 40%, con óxido de etileno o de propileno, en presencia de hidróxidos alcalinos o alcalinotérreos, lo cual conduce a la

formación de los derivados hidroxietil e hidroxipropil, respectivamente (Perera *et al.*, 1997).

La introducción de grupos hidroalquilo, en combinación con reacciones de entrecruzamiento, mejora la capacidad de hinchamiento y la solubilidad, así como la capacidad de retención de agua, disminuye la temperatura de gelatinización e incrementa la estabilidad frente a la congelación y la descongelación de soluciones viscosas (Pal *et al.*, 2002; Thomas y Atwell, 1999).

Para evaluar el efecto de este tipo de modificación sobre las propiedades funcionales de los almidones de plátano, Waliszewski *et al.* (2003), evaluaron el efecto de la hidroxipropilación y comprobaron que los almidones desarrollaban elevados valores de viscosidad, que se mantenían estables durante la fase de calentamiento, debido a que la sustitución de grupos funcionales provocó una reducción de las fuerzas asociativas intragranulares, resultado similar fue encontrado por Perera y Hoover, (1999) al estudiar el efecto de la hidroxipropilación sobre la retrogradación de almidones de papa.

2.4.2.2.3.- Almidones Esterificados

La esterificación es otra de las técnicas de modificación de almidones por sustitución, en la cual se obtienen los monofosfatos de almidón, principalmente por calentamiento en seco del almidón con ortofosfatos o tripolifosfatos alcalinos a 120-175 °C, en presencia de ortofosfato se produce almidón fosfato monoéster y con tripolifosfato de sodio, la reacción ocurre en condiciones alcalinas (Rutenberg y Solarek, 1994; Liu *et al.*, 1999).

La fosfatación es uno de los métodos de modificación química más utilizado, ya que a través de este método se produce una repulsión entre las cadenas adyacentes del almidón, causada por la introducción de grupos fosfato con carga negativa, los cuales provocan una reducción en el número de asociaciones entre las cadenas de almidón y un aumento en la capacidad de hidratación, estabilidad frente a la congelación, permitiendo ser utilizados como agentes espesantes y estabilizantes en alimentos (Liu *et al.*, 1999; Lim y Seib, 1993).

Los almidones fosfatados se pueden dividir en dos categorías: monoésteres de fosfato almidón en los cuales un grupo hidroxilo del almidón se esterifica con solamente uno de los tres ácidos del ácido fosfórico, y multiésteres de fosfato de almidón en los cuales más de uno de los grupos ácidos del ácido fosfórico se esterifica. Este último es generalmente una mezcla de mono-, di- y de triésteres del ácido fosfórico. Los almidones fosfatados monoésteres son derivados aniónicos que producen dispersiones con altas viscosidades, claras y más estables con relación a los almidones nativos.

En el tratamiento con trimetafosfato de sodio, como con el tratamiento de oxiclورو de fósforo, el producto de la reacción de enlace cruzado es un di-almidón fosfato (enlace ester), (Figura 9).

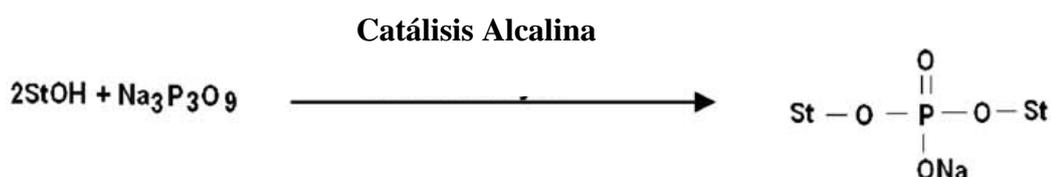


Figura 9. Reacción química para el enlace cruzado de trimetafosfato de sodio St= polímero de almidón.

Fuente: Singh *et al.* (2007)

En la Figura 10, se observa que la reacción inicial entre STMP (trimetafosfato de sodio) y el almidón involucra la apertura del anillo de STMP con la formación del tripolifosfato de almidón. Esta reacción es similar a la hidrólisis alcalina del STMP. El tripolifosfato de almidón tiene una estructura similar a la de adenosin 5-trifosfato (ATP), bjo condiciones alcalinas, el ATP es conocido por su hidrólisis en pirofosfato (ppi) y adenosinmonofosfato(AMP). A pH superiores a 8, el almidón puede reaccionar de una manera similar al almidón trifosfato en el enlace α -fosfato para dar dialmidón fosfato (entrecruzados) y pirofosfato.

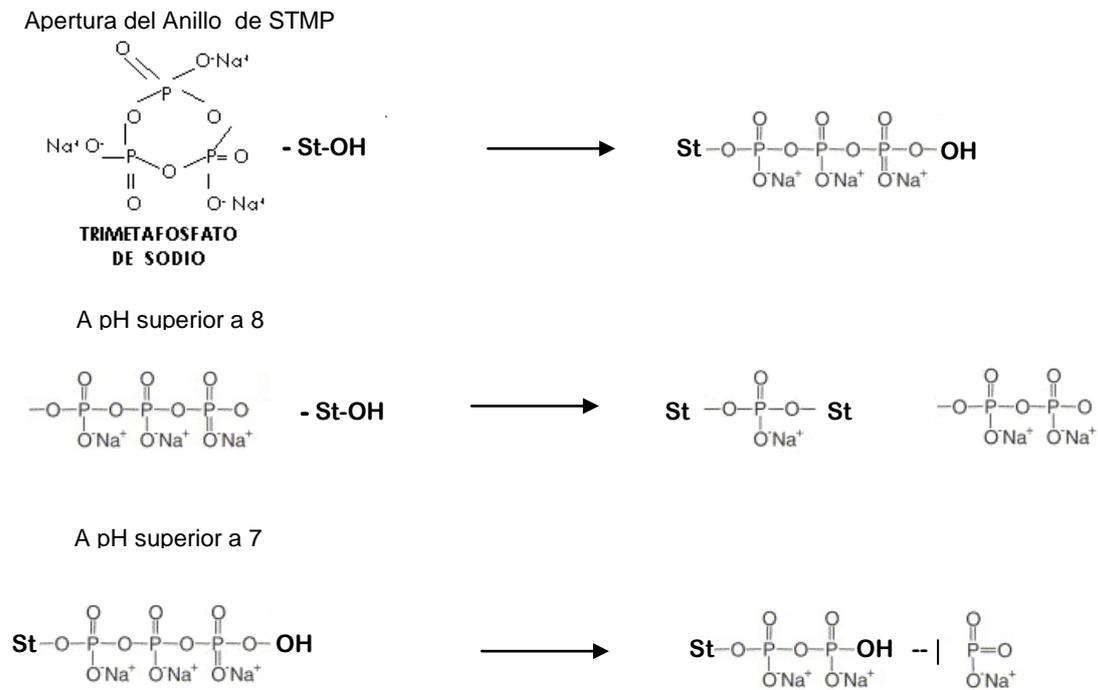


Figura 10. Reacciones propuesta en la fosfatación del almidón.

Fuente: Singh *et al.* (2007).

La FDA regula el fósforo incorporado al almidón de acuerdo con el agente fosfatante usado, para el almidón modificado con tripolifosfato de sodio se ha establecido un valor límite para el fósforo de 0,4 % y de esta manera se logra obtener un

un almidón que resulta una goma clara con solubilidad alta, capacidad de hinchamiento y estabilidad al congelamiento-descongelamiento (Lim y Seib, 1993).

Es importante señalar que dependiendo del nivel de sustitución en los gránulos de almidón, el cual es expresado en términos de grado de sustitución (GS) o sustitución molar (SM) (Van der Burgt *et al.*, 1999), el almidón modificado puede hincharse, dispersarse o disolverse en agua fría (Chang y Lin, 2007; Martínez *et al.*, 2004).

La determinación del grado de sustitución de los almidones modificados, según Paschall, (1964) es:

$$GS \text{ de ester de monosodio} = \frac{162 * P}{(3100 - 102 P)}$$

Donde:

162= peso molecular de la anhidroglucosa

P= porcentaje de fósforo contenido (base seca) de los almidones.

3100= constante

102= constante.

Sitohy *et al.* (2000), al preparar almidones fosfatados a diferentes grados de sustitución, a partir de almidones de maíz, arroz y papa, determinaron que los valores de solubilidad, poder de hinchamiento y viscosidad se incrementaban considerablemente a bajos niveles de sustitución lo cual puede atribuirse a la mutua repulsión entre las cargas negativas de los grupos fosfatos en la molécula de almidón, reduciendo las fuerzas de atracción intermoleculares, mientras que dichas propiedades disminuyeron gradualmente al incrementar el grado de sustitución, lo que puede deberse a la formación de ligaciones cruzadas entre los polímeros del almidón, igual resultado fue

reportado por Waliszewski *et al.* (2003) al determinar el efecto de la fosfatación en las propiedades reológicas de almidones de plátano.

La acetilación de almidón es una modificación química conocida por más de un siglo, (Elomaa *et al.*, 2004), esta permite convertir por esterificación algunos grupos –OH de la unidades de anhidroglucosa (UAG) a grupos acetilo ($\text{CH}_3\text{-C=O}$) que proporcionan un entorno hidrofóbico al almidón (Figura 11A, B), se obtienen con diferentes agentes modificantes como el ácido acético, anhídrido acético (Figura 11C) , vinil acetato y cloroacetato; generalmente a pH básico de 7,5-9,0 y se realiza en presencia de catalizadores como NaOH, piridina, ácido sulfúrico, entre otros. Los almidones acetilados imparten propiedades de espesamiento, ampliamente utilizados en aplicaciones alimenticias pues confieren propiedades de adhesividad, estabilizante y texturizante, además de formar películas (Singh *et al.*, 2004; Chi *et al.*, 2008; Elomaa *et al.*, 2004).

Las reacciones que ocurren durante la acetilación son ilustradas en la Figura 12, en la reacción principal, el almidón es acetilado con anhídrido acético y con una base como catalizador, esta reacción es un ejemplo de una sustitución nucleofílica en un carbono insaturado del anhídrido acético (Wurzburg, 1986b; Rutenberg y Solarek, 1984).

La sustitución se lleva a cabo por un mecanismo de adición y eliminación, además, los grupos OH⁻ libres de la UAG tienen diferente reactividad. El grupo OH⁻ primario situado en el C₆ es más reactivo, ya que se localiza en el exterior de la molécula, teniendo mayor contacto con el anhídrido acético y acetilándose con mayor facilidad que los grupos OH en posiciones secundarias C₂ y C₃ que se encuentran localizados en el interior de la molécula, formando puentes de hidrógeno con las UAG

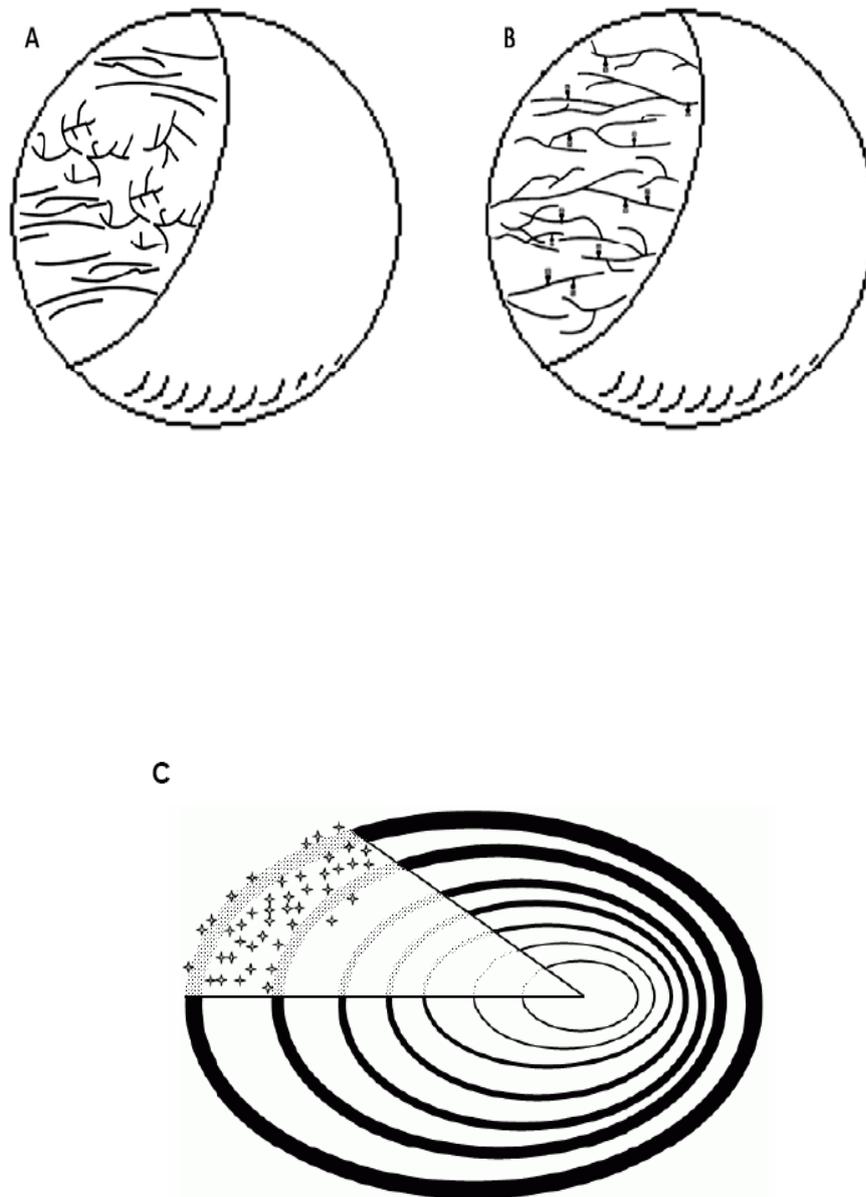


Figura 11. Gránulo de almidón (A) nativo y (B) acetilado mostrando la acción bloqueadora (\approx) de los grupos acetilos (+) introducidos; ataque del anhídrido acético en el gránulo de almidón de garbanzo propuesto por Huang, (2006) (C).

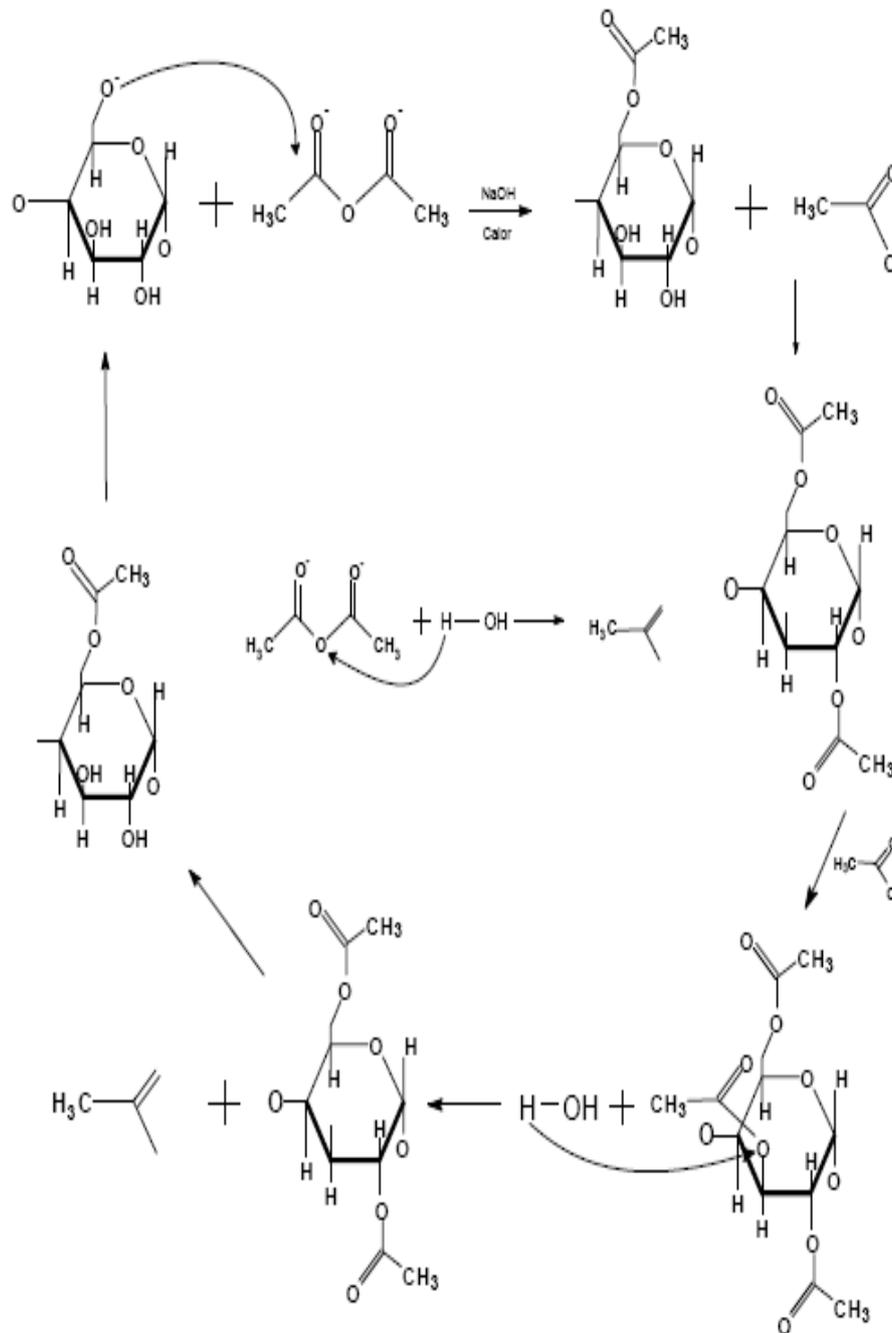


Figura 12. Reacciones químicas que ocurren durante la acetilación del almidón.

cercanas (Rutenberg y Solarek, 1986; Huang, 2006).

De los grupos OH⁻ secundarios, el grupo OH en el C₂ es más reactivo que el del C₃ (Xu *et al.*; 2004); sin embargo Heins *et al.* (1998), demostraron mediante resonancia magnética nuclear (RMN) que al hacer el análisis de los almidones ya acetilados la posición que se encontró mayormente acetilada fue la del C₃.

Varios investigadores (Rutenberg y Solarek, 1984; De Graaf *et al.*, 1995; Xu *et al.*; 2004) mencionan que en medio acuoso la acetilación es reversible, provocándose una desacetilación en el almidón, lo que explicaría los resultados presentados de la reactividad de los carbonos en la acetilación del almidón (Heins *et al.*, 1998).

En las reacciones consecutivas de la Figura 12, se observa un ciclo donde se lleva a cabo la acetilación y desacetilación del almidón, por medio de la disociación nucleofílica que se lleva a cabo entre los catalizadores, reactivos, subproductos y productos durante la acetilación, lo cual según la definición de Hart *et al.*, (2007) puede ocurrir por la producción de agua durante la esterificación, proporcionando un medio acuoso que facilita la desacetilación.

El almidón acetilado que tiene un contenido de acetilos de hasta 1,85% puede ser desacetilado completamente mediante la suspensión del almidón en agua a pH 11 por 4 horas a 25 °C (Rutenberg y Solarek, 1984).

La esterificación de los polímeros del almidón por la acetilación forman almidones acetatos (Jatowenko, 1986) y se preparan comercialmente a temperatura ambiente haciendo reaccionar una suspensión acuosa de gránulos de almidón con anhídrido

acético, en la presencia de agentes catalizadores alcalinos, como el hidróxido de sodio (Morton and Solarek, 1984; Singh *et al.*, 2004; Elomaa *et al.*, 2004) que neutraliza el ácido formado y mantiene el pH alrededor de ocho. El tiempo de reacción puede ser de varias horas; sin embargo, las eficiencias que se obtienen son bajas (alrededor del 70 %) dependiendo del tipo de reactivo y condiciones de reacción (Shogren, 2003; Biswas *et al.*, 2008; Chi *et al.*, 2008).

Los almidones acetilados pueden tener bajos o altos grados de sustitución (GS), el cual debe encontrarse en el rango de 0,5-2,5 % de grupos acetilo para aplicaciones en alimentos, debido a que el límite de la FDA para almidones alimenticios es de 2,5% del contenido de acetilo (Chi *et al.*, 2008; Morton and Solarek, 1984)

Para la obtención de almidones acetilados con un bajo grado de sustitución (0,01 a 0,2%), usualmente la reacción se lleva a cabo a temperatura ambiente en un rango de pH de 7,5-9,0, con la adición lenta de anhídrido acético o vinil acetato en medio acuoso, en presencia de catálisis alcalina, una vez que la reacción esta completa el almidón es neutralizado, lavado, recuperado por centrifugación y posteriormente secado. Los almidones acetilados con altos grados de sustitución (2-3) son preparados de forma similar utilizando tiempos de reacción más prolongados (Elomaa *et al.*, 2004; Wang y Wang, 2003).

Estos almidones modificados han sido ampliamente utilizados en la formulación de alimentos, ya que mejoran las propiedades funcionales y la estabilidad de los mismos, actualmente la utilización de almidones modificados de musáceas esta en auge por tener a el almidón como componente principal del fruto inmaduro, además al aplicarle la modificación química permite obtener geles con una mayor viscosidad,

textura suave, estables al tratamiento térmico y a temperatura de refrigeración (Shing *et al.*, 2007; Biswas *et al.*, 2008).

2.4.3.2.4.- Almidones doblemente modificados o doble derivación:

El almidón doble derivado, es una combinación de sustitución y entrecruzamiento que provee estabilidad al sistema alimenticio bajo condiciones de acidez, degradación térmica y mecánica y previene al almidón a la retrogradación durante condiciones de almacenamiento (Singh *et al.*, 2007). Estos son usados principalmente en la elaboración de productos enlatados, salsas para aderezos, alimentos congelados y pudines (Kwan y Byoungseung, 2006).

Es importante señalar que, la cantidad de reactivo requerido para el entrecruzamiento en la preparación de almidones dobles derivados (con propósitos deseables), varían con la fuente de almidón, el tipo de reactivo para el entrecruzamiento, la eficiencia de la reacción, el grado de sustitución necesario y las propiedades específicas requeridas en el producto final (Wattanchant *et al.*, 2003). Por otra parte, el efecto de las diferentes condiciones de reacción, tales como la concentración base del almidón, temperatura, pH y la concentración de las sales analíticas juegan un papel importante durante la preparación de los almidones doblemente modificados (hidroxipropilados y entrecruzados) (Zamudio *et al.*, 2010).

III.- MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.- Materiales

3.1.1.- Lugar de investigación

El procesamiento de la materia prima y los diferentes análisis físicos, químicos, funcionales y nutricionales fueron llevados a cabo en el Laboratorio de Bioquímica de Alimentos “Dra. Emperatriz Pacheco-Delahaye” de la Facultad de Agronomía y en el laboratorio de Granos Raíces y Tubérculos “Dra. Mercedes Baragaño de Mosqueda” del Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos (ICTA) de la Facultad de Ciencias, ambos pertenecientes a la Universidad Central de Venezuela.

3.1.2.- Materia Prima

Para determinar la materia prima a utilizar se realizaron pruebas preliminares de extracción del almidón en diferentes variedades de Musa como *Musa* ABB; *Musa* AAA Subgrupo Cavendish “pineo gigante”; *Musa* AAAB “FHIA-01”, *Musa* AAAB “FHIA-02”, *Musa* AAAB “FHIA-03”, *Musa* AAAB “FHIA-17”; *Musa* AAA “Yagambi Km 5 Ibotá”; *Musa* AAB Subgrupo “AMA-Nat”, lo que permitió obtener diversos valores de rendimiento y determinar de esta manera los clones a utilizar, por tanto las variedades de clones Musa tomadas para el estudio fueron *Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón” y *Musa* AAA subgrupo Cavendish “pineo gigante”, *Musa* AAAB “FHIA-01” y *Musa* AAAB “FHIA-02” de plátano y cambur verde respectivamente, provenientes del Banco de Germoplasma de la estación Experimental del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA), ubicado en la Facultad de Agronomía-Universidad Central de Venezuela. Estos materiales fueron cosechados en el estado de madurez fisiológico.

3.1.3.- Plan de muestreo y análisis estadístico

La toma de muestra de las variedades en estudio se hizo en función a la disponibilidad del Banco de Germoplasma. La muestra utilizada fue de 10 kg para cada variedad. Su recolección fue realizada al azar, siguiendo un modelo completamente aleatorizado. Los datos de las determinaciones por triplicados de las características físicas, químicas, funcionales y nutricionales de los almidones, fueron sometidas a un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significación del 5% y las medias con diferencias significativas se sometieron a la prueba de comparación de medias por el método de Tukey, utilizando el paquete estadístico SPSS versión 17, para Windows 2007.

3.2.- Métodos

3.2.1.- Extracción de almidón nativo

El aislamiento y purificación de los almidones nativos de los cultivares de plátano (*Musa* AAB) y cambur verde (*Musa* AAA subgrupo cavendish “pineo gigante”, *Musa* AAAB “FHIA-01” y “FHIA-02”) se realizó de acuerdo al esquema tecnológico establecido por Pérez (1997) ilustrado en la Figura 13. Donde los frutos fueron pelados y sumergidos en una solución de ácido cítrico al 1%, y cortados en cubos de (2 a 3 cm) luego se maceraron en una licuadora por 2-3 min a baja velocidad. El homogenizado se filtró a través de paños de muselina, a continuación se centrifugó a 5000 rpm por 10 minutos, realizando lavados consecutivos con agua destilada y centrifugando nuevamente a 5000 rpm por 10 min. El sedimento correspondiente al almidón se seco en una estufa con circulación de aire a 45 °C por 16 horas, para luego molerlo y pasarlo por un tamiz a 100 mesh y almacenarlo a temperatura ambiente en un recipiente sellado.

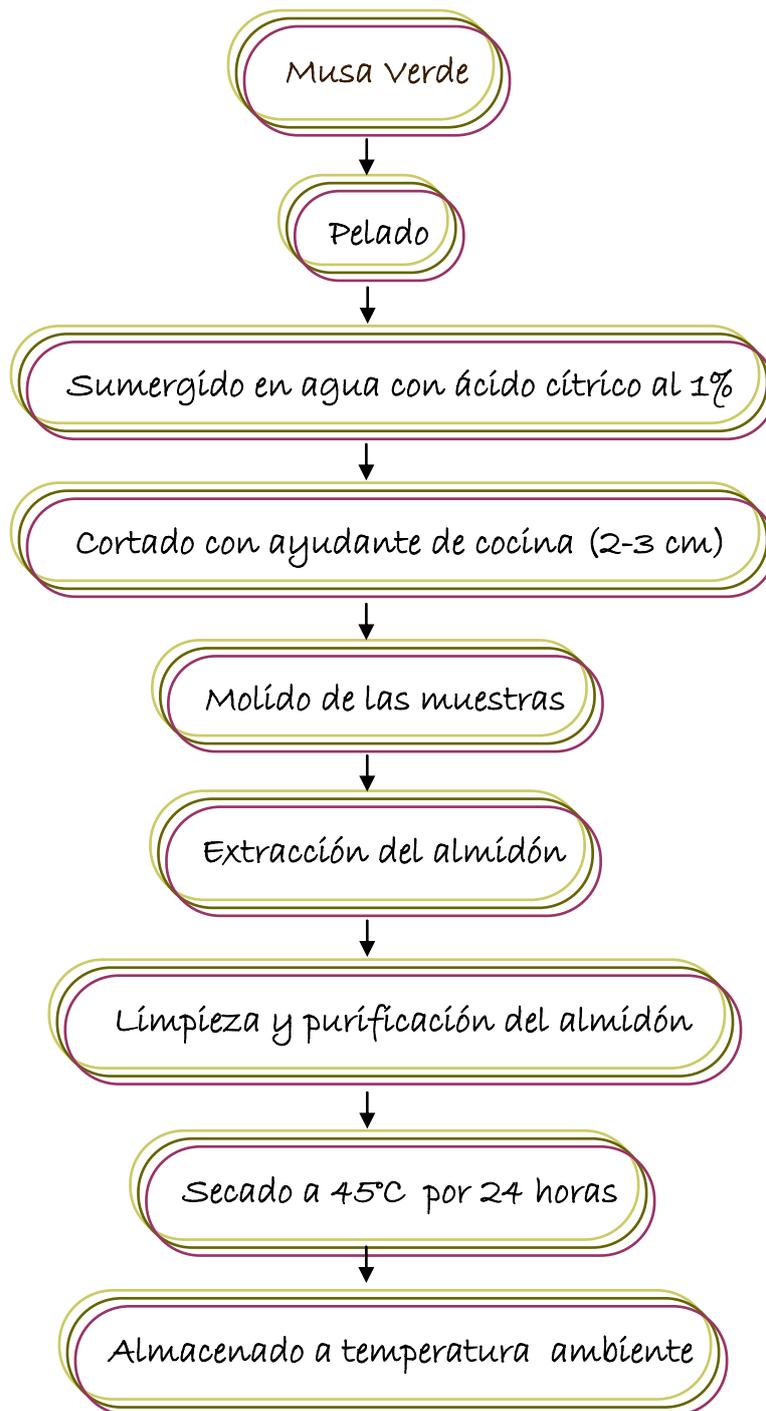


Figura 13. Esquema tecnológico para la extracción y purificación del almidón nativo.

Fuente: Pérez (1997)

3.2.2.- *Modificación de los almidones nativos*

3.2.2.1.- *Almidones modificados físicamente por tratamiento térmico.*

3.2.2.1.1.- *Obtención de almidones pre-gelatinizados por doble tambor.*

El almidón nativo extraído fue modificado por deshidratación usando el deshidratador de doble tambor (Figura 14). Acondicionar 300 g de muestra en una relación agua: almidón de 10:1 siguiendo parámetros descritos por Colonna *et al.*, (1984) y Doublier *et al.*, (1986). Se procedió según metodología descrita por González y Pérez (2003), se alimentó el deshidratador de doble tambor (Sterling Speedtrol, modelo 20, serial 810, Sterling Power System, Inc., Indiana, USA) con la suspensión de almidón a una velocidad de tambor de 9 rpm, y una presión de vapor de 60 psi lo que equivale a 152, 2 °C (306 °F). Pulverizar las láminas de almidón hasta 60 mesh usando el molino de martillo. Empacar el almidón pulverizado en bolsas de polietileno, con cierre hermético para ser analizado posteriormente.

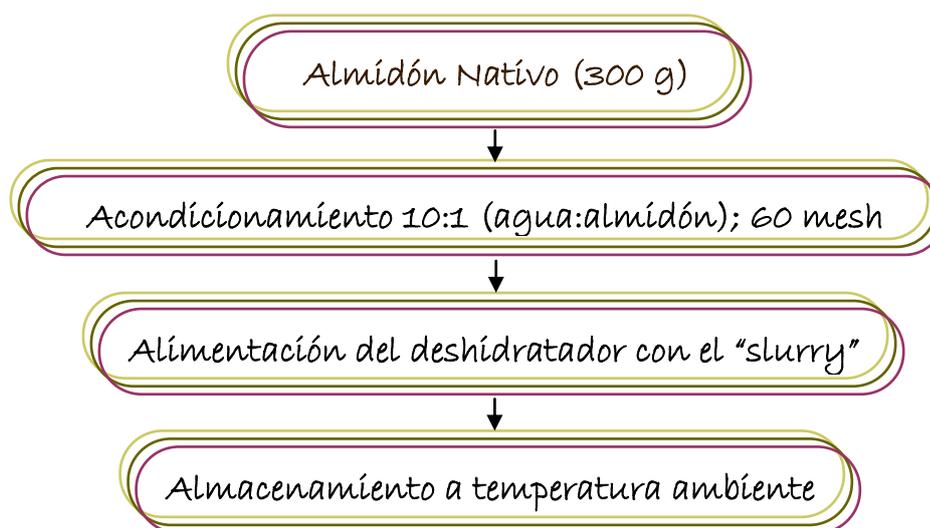


Figura 14. Esquema tecnológico de la modificación por deshidratación con doble tambor.

Fuente: González y Pérez (2003).

3.2.2.2.- Almidones modificados químicamente por derivación o sustitución.

3.2.2.2.1.- Obtención de almidones fosfatado-acetilado.

El almidón nativo extraído fue doble derivado; es decir, doblemente modificado (fosfatado-acetilado) según metodología descrita por Kerr y Cleveland (1959), Wurzburg (1986b) y Whistler y Paschall (1986) con algunas modificaciones. Se procedió a mezclar 300 g de almidón con 300 ml de agua, se midieron los grados Baumé de la solución, los cuales se encontraban alrededor de 24, posteriormente se ajustó el pH a 11 con NaOH al 2.5%, se añadió 15 gramos de sulfato de sodio (Na)₂SO₄ y volvió a ajustar el pH a 11. Se calentó en baño de agua a 45°C, una vez alcanzada la temperatura se le añadió 2 g trimetafosfato, se dejó en agitación constante por tres horas, chequeando el pH cada hora y ajustándolo a 11 con NaOH al 2,5 %. Transcurrida las tres horas se neutralizó a pH 7 con HCl a 2,5%, logrando de esta manera la fosfatación, para la segunda modificación, es decir, la acetilación, seguidamente se procedió a ajustar el pH a 8 con NaOH al 2,5 %, se adicionó 0,1 mol ≈ 9,44 ml de anhídrido acético y simultáneamente se añadió NaOH al 2,5 % para mantener el sistema a pH 8, luego se ajustó el pH a 4,5 con HCl 0,5 Mc. Se centrifugó por 15 minutos a 1500 rpm, se decantó el sobrenadante y resuspendió en agua destilada y centrifugó repitiendo el procedimiento 2 veces, finalmente se seco a 45 °C por 24 horas y se molió hasta alcanzar un tamaño de partículas de 60 mesh, luego se almacenó a temperatura ambiente. (Figura 15).

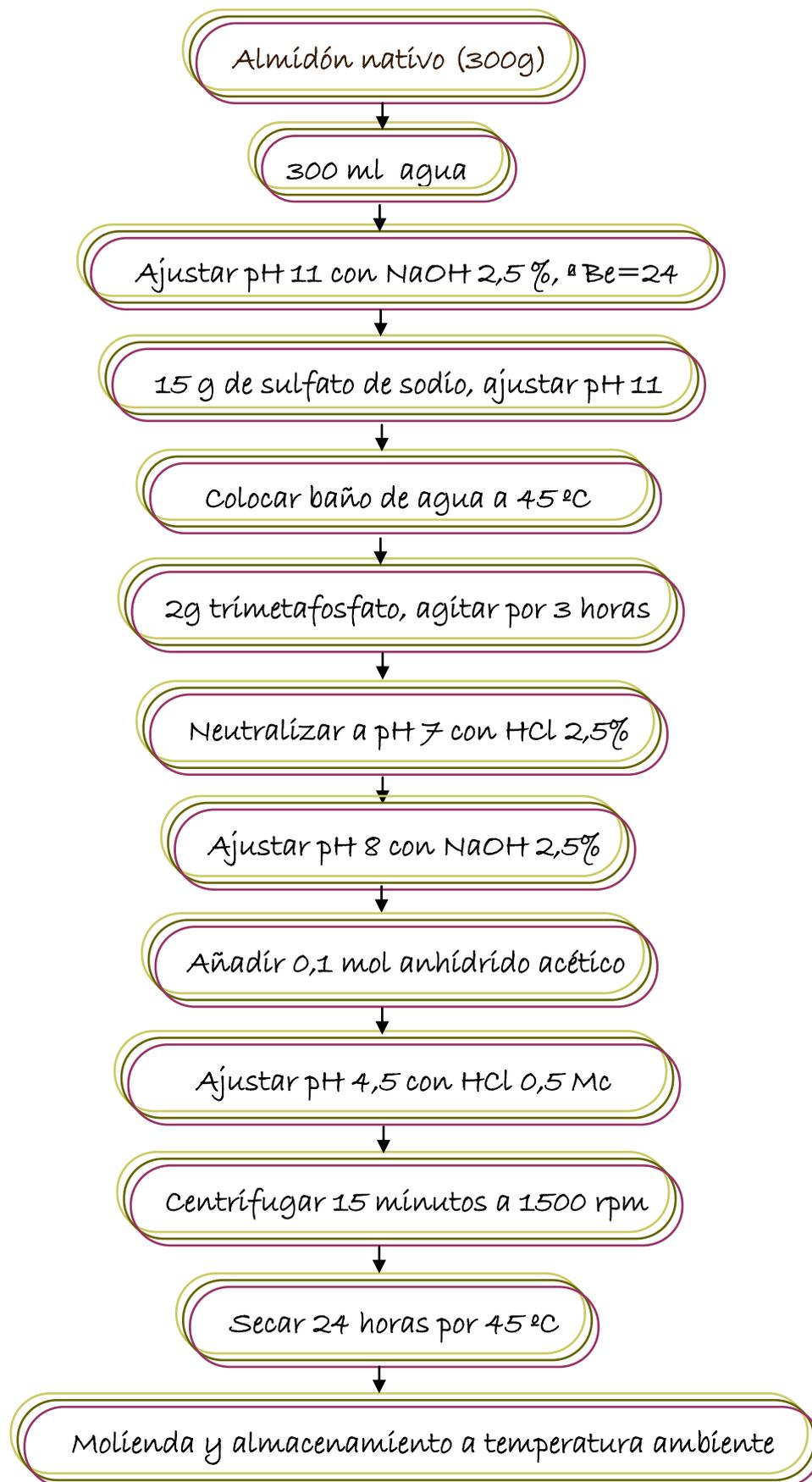


Figura 15. Esquema tecnológico de la modificación fosfatado-acetilado.
Fuente: Propia

3.3.- Cálculo del rendimiento de los almidones obtenidos.

El cálculo del rendimiento para el proceso de extracción de almidón nativo se obtuvo mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Rendimiento}(\%) = \frac{\text{peso almidón(g)}}{\text{peso porción comestible(g)}} \times 100$$

El cálculo del rendimiento en los diferentes procesos de modificación, respecto al almidón nativo, se realizó según la siguiente ecuación:

$$\text{Rendimiento}(\%) = \frac{\text{peso almidón modificado(g)}}{\text{peso almidón nativo(g)}} \times 100$$

3.4. Caracterización de los almidones nativos y modificados de plátano y cambur verde

3.4.1.- Grado de sustitución (GS) de los almidones modificados fosfatados-acetilados

El GS correspondiente a las moléculas de fósforo incorporadas, se calculó a partir de la fórmula:

$$GS \text{ de ester de monosodio} = \frac{162 * P}{(3100 - 102 P)}$$

Donde:

P= Es la diferencia en el contenido de fósforo (en base seca), de la muestra tratada químicamente y el contenido de fósforo de la muestra nativa, expresado como porcentaje de fósforo.

162= Peso molecular de la anhidridoglucosa.

3100= Valor constante

102= Valor constante

Para determinar el GS (número promedio de grupos OH- que fueron reemplazados por grupos CH₃-C=O en las unidades de anhidroglucosa (UAG)) correspondiente al % de acetilo, se procedió según metodología descrita por Bello *et al.*,(2002). La muestra pulverizada de 1 g del acetato de almidón se colocó en un matraz de 250 mL y se adicionó 50 mL de una solución de etanol-agua (75% v/v). La mezcla se agitó y se mantuvo a 50 °C durante 30 min. A continuación se enfrió y se agregaron 40 mL de KOH (0,5 Mc). Esta mezcla se mantuvo durante 72 h con agitación ocasional. El exceso de álcali fue titulado por retroceso con una solución estándar de HCl (0,5 Mc) usando fenolftaleína como indicador. La solución se dejó en reposo por 2 h y después se neutralizó el exceso de álcali que aún pudiera tener la muestra. Simultáneamente se tituló una muestra testigo utilizando una muestra original del almidón.

El nivel de acetilación y el grado de sustitución del almidón se calcularon como sigue:

$$\% \text{ Acetilación} = \frac{[ml(\text{testigo}) - ml(\text{muestra})] * \text{Normalidad del ácido} * 0,043 * 100}{\text{peso de la muestra (g base seca)}}$$

$$\text{Grado de sustitución (GS)} = \frac{162 * \% \text{ Acetilación}}{4300 - (42 * \% \text{ Acetilación})}$$

Donde:

162 corresponde al peso molecular de la UAG,

4300 se obtiene de multiplicar 100 por el peso molecular del grupo CH₃-C=O y 42 al peso molecular del grupo CH₃-C=O) - 1.

3.4.2.- Análisis morfométrico de los gránulos de almidón

3.4.2.1.- Microscopía electrónica de barrido (SEM)

El análisis morfométrico se realizó por medio de la técnica de microscopía electrónica de barrido, (SEM) según lo descrito por Qi *et al.* (2000), se colocó una porción, de cada una de las muestras, en un porta-muestras de aluminio, previamente identificado y cubierto con una cinta especial para fijar la muestra y evitar su dispersión al momento de movilizarlas, luego se introdujeron en el microscopio electrónico de barrido (HITACHI, scanning electron microscope, S-2400), trabajando con un haz de energía de 10 a 15kV y una bomba de vacío a 0,98 Tor de presión.

3.4.2.2.- Microscopía óptica

Para observar la microscopía óptica de los almidones se usó un microscopio de luz polarizada (Leitz, Wetzlar, Alemania) con un objetivo 40X (NIKON OPTIPHOT-2) y una cámara digital. Las muestras de almidón se espolvorearon en un portaobjeto, se adicionó una gota de agua destilada, se mezcló con una espátula, se colocó un cubreobjetos (Kuakpetoon y Wang, 2008). La captura de las imágenes se hizo con un software Pixela Image Mixer ver 3.0 (Pixela Corporation, Japón).

3.4.2.3.- Tamaño de partícula

El tamaño de partícula fue determinado por triplicado en una cámara a temperatura ambiente, empleando el equipo Malvern Master-Sizer 2000 (Malvern Instruments, Ltd. Worcestershire, UK) el analizador de difracción laser contenía celda de Fourier (0,02-2000 μm) y dispositivo Hydro SM con un capacidad de volumen de

50 a 120 μ L. El instrumento da información de la distribución media (v , 0,5) del volumen como medida fundamental. El medio dispersante de los almidones fue etanol y los índices de difracción utilizados en este estudio fueron de 1.330 y 1.335.

3.4.3.- *Propiedades físicas, químicas y funcionales*

Los almidones nativos y modificados se caracterizaron en sus propiedades físicas, químicas y funcionales siguiendo los métodos que se muestra en l tabla 7.

Tabla 7. Análisis físicos, químicos y funcionales.

| Parámetro | Método, número |
|-------------------------|---|
| Humedad | AACC (2003) 44-15 A |
| Proteína cruda (N*5,85) | AACC (2003) 46-13 |
| Grasa cruda | Schoch, (1964) |
| Ceniza | AACC (2003) 08-01 |
| Carbohidratos totales | INN (2000) |
| Almidón total | Mc Cready <i>et al.</i> , (1950) |
| Amilosa | Juliano, (1971) |
| Amilopectina | Diferencia contenido de amilosa |
| Azúcares reductores | Somogyi (1952) |
| pH y acidez | AACC, (2003) 02-31 y 02-52 respectivamente. |
| Color | Manual Hunter, (2001) |
| Densidad | Smith (1964). |
| Almidón dañado | AACC (2000) , 76-30 |

3.4.3.1.- *Determinación de la pureza*

La pureza se determinará por diferencia: Se calculará en base seca, según la fórmula:
 $100 - (\% \text{ proteína cruda} + \% \text{ grasa cruda} + \% \text{ ceniza})$ (Pérez, 1994).

3.4.3.2.- *Color*

El color se determinó por medio del colorímetro triestímulo de Hunter (HunterLab, Reston, D-25). Los parámetros de color se expresaron en la escala de color

CIE L*a*b*. En el sistema CIE LAB, el color es definido por tres coordenadas rectangulares L*, a* y b*, siendo L* la luminosidad con valores de 0 (totalmente negro) a 100 (blanco). El matiz (tonalidad) es dado por dos caracteres cromáticos, uno de ellos codificado por a* con valores de - (verde) y +(rojo), el segundo carácter de matiz es el b* el cual varía entre valores de - (azul) y +(amarillo) (Richard, 2005). A partir de los valores obtenidos de la escala CIE L*a*b* se calculará la variación total entre muestras (ΔE), definido por la siguiente ecuación:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

Donde:

L*: Representa el índice de Luminosidad (100 = blanco y 0 = negro).

a*: Mide los colores de rojo (+) a verde (-) y el 0 es neutro.

b*: Mide los colores de amarillo (+) a azul (-) y 0 es neutro.

L*/b*: Indica el matiz de la harina cruda, intensidad del color amarillo.

ΔE : Indica el cambio total del color, es decir, la variación total del color entre las muestras.

Para obtener los valores de ΔE en las harinas, se utilizó como índice de comparación (Standard) la placa blanca de porcelana, del instrumento, y cuyos valores son: L* = 93,54 a* = -0,81 b* = 1,58. El índice de blanco (IB), representará la blancura total de la muestra y se calculará de acuerdo a ecuación usada por Hsua *et al.* (2003):

$$IB = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}}$$

3.4.4.- Propiedades funcionales

3.4.4.1.- Perfil amilográfico

El perfil de gelatinización se realizó con un equipo de viscoamilografía rápida (RVA), marca Newport Scientific, RVA-4 series, empleando una concentración de 7% (p/v) según método descrito en la AACC, 2003 (N°76-10) y Shuey y Tipples, (1991).

La suspensión se colocó en el portamuestras del RVA y se sometió a calentamiento de la siguiente forma: en la etapa inicial la temperatura se incrementó a 50°C durante 1 minuto, posteriormente se llevó la suspensión a 95°C a razón de 6°C/minuto y se mantuvo a esta temperatura por 2.7 minutos, luego se enfrió hasta 50°C (6°C/minuto), finalmente se mantuvo a 50°C por 2 minutos aproximadamente, con una agitación constante de 160 rpm. La interpretación del amilograma, se realizó, según parámetros descritos por Mazur *et al.* (1957) y Merca y Juliano, (1981).

3.4.4.2.- Índice de absorción de agua, sólidos solubles y poder de hinchamiento

Estos parámetros se determinaron según el método descrito por González y Pérez, (2002), para ello se pesaron 2 gramos de almidón y se colocaron en un balón de 500 ml de capacidad con tres cuellos. El balón se colocó sobre una manta de calentamiento con agitación, conectando el cuello central a un tubo refrigerante. Se agregó 100 ml de agua destilada y se agitó a velocidad constante para mantener el almidón en suspensión, se tapó uno de los cuellos con un tapón de goma provisto de un termómetro y el otro con un tapón de goma solamente. El termostato de la manta se ajustó para que la temperatura aumentará $\pm 1,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, las bocas de los tapones se

mantuvieron tapadas excepto en el momento de tomar la alícuota. Se pesaron los tubos de centrífuga previamente identificados, así mismo se identificaron y pesaron las cápsulas de porcelana. A intervalos de 5°C entre 60 y 95 °C, se tomaron alícuotas de 10 ml de la suspensión y fueron colocadas en los tubos de centrífuga. Se enfrió con agua corriente, se secaron con papel absorbente y se pesaron (A). Se centrifugó a 16000 x g durante 15 min., en una centrífuga con cabezal en ángulo. Se decantó el líquido sobrenadante de cada tubo y se colocó en las cápsulas de porcelana. Se evaporó a sequedad y luego en una estufa a 105°C durante 4 h. Se dejó enfriar en un desecador a vacío y se pesó (B). Se pesó, asimismo, el sedimento dejado en el tubo (a). La expresión de los resultados viene dada por lo siguiente:

$$W1 = \frac{\text{Peso (g) almidón (b.s.)} \times 100}{\text{Peso (g) almidón (b.h.)} + 100}$$

$$W2 = \frac{A \times W1}{100}$$

$$W3 = W2 - b$$

$$\% \text{ S.S.} = \frac{b \times 100}{W2}$$

$$\text{A.A.} = \frac{a - W3}{W3}$$

$$\text{PH} = \frac{a \times 100}{W2 \times (100 - \% \text{S.S.})}$$

Donde:

W1 = Porcentaje de almidón en la suspensión (b.s.)

W2 = Almidón en cada alícuota W3 = Almidón residual (en el sedimento)

A = Peso de la alícuota

a = peso del sedimento en el tubo

b = peso de residuo en la cápsula

A.A. = Agua absorbida en g. por g. de almidón

PH = Poder de hinchamiento

%S.S. = Porcentaje de sólidos solubles

3.4.4.3.- Solubilidad en agua fría

La solubilidad en agua fría se realizó por la metodología descrita por Eastman y Moore, (1984) modificada por Bello *et al.* (2002). Para ello se preparó una suspensión de almidón (base seca) en agua en 1% (p/v), se mezcló a baja velocidad en una licuadora, luego de agregar toda la muestra de almidón, el equipo se operó a alta velocidad por 2 minutos. La suspensión de almidón se colocó en recipientes se centrifugó a 3500 rpm por 15 minutos y se transfirió una alícuota de 25 mL del sobrenadante a una cápsula de Petri previamente pesada, y se secó en estufa a 110 °C por 4 horas. Por diferencia de peso se calculó la solubilidad en agua fría, expresada en porcentaje.

3.4.4.4.- Estabilidad y claridad de las pastas

La estabilidad y la claridad de las pastas de almidón a temperatura ambiente y a 4 °C se realizó según la metodología de Bello *et al.* (2002). Para ello se preparó una suspensión de almidón (base seca) en agua de 4% (p/v), utilizando tubos de ensayo con tapa, los cuales fueron colocados en un baño de agua a ebullición por 30 min. Los tubos se agitaron vigorosamente cada 5 min. Después de enfriar a temperatura ambiente, se determinó el porcentaje de transmitancia (%T) a 650 nm utilizando agua como testigo para el ajuste del equipo. Tres de las muestras se almacenaron a temperatura ambiente y a 4 °C, midiendo el porcentaje de transmitancia a las 24, 48 y 72 horas.

3.4.4.5.- Estabilidad al congelamiento-deshielo:

Esta prueba se hizo de acuerdo a Bello *et al.* (2002) preparando suspensiones de almidón (base seca) en agua de 5% (p/v), para someterlas a un ciclo de congelamiento (-20°C x 18 h) y posterior deshielo (temperatura ambiente por 6 h). Al término, las muestras fueron centrifugadas a 3000 x g durante 10 min, luego se midió el porcentaje de agua separada obtenido.

3.4.4.6.- Viscosidad Aparente

Para realizar la viscosidad se prepararon suspensiones de almidón (base seca) en agua destilada a 5% (p/v), colocando éstas en un baño con agua hirviendo durante 15 min y posteriormente enfriándolas a temperatura ambiente. La viscosidad aparente de las pastas frías se midió a 25 °C en un viscosímetro Brookfield (model RVF, Stoughton, MA) a cuatro velocidades de deformación (2, 4, 10 y 20 min⁻¹) utilizandola aguja No. 4. Finalmente se observó la estabilidad de la pasta a una velocidad de 20 min⁻¹ en los minutos 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20 y 30.

3.4.4.7.-Consistencia del gel

Se realizó según metodología de Cagampang *et al.* (1973). Se Pesó 100 ± 1 mg (en base a 12% humedad, 100 mesh) de almidón en un tubo de ensayo de 13 x100 mL (pyrex 9820). Se Humedeció con 0,2 mL de la solución de azul de timol al 0,025% en etanol al 95%. Agitó y añadió 2 mL de la solución de hidróxido de potasio 0,2 Mc. Agitó el tubo en un vortex a velocidad 6, luego se cubrió el tubo con una metra de vidrio y se colocó en un baño de agua hirviendo durante 5 minutos, se retiró del baño,

espero 5 minutos y se enfrió en un baño de hielo durante 15 minutos, secado los tubos. Se procede a acostar los tubos sobre el papel milimetrado entre 30 a 60 minutos. Se mide la longitud total del gel en mm, desde la parte inferior del tubo hasta el frente del gel.

3.4.5.- Propiedades Nutricionales

3.4.5.1.- Digestibilidad in vitro del almidón

Se determinó mediante el método descrito por Holm *et al.*, (1985), en el cual se estima el poder reductor liberado por la acción de la α -amilasa porcina.

3.4.5.2.- Almidón resistente

La determinación del almidón resistente total se realizó mediante el método descrito por Goñi *et al.*, (1996). Este método se basa en una cuantificación de glucosa liberada mediante una determinación enzimática-colorimétrica, esta medición permite determinar el contenido de almidón indigestible en muestras vegetales tal y como se ingieren. En primer lugar se realiza una hidrólisis proteica con pepsina a pH ácido para simular las condiciones gástricas, seguida de una hidrólisis del almidón digestible con alfa-amilasa pancreática (Sigma, A-3176), durante 16 horas y a pH neutro.

IV.- RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1.- RENDIMIENTO DE LOS PROCESOS DE OBTENCIÓN DE LOS ALMIDONES NATIVOS Y MODIFICADOS DE MUSÁCEAS.

Los rendimientos de los almidones nativos y de cada una de las modificaciones empleadas en el presente estudio se muestran en el Tabla 8, donde se observa el rendimiento del almidón nativo (N), pregelatinizado (P) y fosfatado-acetilado (FA) extraído de clones de diferentes variedades de musáceas específicamente, plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) y cambur verde (*Musa* AAA subgrupo Cavendish “pineo gigante”; *Musa* AAAB “FHIA-01” y “FHIA-02”).

En la extracción de los almidones nativos de plátano Hartón (HC), cambur subgrupo Cavendish “pineo gigante” (PG), cambur “FHIA-01” (F1) y “FHIA-02” (F2) se obtuvieron rendimientos de 15,00%, 14,64 %, 14,44% y 11,76 % respectivamente, los cuales son bastante aceptables, si se consideran las pérdidas por desechos, la metodología de extracción empleada para cada uno de ellos, la cual implica diferentes operaciones unitarias donde se pierde cierta cantidad de sólidos , debido a que se requieren varias fases de lavado, lo cual se traduce en mayores pérdidas de material amiláceo y por consiguiente, valores de rendimiento más bajos. Se evidencia que el mayor rendimiento fue para los almidones de HC, lo cual puede deberse a las características de esta variedad como por ejemplo, a su tamaño.

Al comparar las cantidades de almidón obtenidos en los diferentes lotes procesados, se encontraron valores similares, por lo que se puede considerar que el método de aislamiento es reproducible, y las ligeras variaciones se deben a que las

Tabla 8. Rendimiento de los almidones nativos y modificados de plátano y cambur verde.

| Muestra | Almidón (%) | Almidón (%) | Almidón (%) |
|----------------|--------------------|---------------------|--------------------------|
| | Nativo (N) | Pregelatinizado (P) | Fosfatado-Acetilado (FA) |
| HC | 15,00 | 81,67 | 83,33 |
| PG | 13,64 | 85,33 | 86,67 |
| F1 | 14,44 | 81,00 | 85,00 |
| F2 | 11,76 | 84,33 | 82,67 |

HC=*Musa* AAA subgrupo Plátano “Harton”; PG= *Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pinoe gigante”; F1= *Musa* AAAB “FHIA-01”; F2= *Musa* AAAB “FHIA-02”.

operaciones son manuales y se introducen variaciones entre lote y lote, así como también se pueden considerar variaciones en la materia prima, como sería el tamaño o grado de madurez de los frutos.

Sin embargo, los rendimientos encontrados a nivel laboratorio pueden considerarse adecuados, y son similares a los reportados en otros estudios, en este sentido Cabrera *et al.* (2010) obtuvieron rendimientos de 6 a 12% en cambures (“FHIA-01” Y “FHIA-02”), mientras que Flores *et al.* (2004) indican rendimientos de almidón del 16 al 20 % , los cuales aumentaron a medida que aumentaba el peso de la pulpa, además demostraron que el proceso puede ser técnicamente factible a escala industrial de operación.

En relación a las modificaciones aplicadas a partir del almidón nativo, en el caso de HC, PG, F1 y F2, los valores de rendimiento alcanzados en el almidón pregelatinizado fueron similares a los del almidón fosfatado-acetilado, encontrándose entre 81% y 86%, evidenciándose la eficiencia del proceso de modificación. Resultados similares fueron encontrados por Bello *et al.* (2002), cuyos rendimientos de almidones modificados de musáceas a partir del almidón nativo fue 87,6%.

4.2 Grado de sustitución (GS) de los almidones modificados fosfatados-acetilados

En la Tabla 9, se muestra el contenido de fósforo así como el grado de sustitución, éste último oscila entre 0,34% y 0,37%, resultados similares fueron encontrados por Woo y Seib (2002), los cuales prepararon almidón resistente por fosfatación a partir de almidón de trigo usando trimetafosfato de sodio, logrando un grado de sustitución del 0,32%, del mismo modo Aparacio *et al.*(2010) al obtener almidón resistente a partir de almidón de plátano entrecruzado, el grado de sustitución fue de 0,29% al igual que Manni y Santiago, (2008) al desarrollar biomateriales (encapsulados) a partir de almidón de amaranto modificado por fosfatación el grado de sustitución fue 0,25 %, concluyendo que la eficiencia de encapsulación resultó ser bastante elevada en las microcápsulas con almidón fosfatado a ese grado de sustitución.

Tabla 9. Determinación del contenido de fósforo (%p/p) y grado de sustitución (GS) en almidones de plátano y cambur verde nativo y modificado.

| | MUESTRAS | | | |
|---------------------------|----------|--------|--------|--------|
| | HC | PG | F1 | F2 |
| Fósforo (% p/p) AN | 0,007 | 0,005 | 0,009 | 0,008 |
| Fósforo (%p%p) FA | 0,124 | 0,135 | 0,130 | 0,125 |
| FÓSFORO (%p/p) | 0,065 | 0,070 | 0,070 | 0,066 |
| GS | 0,0034 | 0,0037 | 0,0037 | 0,0035 |

AN= Almidón nativo; FA= Almidón fosfatado-acetilado: HC=*Musa* AAA subgrupo Plátano “Hartón”; PG= *Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pineo gigante”; F1= *Musa* AAAB “FHIA-01”; F2= *Musa* AAAB “FHIA-02”.

Por otro lado, el % de acetilo y el grado de sustitución de los almidones se muestran en la Tabla 10, donde se evidencia que el grado de sustitución en los almidones modificados, oscila entre 2,1 y 2,5%; Según Shogren (2003), estos almidones son considerados de bajo grado de sustitución (0,01-0,2) y aceptables a los

Tabla 10. Determinación del % de acetilo y grado de sustitución (GS) en muestras de almidones de plátano y cambur verde modificado.

| | MUESTRAS | | | |
|------------------|----------|--------|--------|--------|
| | HC | PG | F1 | F2 |
| % ACETILO | 0,6505 | 0,7435 | 0,6505 | 0,5576 |
| GS | 0,025 | 0,025 | 0,025 | 0,021 |

HC=*Musa* AAA “Harton Común”; PG= *Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pineo gigante”;

F1= *Musa* AAAB “FHIA-01”; F2= *Musa* AAAB “FHIA-02”.

reportados para aplicaciones en la formulación de alimentos (Singh *et al.*, 2004). El bajo grado de sustitución presente en las muestras en estudio, puede ser atribuido, a que el entrecruzamiento se realizó antes de la sustitución quedando menor cantidad de grupos hidroxilos disponibles para ser reemplazados; y además Chen *et al.* (2005), señalan que las características propias de los gránulos, como el tamaño, fragilidad granular, relación amilosa-amilopectina, estructura, y cristalinidad del almidón, afectan el grado de sustitución.

Los almidones acetilados utilizados en la formulación de alimentos generalmente contienen entre 0,01 y 2,5% de grupos acetilos, aunque la legislación mundial para el uso de estos almidones se encuentra todavía en discusión (Singh *et al.*, 2007), el máximo valor de GS permitido en USA es 9% para el caso de los acetilados (Whistler *et al.*, 1984). Así, los resultados obtenidos están de acuerdo con este requerimiento. Un grado de sustitución bajo es indicativo de la preservación de la estructura del gránulo durante el proceso de modificación permitiendo obtener de esta manera derivados compatibles con propósitos farmacéuticos y alimenticios.

Resultados similares fueron reportados por Rivera *et al.*, (2010) al modificar almidones de plátano por acetilación, encontrando un grado de sustitución fue de 2,5 a

4,2%, del mismo modo Bello *et al.* (2002) al acetilar almidón nativo de plátano Variedad “MACHO” indicaron un grado de sustitución de 4%; de esta manera se puede inferir que la modificación realizada es reproducible y eficiente, en las muestras en estudio.

4.3.- Análisis morfométrico de los gránulos de almidón

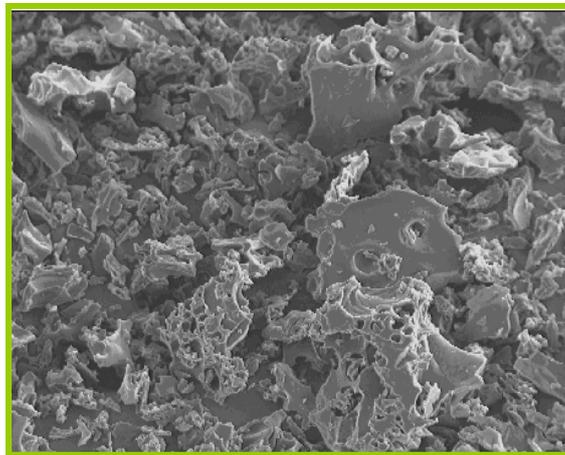
4.3.1.- Microscopía electrónica de barrido (SEM)

En general, los gránulos de almidón nativos (Figuras 16A; 17A; 18A; 19A) de plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) y cambur (*Musa* AAA subgrupo cavendish “pino gigante”; *Musa* AAAB “FHIA-01” y “FHIA-02”), estudiados presentaron formas irregulares y diversos tamaños, observándose microscópicamente como óvalos alargados y con superficie densa, la cubierta externa de los gránulos se observa suave y sin la presencia de poros, con la superficie externa casi intacta, lo que indica que el proceso de extracción fue eficiente, sin afectar las características del material y la naturaleza de éste. Los gránulos presentaron diversos valores de longitud, sobrepasando estos la mayoría de las veces los 40 μm , siendo esto comparable a los resultados reportados por otros investigadores que señalan que el tamaño de los gránulos de almidón oscila entre 20 y 60 μm . para el mismo tipo de muestra (Millán *et al.*, 2005; Waliszewski *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2005; Bello *et al.*, 2000, 2005; Jane *et al.*, 1994). En cuanto a la dimensión de los gránulos se obtuvo un valor similar a otros autores (Ling *et al.*, 1982; Kayisu *et al.*, 1981) ya que fueron superiores a los 20 μm .

(A)



(B)



(C)

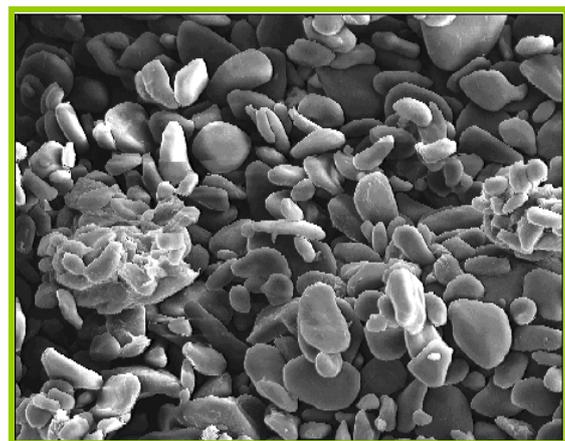
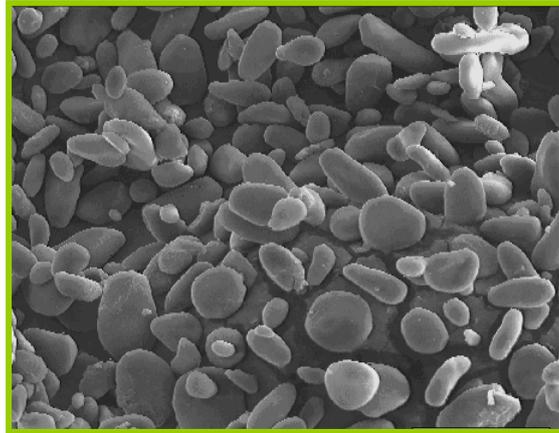
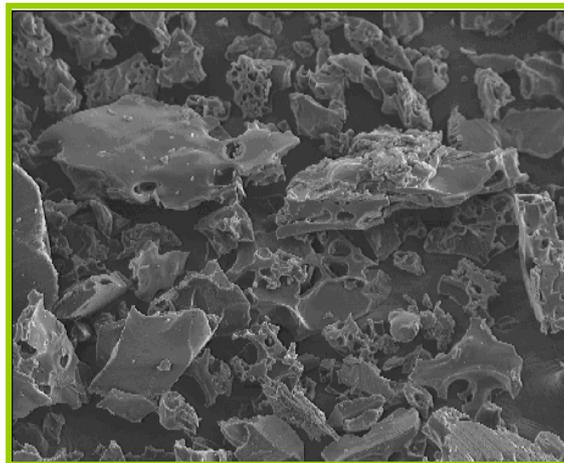


Figura 16. Microscopía electrónica de barrido de gránulos de almidón de plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”). (A)= Almidón nativo; (B)= Almidón modificado por doble tambor; (C)= Almidón fosfatado-acetilado.

(A)



(B)



(C)

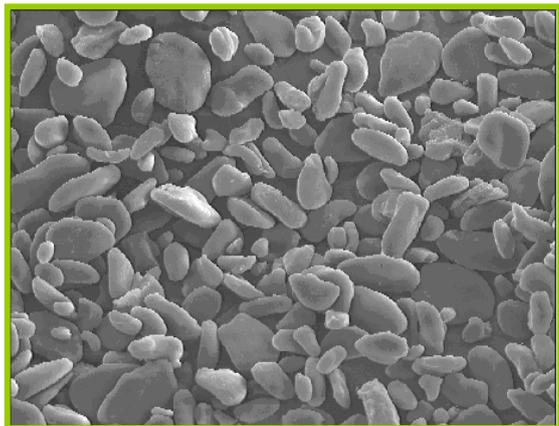
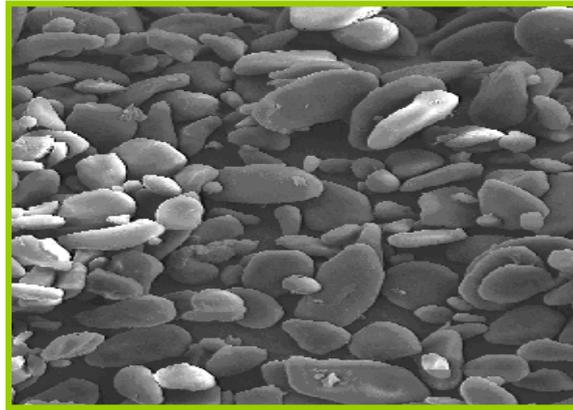
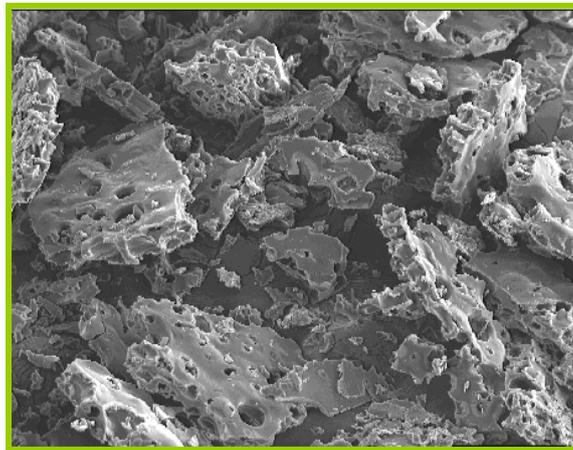


Figura 17. Microscopia electrónica de barrido de gránulos de cambur (*Musa* AAA subgrupo Cavendish "pino gigante"),. (A)= Almidón nativo; (B)= Almidón modificado por doble tambor; (C)= Almidón modificado fosfatado-acetilado.

(A)



(B)



(C)

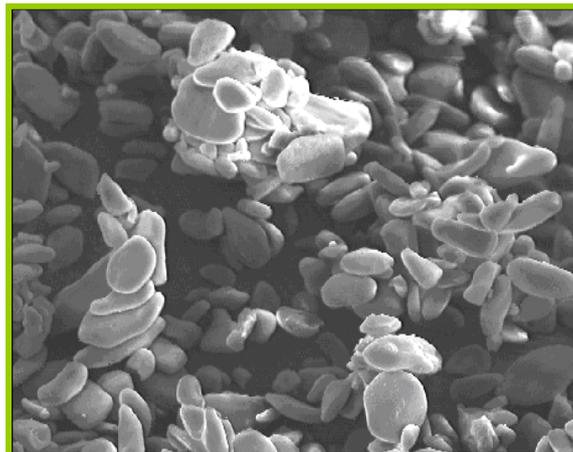
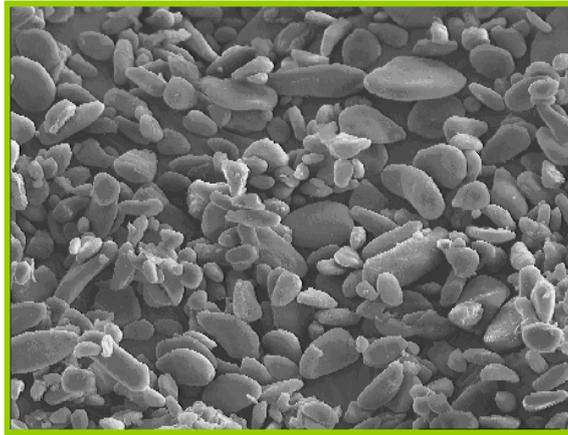
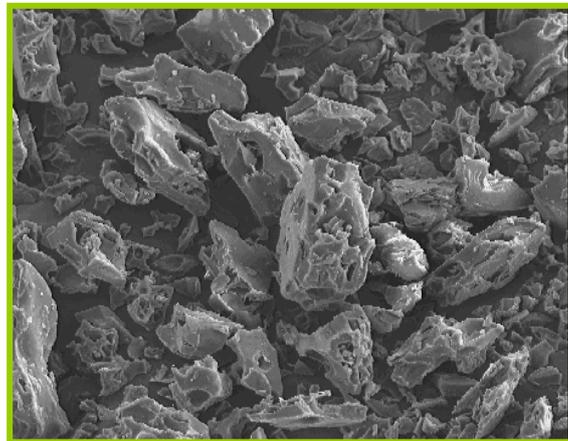


Figura 18. Microscopia electrónica de barrido de gránulos de almidón de cambur (*Musa* AAAB "FHIA-01"). (A)= Almidón nativo; (B)= Almidón modificado por doble tambor; (C)= Almidón modificado fosfatado-acetilado.

(A)



(B)



(C)

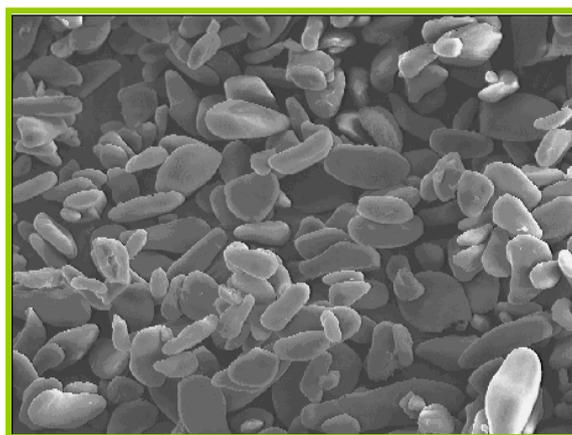


Figura 19. Microscopia electrónica de barrido de gránulos de almidón de cambur (*Musa* AAAB "FHIA-02"). (A)= Almidón nativo; (B)= Almidón modificado por doble tambor; (C)= Almidón modificado fosfatado-acetilado.

Es importante señalar que, el tamaño del gránulo de almidón, es un parámetro importante que afecta las propiedades funcionales y fisicoquímicas de los mismos. Se ha reportado que gránulos pequeños pueden absorber mayor cantidad de agua, en comparación con los gránulos grandes, esto debido a que presentan mayor área de contacto y (Paredes *et al.*, 1989). Del mismo modo Tian *et al.* (1991), reportaron que mientras más pequeños son los gránulos mayor, es su digestibilidad.

Al observar las micrografías de todas las muestras de almidón modificadas por doble tambor (Figura 16B; 17B; 18B; 19B), se evidencia que fue alterada la apariencia y la estructura del gránulo nativo, a formas de escamas y de material agregado sin áreas definidas, tipo masa discontinua lo que indica que el proceso térmico fue eficiente, este efecto fue similar al observado por Leonel *et al.* (2004) en gránulos de almidón de batata, sometidos a deshidratación por atomización con aire caliente a temperatura de 80-120 °C, donde evidenciaron la pérdida de la estructura nativa. De igual manera, Yadav *et al.* (2006) en muestras de ñame sometidas a secado en tambor rotatorio, apreciaron una parcial a completa destrucción de la estructura cristalina de los gránulos de almidón. Del mismo modo, Martín y López (2009) en almidones de yuca pregelatinizados por doble tambor, observaron pérdida de la estructura del gránulo, con presencia de formas irregulares y con superficies fragmentadas y rugosas.

Con respecto a los almidones modificados fosfatado- acetilado (Figura 16B; 17B; 18B; 19B) para todas las muestra en estudio, se observa que, se mantiene la forma original, aumentando sólo en pequeña escala su tamaño (como se corrobora con el ensayo empleando difracción láser), por otra parte, solo en algunos casos, se evidencia la presencia de material en la superficie de los gránulos, lo cual pudiera ser restos de los componentes empleados en la modificación, así como también material interno del

mismo gránulo, asimismo, se observan escasas y minúsculas estructuras redondas adheridas a la superficie del gránulo lo cual nos pudiera sugerir la entrada del material modificador al interior del gránulos, revelando que los gránulos de almidón son resistentes a este tipo de modificación.

Se ha reportado que el tratamiento de modificación química por acetilación altera levemente la morfología granular (Singh *et al.*, 2004). Sánchez *et al.*,(2010) al estudiar almidones de plátano acetilados concluyeron que los gránulos de almidón de plátano son resistentes a la modificación, no observaron diferencia en la estructura molecular, sólo un pequeño aumento del tamaño del gránulo. Kaur *et al.* (2006) al evaluar almidones de maíz y papa modificados con anhídrido acético, reportaron que el tratamiento por acetilación causó fusión granular en ambos almidones. Estos resultados son comparable con el presente estudio, donde solo un leve incremento del tamaño granular fue observado en las micrografías obtenidas empleando microscopía óptica y electrónica.

En general, este incremento del tamaño del gránulo es debido a la inclusión de grupos fosfato dentro de los gránulos del almidón, los cuales crean ciertas fuerzas de repulsión que pudieran aumentar los espacios inter e intra moleculares, permitiendo la inclusión de un mayor número de moléculas de agua. Asimismo, cuando el almidón es tratado con trimetafosfato de sodio (reacción por entrecruzamiento), éste tiende a formar aglomerados en forma de pequeños racimos; lo que no se presenta en los almidones nativos, tal y como se presenta en las Figuras 16C; 17C; 18C; y 19C, similares resultados reportaron Rodríguez *et al.* (2010) quienes al modificar almidones de plátano con trimetafosfato de sodio reportaron solo hubo diferencias entre la morfología de los gránulos del almidón nativo y los almidones entrecruzados en cuanto a su

tamaño, del mismo modo, Sivoli *et al.* (2005), en almidón de yuca, observaron que al iniciarse el proceso de modificación química empleando trimetafosfato de sodio, la introducción de grupos químicos en la molécula, originó un aumento de tamaño con promedio de 19 μm , probablemente el arreglo interno en la molécula del almidón.

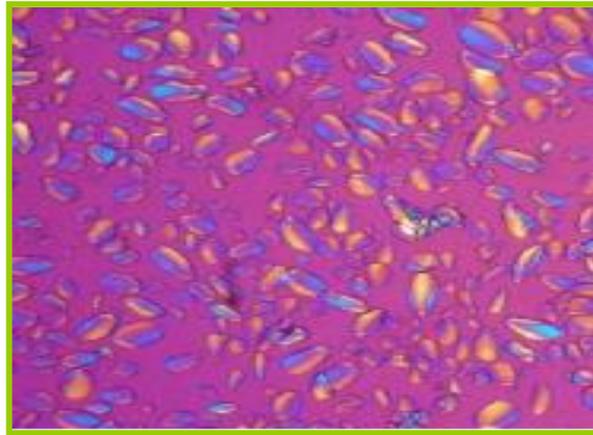
4.3.2.- Microscopía óptica

4.3.2.1.- Microscopia de luz polarizada (MLP)

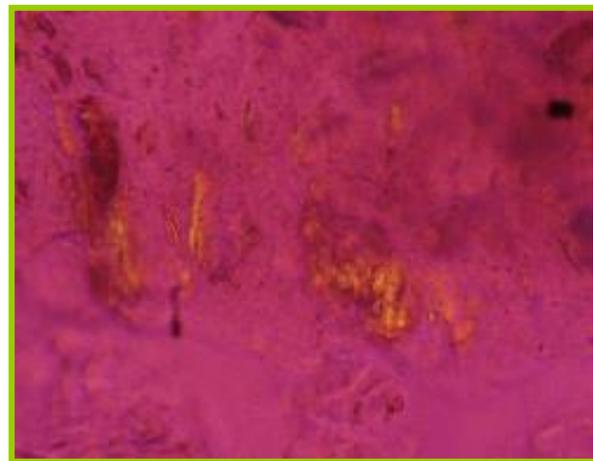
La observación bajo la luz polarizada provee información más detallada en relación a la organización molecular de los gránulos de almidón. La naturaleza birrefringente del almidón indica el alto grado de orientación molecular dentro de los gránulos. En la micrografía con MLP se observa una cruz de malta bien definida para todas las muestras, al igual que los bordes de los gránulos, formas irregulares como óvalos alargados con *hilum* definido y excéntrico, éste se encuentra en uno de los extremos, ya que los anillos de crecimiento parten de uno de estos, lo que evidencia que los anillos en los almidones de musáceas no crecen alrededor de hilum como en la mayoría de los gránulos de almidones de otras fuentes botánicas. La micrografía con MLP indica que existe un alto grado de organización molecular por el arreglo ordenado en forma radial de las cadenas de amilosa y amilopectina (Figuras 20A; 21A; 22A; 23A). Resultados similares se obtienen en almidones cerosos de papa y maíz (Bertoft, 2004), así como en yuca (Sivoli *et al.*, 2005).

Con respecto a los almidones pregelatinizados (Figuras 20B; 21B; 22B; 23B), se observa que para todas las muestras la estructura del gránulo de almidón fue alterada, resultando gránulos de almidón fragmentados a forma de escamas y de material

(A)



(B)



(C)

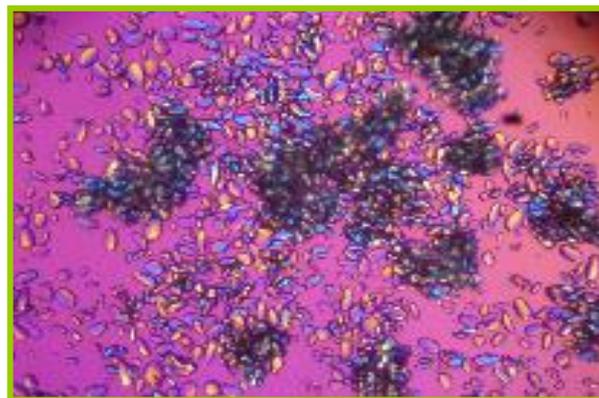
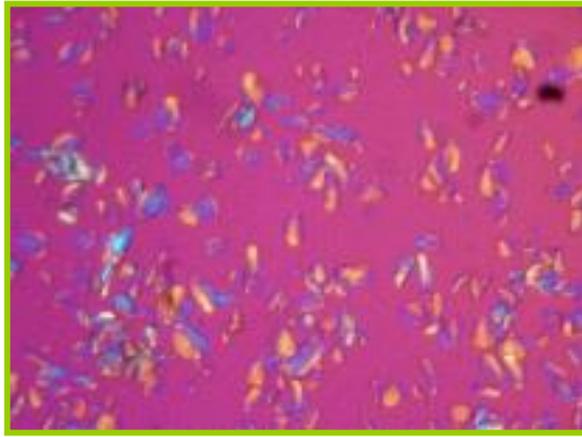
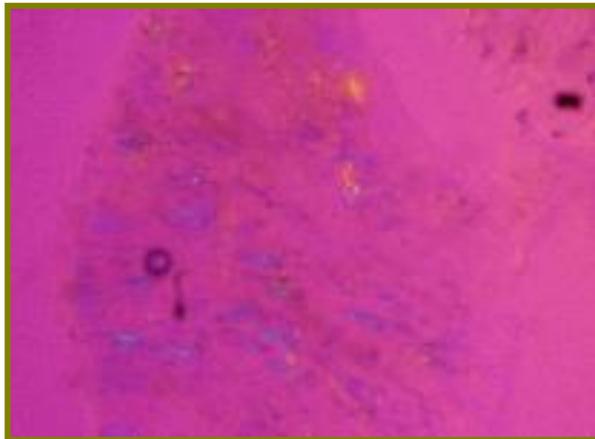


Figura 20. Microscopia de luz polarizada de gránulos de almidón de plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”). (A)= Almidón nativo; (B)= Almidón modificado por doble tambor; (C)= Almidón modificado fosfatado-acetilado.

(A)



(B)



(C)

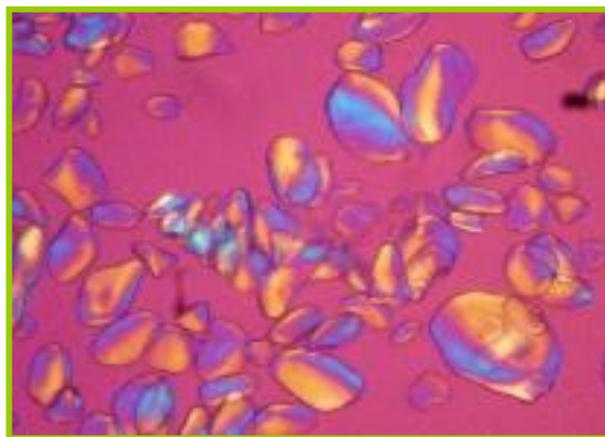
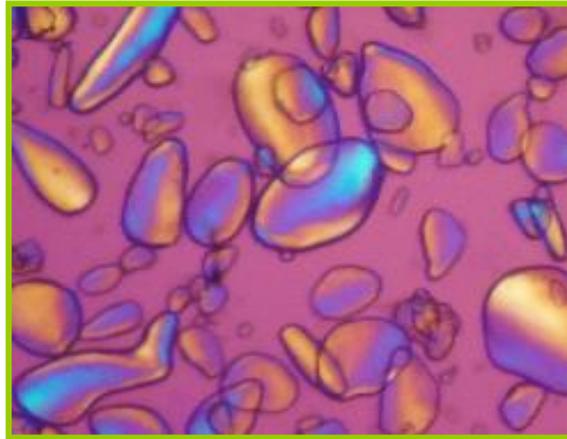
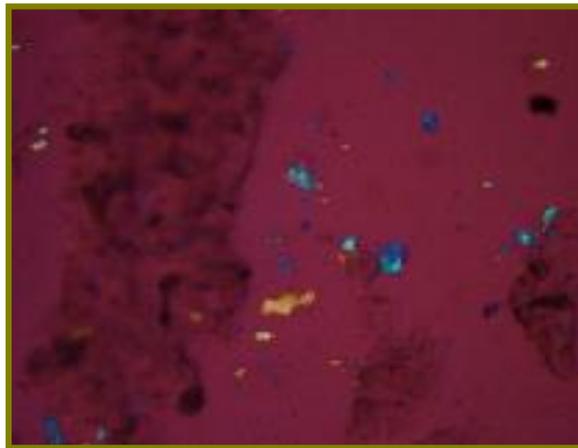


Figura 21. Microscopia de luz polarizada de gránulos de almidón de cambur (Musa AAA subgrupo Cavendish "pino gigante"). (A)= Almidón nativo; (B)= Almidón modificado por doble tambor; (C)= Almidón modificado fosfatado-acetilado.

(A)



(B)



(C)

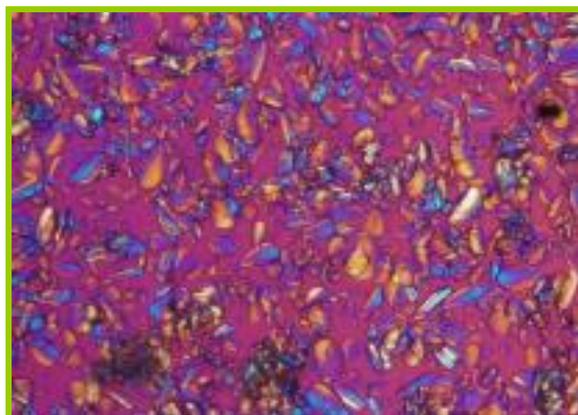
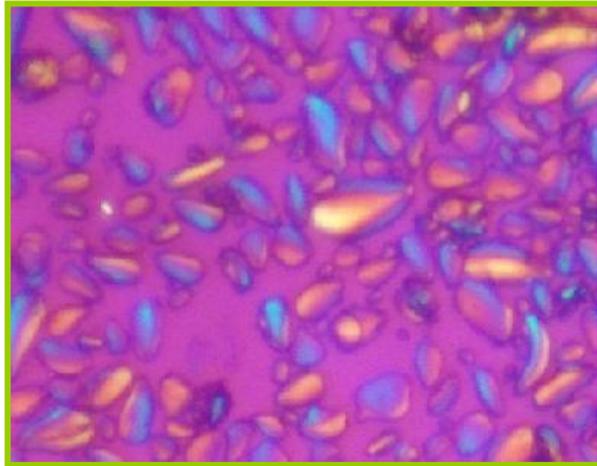
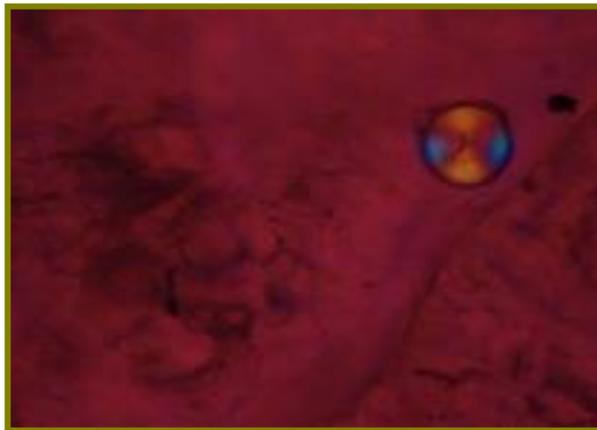


Figura 22. Microscopia de luz polarizada de gránulos de almidón de cambur (Musa AAAB "FHIA-01"). (A)= Almidón nativo; (B)= Almidón modificado por doble tambor; (C)= Almidón modificado fosfatado-acetilado.

(A)



(B)



(C)

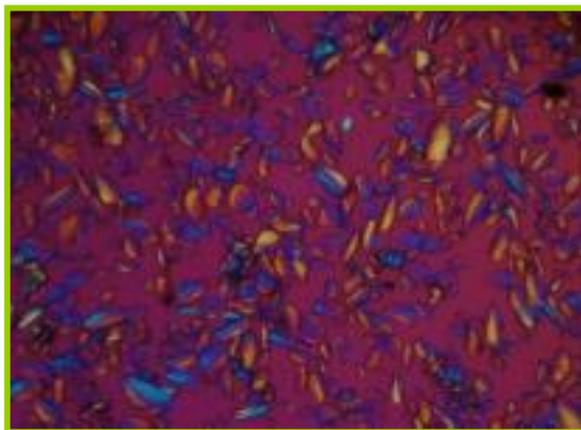


Figura 23. Microscopia de luz polarizada de gránulos de almidón de cambur (MUsa AAAB "FHIA-02"). (A)= Almidón nativo; (B)= Almidón modificado por doble tambor; (C)= Almidón modificado fosfatado-acetilado.

agregado sin áreas definidas, ocasionando la pérdida de la cruz de malta, lo que se traduce en un bajo o casi nulo orden molecular, sin embargo se evidenció la presencia de algunos almidones que aún mantenían la cruz de malta pero en una proporción muy baja menor al 1%, corroborando la eficiencia de la modificación, resultados similares fueron reportados por Yadav *et al.* (2006) en muestras sometidas al secado en tambor rotatorio, donde detallaron una parcial a completa destrucción de la estructura cristalina de los gránulos de almidón, del mismo modo Milan *et al.* (2005) en almidones de cambur.

En las Figuras 20C; 21C; 22 C; y 23C; se observa que no hubo variación de la forma granular, ni lixiviación de material intragranular por efecto de la modificación al cual fueron sometidas las muestras bajo estudio. La configuración tangencial de las estrías de crecimiento de los cristales explica la aparición del fenómeno de la cruz de malta (birrefringencia) que se observa en el gránulo de almidón de todas las muestras, notándose que ésta no desaparece durante la modificación, por lo que se presume que no hay alteración del nivel de cristalinidad de los gránulos. Asimismo, cuando el almidón es tratado con trimetafosfato de sodio (reacción por entrecruzamiento), éste tiende a formar aglomerados en forma de racimos, la formación de estos, sugiere que durante el entrecruzamiento se llevo a cabo una gelatinización parcial de los gránulos y la amilosa liberada forma una red que permite que gránulos de almidón se adhieran entre sí, similares resultados se reportan en literatura para almidón de arroz y yuca (Sivoli *et al.*, 2005; González y Pérez, 2002).

4.3.3 Tamaño de partícula

El tamaño de partícula de los almidones plátano y cambur fue diferente entre sí (Tabla 11), donde se puede notar, que los almidones plátano nativo, mostraron una distribución modal que está entre 13, 21 y 46,67 μm , mostrando un diámetro medio de aproximadamente 26,73 μm . La distribución del tamaño de partículas indicó que el 90% de los gránulos tenían diámetros menores a 46, 67 μm , mientras que el 10% de los gránulos tenían diámetros inferiores a 13,21 μm . El diámetro promedio de los almidones de cambur PG, F1 y F2 fue de 24,64; 26,31 y 23,22 μm respectivamente, ligeramente menor que los almidones nativos de plátano. Estas diferencias pueden observarse también en los resultados de microscopía de barrido, en la cual generalmente se ve que los gránulos de almidón plátano tienden a presentar valores mayores de longitud que los almidones de topocho verde.

Con respecto a los almidones pregelatinizados en la Tabla 11, se evidencia un tamaño de partícula promedio de 239,91; 363,58; 247,38 y 295,12 μm para HC, PG, F1 y F2 respectivamente, corroborando que la apariencia y la estructura del gránulo fue alterada a forma de hojuelas o escamas y de material agregado sin áreas definidas, tipo masa discontinua.

En relación con los almidones fosfatado-acetilado, la distribución de tamaño de partícula promedio para los almidones HCFA fue de 28,17 μm ; PGFA fue de 35,39 μm ; F1FA fue de 46,62 μm y F2FA fue de 46,92 μm , evidenciándose un ligero aumento en el tamaño de los gránulos con respecto a los gránulos de los almidones nativos (como se corrobora por las microfotografías tomadas por SEM) tal como se observa en la Tabla 11, Esto incremento en el tamaño del gránulo es debido a la inclusión de grupos

fosfato dentro de los gránulos del almidón, los cuales crean ciertas fuerzas de repulsión que pudieran aumentar los espacios inter e intra moleculares, permitiendo la inclusión de un mayor número de moléculas de agua. Asimismo, cuando el almidón es tratado con trimetafosfato de sodio (reacción por entrecruzamiento), éste tiende a formar aglomerados en forma de pequeños racimos. La formación de estos aglomerados sugiere que durante el entrecruzamiento se llevo a cabo una gelatinización parcial de los gránulos y la amilosa liberada forma una red que permite que gránulos de almidón se adhieran entre sí (Aparicio *et al.*, 2010).

Tabla 11. Tamaño de partículas de los almidones nativos y modificados de plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pineo gigante”) “PG”; (*Musa* AAAB “FHIA-01”) “F1” y (*Musa* AAAB “FHIA-02”) “F2”.

| Muestra | Tamaño de Partícula | | |
|-------------|---------------------|---------------|---------------|
| | d (0,1) µm | d (0,5) µm | d (0,9) µm |
| HCN | 13,213 | 26,731 | 46,671 |
| HCP | 40,735 | 239,919 | 576,111 |
| HCFA | 13,871 | 28,175 | 52,433 |
| PGN | 11,638 | 24,644 | 44,129 |
| PGP | 85,410 | 363,587 | 720,581 |
| PGFA | 14,342 | 35,395 | 272,240 |
| F1N | 10,132 | 26,314 | 56,877 |
| F1P | 48,252 | 247,385 | 546,817 |
| F1FA | 16,302 | 46,624 | 466,821 |
| F2N | 9,306 | 23,222 | 55,829 |
| F2P | 75,822 | 295,129 | 550,002 |
| F2FA | 16,799 | 46,924 | 377,197 |

4.4.- Composición física y química de los almidones de plátano (*Musa AAB* subgrupo Plátano “Hartón”) y cambur (*Musa AAA* sub grupo “pineo gigante”; *Musa AAAB* “FHIA-01” y *Musa AAAB* “FHIA-02”).

4.4.1.- Composición química

La composición química indica la pureza del almidón, y su consideración es importante al momento de evaluar las propiedades funcionales o reológicas, ya que estas pueden verse afectadas en función de la cantidad de impureza o componentes no amiláceos presentes, del mismo modo, estas propiedades son particulares dependiendo del origen y del tipo de modificación, las cuales pueden ser alteradas y por consiguiente influir en el comportamiento de estos almidones en sistemas alimenticios (Araujo *et al.*, 2004; Blanco *et al.*, 2004).

En Tabla 12, se muestran los resultados obtenidos para la composición química proximal evaluada en los almidones nativos, pregelatinizados y fosfatado-acetilado de plátano y cambur, expresados en base seca.

En cuanto al contenido de humedad, determinado para cada uno de los almidones evaluados, se puede apreciar que existen diferencias estadísticamente significativas con un nivel de significancia del 5% entre tratamientos, estos oscila entre 11,47 % a 7,41%; encontrándose el mayor contenido de humedad para los almidones nativos HCN (11,44 %), PGN (11,47 %), F1N (11,40 %) y F2N (11,41 %), mientras que en los almidones fosfatado-acetilado (HCFA= 8,42 %; PGFA= 8,42%; F1FA= 8,41 %; F2FA= 8,44 %) el contenido de humedad fue más bajo con respecto al nativo pero mayor que el pregelatinizado (HCP= 7,41 %; PGP= 7,90 %;

Tabla 12. Composición química de los almidones nativos y modificados de plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pino gigante”) “PG”; (*Musa* AAAB “FHIA-01”) “F1” y (*Musa* AAAB “FHIA-02”) “F2”.

| Muestra | Composición | | | | | | | | |
|-------------|----------------|---------------------|------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------------|
| | Humedad (%) | *Proteína Cruda (%) | *Grasa Cruda (%) | * Cenizas (%) | *CHO st (%) | * Almidón (%) | *Amilosa (%) | *Amilopectina (%) | *Azúcares Reductores (%) |
| HCN | 11,44 ± 0,45 a | 1,03 ± 0,04 a | 0,44 ± 0,03 a | 0,55 ± 0,02 b | 86,54 ± 0,54 d | 96,22 ± 0,45 b | 24,36 ± 0,04 e | 75,64 ± 0,03 a | 0,03 ± 0,02 e |
| HCP | 7,41 ± 0,29 c | 0,61 ± 0,12 b | 0,35 ± 0,09 a | 0,51 ± 0,03 b | 91,15 ± 0,21 a | 96,12 ± 0,29 b | 28,62 ± 0,12 a | 71,38 ± 0,09 e | 0,06 ± 0,03 c |
| HCFA | 8,42 ± 0,08 b | 0,92 ± 0,11 b | 0,25 ± 0,03 b | 1,85 ± 0,04 a | 88,56 ± 0,04 c | 92,95 ± 0,08 c | 26,61 ± 0,11 c | 73,39 ± 0,03 c | 0,04 ± 0,04 d |
| PGN | 11,47 ± 0,90 a | 1,13 ± 0,12 a | 0,41 ± 0,04 a | 0,55 ± 0,04 b | 86,44 ± 0,79 d | 97,59 ± 0,90 a | 25,76 ± 0,12 d | 74,24 ± 0,04 b | 0,04 ± 0,04 d |
| PGP | 7,90 ± 0,53 d | 0,58 ± 0,01 a | 0,40 ± 0,24 a | 0,51 ± 0,04 b | 90,61 ± 0,72 a | 96,99 ± 0,53 b | 28,98 ± 0,01 a | 71,02 ± 0,24 e | 0,10 ± 0,04 a |
| PGFA | 8,42 ± 0,04 b | 0,76 ± 0,09 bc | 0,20 ± 0,05 b | 1,53 ± 0,01 a | 88,94 ± 0,01 c | 91,12 ± 0,04 c | 27,87 ± 0,09 b | 72,13 ± 0,05 d | 0,06 ± 0,01 c |
| F1N | 11,40 ± 0,60 a | 1,04 ± 0,05 a | 0,44 ± 0,02 a | 0,71 ± 0,04 b | 86,41 ± 0,57 d | 98,07 ± 0,60 a | 25,21 ± 0,05 d | 74,79 ± 0,02 b | 0,06 ± 0,04 c |
| F1P | 7,35 ± 0,02 c | 0,42 ± 0,24 b | 0,41 ± 0,36 a | 0,54 ± 0,00 b | 91,28 ± 0,63 a | 96,05 ± 0,02 b | 28,81 ± 0,24 a | 71,19 ± 0,36 e | 0,09 ± 0,00 a |
| F1FA | 8,41 ± 0,27 b | 0,57 ± 0,36 d | 0,25 ± 0,41 b | 1,72 ± 0,17 a | 89,05 ± 0,38 b | 94,67 ± 0,27 c | 26,90 ± 0,36 c | 73,10 ± 0,41 c | 0,07 ± 0,17 b |
| F2N | 11,41 ± 0,07 a | 0,95 ± 0,12 b | 0,44 ± 0,15 a | 0,72 ± 0,02 b | 86,48 ± 0,38 d | 97,49 ± 0,07 a | 24,86 ± 0,12 e | 75,14 ± 0,15 a | 0,03 ± 0,02 e |
| F2P | 7,47 ± 0,35 c | 0,63 ± 0,12 bc | 0,41 ± 0,08 a | 0,70 ± 0,23 b | 90,79 ± 0,35 a | 97,27 ± 0,35 a | 28,70 ± 0,12 a | 71,30 ± 0,08 e | 0,06 ± 0,23 c |
| F2FA | 8,44 ± 0,09 b | 0,68 ± 0,35 cd | 0,25 ± 0,33 b | 1,63 ± 0,18 a | 89,00 ± 0,46 b | 96,05 ± 0,09 c | 26,60 ± 0,35 c | 73,40 ± 0,33 c | 0,04 ± 0,18 d |

N= Almidón nativo; P= Almidón pregelatinizado; FA= Almidón fosfatado-acetilado.

Nota: Los tratamiento con iguales letras, en una misma columna indican que entre ellos no existen diferencias estadísticamente significativas, para $p \leq 0,05$.

CHO(st)= Carbohidratos por diferencia.

* Base seca.

F1P= 7,35 %; F2P= 7,47 %), evidenciándose el efecto de las modificaciones, en este sentido, el efecto más drástico se observó en el almidón modificado por deshidratación con doble tambor debido a que éste se hizo pasar, en forma de suspensión, a través de 2 rodillos calentados con vapor a una temperatura de 152°C, mientras que los almidones modificados por fosfatación-acetilación a pesar de todos los pasos que ésta involucra como suspensión del almidón en agua y reactivos líquidos que se emplean al finalizar un eficiente proceso de secado.

Los contenidos de humedad obtenidos se asemejan a los valores reportados por Bello *et al.* (2002) para almidones de plátanos nativos (10,50%) y modificados con el uso de 40% de etanol a 25°C (10,70%). Estos valores se encuentran entre el rango aceptable para el almacenamiento de los almidones, tanto en condiciones ambientales como de refrigeración, ya que el porcentaje máximo de humedad permitido para el almacenamiento del almidón en varios países es del 13% (Moorthy, 2002; Thomas y Atwell, 1999; Pérez y Pacheco, 2005). Así mismo, se observa similitud del contenido de humedad con los valores reportados por Núñez *et al.* (2004); Bello *et al.* (2002); Pacheco y Alemán (2010), quienes reporta valores de 9,53 % a 10,62%, en todos los casos para almidones de musáceas, mientras que Milán *et al.* (2005), reportaron un contenido de humedad de 16,52 %, superior al encontrado en esta investigación. Del mismo modo para almidones modificados de raíces y tubérculos con doble tambor el contenido de humedad según García y Pacheco, (2009) y González y Pérez, (2003) señalan un contenido de humedad de 3,81% a 8,40 % y para almidones de musáceas modificados químicamente Aparicio *et al.* (2005); Bello *et al.* (2000) quienes reportaron valores de 1,48 y 7,99 % respectivamente. El contenido de humedad que pueda presentar los almidones de musáceas depende de las condiciones del proceso de

obtención, modificación, almacenamiento y manipulación en general del almidón. Según Wootton y Bamunuarachi, (1978) la capacidad de unir agua de los almidones nativos y modificados varía dependiendo de la disponibilidad de los sitios de enlace de este solvente en los diversos constituyentes de los gránulos de almidón, es decir, los grupos hidróxilo y los átomos de oxígeno inter-glucosa. La disponibilidad de estos sitios para interactuar con el agua depende del arreglo molecular, la distribución de las zonas amorfas y cristalinas y de la proporción de amilosa y amilopectina.

La determinación del contenido de humedad es uno de los métodos analíticos más importantes en alimentos, y frecuentemente sus valores se usan como índices de calidad y estabilidad. Se ha reportado (Joslyn, 1970) que cuando los valores de este parámetro son muy altos pueden existir problemas de deterioro causados por mohos u otros microorganismos.

A temperatura ambiente, el almidón establece un equilibrio con la humedad circundante y absorbe o cede humedad de manera reversible, pudiendo unirse como agua de cristalización, absorbida o intersticial (Whistler y Paschall, 1967). La cantidad de agua absorbida depende de la temperatura, la humedad relativa a la cual este es almacenado y la especie botánica de la cual fue extraída (Pérez 2000, Whistler y Paschall 1967). Bajo condiciones atmosféricas normales (65% Humedad Relativa) la mayoría de los almidones contiene entre 10-20% de humedad (Pérez 2000), mientras que a una humedad relativa del 20% el contenido de humedad varía entre 5 y 6% (Whistler y Paschall, 1967).

Para el caso del contenido proteínico presente en las muestras de almidón, el análisis de varianza detectó diferencias estadísticamente significativas con un nivel de significancia de 5 %. Los almidones nativos HCN (1,03%); PGN (1,13%); F1N (1,04 %) y F2N (0,95 %) presentaron los valores más altos de proteínas, mientras que los valores más bajos fueron reportados por los almidones HCP (0,61 %); PGP (0,58 %); F1P (0,42 %) y F2P (0,63 %) y las muestras HCFA (0,92 %); PGFA (0,76 %); F1FA (0,57 %) y F2FA (0,68 %) con valores intermedios de proteínas.

Estos valores reportados en los almidones nativos donde se evidencian diferencias entre F2N y el resto de las muestras nativas (HCN; PGN; F1N), son atribuibles al método de extracción, y a los lavados que este conlleva. Sin embargo, están dentro de los reportados para diversos gránulos de almidón de diferentes fuentes botánicas. Nimsung *et al.* (2007) por ejemplo, reporta valores mucho más bajos (0,20 y 0,21%) para muestras de almidones de clones AAA y ABB. Por el contrario, Bello *et al.* (2006); Brouns *et al.* (2002); Nuñez *et al.* (2004); Waliszewski *et al.* (2003) reportaron valores de contenido de proteína más altos en almidones de plátano, el cual oscila entre 0,22 % y 2,03%. Resultados que permiten confirmar lo planteado por Whistler y Paschall (1967), quienes mencionaron que el contenido de proteínas de los almidones nativos puede ser variable y que esto depende de la fuente botánica, de las condiciones agroclimáticas y del método de extracción utilizado, es importante recordar que, según Thomas y Atwell, (1999) las proteínas de los gránulos de almidón se dividen en dos tipos, sobre la base de su facilidad de ser extraídas del gránulo. Las proteínas superficiales se pueden extraer con soluciones salinas, mientras que las proteínas integrales requieren de una extracción más rigurosa, por ejemplo con el detergente sulfato dodecil de sodio o una solución alcalina, así mismo, se ha establecido que las

proteínas integrales están embebidas y posiblemente enlazadas covalentemente en la estructura amilosa-amilopectina del gránulo, mientras que las proteínas de la superficie están más libres en el exterior del mismo. Por lo tanto, Pérez (2001), concluye que, un alto contenido de proteína es atribuible a deficiencias en el proceso de extracción específicamente en el proceso de lavado y centrifugado. Cabe señalar que, optimizando el proceso de extracción, se podría disminuir este contenido proteico en los almidones de las musáceas estudiadas.

Al observar los valores del contenido proteínico en los almidones modificados tanto en los pregelatinizados como en los fosfatado-acetilados, se nota que estos valores disminuyeron al compararlos con sus respectivos controles (almidones nativos), lo cual se atribuye al mismo proceso de modificación, por lo que se puede inferir, que el efecto en el contenido de proteína cruda es debido a la aplicación de un tratamiento térmico drástico, ya que la disminución fue más notoria en el proceso de modificación con doble tambor donde se aplicó calor seco a altas temperaturas (152° C), lo que comprueba el efecto desnaturizante de la temperatura en los procesos de producción de las mismas. Nielsen, (2003) mencionó que las disminuciones proteínicas por efecto de las temperaturas obedecen también al desarrollo de la reacción de Maillard, en la cual algunos aminoácidos (lisina, arginina, histidina y triptófano) reaccionan con los azúcares reductores para formar melanoidinas (pardeamiento no enzimático), con lo que ocurre una reducción de la disponibilidad en el contenido de aminoácidos y por ende del contenido proteico.

En el caso específico de la modificación fosfatado-acetilado, el cual incluye reactivos, durante la fosfatación o entrecruzamiento, las condiciones de reacción son

alcalinas (pH 11,5 durante 3 horas) lo que ocasiona la extracción de las proteínas llamadas integrales y durante la acetilación se adiciona HCl, lo cual conlleva a la desnaturalización de las proteínas, aunado a esto, también influyen los lavados al final del proceso (Agama *et al.*, 2008; Adebowale *et al.*, 2002). Asimismo Lawal, (2004) asegura que la reducción en el contenido de proteínas en los almidones modificados se debe a la desintegración y pérdida de la estructura durante el proceso.

Resultados similares fueron encontrados por Bello *et al.* (2000), al acetilar almidones de plátano reportando valores de 1,02% con respecto al nativo, del mismo modo Zamudio *et al.* (2010), al estudiar el contenido de proteína en almidones nativos y doblemente modificados de plátano Macho (*Musa paradisiaca L.*) encontraron que éste oscilo entre 0,75 a 2,06% siendo este último valor para los almidones nativos. Por su parte Bello *et al.* (2002) y Pacheco y Alemán (2010); al caracterizar almidones granulares de musáceas obtuvieron como resultado valores menores que oscilaron entre 0,2 a 0,7% de proteínas con respecto al nativo y el efecto fue mayor cuando la concentración utilizada para preparar estos almidones se incremento.

Los lípidos forman otro componente importante que tiene un fuerte efecto sobre las propiedades funcionales de los almidones. Los lípidos en los gránulos de almidón pueden clasificarse en lípidos verdaderos y lípidos superficiales. Los primeros son los lípidos que se localizan en el interior de los gránulos de almidón nativos y básicamente son ácidos grasos libres y lisofosfolípidos (Morrison, 1981). Aunque se asume que los lípidos del almidón forman complejos con la amilosa en los gránulos nativos, existen evidencias que ambos coexisten independientemente y que únicamente se forman complejos durante la gelatinización (Eerlinger *et al.*, 1994), aunque trazas menores de

sustancias grasas pueden influenciar en la gelatinización del almidón, el efecto más drástico es sobre el “flavor” de los mismos. Los lípidos que están contenidos dentro del gránulo, aparentemente están atrapados en la hélice de la amilosa ocupando el sitio del yodo. Se piensa que ellos están altamente asociados a la molécula de amilosa y que éste forma un complejo con la amilosa que cristaliza en una organización genéricamente conocida como amilosa V (Bello *et al.*, 1998). Sin embargo, hay evidencia de que muchos de los fosfolípidos contenidos en el gránulo, no están asociados con la amilosa (Thomas y Atwell, 1999).

El contenido lipídico de las muestras de plátano y de cambur verde varió entre 0,44 % y 0,20 % respectivamente. Al realizar el análisis de varianza, éste reporto que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los almidones nativos y pregelatinizados, caso contrario, ocurre con los almidones fosfatado-acetilados. El mayor contenido lipídico se encuentra en los almidones nativos (HCN= 0,44 %; PGN= 0,41 %; F1N= 0,44 % y F2N= 0,44 %), mientras que el menor valor lo tuvieron los almidones fosfatado-acetilado (HCFA= 0,25 %; PGFA= 0,20 %; F1FA= 0,22 %; F2FA= 0,24%). A pesar de que no existen diferencia entre los almidones nativos y pregelatinizados, se evidencia que hay una disminución del contenido lipídico con respecto a éste último, lo cual es atribuible a una extracción incompleta del material lipídico presente, el cual, de por sí, está en una cantidad limitada (González y Pérez, 2003). Con respecto a los almidones fosfatado-acetilado, la disminución en el contenidos lipídico, podría explicarse en función del posible efecto que el tratamiento pueden tener sobre la polaridad o tal vez sobre los enlaces entre la grasa presente en este tipo de almidón, con sus componentes amiláceos u otro componente del mismo, por lo que la materia grasa sería menos extraíble por los solventes orgánicos utilizados en el

método de cuantificación (Pérez y Pacheco, 2005), también podría deberse a que durante la modificación el proceso se da bajo condiciones alcalinas (pH 11,5 durante 3 horas) lo cual ocasiona una saponificación alcalina de los lípidos, originando su solubilización, es decir, que facilita su eliminación (Aparicio *et al.*, 2005).

Es importante señalar que, los almidones contienen alrededor de 0,1% de glicéridos de ácidos grasos que pueden ser extraídos con solventes hidrofóbicos, tales como éter, hexano o tetracloruro de carbono, aunque la mayoría de estos almidones también presentan entre 0,5 y 0,65% de ácidos grasos libres que forman complejos de inclusión con la amilosa (clatratos), estos complejos tienden a reprimir el hinchamiento de los gránulos, la solubilización del material intragranular durante la gelatinización, la hidrólisis enzimática y la afinidad con el yodo, entre otros efectos (Whistler y Paschall, 1967, Eerlinger *et al.*, 1994).

La variabilidad en el contenido de grasa se observa al comparar con resultados como los de Nimsung *et al.* (2007); Bello *et al.* (2002); Lehmann *et al.* (2002) quienes reportan valores menores respecto a los encontrados en esta investigación, contradictorio al mismo tiempo al observar los resultados de Carmona *et al.* (2009); Núñez *et al.* (2004); Bello *et al.* (1999) quienes hallaron contenidos lipídicos en almidones de musáceas superiores a los planteados anteriormente.

Referente al contenido de cenizas el análisis de varianza detectó diferencias significativas a un nivel de significancia del 5%, entre los almidones fosfatado-acetilado con respecto a los almidones nativos y pregelatinizados de cada una de las muestras bajo estudio, cabe destacar que entre las muestras (HCN; PGN; F1N; F2N) no

existieron diferencias, por lo cual, se evidencia que el contenido de minerales de diferentes variedades de musáceas son similares, como se observa en el Tabla 12, luego se procedió a realizar la prueba de medias de Tukey, la cual indicó que las muestras de almidón fosfatado-acetilado presentaron el mayor contenido de cenizas (HCFA= 1,85 %; PGFA= 1,53 %; F1FA= 1,72 %; F2FA= 1,63 %), en comparación con los almidones nativos y pregelatinizados, cuyos valores oscilaron entre 0,71 % y 0,51 %, lo que corrobora lo expuesto por Whistler y Paschall, (1967) quienes señalan que los almidones contienen pequeñas cantidades o trazas de materiales inorgánicos. Del mismo modo Pérez, (2000) mencionó que la concentración aproximada de estos materiales se expresa como un porcentaje del contenido de cenizas, que normalmente contiene principalmente sodio, potasio, magnesio y calcio como elementos metálicos. No obstante, en los almidones, el contenido de cenizas en los almidones pueden variar ampliamente en función de la fuente botánica, del método de extracción y del tipo de modificación (Sitohy *et al.*, 2000).

Con respecto a todos los almidones fosfatado-acetilado el contenidos de cenizas aumentó respecto al nativo por el efecto del tratamiento de fosfatación. Esto es obvio y es debido a la adición del reactivo trimetafosfato de sodio, con el objeto de lograr la formación de grupos mono y bifuncionales. Aseguran Chen y Jane (1994a) indican que el contenido de cenizas aumenta, cuando los almidones se encuentran bajo condiciones alcalinas y como consecuencia, existen trazas de sal que ocasiona el aumento de esta fracción en los mismos.

Similares resultados fueron obtenidos por Waliszewski *et al.* (2003), los cuales obtuvieron almidón nativo utilizando var. *Valery* en su primera etapa de maduración, el

cual reportó un contenido de ceniza (0,47%), valores que concuerdan con los reportados por Bello *et al.* (2006); Bround *et al.* (2002) a pesar que obtuvieron almidón nativo de *Musa paradisiaca* L., los cuales coincide con los del presente estudio, caso contrario fue el obtenido por Pérez, (1996), cuyo contenido reportado fue de 0,02%. Asimismo Zamudio *et al.* (2010); Aparicio *et al.* (2010) obtuvieron valores de cenizas para almidones modificados químicamente (entrecruzamiento) de 1,11 % y 3,65% respectivamente, los cuales superaron el contenido de los almidones nativos, tal como se observó en está investigación

El almidón es el componente principal de plátanos y bananos verdes, el cual experimenta cambios importantes durante la maduración (Zhang *et al.*, 2005). El contenido de almidón promedio en el estado inmaduro del banano puede ser de 70 a 80% (período pre-climatérico) disminuyendo a menos de 1% al final del período climatérico, mientras que los azúcares, principalmente sacarosa, se acumulan al menos en 10% del peso fresco de la fruta.

Lii *et al.* (1982) investigaron sobre los cambios durante la maduración de bananos con relación al estado físico y las propiedades químicas del almidón extraído y su contenido de azúcares reductores y sacarosa, estos autores, reportaron valores de contenido de almidón que van desde 61,7% para los frutos inmaduros llegando hasta 2,6% para frutos maduros (amarillos y con manchas). Durante la maduración el almidón se va degradando, el contenido de la sacarosa aumenta y precede la acumulación de la glucosa y de la fructosa (García y Lajolo, 1988).

El contenido de almidón en las muestras de almidón nativo, pregelatinizados y fosfatado-acetilado fue elevado, evidenciándose la pureza de estos almidones. El análisis estadístico indicó que existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores de almidón, de las muestras estudiadas, encontrándose en los almidones nativos los mayores valores de almidón, de esta manera el almidón del HCN presentó un contenido de 96,22 %, el de PGN con un contenido de 97,59 %, el de F1N con un contenido de 98,07 % y finalmente el F2N con un contenido de 97,49%; aunque las diferencias estadísticas, pueden ser atribuible al grado de maduración de las muestras. Los valores más bajos de almidón fueron observados en los almidones fosfatado-acetilado (HCFA= 92,95 %; PGFA= 91,12 %; F1FA= 94,67 %; F2FA= 96,05 %), cabe destacar que los almidones pregelatinizados reportaron valores intermedios en cuanto al contenido de almidón. Esta disminución está relacionada con la introducción de los grupos fosfatos y acetilos, de manera que la modificación cambia la estructura del almidón dando como resultado la despolimerización parcial del mismo. Resultados similares fueron encontrados por Núñez *et al.*, (2004); Pacheco y Alemán (2010); Aparicio *et al.*, (2005); Bello *et al.*, (1999) y Zamudio *et al.*, (2010) en almidones nativos y modificados de musáceas reportando en promedio valores de almidón entre 98,20 % y 90,90 % respectivamente.

En cuanto al contenido de amilosa, su determinación es realmente importante, ya que permite predecir el comportamiento reológico de las suspensiones de almidón, determinar las condiciones de procesamiento más idóneas de acuerdo al tipo de almidón empleado y evaluar la calidad de diferentes productos alimenticios (Aspinal, 1983; Cairns *et al.*, 1997; Chun *et al.*, 1997; Pérez *et al.*, 2005). La fracción de amilosa,

imparte características definitivas al almidón, y por lo tanto, su concentración es considerada un criterio de calidad importante (Beyer, 1987; Carr, 1993; Peshin, 2001).

Con relación al contenido de amilosa, se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes almidones estudiados, tal como se muestra en el Tabla 12. Las muestras HCP; PGP; F1P y F2P presentaron el mayor contenido de amilosa 28,62 %; 28,98 %; 28,81 % y 28,70 %, respectivamente, los almidones fosfatado-acetilado reportaron un valor intermedio (HCFA= 26,61%; PGFA= 27,87 %; F1FA= 26,90 % y F2FA= 26,60 %) y los almidones nativos HCN= 24,36 %; PGN= 25,76 %; F1N= 25,21 % y F2N= 24,86 % con el menor valor de amilosa, entre éstas últimas existe diferencias significativas, sin embargo, cabe destacar que los resultados de esta investigación concuerdan con el contenido de amilosa esperado para este tipo de muestras.

El contenido de amilosa obtenido en los almidones modificados con doble tambor y fosfatado-acetilado aumentó con respecto al nativo en todos los casos. Lo que permite inferir que el efecto de los tratamientos se reflejó en la producción de reacciones de hidrólisis y del fenómeno conocido como despolimerización, que consiste en la ruptura de las cadenas de amilosa, así como de los puntos de ramificación de la estructura de la amilopectina, lo que produjo un aumento en el contenido de amilosa (Jayakody y Hoover, 2002). Sin embargo, la hidrólisis no degrada completamente la estructura cristalina de los gránulos de almidón (Franco *et al.*, 2002), lo cual podría producir un almidón resistente a la hidrólisis por las enzimas digestivas (Aparicio *et al.*, 2005).

Resultados similares fue reportado por Pérez y Pacheco, (2005) quienes observaron un aumento en el contenido de amilosa al modificar almidones de

tubérculos de batatas, ocumo chino y ocumo criollo por diferentes métodos (pirodextrinizado, fosfatado, microondas y doble tambor). Del mismo modo Bello *et al.*, (2002) encontraron valores de amilosa mayores en almidones acetilados en comparación con el nativo por efecto de la modificación. Lo que corrobora lo postulado por Adebowale y Lawal (2003) quienes aseguran que un aumento en la fracción de amilosa de los gránulos de almidón, también puede atribuirse al efecto de los tratamientos químicos a los que se somete al almidón nativo.

El conocimiento del contenido de amilosa en las muestras evaluadas es de gran importancia, a la hora de utilizar estos almidones en la elaboración de - productos, tomando en cuenta que la tendencia a retrogradar será menor, que en otros tipos de almidones que presentan un mayor contenido de amilosa. Chen y Jane (1994a,b) demostraron que la retrogradación del almidón en almidones modificados de maíz, es retardada por el efecto de las modificaciones sobre la polaridad de los mismos. Por lo cual el comportamiento de la pasta de almidón en sistemas acuosos, puede depender de ello, así como de otras características físicas y químicas de los gránulos de almidón, tales como, promedio del tamaño de gránulo, distribución del tamaño del gránulo y contenido mineral. El contenido de amilosa de los gránulos de almidón varía con la fuente botánica y es afectado por las condiciones climáticas y tipo de suelo durante el crecimiento. Asimismo, la actividad de las enzimas involucradas en la biosíntesis del almidón puede ser responsable de la variación en el contenido de amilosa entre diferentes almidones, así como los distintos procedimientos de aislamiento y los métodos analíticos usados para determinar el contenido de amilosa (Singh y Singh, 2003; Liu *et al.*, 2007; Jayakody y Hoover, 2002; Jane *et al.*, 1994).

Es importante señalar que la técnica de cuantificación empleada determina la fracción de amilosa capaz de acomplejarse con el yodo. Sin embargo, la literatura ha precisado una controversia relacionada con la determinación de la amilosa (Martínez y Prodolliet, 1996); el método más frecuentemente utilizado es el colorimétrico (yodo que enlaza la amilosa formando un complejo azul); este procedimiento, no es constantemente exacto, porque el complejo formado entre el yodo y la cadena larga de amilopectina, absorbe la luz en una longitud de onda similar a la del yodo acomplejado con la amilosa (Zhu *et al.*, 2008). Por otra parte la existencia de polímeros intermediarios, cadenas con longitud variable en la amilosa y amilosa ramificada, afectan el método de enlace con yodo (colorimétrico). Por otro lado, estos procedimientos requieren una curva estándar de la calibración usando amilosa pura, una curva estándar con amilosa del mismo origen botánico, tiene que ser generada para cada fuente (McGrance *et al.*, 1998); por lo tanto, la selección y la disponibilidad de una curva estándar es generalmente difícil. Del mismo modo Whistler y Daniels (1990) reportaron que las modificaciones producen segmentos más lineales que facilitan la absorción de mayor cantidad de yodo. Todo esto, pudiera estar afectando la determinación del contenido de amilosa para los almidones modificados en todas las muestras del presente estudio, lo que genera su aumento.

Al evaluar el contenido de azúcares reductores en los almidones bajo estudio, valores reportados en la Tabla 12, el análisis de varianza detectó diferencias significativas entre las muestras estudiadas. Las muestras de almidones pregelatinizados presentaron el mayor contenido de azúcares reductores (HCP= 0,06%; PGP= 0,10 %; F1P= 0,09 %; F2P= 0,06%) y los almidones fosfatado-acetilado (HCFA= 0,04 %; PGFA= 0,06 %; F1FA= 0,07 % y F2FA= 0,04 %) presentaron valores menores a los

almidones pregelatinizados pero a su vez mayores que los almidones nativos (HCN= 0,03 %; PGN= 0,04; F1N=0,06 %; F2N= 0,03 %) entre éstas muestras existe diferencias significativas, lo cual indica, que al momento de la extracción posiblemente el grado de maduración varió. Se evidenció el efecto de los tratamientos que ocasionan la despolimerización del almidón, es decir, la ruptura de los enlaces glucosídicos de la amilopectina, con la consecuente formación de azúcares del tipo mono, di y oligosacáridos reductores que son más solubles en agua. Resultado que es comparable con lo reportado por Pérez y Pacheco, (2005) al evaluar el contenido de estos en almidones nativos y modificados de tubérculos. Asimismo, Torres, (2007) encontraron, al modificar almidones de plátano entrecruzado por extrusión, un aumento de azúcares reductores con respecto al nativo, debido a la hidrólisis y despolimerización del almidón, que provoca la liberación de azúcares reductores.

4.4.2.- Caracterización físico-química

La determinación de la acidez y pH constituyen un índice de calidad importante, son indicadores del uso de aditivos, fermentación o aplicación de algún tipo de modificación. Los ácidos orgánicos presentes en los alimentos influyen en el sabor, color y en la estabilidad de los mismos. Asimismo, la acidez es uno de los índices comunes de la materia prima vegetal, y la misma se debe a la presencia de diversos ácidos orgánicos, en proporciones variables, principalmente: cítrico, málico, tartárico, oxálico, fórmico, succínico, galacturónico, entre otros. Por lo tanto, la determinación de la acidez constituye un índice de calidad importante, que además, permite determinar si

un producto ha sufrido o no algún deterioro, ya sea de tipo físico, químico o microbiológico (Belitz y Grosch, 1985; Tovar y Melito, 1996; Bou *et al.*, 2006).

Del mismo modo la determinación de la densidad relativa en almidones es importante, pues es un índice de identidad de los mismos, además se puede estimar y/o inferir el comportamiento que estos presentarían durante un proceso de empaquetado y de almacenamiento, ya que el volumen ocupado por estos estará siempre en función a cada una de las densidades. Al trabajar con valores de densidad tope, se precisa la cantidad de material que realmente puede almacenarse en cualquier recinto.

En la Tabla 13, se muestran los valores de densidad relativa expresada en g/ml^{-1} a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Al realizar el análisis de varianza se detectaron diferencias significativas a un nivel de significación del 5% entre los tratamientos. El mayor valor de densidad fue experimentado por los almidones fosfatado-acetilado (HCFA= 0,86; PGFA= 0,82; F1FA= 0,84; F2FA= 0,83) lo cual podría deberse al efecto de la modificación, que genera un aumento del tamaño del gránulo, ocasionado por la sustitución de los grupos fosfatos, que incrementan el tamaño de los espacios inter e intra moleculares; a su vez durante la acetilación los gránulos tienden a formar agregados en forma de racimos (Sivoli *et al.*, 2005). Mientras que los almidones pregelatinizados con doble tambor presentaron una densidad relativa menor (HCP= 0,46; PGP= 0,47; F1P= 0,48; F2P=0,47), hecho atribuible a que durante la modificación se produce una desintegración total de la estructura granular y aparecen muchos espacios con aire ocluido, por lo que se obtiene un mayor volumen por unidad de peso, disminuyendo la densidad (Acosta *et al.*, 2006; Pérez y Pacheco, 2005).

Tabla 13. Valores de densidad relativa, pH y acidez titulable obtenidos para los almidones nativos y modificados de plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pineo gigante”) “PG”; (*Musa* AAAB “FHIA-01”) “F1” y (*Musa* AAAB “FHIA-02”) “F2”.

| Muestra | Componentes | | |
|-------------|---|---------------|--|
| | Densidad Relativa (g. ml ⁻¹) | pH | Acidez Titulable (meq NaOH/100 g muestra) |
| HCN | 0,66 ± 0,45 b | 6,25 ± 0,04 a | 0,041 ± 0,03 c |
| HCP | 0,46 ± 0,29 c | 6,25 ± 0,12 a | 0,082 ± 0,09 b |
| HCFA | 0,86 ± 0,08 a | 5,20 ± 0,11 b | 0,105 ± 0,03 a |
| PGN | 0,63 ± 0,90 b | 6,30 ± 0,12 a | 0,045 ± 0,04 c |
| PGP | 0,47 ± 0,53 c | 6,30 ± 0,01 a | 0,080 ± 0,24 b |
| PGFA | 0,82 ± 0,04 a | 5,10 ± 0,09 b | 0,099 ± 0,05 a |
| F1N | 0,65 ± 0,60 b | 6,25 ± 0,05 a | 0,043 ± 0,02 c |
| F1P | 0,48 ± 0,02 c | 6,20 ± 0,24 a | 0,075 ± 0,36 b |
| F1FA | 0,84 ± 0,27 a | 4,90 ± 0,36 c | 0,115 ± 0,41 a |
| F2N | 0,62 ± 0,07 b | 6,35 ± 0,12 a | 0,045 ± 0,15 c |
| F2P | 0,47 ± 0,35 c | 6,30 ± 0,12 a | 0,084 ± 0,08 b |
| F2FA | 0,83 ± 0,09 a | 4,80 ± 0,35 c | 0,102 ± 0,33 a |

N= Almidón nativo; P= Almidón pregelatinizado; FA= Almidón fosfatado-acetilado.

Nota: Los tratamientos con letras iguales, en una misma columna, indican que no hay diferencias estadísticas entre los tratamientos, para $p \leq 0,05$.

Resultados comparables al comportamiento mostrado por los almidones estudiados por Pérez y Pacheco (2005) donde la densidad de los almidones de batatas nativos fue de 1,53 (g/cm³) mayor a los almidones deshidratados por doble tambor los cuales obtuvieron 0,80 (g/m³) de densidad, igualmente se comportaron las muestras de almidón nativo y pregelatinizado de ocumo criollo y ocumo chino en el mismo estudio, del mismo modo se puede comparar con los resultados obtenidos por Ordoñez, (2012) quien evaluó almidones nativos y modificados de cambur FHIA-01 y FHIA-02 cuyo valor vario 0,72 y 0,62 .

Con respecto a los valores de pH (Tabla 13), se puede apreciar que los almidones nativos y pregelatinizados muestran valores similares entre sí, reportando que no existe diferencias entre muestras, los cuales oscilan entre 6,20 y 6,35, siendo estadísticamente diferentes a los almidones fosfatado-acetilado los cuales experimentaron valores de pH más bajos (HCFA= 5,20; PGFA= 5,10; F1FA= 4,90; F2FA= 4,80), estas diferencias son atribuibles al tipo de modificación, en donde estuvieron involucrados compuestos químicos de naturaleza ácida como el ácido clorhídrico, que provocan la disminución en los valores de pH, al suministrar iones H⁺ a la suspensión de almidón. Resultados similares fueron reportados por Pérez y Pacheco, (2005) y Acevedo, (2011).

Asimismo, en lo que respecta al contenido de acidez titulable (expresado en meq NaOH/100 g muestra) presente en los almidones bajo estudio, al realizarle el análisis de varianza éste reportó que existen diferencias estadísticamente significativas en todos los tratamientos, siendo los almidones modificados por fosfatación-acetilación los que presentan mayor valor de acidez (HCFA=0,105; PGFA= 0,099; F1FA= 0,115; F2FA=0,102), seguido por los almidones pregelatinizados con doble tambor (HCP=

0,082; PGP=0,080; F1FA= 0,075; F2FA= 0,084) y finalmente los almidones nativos muestran valores para HCN= 0,041; PGN= 0,045; F1N= 0,043 y F2N= 0,045. Estas diferencias se explican, porque en el proceso de fosfatación-acetilación se usó HCl para ajustar pH=4,5 y finalizar la reacción de acetilación y en menor grado en la deshidratación con doble tambor se producen reacciones de despolimerización y de hidrólisis, que conllevan a la formación de grupos carboxilos en la molécula de los componentes amiláceos. Estos Resultados son similares a los reportados por Pacheco y Alemán (2010) y Ordoñez, (2012) para almidones nativos y modificados de musáceas, específicamente plátano y cambur (*Musa* AAAB “FHIA-01”) y (*Musa* AAAB “FHIA-02”).

No obstante, es importante señalar que los valores de pH y acidez titulable obtenidos se encuentran dentro del rango aceptado para almidones comerciales, ya que los valores de pH deben ser superiores a 5,0 y los de acidez inferiores a 0,11% (COVENIN, 1985; Salazar y Marcano, 2005).

4.4.2.1.- Color

El atributo color, evento psicofísico de gran relevancia en la calidad de los productos alimenticios, están relacionados con las cualidades sensoriales (que determina la aceptabilidad de los mismos por el consumidor) y la composición química y, por lo tanto, es uno de los factores que define la calidad del producto final (Giese, 1995).

Los resultados obtenidos para el atributo color se muestran en la Tabla 14, medidos a través de los parámetros L*, a* y b*, para los almidones nativos y modificados de plátano y cambur verde.

Con respecto al índice de luminosidad L*, se observa que existen diferencias significativas para todos los almidones estudiados, el valor más alto fue para los almidones fosfatado-acetilado (HCFA= 93,68; PGFA= 93,15; F1FA= 92,88 y F2FA= 90,82) seguido de los almidones nativos (HCN= 89,93; PGN= 83,57; F1N= 81,80 y F2N= 80,94) y finalmente los almidones pregelatinizados (HCP= 67,45; PGP= 65,78; F1P= 69,80 y F2P= 61,76).

En cuanto a los valores de L* experimentado por los almidones pregelatinizados en todas las muestras, se evidencia el efecto del tratamiento térmico el cual por causa de la alta temperatura conlleva a reacciones de oscurecimiento no enzimático, tales como caramelización y reacciones de Maillard, además de la degradación de los pigmentos, sin embargo los almidones fosfatado-acetilado presentaron un valor de L* superior, lo cual indica que tiene una tendencia hacia el color blanco, hecho atribuible a que esta modificación implica un mayor grado de purificación, donde los reactivos usados como HCl provocan la eliminación de una mayor cantidad de componentes químicos que normalmente no deberían estar presentes en los almidones o que se encuentra en pequeñas cantidades, tales como, proteínas, fibra dietética y polifenoles (Gebre *et al.*, 1998; Fu *et al.*, 2004).

La baja luminosidad de los almidones nativos provenientes de musáceas, puede obedecer a la presencia de polifenoles y enzimas polifenoloxidasas que presentan

Tabla 14. Índice de luminosidad (L), coordenadas de cromaticidad (a y b), e índice de blancura (WI), obtenidos para los almidones nativos y modificados de plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pineo gigante”) “PG”; (*Musa* AAAB “FHIA-01”) “F1” y (*Musa* AAAB “FHIA-02”) “F2”.

| Muestra | COLOR | | | | |
|-------------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|
| | L* | a* | b* | ΔE | WI |
| HCN | 89,93±1,45 b | 1,44± 0,50 d | 3,12± 0,09 d | 4,47 ± 0,10 h | 89,41± 0,25 b |
| HCP | 67,45±0,97 c | 4,44±0,75 a | 3,16± 0,77 d | 27,08± 0,21 c | 66,79± 0,01 d |
| HCFA | 93,68± 0,03 a | 0,71± 0,01 e | 7,11± 0,00 b | 4,89± 0,05 h | 91,65± 0,09 a |
| PGN | 83,57± 0,43 b | 1,33± 0,05 d | 9,45± 0,02 a | 12,92± 0,02 f | 81,62± 0,10 b |
| PGP | 65,78± 0,04 c | 2,45± 0,09 c | 2,24± 0,60 e | 28,57± 0,05 b | 65,26± 0,52 d |
| PGFA | 93,15± 1,24 a | 0,98± 0,05 e | 2,18± 0,22 e | 1,20± 0,01 j | 92,66± 0,12 a |
| F1N | 81,80 ± 0,70 b | -1,94 ± 0,47 f | 6,80 ± 1,52 c | 13,68± 0,09 g | 80,51± 0,58 b |
| F1P | 69,80± 0,64 c | 3,94±0,58 b | 3,10± 0,49 d | 24,68± 0,10 d | 69,17± 0,32 d |
| F1FA | 92,88± 0,95 a | 1,02± 0,08 d | 2,95± 0,13 e | 1,60± 0,65 j | 92,37± 0,65 a |
| F2N | 80,94 ± 1,45 b | -1,35 ± 0,25 f | 7,98 ± 1,18 b | 14,77± 0,23 e | 79,47± 0,20 c |
| F2P | 61,76±1,32 c | 4,89±0,06 a | 2,89± 0,30 e | 32,77± 0,45 a | 61,09± 0,74 |
| F2FA | 90,82± 2,11 a | 1,34± 0,08 d | 2,99± 0,60 e | 3,57± 0,85 i | 90,31± 0,12 a |

Calibrado con la placa estándar: L = 94,32; a = 1,22; b = 2,29
 N= Almidón nativo; P= Almidón pregelatinizado; FA= Almidón fosfatado-acetilado.

L*: Índice de Luminosidad (100 = blanco y 0 = negro).

a*: Rojo (+) a verde (-).

b*: Amarillo (+) a azul (-).

ΔE: Indica el cambio total del color, es decir, la variación total del color entre las muestras

WI: Índice de blancura.

Nota: Los tratamiento con iguales letras en una misma columna indican que entre ellos no existen diferencias estadísticamente significativas, para $p \leq 0,05$.

generalmente los frutos, de ahí lo imperativo de emplear durante la extracción agentes antioxidantes en las aguas lavado y de sumergido de los frutos antes del cortado o troceado para la extracción final.

Cabe destacar que los valores obtenidos en promedio fueron más altos al compararlos con los reportados por Waliszewski *et al.* (2003) quienes reportaron un valor de L^* igual a 73,60, debido a una mayor oscuridad y color amarillento. Bello *et al.* (1999) reportaron diferencias en la luminosidad de los almidones de dos variedades de banano. Pacheco y Alemán (2010) quienes reportaron valores de L^* para el almidón de topocho de 73,78.

En lo que respecta a los valores de a^* , se observa que existen diferencias significativas entre las muestras, ya que los almidones de cambur FHIA-01 y FHIA-02 presentaron una tendencia al color verde (-), mientras que el resto de las muestras experimentaron una tendencia hacia el color rojo (+). Mientras que el parámetro b^* en todas las muestras presenta una tendencia al color amarillo, pues reportaron valores positivos. Esto significa que los almidones pregelatinizados se oscurecieron por efecto del tratamiento como se observa en los valores de ΔE obtenidos.

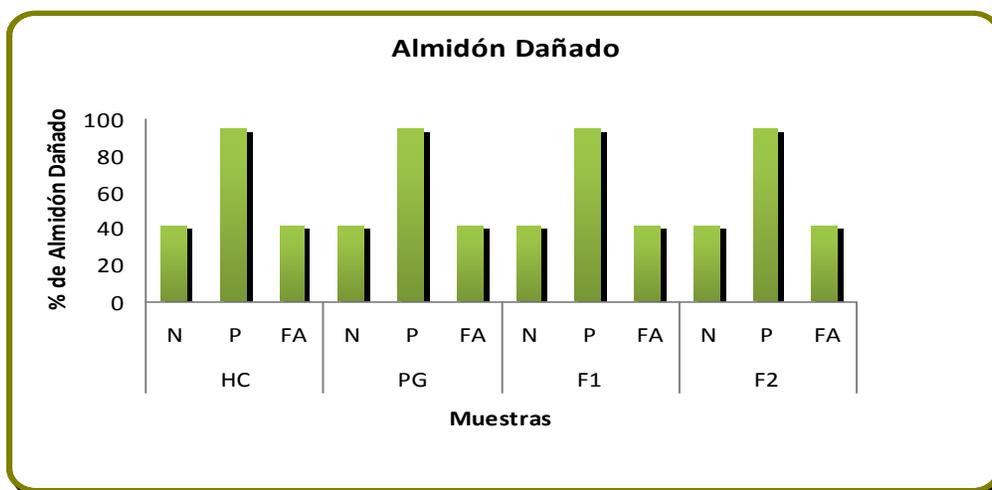
Al calcular el valor de ΔE , se determinó la magnitud de la diferencia de color existente entre la muestra de almidones y la placa estándar, se observa que la menor diferencia se obtuvo para los almidones fosfatado-acetilado, los cuales presentaron un ΔE para HCFA= 4,89; PGFA= 1,20; F1FA= 1,60 y F2FA= 3,57, ya que estos fueron sometidos a un proceso de modificación química que aparentemente implicó un mayor grado de purificación.

Asimismo, el índice de blancura (WI) fue superior en los almidones fosfatado-acetilado, al igual que el índice de luminosidad, por lo tanto, los almidones fosfatado-acetilado para todos los clones son los que experimentan una mayor tendencia hacia el color blanco, y por consiguiente un mayor grado de pureza.

Resultados similares fueron reportados por Zamudio *et al.* (2010), en almidones de plátano doblemente modificados, obteniendo que el parámetro (L*) fue directamente proporcional al grado de oxidación (concentración de cloro activo) usado para modificar los almidones, apreciándose de esta manera valores de 81,1 para el almidón nativo hasta 96,7 para almidón oxidado con 1,5% de cloro activo, el cual es cercano a 100 (valor máximo) que indica un material blanco. Ordoñez, (2012) en almidones de cambur verde modificados químicamente por tratamiento alcohólico-alcalino, observó que el valor de L*, índice de blancura (WI) fue mayor para los almidones modificados al compararlos con los nativos.

4.4.4.2.- Almidón dañado

La Figura 24, muestra el porcentaje de almidón dañado, tanto en las muestras de almidón nativo, como en los tratamientos de modificación aplicada para todas las muestras bajo estudio. El almidón dañado es un índice de la calidad del almidón y del efecto del proceso de extracción y en este caso de la modificación.



N= Almidón nativo; P= Almidón pregelatinizado; FA= Almidón fosfatado-acetilado.

Figura 24. Porcentaje de almidón dañado en muestras de almidones nativos y modificados de plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pineo gigante”) “PG”; (*Musa* AAAB “FHIA-01”) “F1” y (*Musa* AAAB “FHIA-02”) “F2”. cultivados del banco de germoplasma del INIA-Maracay.

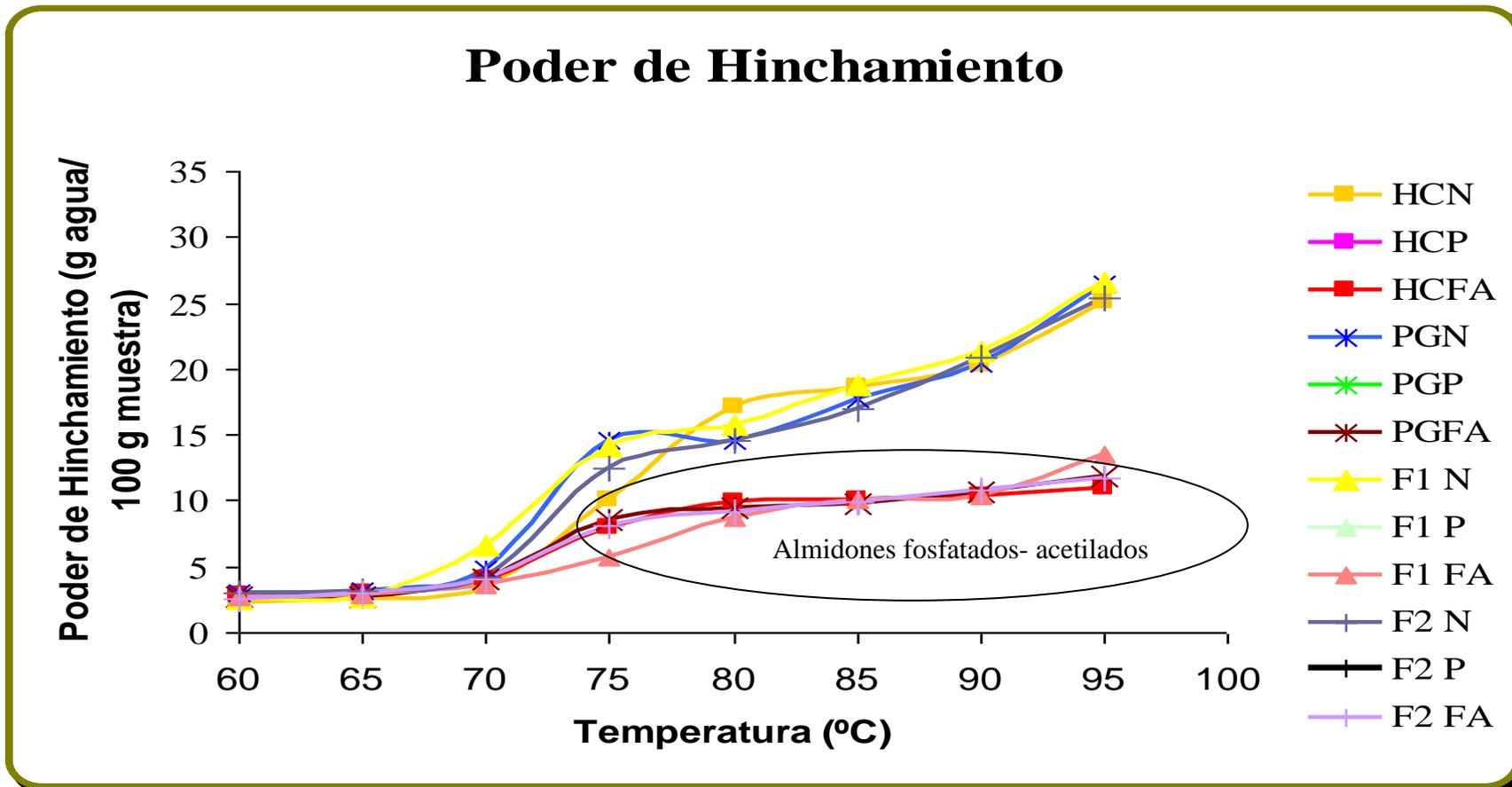
En el presente estudio el contenido de almidón dañado en las cuatro variedades de musáceas (HC; PG; F1 y F2) de almidón nativo es alrededor de 2,15 %, esto concuerda con lo reportado por Martínez *et al.* (2007), el cual cita un contenido de almidón dañado en muestras de almidón nativo de yuca de 2,33%, empleando el mismo método. En los almidones modificados fosfatado-acetilado para todas las muestras, el contenido de almidón dañado es de 2,46 %, notándose que a pesar del tratamiento químico, al cual fueron sometidas las muestras, el almidón no sufrió alteraciones significativas a nivel estructural, lo que es indicativo de la efectividad tanto de la técnica de extracción como del proceso de modificación química de los mismos. Caso contrario lo experimentaron los almidones pregelatinizados con doble tambor, los cuales presentan valores de almidón dañado bastante altos de 98,70 % como era de esperarse por la alta temperatura aplicada

(152 °C) durante la modificación, esto es corroborado por la MEB y MLP donde se evidencia la destrucción total de los gránulos de almidón.

4.5.- Propiedades Reológicas

4.5.1.- Índice de absorción de agua, solubilidad y poder de hinchamiento

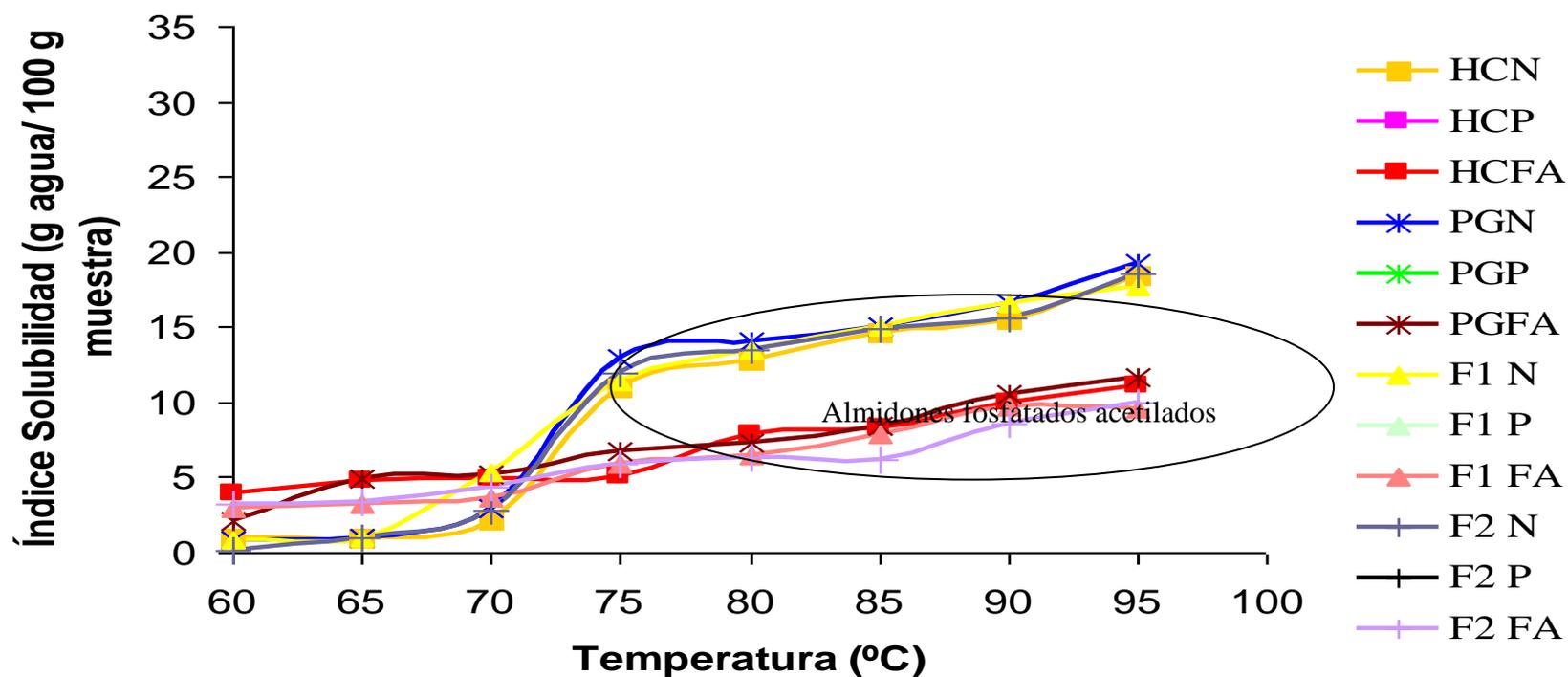
Los resultados de índice de absorción de agua, solubilidad y poder de hinchamiento obtenidos para cada una de los almidones nativos (HC; PG; F1; F2) y modificados (pregelatinizado y fosfatado-acetilado) se presentan en las figuras 25, 26 y 27. Donde se evidencia que, al aumentar gradualmente la temperatura, se produce también el incremento en el índice de absorción de agua, en la solubilidad y en el poder de hinchamiento, para cada una de las muestras analizadas, esto debido a que se produce una interacción entre las cadenas de almidón constituidas por amilosa y amilopectina, que permite la interacción del agua con los gránulos de almidón; de igual forma están influenciados por las características de la amilosa y amilopectina en cuanto a la distribución del peso molecular, grado de ramificación, longitud de las cadenas y conformación de las moléculas, así como por la formación de complejos amilosa-lípidos que restringen el poder de hinchamiento y solubilidad de los almidones. Asimismo, las proteínas presentes en los gránulos pueden jugar un papel importante en el hinchamiento de los mismos (Han *et al.*, 2002a; Han *et al.*, 2002b; Han y Hamaker, 2002a; Zhang *et al.*, 2005).



N= Almidón nativo; P= Almidón pregelatinizado; FA= Almidón fosfatado-acetilado.

Figura 25. Poder de Hinchamiento de los almidones nativos, pregelatinizados y fosfatado-acetilado de plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pineo gigante”) “PG”; (*Musa* AAAB “FHIA-01”) “F1” y (*Musa* AAAB “FHIA-02”) “F2”.

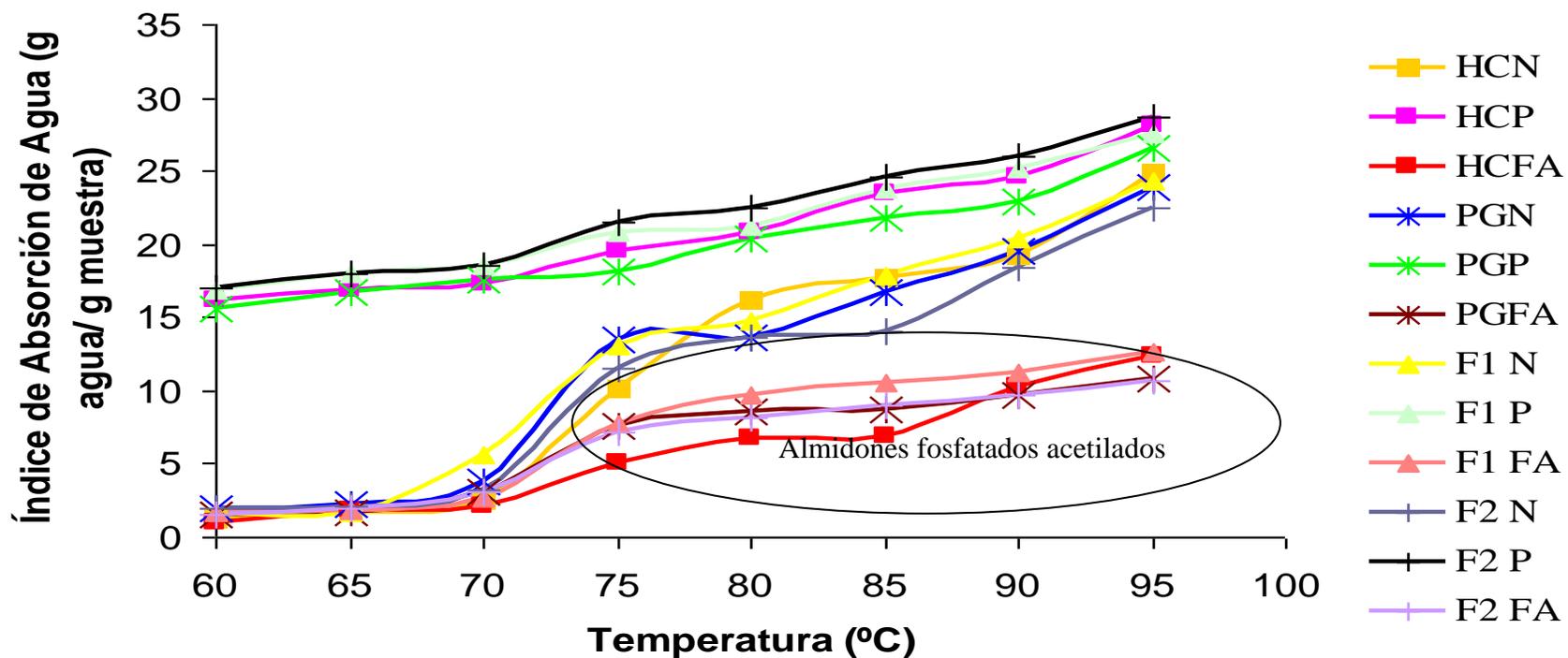
Índice de Sólidos Solubles



N= Almidón nativo; P= Almidón pregelatinizado; FA= Almidón fosfatado-acetilado.

Figura 26. Índice de Solubilidad de los almidones nativos, pregelatinizados y fosfatado-acetilado de plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pineo gigante”) “PG”; (*Musa* AAAB “FHIA-01”) “F1” y (*Musa* AAAB “FHIA-02”) “F2”.

Índice de Absorción de Agua



N= Almidón nativo; P= Almidón pregelatinizado; FA= Almidón fosfatado-acetilado.

Figura 27. Índice de absorción de agua de los almidones nativos, pregelatinizados y fosfatado-acetilado de plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pineo gigante”) “PG”; (*Musa* AAAB “FHIA-01”) “F1” y (*Musa* AAAB “FHIA-02”) “F2”.

El incremento en el índice de absorción de agua, en la solubilidad y en el poder de hinchamiento de las suspensiones de los almidones nativos bajo estudio, se hace evidente después de 65 °C para la muestra F1N y a 70 °C para el resto de las muestras nativas, (valores que se corresponden con las temperaturas de gelatinización obtenidas mediante la técnica de RVA) tal como lo indican Bello *et al.* (1999) para almidones nativos de plátano (*Musa paradisiaca* L). Cabe destacar que en los almidones de plátano y cambur, que ese incremento de la temperatura causó un aumento del índice de absorción de agua, además de producir un rompimiento de las fuerzas intragranulares de la región amorfa, conduciendo al inicio del desdoblamiento de las regiones de doble hélice y al rompimiento de las estructuras de amilopectina con lo cual se va generando una desorganización de la estructura del gránulo (Chen y Jane, 1994 a,b; Shing y Singh, 2003; Bello *et al.*, 2006).

Resultados muy similares a los encontrados por Zhang *et al.* (2005); De la Torre *et al.* (2008) y Núñez *et al.* (2004) en almidones de plátano, el cual presentó a temperaturas superiores de los 70 °C una solubilidad y poder de hinchamiento mayor al de mijo pero menor que el de yuca, papa y ñame según lo reportaran Yuan *et al.* (2007); Jayakody *et al.* (2007) y Amani *et al.* (2005); asegurando que se debe a la longitud y estructura de la cadena de amilopectina, mientras que Aparicio *et al.* (2003) señaló un comportamiento similar en el almidón de plátano pero el comienzo de la solubilidad se da a los 60 °C.

Cabe destacar que el poder de hinchamiento está relacionado con la unión asociativa dentro del gránulo de almidón, y aparentemente la fuerza y carácter de la red micelar está relacionada con el contenido de amilosa en el almidón, es decir, un alto contenido de amilosa produce un bajo poder de hinchamiento, por lo que requieren de

mayor temperatura para que los enlaces de hidrógeno se rompan en las áreas amorfas, lo cual es irreversible contribuyendo así, a la absorción progresiva del agua en el almidón (De la Torre *et al.*, 2008; Adebowale *et al.*, 2002). Además, es importante señalar que el poder de hinchamiento también está determinado por el tamaño del gránulo, temperatura de gelatinización y la organización supramolecular de los componentes del almidón (longitud de la cadena de amilopectina y contenido de amilosa) (Bello *et al.*, 2002; Sasaki y Matsuki, 1998).

Los resultados obtenidos para los almidones de este estudio permiten ver la interrelación entre el contenido de amilosa y el poder de hinchamiento, pudiendo corroborar lo establecido en la literatura referente al contenido de amilosa y el poder de hinchamiento de los gránulos, de igual modo se puede decir que la variabilidad en el tamaño de los gránulos de almidón de las variedades de este estudio contribuyen a que los mismos presenten poder de hinchamiento y de absorción de agua superiores a los encontrados para almidones de otras especies botánicas

En cuanto a la solubilidad, la cual indica el grado de asociación existente (enlaces intragranulares) entre los polímeros del almidón (amilosa y amilopectina) (Figura 26), los valores más altos para cada una de las muestras evaluadas, se obtuvieron en el rango de temperatura comprendido entre los 75 y 95°C, ésta aumenta a consecuencia del hinchamiento del gránulo y del incremento de la temperatura lo que conlleva a un aumento de la movilidad de los gránulos de almidón, lo cual facilita la dispersión de las moléculas de almidón en el agua, produciendo un incremento en la solubilidad (Rincón *et al.*, 2007). Este incremento en la solubilidad podría atribuirse al mayor contenido de

amilosa en estas variedades, debido a que estas moléculas son las primeras que se solubilizan y salen al exterior del gránulo de almidón hinchado.

No obstante, cabe destacar que las suspensiones de almidón modificados con doble tambor para todas las muestras, no mostraron valores de poder de hinchamiento y de solubilidad, demostrándose así, la total disrupción de la estructura granular y la nula salida de sólidos al medio circundante. Estos resultados se debe al efecto de la alta temperatura (152 °C) que provoca la desintegración total de la estructura granular, lo que conlleva a la pérdida del orden cristalino, (Miles *et al.*, 1985; Karim *et al.*, 2008; Bello *et al.*, 2002; Chen y Jane, 1994a; Adebawale y Lawal, 2003).

Sin embargo, en la literatura revisada se han reportado valores mayores en índice de solubilidad y en índice de absorción de agua para almidones modificados físicamente (extrusión), lo cual podría explicarse de la siguiente manera, cuando se obtienen almidones pregelatinizados donde no se aplica ninguna fuerza de corte a los gránulos como es el caso de la extrusión, ocurre apenas una lixiviación parcial de la amilosa, llevando a cabo una absorción de agua y una solubilidad un poco mayor a los almidones nativos (Colonna *et al.*, 1987).

En cuanto al poder de hinchamiento, en los almidones fosfatado-acetilado, para todas la muestras se evidencia el mismo comportamiento, el cual al compararlos con sus respectivos controles (almidón nativo) es notablemente inferior, reportando valores de poder de hinchamiento de HCFA= 10,98 %; PGFA= 11,83%; F1FA= 13,50%; F2FA= 11,71%, hecho atribuible a una combinación de efectos, primero: durante el entrecruzamiento (fosfatación) se introducen grupos fosfatos, provocando el fortalecimiento de los gránulos de almidón por la introducción de dobles enlaces, que

estabilizan la organización molecular de los componentes del almidón, lo cual incrementa la resistencia de los gránulos al hinchamiento, sin embargo, Zheng *et al.* (1999) señalan que el entrecruzamiento inhibe el hinchamiento granular y hace el gránulo hinchado más resistente a la degradación, del mismo modo, Liu *et al.* (1999) concluyen que la fosfatación con trimetafosfato incrementa el poder de hinchamiento en algunos almidones, presentando un máximo hinchamiento cuando se fosfatan a pH 8 y un mínimo cuando se fosfatan a $\text{pH} \geq 10$ como el caso de los almidones bajo estudio, y segundo: con la modificación por acetilación se incluye la sustitución de los grupos acetilos en la cadena del almidón debilitando la estructura del almidón, previniendo la asociación intercatenaria de las cadenas del almidón adyacente lo que facilita la hidratación del gránulo, lo que pudiera explicar, el bajo poder de hinchamiento obtenido para las muestras de esta investigación.

Con respecto al índice de solubilidad y el índice de absorción de agua, en los almidones fosfatado-acetilado, fue notable su disminución al compararlo con los nativos, obteniendo un índice solubilidad de HCFA= 11,04%; PGFA= 11,71%; F1FA= 9,55% y F2FA= 9,94% y un índice de absorción de agua de HCFA= 12,41%; PGFA= 10,83%; F1FA= 12,60% y F2FA= 10,71%, lo cual pudiera estar promovido por el grado de sustitución alcanzado durante la modificación, tanto por la fosfatación como por la acetilación, durante la incorporación de grupos fosfatos el grado de sustitución fue alto, alrededor de 0,36% casi cercano al límite permitido en alimentos (0,4%), lo cual le confiere bajo índice de solubilidad y de absorción de agua a los gránulos de almidón, éste comportamiento permite corroborar lo dicho por Cooreman *et al.* (2005) y Harumi, (1996), los primeros aseguran que existe una relación inversamente proporcional entre el nivel de entrecruzamiento y el índice de solubilidad debido a que a mayor formación

de ligaciones cruzadas entre los gránulos de almidón menor será la lixiviación de los componentes del gránulo hacia el medio circundante, mientras que el segundo indica, que un alto grado de fosfatación en las moléculas reduce la capacidad de absorción de agua, debido a la formación de enlaces cruzados entre las moléculas, reduciendo su capacidad para hidratarse. Con respecto a la incorporación de grupos acetilos, los almidones bajo estudio alcanzaron un grado de sustitución bajo de 2,4%, lo cual es atribuido a varias razones, las cuales se nombran de acuerdo al grado de importancia a) el entrecruzamiento se realizó antes de la sustitución quedando menor cantidad de grupos hidróxilos disponibles para ser reemplazados, b) las características propias del gránulo, los cuales tienen formas irregulares, diversos tamaños ($> 40 \mu\text{m}$) y una superficie densa, tal como se observaron en la MEB, en primer lugar, el tamaño del gránulo disminuye el grado de acetilación, ya que los gránulos grandes de almidón se acetilan en menor proporción que los pequeños (Huang *et al.*, 2007a,b); en segundo lugar, la superficie densa de los gránulos impide la acción de agentes externos, según Millán *et al.* (2005) la superficie de los gránulos de almidones de musáceas presentan una mayor densidad que otros gránulos de diferentes fuente botánica, c) relación amilosa/amilopectina, según Singh *et al.* (2004) un bajo contenido de amilosa favorece la introducción de grupos acetilos, resultando en un elevado grado de sustitución. En conclusión la solubilidad y absorción de agua en los almidones acetilados depende de grado de sustitución; los almidones acetilados con valores superiores al 15% de grupo acetilo son solubles en agua a 50 -100 °C e insolubles en disolventes orgánicos (Rutenberg y Solarek, 1984).

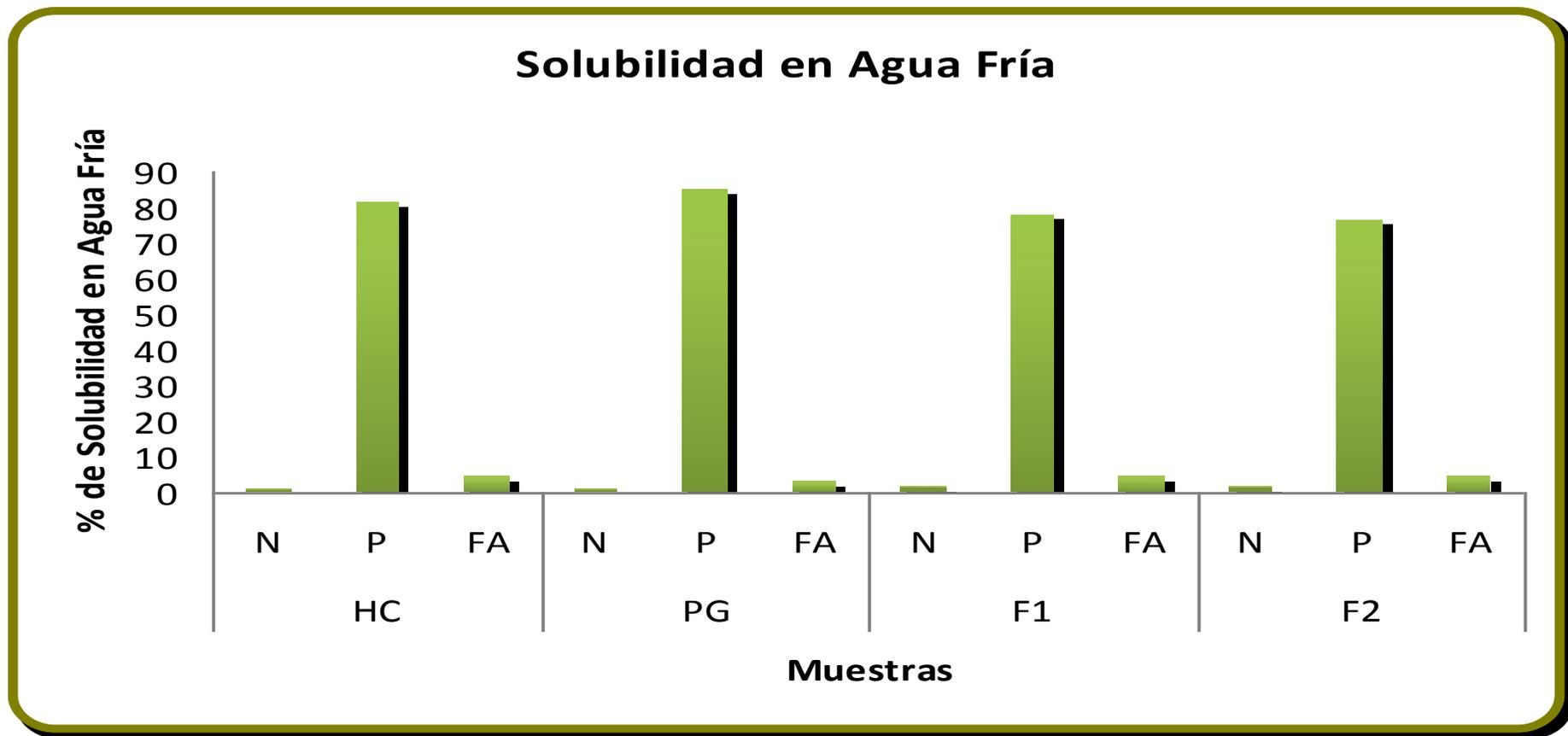
Se aprecia en las curvas de los nativos dos etapas de absorción de agua y de hinchamiento, indicando variaciones en el grado de cristalinidad o de fuerzas de unión

intergranulares en el interior del gránulo de almidón, las cuales se ven eliminadas por la modificación por fosfatación-acetilación, se podría inferir que este proceso de modificación alteró en cierta extensión el grado de cristalinidad de los almidones. Por lo que a pesar de que el almidón modificado absorbe menos agua, lo hace en una sola etapa.

Por lo antes expuesto, se puede decir que los almidones modificados por fosfatación-acetilación en esta investigación presentan un mayor grado de fosfatación que de acetilación, lo cual explica el comportamiento del poder de hinchamiento, índice de solubilidad e índice de absorción de agua.

4.5.2.- Solubilidad en agua fría.

Los resultados obtenidos para la solubilidad en agua fría de los almidones nativos y modificados en todas las muestras, se observan en la Figura 28, donde se puede observar que presentan un comportamiento diferente para cada tipo de almidón. Los almidones nativos presentaron una solubilidad en agua fría muy baja (HCN= 0,86%; PGN= 0,80%; F1N= 1,28%; F2N= 1,34%), hecho atribuible a la existencia de un mayor grado de orden intragranular, que dificulta la dispersión en agua de los componentes moleculares del gránulo (Howling, 1980; Cooke y Gidley, 1992; Han y Hamaker, 2002b; Freitas *et al.*, 2004), por lo que su uso en la formulación de alimentos se ve limitada sin la adición de temperaturas, que faciliten su proceso de gelatinización y “*pasting*” con lo cual, se logra obtener características como por ejemplo, mayor viscosidad, alta dispersibilidad en agua fría y mayor estabilidad de las pastas. Los resultados obtenidos en esta investigación no escapan a lo planteado en otras investigaciones (Bello *et al.*, 2002), ya que los mismos presentan muy baja a casi nula



N= Almidón nativo; P= Almidón pregelatinizado; FA= Almidón fosfatado-acetilado.

Figura 28. Solubilidad en agua fría de los almidones nativos, pregelatinizados y fosfatado-acetilado de plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano "Hartón") "HC" y cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish "pino gigante") "PG"; (*Musa* AAAB "FHIA-01") "F1" y (*Musa* AAAB "FHIA-02") "F2".

solubilidad en agua fría, sin embargo Pacheco y Alemán, (2010) encontraron valores de solubilidad en agua fría para almidones de la misma especie de 7,45%. Por otro lado, los almidones fosfatado-acetilado presentaron bajo porcentaje de solubilidad en agua fría (HCFA=4,42; PGFA= 2,96%; F1FA= 4,62; F2FA= 4,0%) debido a su alto grado de orden molecular, provocado por los dobles enlaces covalentemente unidos, que actúan como puntos de soldadura para reforzar la estructura granular y darle mayor estabilidad, sin embargo presentan una solubilidad mayor que los almidones nativos motivado al efecto de la acetilación, ya que la sustitución de los grupos acetilos en la cadena del almidón debilita la estructura del almidón, previniendo la asociación intercatenaria de las cadenas de almidón adyacente lo que facilita la hidratación del gránulo (Liu *et al.*, 1999).

Como era de esperarse los almidones pregelatinizados para todas las muestras presentaron mayor solubilidad en agua fría (HCP= 81,71%; PGP= 85,26%; F1P= 78,11%; F2P= 76,51%), lo que se justifica por total destrucción de la estructura granular causada por la aplicación de alta temperatura (152 °C) en exceso de agua (gelatinización). La estructura pasa de granular a a forma de escamas, donde se evidencia la ausencia del orden molecular lo que incrementa la solubilidad en agua fría de las muestras estudiadas.

Por lo tanto los almidones pregelatinizados con doble tambor son capaces de solubilizarse en agua fría, es decir, a temperatura ambiente, lo que le confiere un uso potencial en alimentos instantáneos, tales como pudines, rellenos para tortas y bebidas, pues le confiere mayor viscosidad y textura suave.

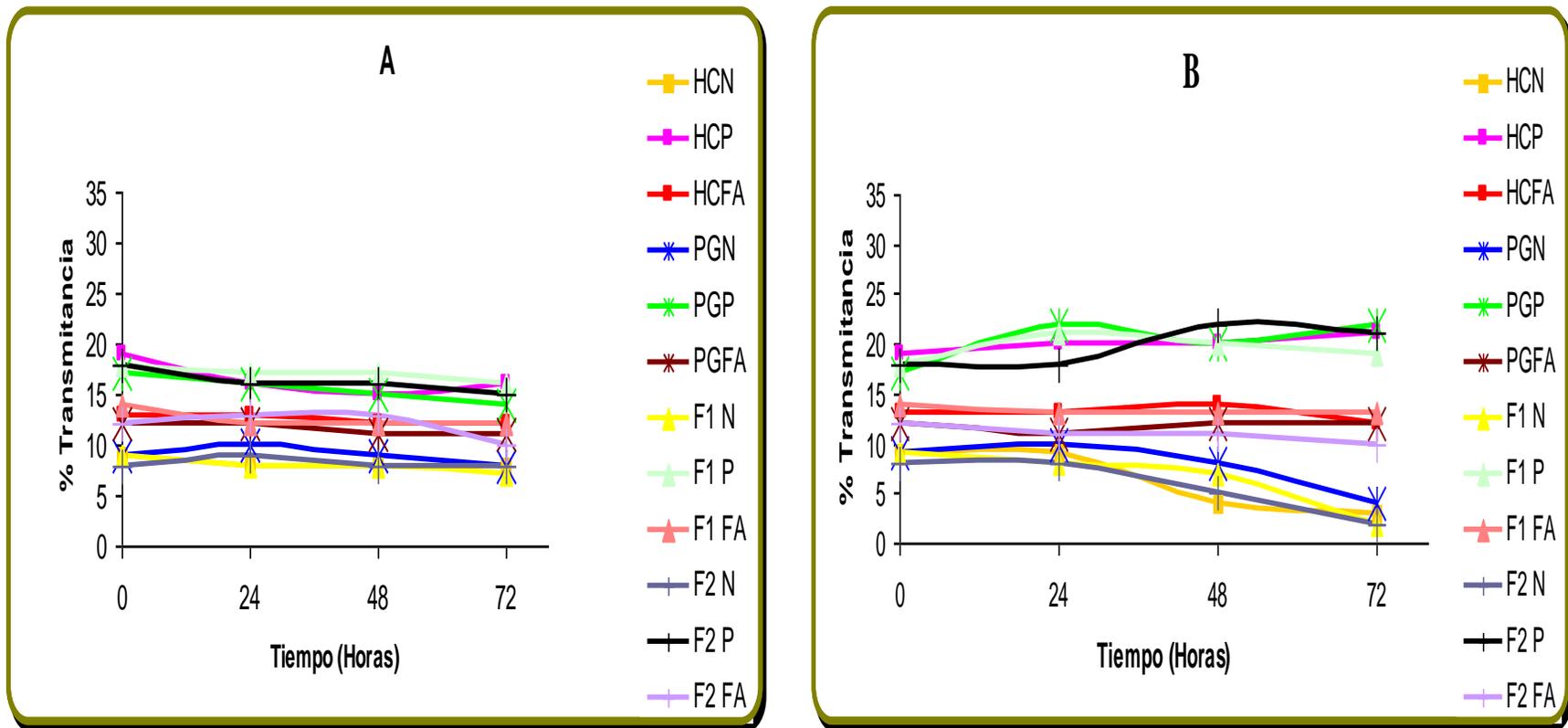
4.5.3.- Estabilidad y claridad de las pastas.

La importancia de la claridad de las pastas de almidones, radica en el uso que se le quiera dar, y de esta manera, ser destinado para su utilización en la elaboración de salsa o cremas en las cuales se requiera tener baja opacidad; o bien puede considerarse su uso en la creación de películas muy finas que recubran productos como frutas, sin que estas distorsionan las características originales y/o propias de estas mismas.

La estabilidad y claridad de las pastas a temperaturas de refrigeración, se relaciona mucho con el tiempo del estudio y el proceso de retrogradación que es propio de los almidones al ser sometidas a estas condiciones, Bello *et al.* (2002) mencionan que a la temperatura de almacenamiento de 4°C debe tener como resultado la formación de cristales menos perfectos que los formados a temperatura ambiente y que además, la agregación de las cadenas de amilosa puede ser llevada a mayor velocidad a bajas temperaturas, lo cual disminuye la transmitancia.

En la Figura 29, se presentan los resultados de el porcentaje de transmitancia obtenido para cada una de las pastas de almidones de plátano y cambur verde evaluadas a temperatura ambiente y a 4 °C, por un período de 72 horas.

En la Figura 26 A, diferencias en el % de transmitancia fueron observadas entre las muestras nativas, pregelatinizadas y fosfatada-acetilada almacenadas a temperatura ambiente, se puede notar que éstos presentan un comportamiento similar donde es notorio que permanecen casi constantes a través del tiempo para todas las muestras



N= Almidón nativo; P= Almidón pregelatinizado; FA= Almidón fosfatado-acetilado.

Figura 29. Claridad (% T a 650 nm) a temperatura ambiente (A) y 4 °C (B) de los almidones nativos, pregelatinizados y fosfatado-acetilado de plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pineo gigante”) “PG”; (*Musa* AAAB “FHIA-01”) “F1” y (*Musa* AAAB “FHIA-02”) “F2”.

de almidones evaluadas por lo que se puede decir que, presentan una estabilidad alta a la retrogradación.

En la Figura 29-B, se observa el comportamiento del % de transmitancia de los almidones bajo estudio a temperatura de refrigeración (4 °C), donde se evidencia que los valores de transmitancia obtenidos presentaron un comportamiento decreciente para los almidones nativos de plátano y cambur verde a medida que transcurría el tiempo de observación, con valores cercanos al 8,2 % y próximos al 2 %, esta disminución en el porcentaje de transmitancia, probablemente se debe al proceso de retrogradación que experimentan las moléculas de almidón, y principalmente la fracción de amilosa, una vez ocurrida la gelatinización, en la fase de enfriamiento (Jacobson *et al.*, 1997; Bello *et al.*, 2000; Ishiguro, 2000), mientras que los almidones pregelatinizados y fosfatado-acetilado para todas las muestras mostraron un comportamiento similar durante el tiempo de estudio, lo que permite inferir que tienen una alta estabilidad a la retrogradación.

Los almidones nativos, pregelatinizados y fosfatado-acetilado, experimentaron diferentes valores de transmitancia a temperatura ambiente, lo que se traduce en % de claridad distintos para cada tratamiento, resultando los almidones pregelatinizados los que presentan mayor % claridad (17,80 %) en comparación con los nativos y fosfatado-acetilado, 8,2 % y 4,0% respectivamente, hecho atribuible a que los almidones pregelatinizados presentaron mayor capacidad de absorción de agua y según Hoover *et al.*, (1996) el grado de transmitancia es afectado directamente por el grado de capacidad de absorción de agua. Esto es corroborado con los actuales resultados, en los que se ha evidenciado la baja capacidad de absorción de agua de los almidones nativos y fosfatado-acetilado en comparación con los almidones pregelatinizados, por tanto se

puede decir que los almidones pregelatinizados forman pastas más traslúcidas, es importante señalar que todos los almidones nativos experimentaron un comportamiento constante al transcurrir el tiempo en estudio, lo que le confiere una baja tendencia a la retrogradación a temperatura ambiente. No obstante, valores superiores de transmitancia se han reportado para almidones de musáceas de diferentes especies (De la Torre *et al.*, 2008; Bello *et al.*, 2002; Pacheco y Alemán, 2010).

Cabe destacar que los valores de transmitancia de los almidones de musáceas son bajos al compararlos por ejemplo a los almidones de maíz comercial, cuyo valor oscila en 22,40% (Betancur *et al.*, 2001), como se debe considerar que la claridad de la pasta es característica de calidad, relacionada con el brillo y opacidad del producto, por tanto los almidones obtenidos en este estudio se podrían utilizar en alimentos que no requieren transparencia como geles de frutas, pudines, rellenos para postres y espesantes para sopas.

En la Figura 29-B, se muestra el comportamiento de los almidones bajo estudio a temperatura de refrigeración (4 °C), donde se observa que los almidones pregelatinizados y fosfatado-acetilado experimentan un comportamiento constante al transcurrir el tiempo de estudio, indicando una menor tendencia a la retrogradación, lo cual podría explicarse por el tipo de modificación empleada. En el caso del almidón pregelatinizado la estructura del almidón se pierde por efecto del tratamiento térmico, lo que dificulta el reordenamiento de las moléculas constituyentes (amilosa y amilopectina) (Colonna *et al.*, 1984; García *et al.*, 1997; Jacobs y Delcour, 1998). En cambio en los almidones fosfatado-acetilado, el entrecruzamiento y el grado de sustitución es determinante pues dificulta la propagación y maduración de los cristales

en la fracción de amilopectina, lo que conlleva a una menor tendencia a la retrogradación (Liu *et al.*, 1998; Meza *et al.*, 2001).

Por otra parte, el comportamiento decreciente del porcentaje de transmitancia a temperaturas de refrigeración (4 °C) experimentada por los almidones nativos de plátano y cambur verde, se evidencia a partir de las 24 horas de almacenamiento, puede explicarse a que se da la retrogradación del almidón, cabe destacar que la retrogradación ocurre en dos etapas la primera, donde se da la congelación de las moléculas de amilosa exudadas de los gránulos de almidón durante la gelatinización y la segunda en la cual ocurre la recristalización de la amilopectina, en la fase de enfriamiento, lo que conlleva a una disminución de la transmitancia, del mismo modo la agregación de las cadenas de amilosa puede ser llevada a mayor velocidad a bajas temperaturas, lo cual disminuye drásticamente los valores de transmitancia, así como la baja capacidad de absorción de agua, el tiempo de almacenamiento probablemente por la retrogradación de las muestras también es responsable de el descenso del porcentaje de transmitancia. Por lo antes expuesto, se puede concluir que las modificaciones aplicadas en este estudio a los almidones nativos tuvieron efecto en retrasar el fenómeno de retrogradación cuando los geles se almacenaron a temperatura de refrigeración.

Resultado similar fue encontrado por Bello *et al.* (2002) y Bello *et al.* (2000) al estudiar las propiedades químicas y funcionales del almidón granular y acetilado de plátano (*Musa paradisiaca* L.), donde los almidones modificados presentaron menor tendencia a la retrogradación (% T= 6% y % T= 5% durante el tiempo en estudio, respectivamente), asegurando que por medio de la modificación se logra obtener almidones estable a la retrogradación a temperatura ambiente, sin embargo, el almidón de maíz granular soluble en agua fría a temperatura ambiente tuvo una alta tendencia a

la retrogradación, luego de 24 horas de almacenamiento, asegurando los autores que dicho comportamiento es debido posiblemente a la distribución de la longitud de las cadenas y la fuente de procedencia del almidón.

No obstante, Amani *et al.* (2005), al evaluar la estabilidad y claridad de las pastas de almidones nativos, obtenidos a partir de cinco cultivares de *D. alata*, once cultivares de *D. cayenensis-rotundata*, un cultivar de *D. dumetorum* y cuatro clones de *D. esculenta*, mostraron mayor tendencia a la retrogradación, pues se evidenció la disminución en los valores de transmitancia por efecto del almacenamiento en refrigeración, lo cual no sólo se debe a la gelificación de las moléculas de amilosa liberadas a partir de los gránulos durante la gelatinización, sino que también está determinada por la recristalización de la amilopectina.

Singh y Singh, (2007) observaron algunas características del almidón de maíz, reportando que el % de transmitancia de maíz varía con la variedad, estos valores de las suspensiones de almidón se incrementó con el tiempo durante el almacenamiento a 4 °C, concluyendo que este comportamiento es atribuido a la interacción de varios factores como, la solubilidad de gránulo, remanente de gránulos, exudación y la longitud de las cadenas de amilosa y amilopectina, así como la substitución por el entrecruzamiento.

4.5.4.- Estabilidad al congelamiento y deshielo

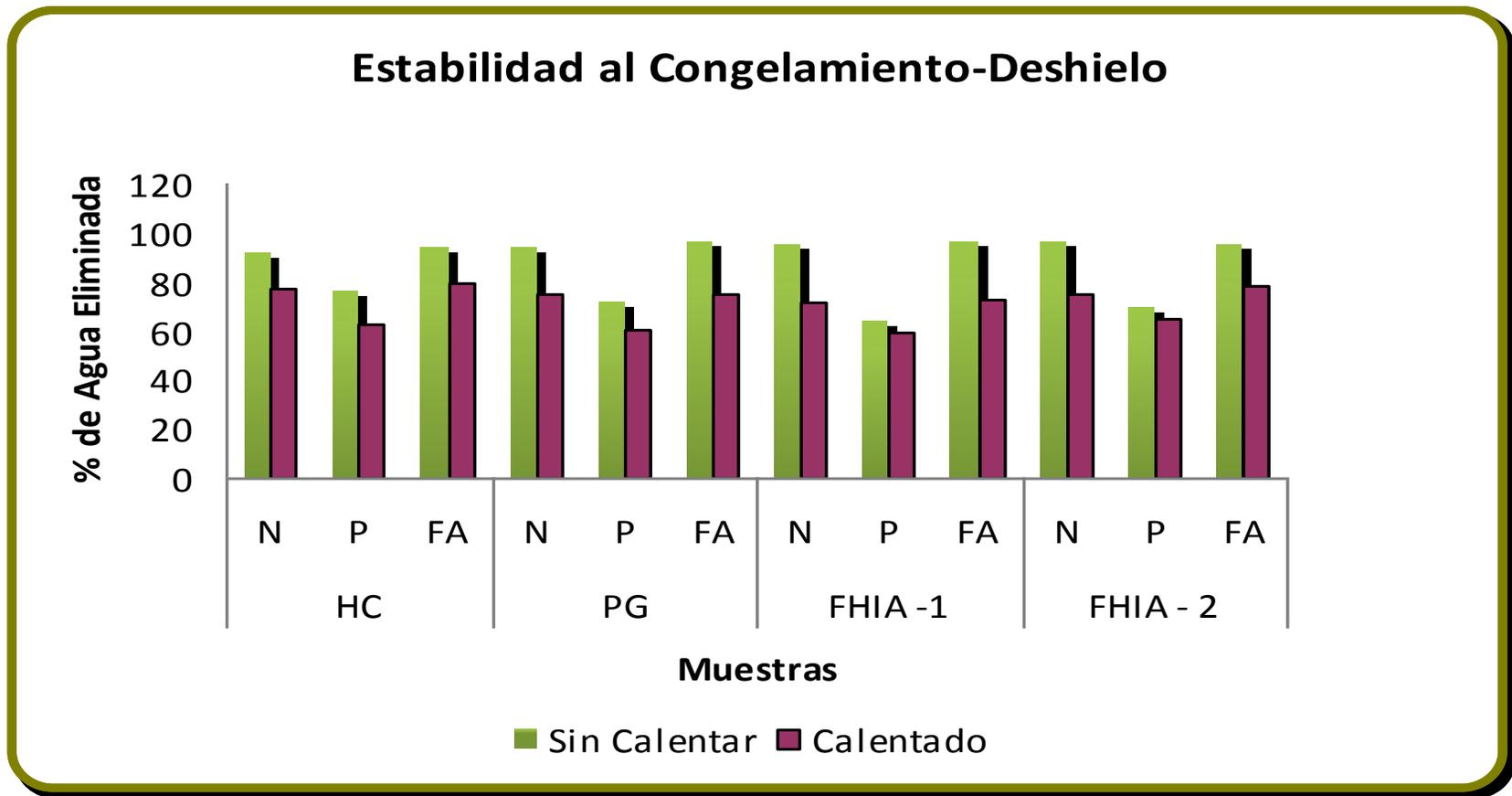
Los productos alimenticios que van a ser sometidos a almacenamiento refrigerado o bajo congelación, deben mantener su composición química y su estructura física estables a bajas temperaturas y a través del tiempo. Ciertos almidones modificados y especialmente los almidones eterificados, han sido considerados como ideales para estas

aplicaciones, mejorando significativamente la consistencia de productos refrigerados y congelados (Swinkles, 1985; Perera y Hoover, 1999; Singh *et al.*, 2007).

Por lo tanto, en vista de la importancia que ha adquirido el desarrollo de productos alimenticios capaces de mantenerse estables a bajas temperaturas, se evaluó la resistencia de las suspensiones de almidón de plátano y cambur verde sin calentamiento y con calentamiento a 90 °C durante 30 minutos, a un ciclo congelamiento a -20°C por 18 horas y posterior deshielo a temperatura ambiente por 6 horas.

La estabilidad al congelamiento – deshielo en los almidones pregelatinizados fue mayor mientras que en los almidones nativos y fosfatado-acetilado fue menor, debido a la gran cantidad de agua que estos últimos eliminaron durante el experimento, tanto calentando las suspensiones como sin calentar (Figura 30), sin embargo, las suspensiones de almidón con calentamiento previo la cantidad de agua eliminada fue menor con respecto a la suspensiones de almidón sin calentamiento.

En líneas generales, se puede apreciar que la estabilidad al congelamiento-deshielo, se incrementó en todos los almidones, se incrementó luego del calentamiento, debido a que a la temperatura de 90 °C ocurre la gelatinización del almidón, incrementando su poder de hinchamiento y capacidad de absorción de agua, lo cual le permite retener mayor cantidad de agua en la estructura interna de la suspensión. Esta tendencia fue similar a la reportada por Bello *et al.* (2002); Pacheco y Alemán (2010) en muestras de musáceas.



N= Almidón nativo; P= Almidón pregelatinizado; FA= Almidón fosfatado-acetilado.

Figura 30. Estabilidad al congelamiento y deshielo de los almidones nativos, pregelatinizados y fosfatado-acetilado de plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pineo gigante”) “PG”; (*Musa* AAAB “FHIA-01”) “F1” y (*Musa* AAAB “FHIA-02”) “F2”.

En cuanto a las suspensiones de almidón nativo se observó que no existen diferencias entre ellas sin calentamiento previo, ya que tanto las muestras de plátano y cambur, presentaron un porcentaje de agua eliminada entre 92 y 96 %, asimismo, al calentar las suspensiones de almidón el agua eliminada osciló entre 77,5 y 75%, lo que quiere decir que los almidones nativos de plátano y cambur verde presentan una pobre estabilidad al congelamiento y deshielo, ya que sólo son capaces de retener con previo calentamiento 25 y 22,5% de agua en la suspensión. La baja estabilidad presentada por los almidones de plátano y cambur verde, puede atribuirse a que los almidones nativos presentan baja resistencia a esfuerzos de corte, descomposición térmica, alto nivel de retrogradación y sinéresis (Bello *et al.*, 2002).

Pacheco y Alemán, (2010) reportaron entre 65 y 40% de agua eliminada para almidones de topocho verde durante las 72 horas de almacenamiento. Ordóñez (2012) mostró altos valores de eliminación de agua (95%) para almidones nativo de cambur Musa AAAB “FHIA-01” y “FHIA-02”. Pacheco y Techeira, (2009) mostraron altos valores de eliminación de agua (80%) para almidones nativo de ñame. Por lo que es predecible este comportamiento de los almidones nativos para todas las fuentes botánicas de estudio.

Del mismo modo, en los almidones fosfatado-acetilado para todas las muestras el % de agua eliminada después de ser sometido a calentamiento previo y posterior congelamiento-deshielo tuvo un comportamiento similar a los almidones nativos, hecho atribuible a que estos almidones tienen una alta integridad granular lograda durante el entrecruzamiento, además poseen un bajo poder de hinchamiento, solubilidad y absorción

de agua, en conclusión, esta modificación no causó ningún efecto frente a la estabilidad al congelamiento y deshielo, en los almidones estudiados.

Por el contrario, los almidones modificados con doble tambor para todas las muestras, exhibieron los valores más bajo de porcentaje de agua eliminada una vez que fue sometida a congelamiento y deshielo, aproximadamente de 60 % debido que durante el tratamiento térmico los gránulos de almidón perdieron su estructura granular y se promovieron reacciones de depolimerización de las moléculas de amilosa y amilopectina generando moléculas más lineales. Por tanto, es factible que se haya presentado un fenómeno de agregación gradual de las cadenas lineales formando una malla que disminuyó la cantidad de agua separada, dando lugar a la formación de un gel resistente a la sinéresis (Baker y Rayas, 1998; Bello *et al.*, 2002).

Resultado similar a los reportados en ésta investigación fueron encontrados por De la Torre *et al.* (2008); Bello *et al.* (1998) y Waliszewski *et al.* (2003) en almidones nativos de plátano los cuales presentan una tendencia alta a la sinéresis y una baja estabilidad en refrigeración, mientras que Bello *et al.* (2002) y Pacheco y Alemán (2010) al estudiar almidones granulares de plátano y topocho, encontraron que los almidones modificados a partir del tercer y cuarto ciclo el porcentaje de agua separada fue muy bajo, lo que muestra una alta estabilidad de estos en comparación con los almidones nativos, resultado similar al de Chen y Jane (1994b) al estudiar almidones granulares de maíz. Dicho comportamiento es atribuible a la integridad de los gránulos de almidón hinchado que no se dispersan totalmente, concluyendo los autores que una manera de mejorar la estabilidad durante el

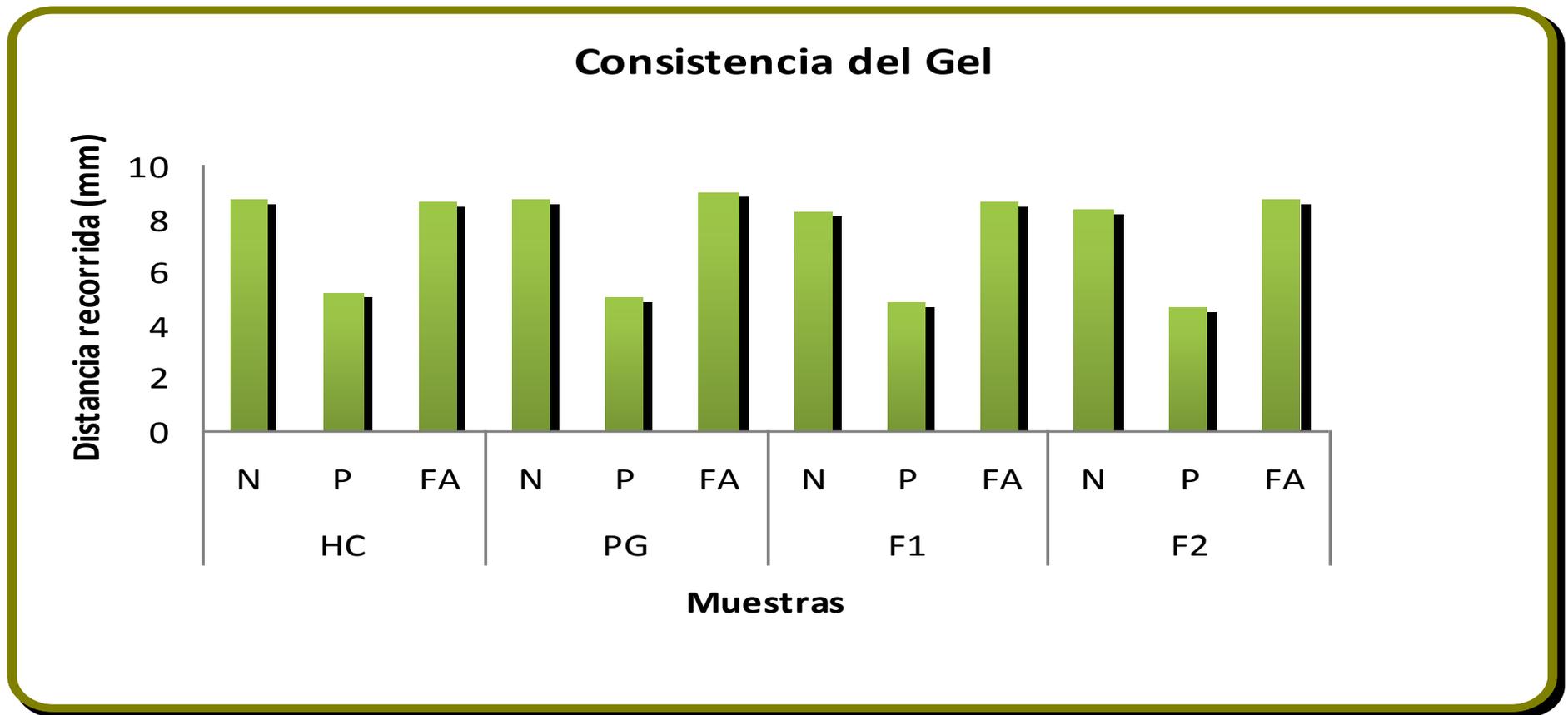
congelamiento y deshielo de los almidones, es produciendo almidones granulares solubles en agua fría (modificación química).

El comportamiento de los almidones estudiados en esta investigación señala que pueden ser utilizados en alimentos que requieran refrigeración, siempre que se realice modificación física como es el caso de los almidones pregelatinizados, que de acuerdo a su comportamiento reológico estipula que pueden usarse como aditivos para postres refrigerados como mermeladas, pudines y colados y espesante para sopas (Hoover y Vasanthan, 1994; Singh y Singh, 2007).

4.5.5.- Consistencia del gel

En la Figura 31, se presenta la consistencia del gel determinada para las diferentes suspensiones de almidón plátano y cambur verde, donde se puede apreciar que existen diferencias entre las muestras.

Los almidones nativos y fosfatado-acetilados, obtuvieron valores de consistencia del gel bastante altos de $\approx 8,3\%$ y de $\approx 8,7\%$ respectivamente; es decir que presentan menor consistencia con respecto al pregelatinizado ($\approx 4,6\%$), hecho atribuible a que estos presentan mayor organización estructural, un poder de hinchamiento y capacidad de absorción de agua menor que los almidones pregelatinizados (estructura granular se pierde, lo que facilita el paso de las moléculas de agua y por ende, hay mayor poder de hinchamiento y mayor capacidad de absorción de agua), lo que se traduce en mayor fuerza inter e intramolecular lo que genera una menor disrupción granular, produciéndose menos



N= Almidón nativo; P= Almidón pregelatinizado; FA= Almidón fosfatado-acetilado.

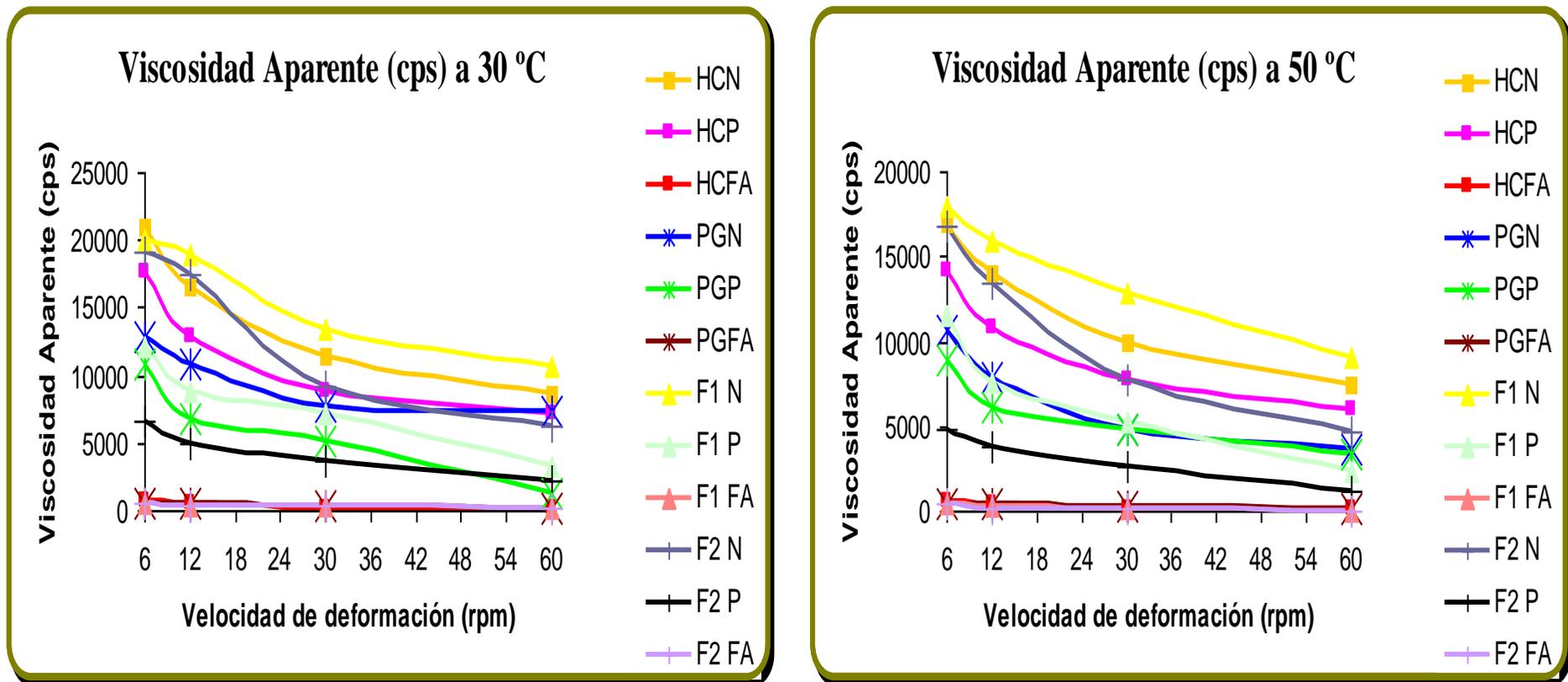
Figura 31. Consistencia del gel de los almidones nativos, pregelatinizados y fosfatado-acetilado de plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pino gigante”) “PG”; (*Musa* AAAB “FHIA-01”) “F1” y (*Musa* AAAB “FHIA-02”) “F2”.

componentes lixiviados hacia el medio circundante y una menor consistencia en la pasta formada. En el caso de los almidones fosfatado-acetilado la consistencia del gel fue alta para todas las muestras, comportamiento que se explica por el tipo de modificación y grado de sustitución, la cual causa el reforzamiento de los enlaces por entrecruzamiento, lo que dificulta el paso de moléculas de agua al interior del gránulo, generando así la formación de suspensiones más fluidas y menos consistentes (Lewandowics *et al.*, 1997).

Resultados similares fueron obtenidos por Ordóñez (2012) al estudiar la consistencia del gel en muestras de cambur verde (Musa AAAB “FHIA-01” y “FHIA-02”) observó que los almidones pregelatinizados presentaron la mayor consistencia del gel formado mientras que los almidones nativos y granulares solubles en agua fría obtuvieron los menores valores, asegurando que la formación del gel depende de la asociación de los polímeros, de la estructura, del tamaño y de la forma del gránulo, motivado a que el gránulo de almidón absorbe rápidamente agua debido al debilitamiento entre las fuerzas de atracción de las moléculas (amilosa/amilopectina).

4.5.6.- Viscosidad aparente

En lo que se refiere a la viscosidad aparente, cuyos resultados se presentan en la Figura 32, se puede apreciar que al incrementar la fuerza de corte (6, 12, 30 y 60 rpm), a una temperatura de 30 °C y de 50 °C, se observó una disminución de todos los valores obtenidos para cada una de las suspensiones de almidones de plátano y cambur verde en estudio, lo que es característico de los fluidos no newtonianos pseudoplásticos. Asimismo, la viscosidad es mayor a menor temperatura en todos los almidones



N= Almidón nativo; P= Almidón pregelatinizado; FA= Almidón fosfatado-acetilado.

Figura 32. Viscosidad Aparente a 30 °C y 50 °C de los almidones nativos, pregelatinizados y fosfatado-acetilado de plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pino gigante”) “PG”; (*Musa* AAAB “FHIA-01”) “F1” y (*Musa* AAAB “FHIA-02”) “F2”.

evaluados y disminuye notablemente por efecto de las modificaciones aplicadas (Pangborn *et al.*, 1988; Mohameed *et al.*, 2006; Pérez y Pacheco, 2005).

La disminución en los valores de viscosidad se explica por la degradación por fricción de las moléculas que componen el almidón, es decir de las moléculas de amilosa y amilopectina, que disminuyen su capacidad de retención de agua (Nkala, 1994; Rao *et al.*, 1997; Sandoval *et al.*, 2007). Del mismo modo, Bello *et al.* (2000) asumen la disminución de la viscosidad a un adelgazamiento de la pasta que inicialmente se había formado para el estudio, esto concuerda con lo dicho por Charm, (1962) quién asegura que cuando la fuerza cortante se aumenta, las partículas de almidón pueden reordenarse en dirección paralela a la fuerza cortante y las partículas grandes pueden romperse en pequeñas partículas. El mismo comportamiento fue señalado por Bello *et al.* (2002) en almidones nativos y modificados de plátano, por González y Pérez (2003) en almidones de yuca pregelatinizados y por Sandoval *et al.* (2007), en suspensiones de almidones extruídos de yuca.

La viscosidad aparente determinada para las suspensiones de almidones de plátano y cambur verde en estudio mostró diferencias, ya que los almidones pregelatinizados y fosfatado-acetilado de plátano y cambur verde experimentaron valores inferiores al almidón nativo. Esta misma tendencia fue reportada por Bello *et al.* (2002), al evaluar almidones de plátanos nativos y modificados donde observaron que la viscosidad aparente disminuyó al incrementar el esfuerzo de corte, hecho atribuible a que la estructura molecular de los almidones tiene una función importante en este comportamiento. De igual forma, los almidones nativos de plátanos analizados por Zhang *et al.* (2005), disminuyeron su viscosidad cuando se incrementó la fuerza de corte de 2 a 20 rpm y los valores más altos de viscosidad se mostraron, cuando la muestra fue

calentada por períodos más prolongados de tiempo, motivo por el cual seguían siendo estables a 20 rpm.

Para el caso específico de los almidones obtenidos con doble tambor, se evidenció la disminución de la viscosidad aparente a medida que se incrementó la velocidad de deformación, lo cual es producido por el efecto del tratamiento térmico que ocasionó posiblemente, que el tamaño de las cadenas de amilosa existentes en este almidón no sea el apropiado para permitir una asociación que pudiera generar un desarrollo apreciable de viscosidad aparente. Estos resultados concuerdan con González y Pérez (2003), quienes al evaluar la viscosidad en almidones de yuca pregelatinizados, tratados con microondas observaron una disminución de la viscosidad en relación al almidón nativo; mientras que Colonna *et al.* (1987), también observaron una disminución de la viscosidad intrínseca en muestras de almidón de trigo pregelatinizado y atribuyeron este comportamiento a la degradación de los componentes del almidón en macromoléculas de menor peso molecular.

Con respecto a los almidones fosfatados-acetilado para todas las muestras presentaron el mismo comportamiento entre ellas, pero con valores de viscosidad aparente inferiores a los almidones nativos y pregelatinizados, denotando un comportamiento de fluido newtoniano, siendo más estables y resistentes a la deformación, ya que la reacción de entrecruzamiento contribuyó a la disminución de la solubilidad y de el hinchamiento de los gránulos, provocando que no se hincharan libremente y que la lixiviación de la amilosa no se llevará a cabo completamente, resultando la formación de pastas de consistencia más suave en comparación con los almidones nativos y pregelatinizados, lo cual concuerda con lo reportado por Rodríguez

et al. (2010), quienes aseguran que los almidones entrecruzados de plátano mostraron un comportamiento de flujo newtoniano ya que estos son más estables a los esfuerzos de corte y forman geles menos rígidos que su contraparte nativa.

4.5.7.- Perfil amilográfico

En el Tabla 15, se muestra el comportamiento reológico de las suspensiones para las muestras de almidón nativo, pregelatinizado y fosfatado-acetilado de plátano y cambur verde, a una concentración del 7 % para los almidones pregelatinizados, con una tasa de calentamiento de 7,5 °C/min haciendo uso del Micro Viscoamilógrafo Brabender, del mismo modo, en la figura 33 a la 44, se observan las curvas amilográficas para cada una de las muestras y tratamientos mencionados.

En este estudio, la suspensión de almidón nativo de plátano verde (HCN) tiene una temperatura inicial de gelatinización (TIG) de 80°C a los 8,50 minutos, valor que es mayor al de las suspensiones de almidón nativo de cambur verde (F2N<PGN<F1N) cuyo valor de TIG fue de 73 °C a los 6,10 minutos; TIG de 72 °C a los 8,5 minutos y TIG de 64 °C a los 8,5 minutos, respectivamente.

Evidenciándose un menor grado de asociación intragranular en los almidones nativos de cambur, ya que requieren menor energía para debilitar las interacciones intra e intergranulares de la amilosa y amilopectina en el interior del gránulo de almidón, mientras que el comportamiento del almidón nativo de plátano pudiera ser un reflejo del alto grado de orden intragranular, además el tamaño del gránulo y el peso molecular de las moléculas de almidón también es un factor que afecta la temperatura inicial de gelatinización, de igual forma la movilidad intragranular y la proporción de cadenas de

Tabla 15. Propiedades viscoamilográficas de los almidones extraídos de plátano (*Musa* AAB subgrupo plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pino gigante”) “PG”; (*Musa* AAAB “FHIA-01”) “F1” y (*Musa* AAAB “FHIA-02”) “F2”.

| Parámetros | MUESTRAS | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|----------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|
| | HC N | HC P | HC FA | PG N | PG P | PG FA | F1 N | F1 P | F1 FA | F2 N | F2 P | F2 FA |
| Viscosidad inicial (UB) | 0 | 8,5 | 0 | 0 | 8,25 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 16 | 0 |
| Temp. Inicial de gel. (°C) (A) | 80 | 72,5 | 90,1 | 72 | 68,1 | 91,0 | 64 | 58,3 | 75,2 | 73 | 62,5 | 85,2 |
| Viscosidad máx.(UB) (B) | 425 | 102 | 288 | 421 | 98 | 302 | 443 | 105 | 383 | 483 | 112 | 450 |
| Viscosidad a 95 °C (UB) (C) | 340 | 102 | 19 | 360 | 98 | 15 | 422 | 105 | 355 | 230 | 112 | 40,3 |
| Viscosidad a 95°C x 15 min.(UB) (D) | 288 | 93 | 288 | 284 | 88 | 302 | 321 | 89 | 383 | 350 | 95 | 450 |
| Viscosidad a 50 °C (UB) (E) | 452 | 107 | 302 | 442 | 97 | 461 | 500 | 96 | 461 | 470 | 88 | 558 |
| Viscosidad a 50°C x 10 min (UB) (F) | 473 | 110 | 312 | 461 | 98 | 499 | 576 | 107 | 503 | 552 | 107 | 599 |
| Retrogradación o Setback (F - B) | 48 | 8 | 24 | 40 | 0 | 197 | 154 | 2 | 120 | 69 | -5 | 149 |
| Estabilidad o Breakdown (B - D) | 137 | 9 | 0 | 137 | 10 | 0 | 101 | 16 | 0 | 133 | 17 | 0 |
| Consistencia (E - D) | 164 | 14 | 13 | 120 | 19 | 159 | 21 | 7 | 79 | 13 | 3 | 108 |

N= Almidón nativo; P= Almidón pregelatinizado; FA= Almidón fosfatado-acetilado

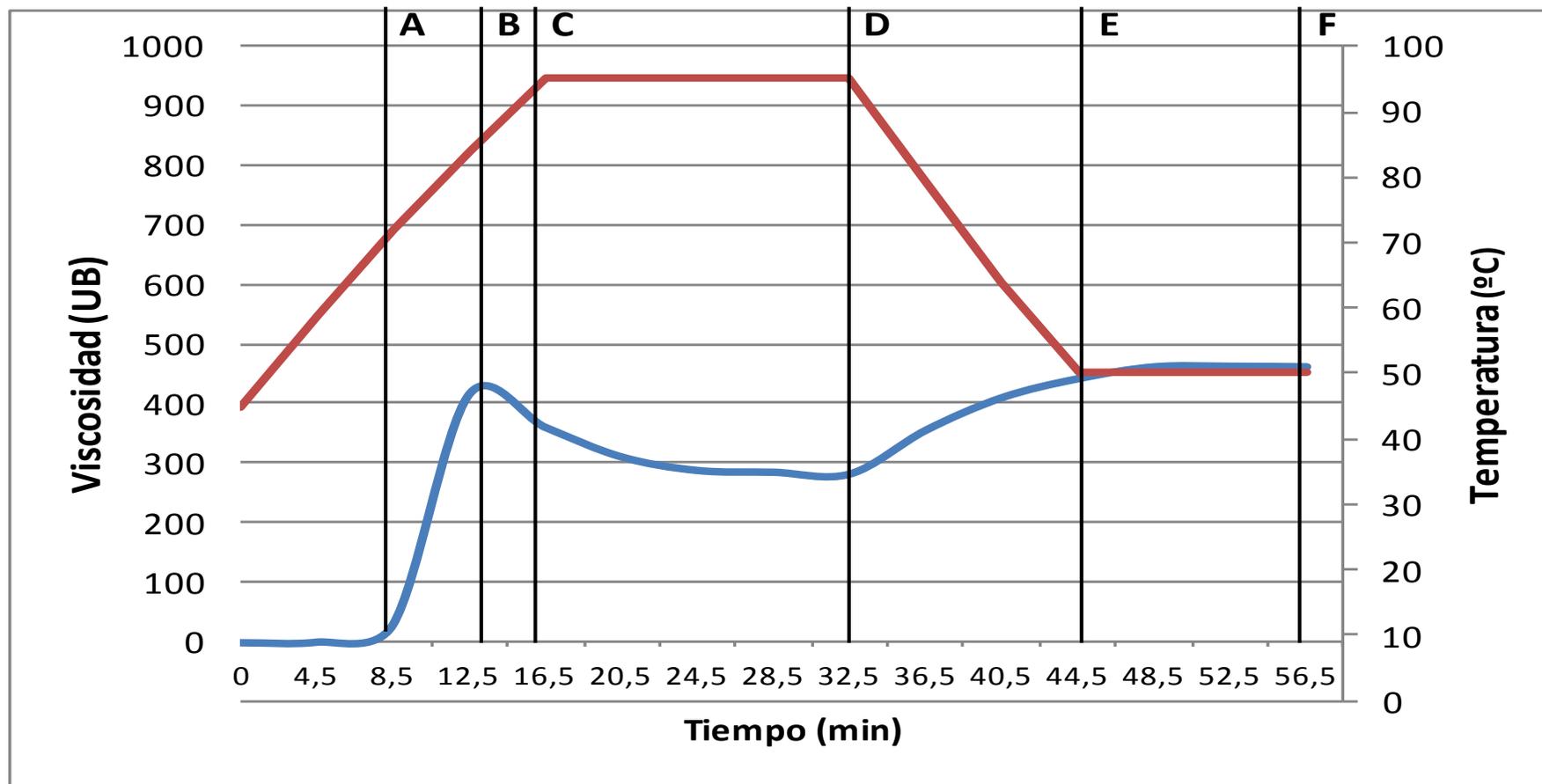


Figura 33. Perfil viscoamilográfico obtenido para una suspensión de almidón nativo de plátano verde (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” al 7 %.

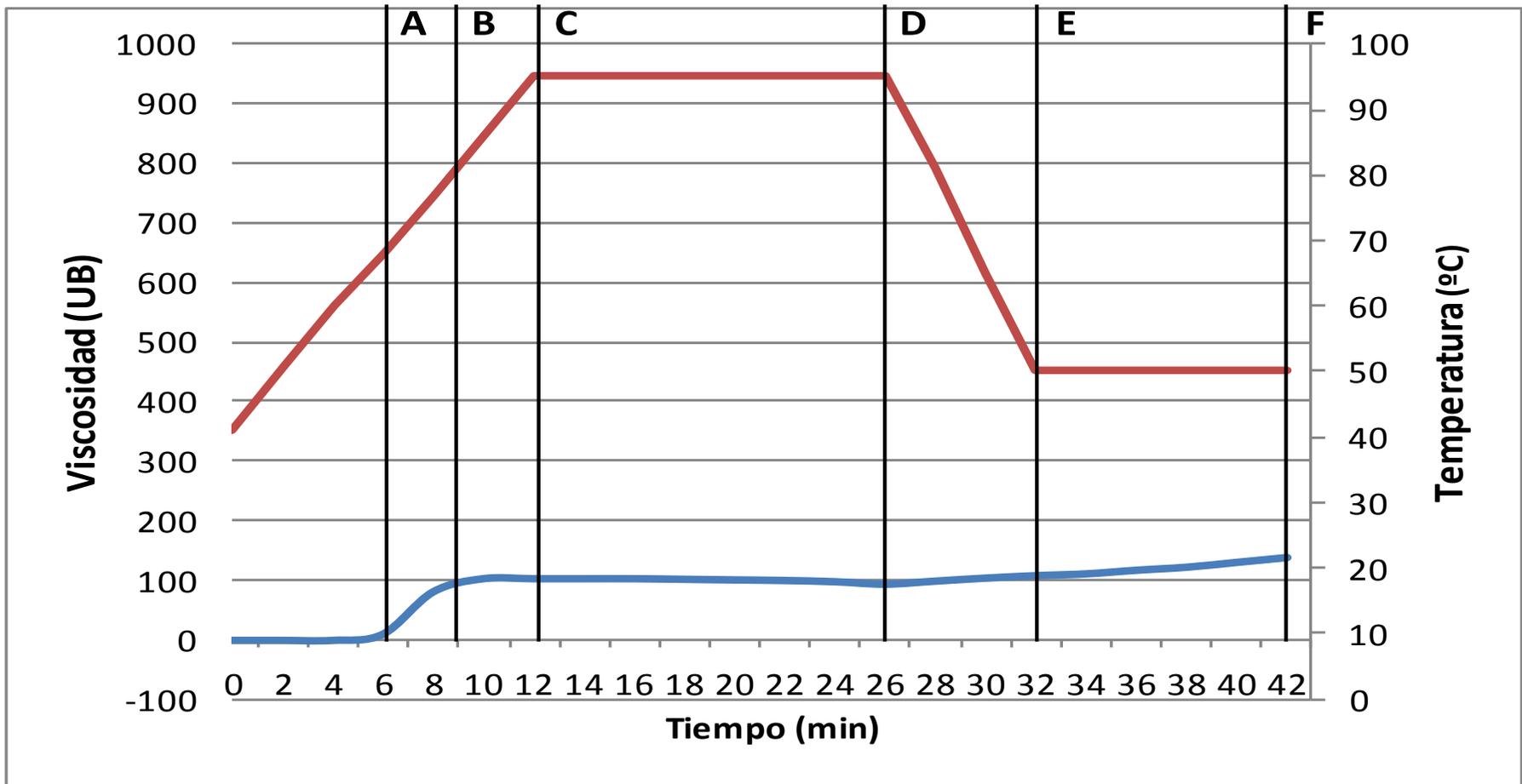


Figura 34. Perfil viscoamiliográfico obtenido para una suspensión de almidón pregelatinizado de plátano verde (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” al 7 %.

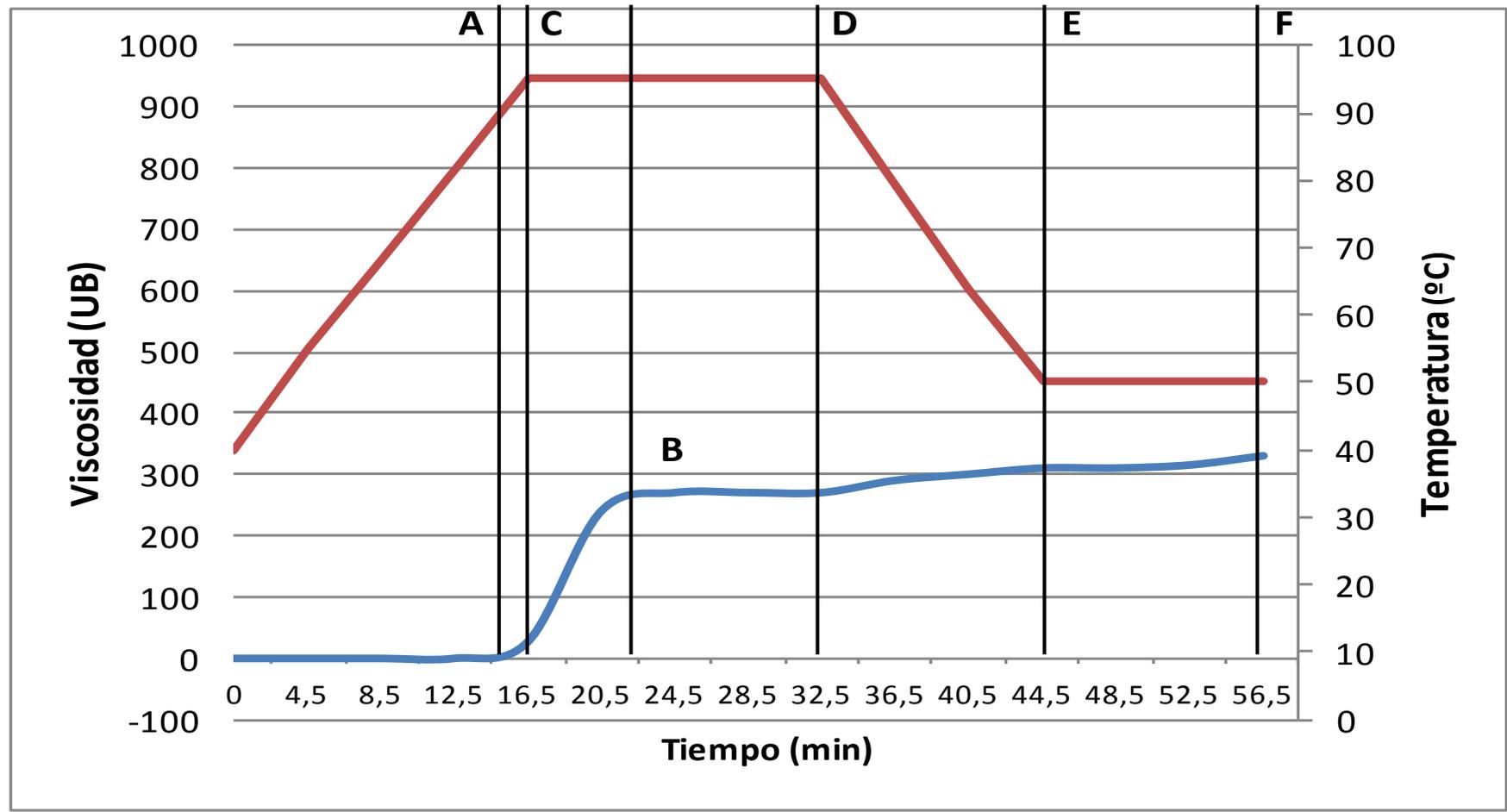


Figura 35. Perfil viscoamiliográfico obtenido para una suspensión de almidón fosfatado-acetilado de plátano verde (*Musa* AAB subgrupo plátano “Hartón”) “HC” al 7%.

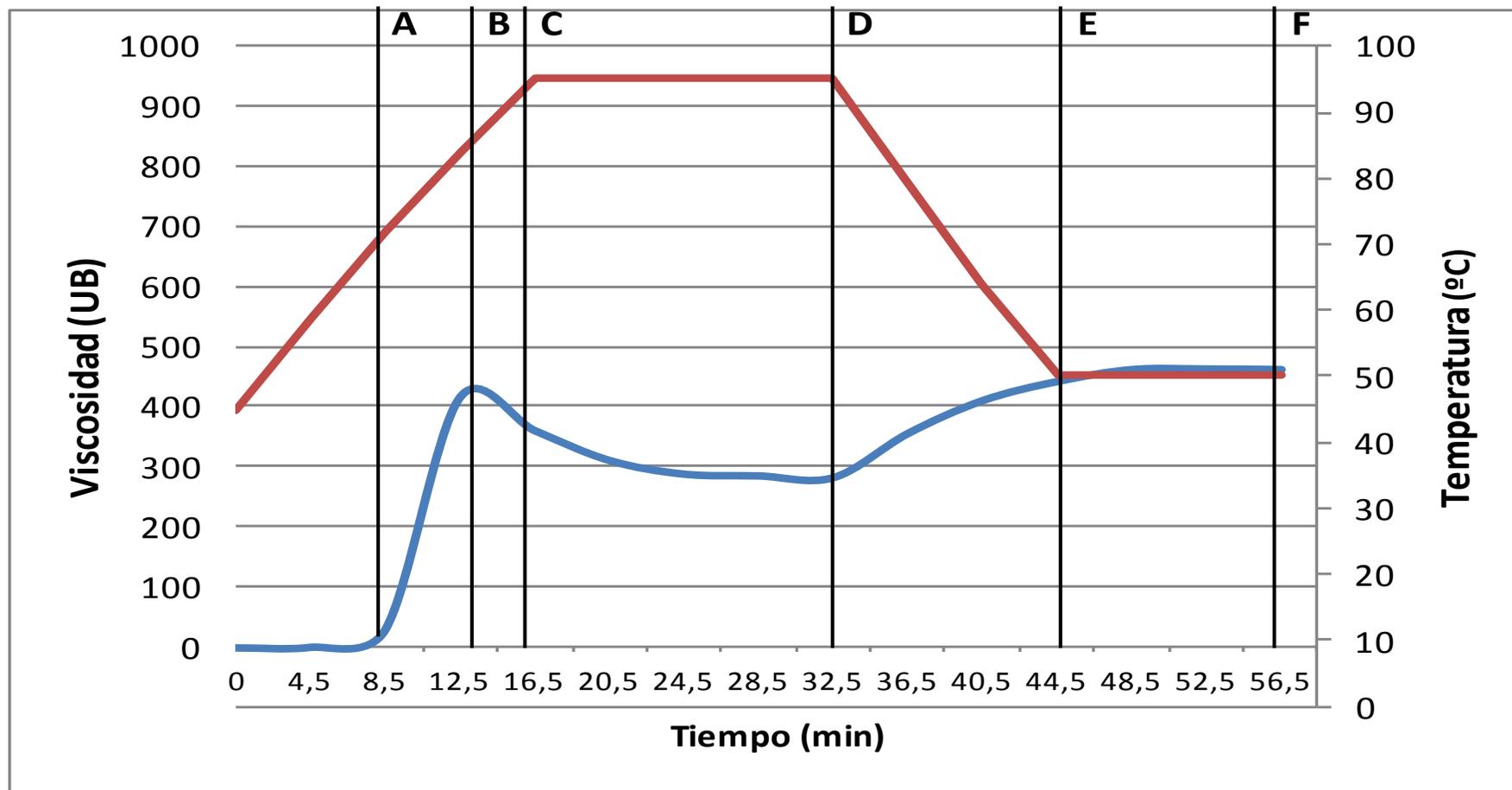


Figura 36. Perfil viscoamulográfico obtenido para una suspensión de almidón nativo de cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pino gigante”) “PG” al 7%.

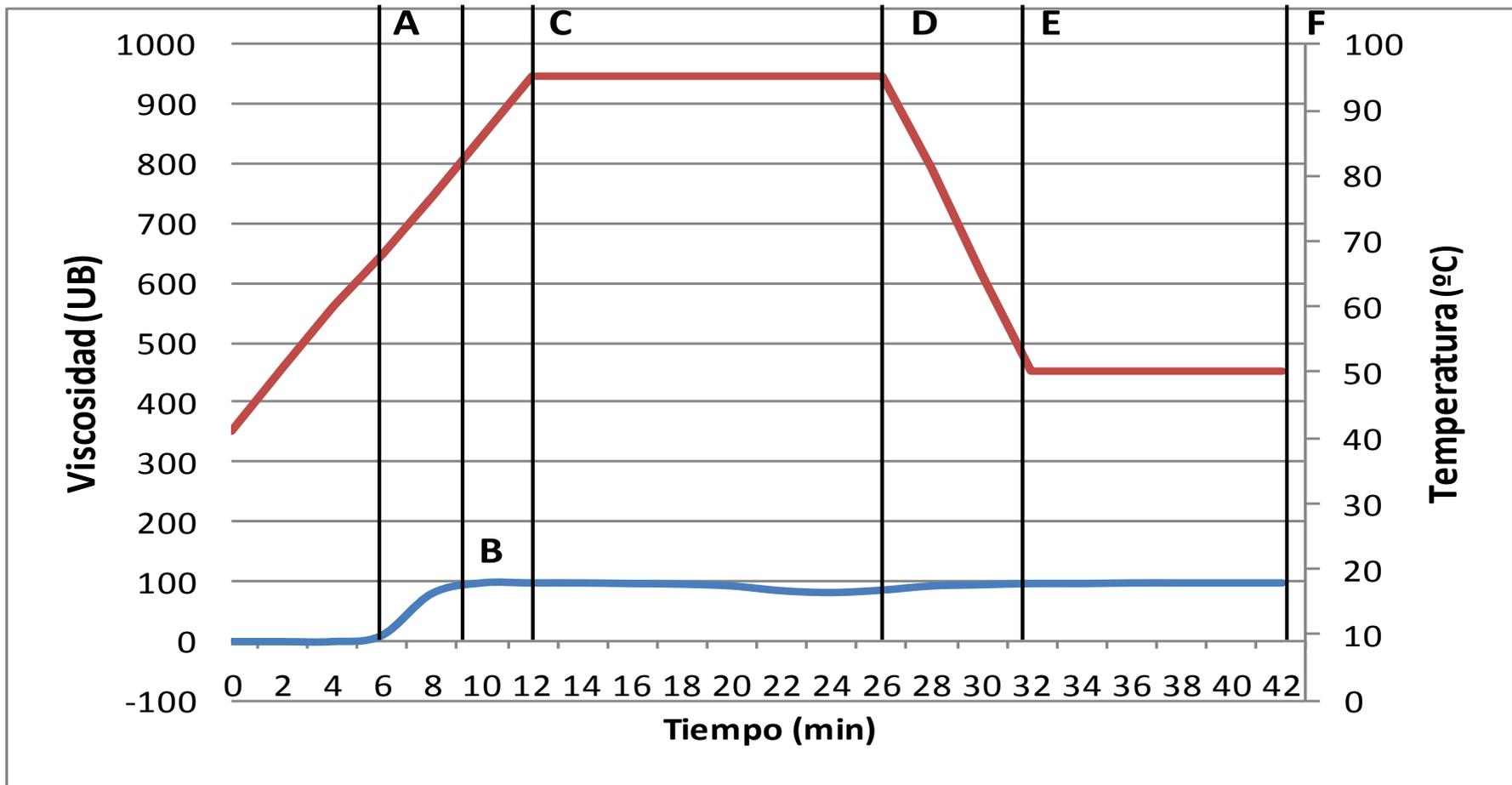


Figura 37. Perfil viscoamilográfico obtenido para una suspensión de almidón pregelatinizado de cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pino gigante”) “PG” al 7%.

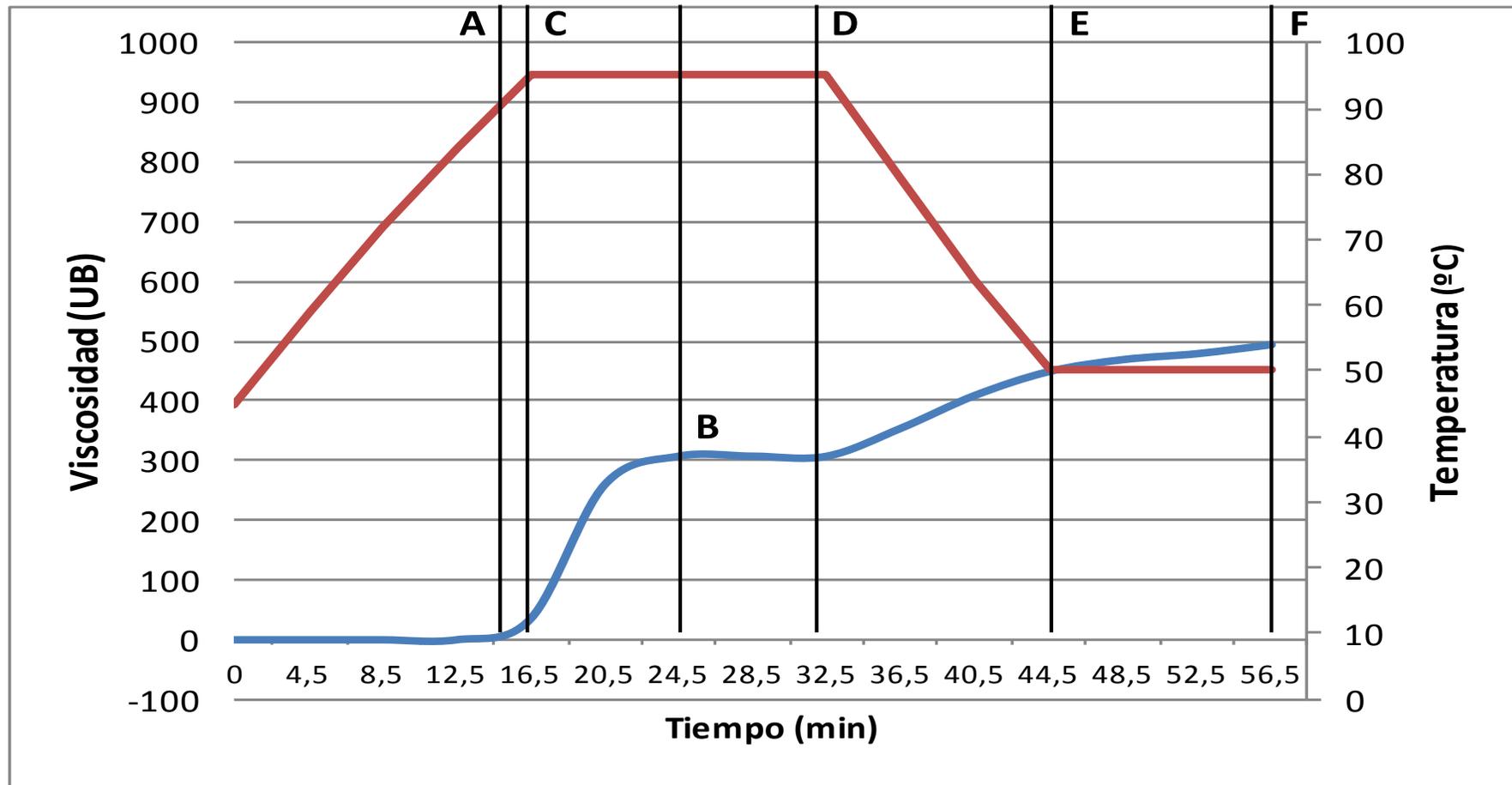


Figura 38. Perfil viscoamiliográfico obtenido para una suspensión de almidón fosfatado-acetilado de cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pineo gigante”) “PG” al 7%.

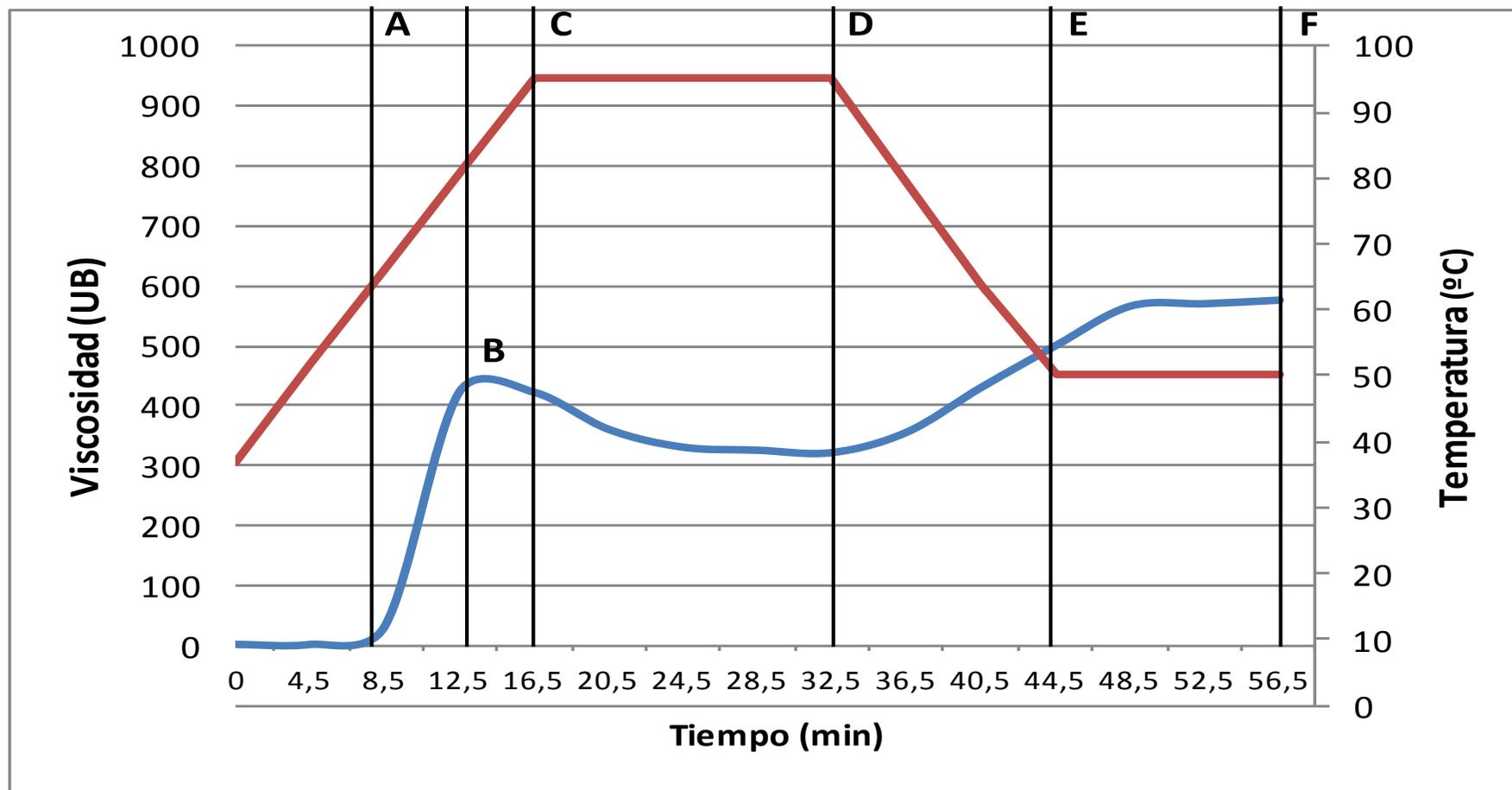


Figura 39. Perfil viscoamiliográfico obtenido para una suspensión de almidón nativo de cambur verde (*Musa* AAA “FHIA-01”) “F1” al 7%.

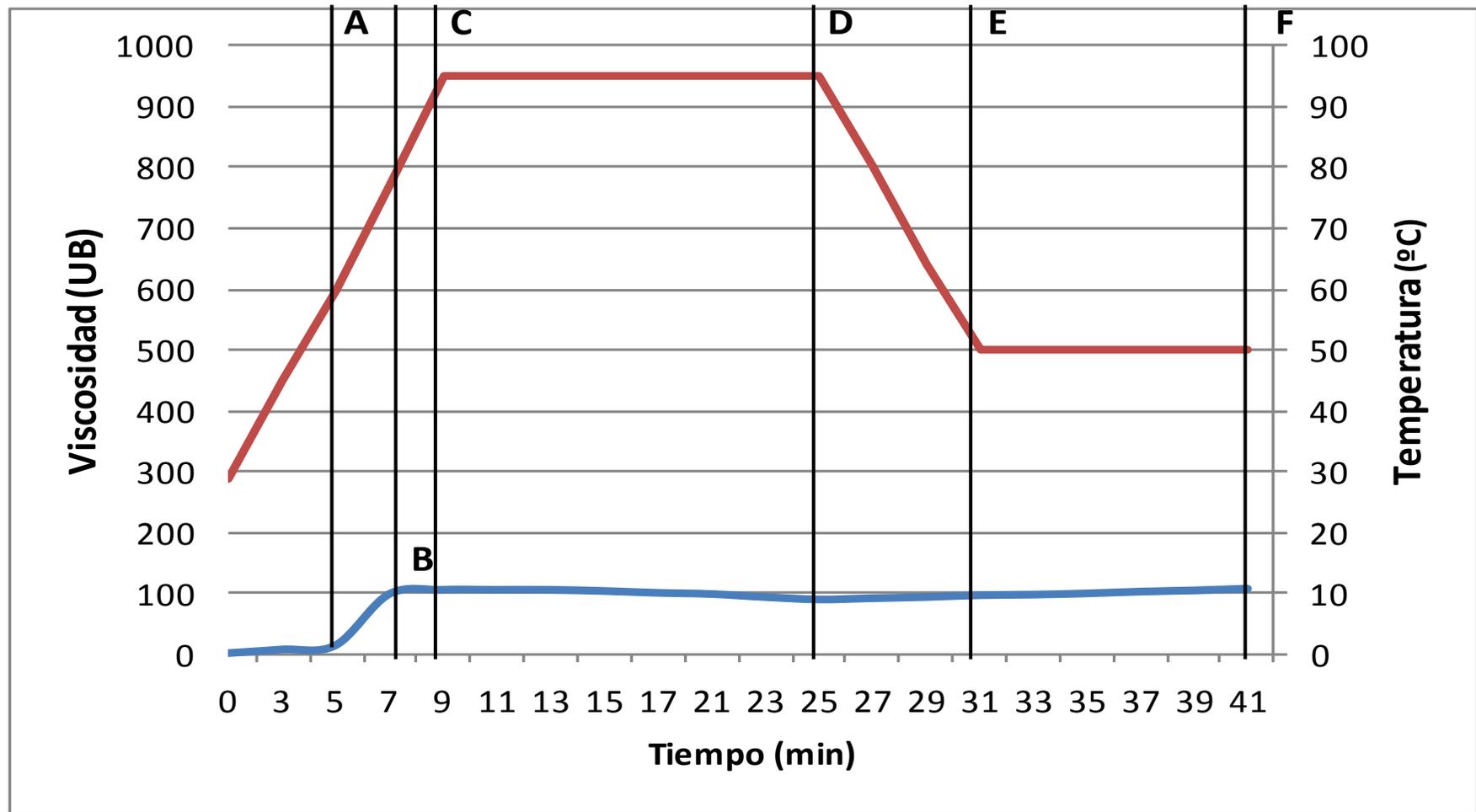


Figura 40. Perfil viscoamiliográfico obtenido para una suspensión de almidón pregelatinizado de cambur verde (*Musa* AAA “FHIA-01”) “F1” al 7%.

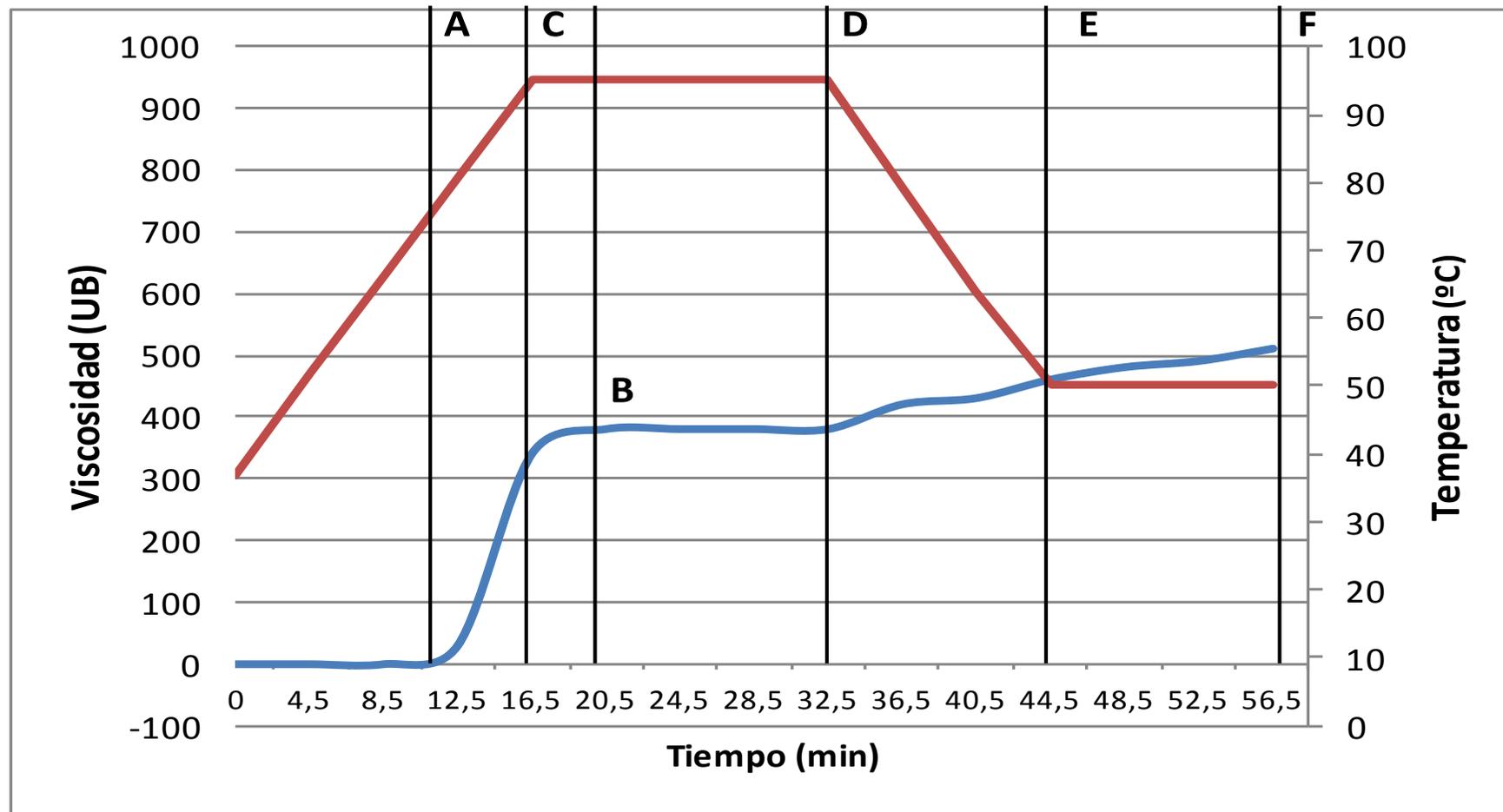


Figura 41. Perfil viscoamiliográfico obtenido para una suspensión de almidón fosfatado-acetilado de cambur verde (*Musa* AAA “FHIA-01”) “F1” al 7%.

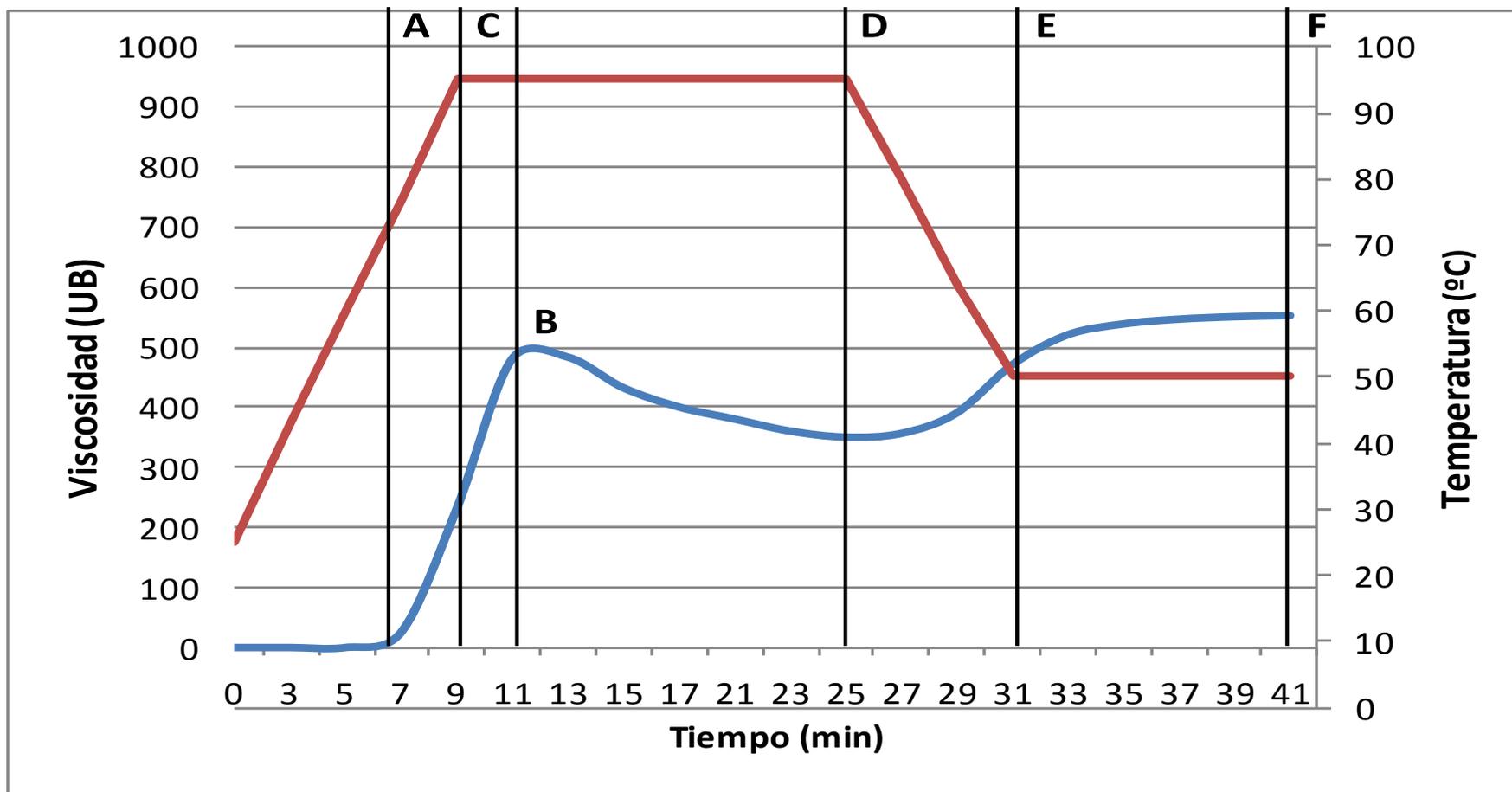


Figura 42. Perfil viscoamilográfico obtenido para una suspensión de almidón nativo de cambur verde (*Musa* AAA “FHIA-02”) “F2” al 7%.

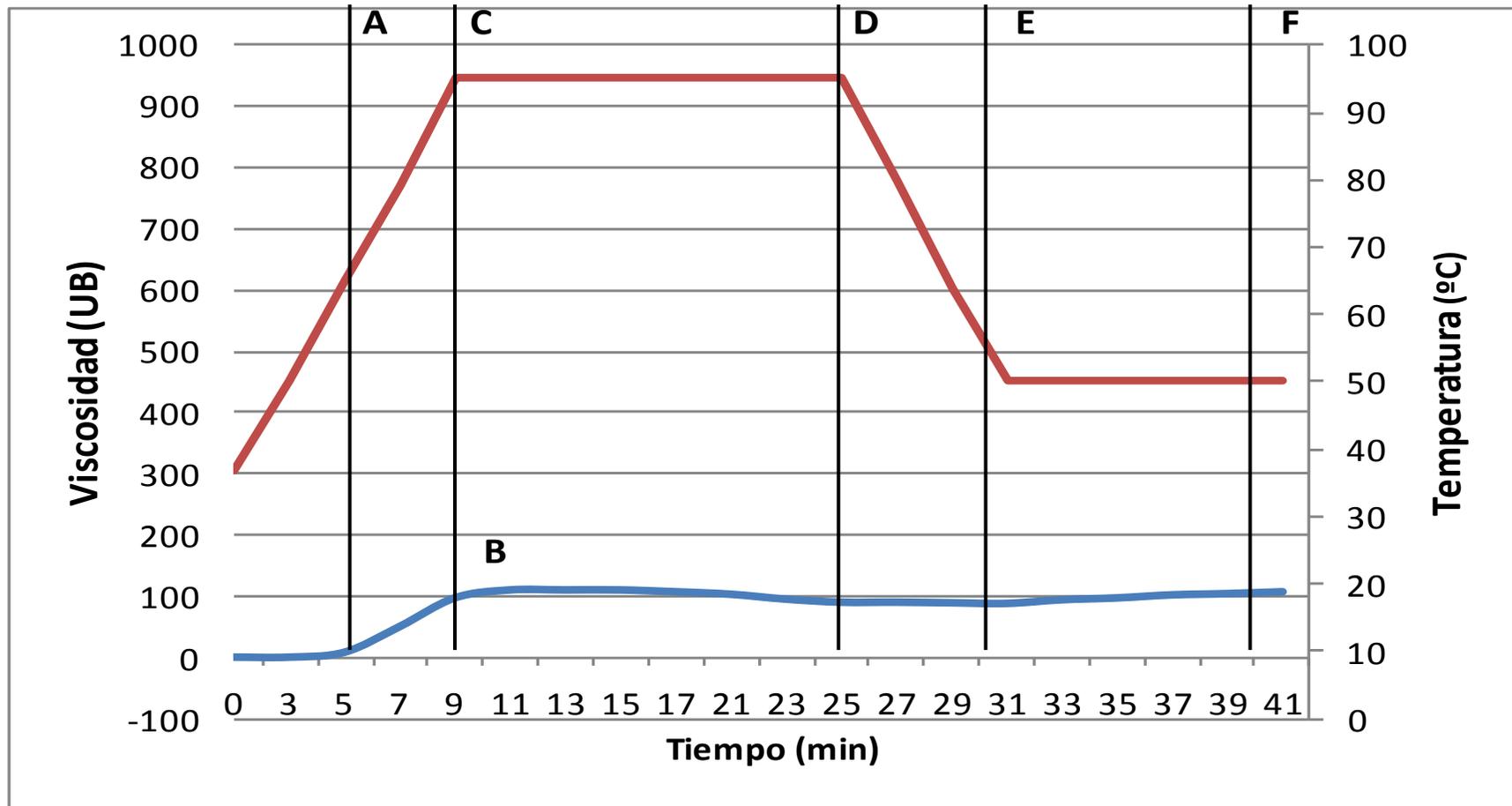


Figura 43. Perfil viscoamiliográfico obtenido para una suspensión de almidón pregelatinizado de cambur verde (*Musa* AAA “FHIA-02”) “F2” al 7%.

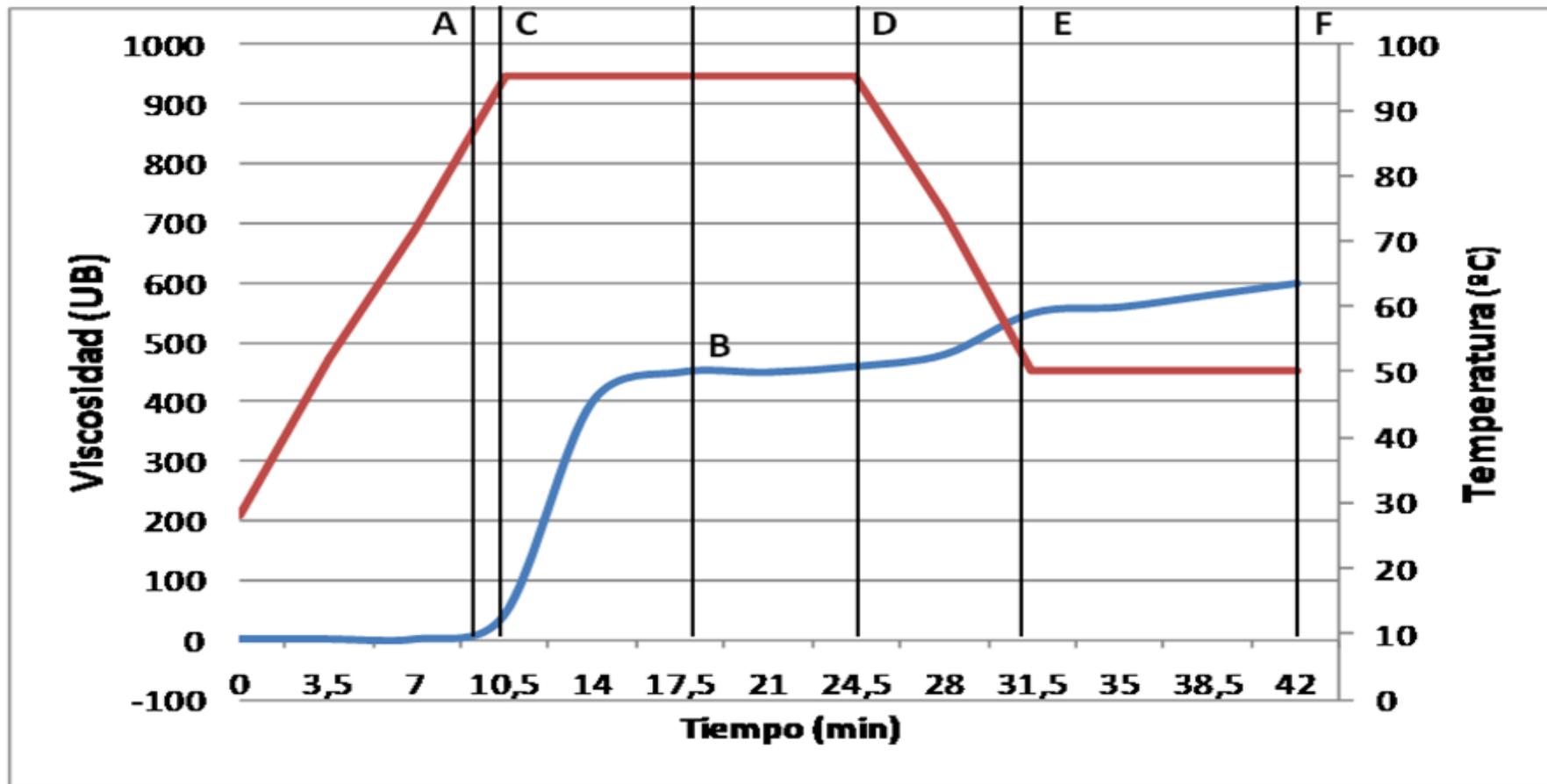


Figura 44. Perfil viscoamiliográfico obtenido para una suspensión de almidón fosfatado-acetilado de cambur verde (*Musa* AAA “FHIA-02”) “F2” al 7%.

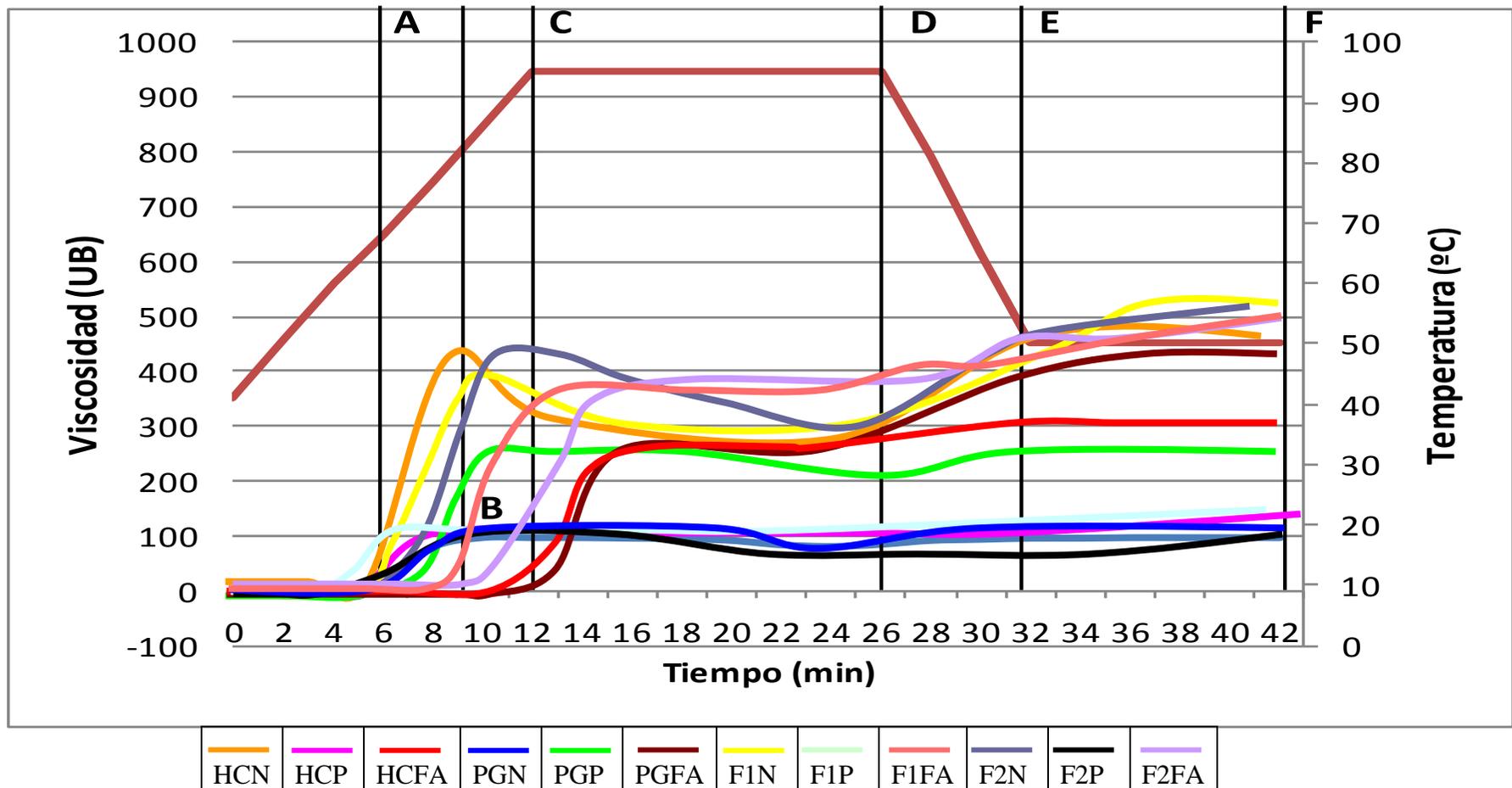


Figura 45. Perfil viscoamilográficas obtenido para las suspensiones de los almidones extraídos de plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pineo gigante”) “PG”; (*Musa* AAAB “FHIA-01”) “F1” y (*Musa* AAAB “FHIA-02”) “F2”.

amilopectina de gran longitud, debido a que éstas pueden formar estructuras de doble hélice que requieren de una gran cantidad de energía para alcanzar la disociación (Zhou *et al.* , 2002; Adebowale *et al.*, 2005; Lewandowicz *et al.*, 2000; Lewandowicz y Fornal, 1998; Singh y Singh, 2003). Resultados similares fueron reportados por Zamudio *et al.* (2010) quienes evaluaron suspensiones de almidones de plátano Macho, donde la temperatura inicial de gelatinización (TIG) de los almidones nativos fue de 64,3 °C, de igual forma Pacheco y Alemán (2010) en almidones nativos de topocho cuya TIG fue de 73,2 °C, del mismo modo Ordoñez (2012) en almidones de cambur FHIA-01 y FHIA-02 reportó la TIG de 64 y 60 °C respectivamente, señalando los autores que las diferencias existentes para la TIG, están determinadas por el peso molecular de las moléculas de almidón, la movilidad intragranular y la proporción de cadenas de amilopectina de gran longitud existentes, ya que éstas pueden formar estructuras de doble hélice que requieren de una gran cantidad de energía para alcanzar la disociación.

En lo que se refiere a la TIG de los almidones pregelatinizados para todas las muestras, se evidencia que fue menor al compararlos con sus respectivos controles (almidón nativo) como era de esperarse, la TIG fue para HCP= 72,5 °C a los 12,50 minutos; PGP= 67,4 °C a los 5,10 minutos; F2P= 64 °C a los 4,60 minutos y F1P= 58 °C a los 4,50 minutos; evidenciándose el mismo comportamiento experimentado por los almidones nativos (HCN<PGN<F2N<F1N) ya que, el que requirió mayor temperatura para debilitar la fuerzas inter e intragranulares fue el almidón de plátano verde pregelatinizado. Cabe destacar que a pesar que la modificación con doble tambor modificó la TIG para todas las muestras, ésta es superior a la reportada en la literatura, dicho comportamiento se podría explicar a que en los almidones pregelatinizados donde

no se aplica ninguna fuerza de corte a los gránulos, el debilitamiento de las fuerzas inter e intragranular es en menor proporción en comparación con los almidones pregelatinizados por extrusión (Colonna *et al.*, 1987) y a la presencia de gránulos de almidón intactos menor al 1% tal como se corrobora con la MLP. Resultados similares fueron encontrados por González y Pérez (2003) en almidón pregelatinizado de yuca, el cual presentó una TIG de 30°C, considerando que la misma correspondería a la fracción de gránulos de almidón que no gelatinizaron durante el tratamiento térmico con el deshidratador de doble tambor. Sin embargo, se comprueba el grado de gelatinización de las mismas así como su característica de instantáneas pues reportaron valores de viscosidad inicial de HCP =8,5 UB; PGP = 8,25 UB; F1P = 15 UB y F2P =16 UB. además de esto los tiempos requeridos para alcanzar la temperatura inicial de gelatinización fueron muy cortos.

Con respecto a los almidones fosfatado-acetilado para todas las muestras, experimentaron un aumento de TIG, efecto que corresponde con el tipo de modificación. Los almidones con mayor TIG lo reportó el HCFA con 90,1 °C a los 16,5 minutos comportamiento que se notó en menores valores para el resto de las muestras (PGFA= 91 °C a los 15,5 minutos; F2FA= 85,2 °C a los 10,5 minutos; F1FA= 75,2 °C a los 12,5 minutos), evidenciándose una mayor temperatura y un mayor tiempo requerido para alcanzar la temperatura inicial de gelatinización en comparación con los almidones nativos para cada muestra. Las altas TIG y tiempos requeridos por estos almidones corrobora el grado de sustitución por entrecruzamiento, el cual genera la formación de enlaces intermoleculares, que ocasiona la disminución de la movilidad de las cadenas de amilosa y amilopectina, pues son covalentemente unidas a una u otra cadena por los grupos fosfatos (Singh *et al.*, 2007). Resultados similares fueron encontrados por

Aparicio *et al.*, (2003) y Aparicio *et al.*, (2010) quienes reportaron la temperatura inicial de gelatinización de almidón de plátano (*Musa cavendish*) entrecruzado de 76 °C y una TIG de 86 °C respectivamente, las cuales son menores a los valores reportados en el presente estudio, esta diferencia podría atribuirse al grado de sustitución logrado en el almidón, en este sentido los autores mencionados reportaron un grado de sustitución menor (0,8) y (2,9%) respectivamente, al alcanzado en este estudio (3,7%).

Con respecto a la viscosidad inicial se evidencia en la Tabla 15, que todas las tratamientos reportaron valores de 0 UB a excepción de los almidones pregelatinizados con valores en el almidón HCP= 8,5 UB; PGP= 8,25 UB; F1P= 15 UB y F2P= 16 UB, corroborando de esta manera el efecto del tratamiento térmico, el cual ocasiona la pérdida de la estructura del granulo y por lo tanto, la disponibilidad del material amiláceo al medio circundante que facilita la absorción de agua y por ende aumento en la viscosidad de la pasta formada.

En cuanto al parámetro de viscosidad máxima (B) los resultados obtenidos indican que las muestras de almidón nativo (F2N; F1N; HCN y PGN), fueron las que presentaron los mayores valores de viscosidad máxima, iguales a 483; 443; 425 y 421 UB respectivamente; mientras que las suspensiones de almidón pregelatinizado (HCP= 305 UB; PGP= 298 UB; F1P= 312 UB y F2P= 328 PG) y fosfatado-acetilado (HCFA= 288 UB; PGFA= 302 UB; F1FA= 383 UB y F2FA= 450 UB) desarrollaron valores de viscosidad más bajos. Sin embargo, los almidones nativos tienen un poder de hinchamiento menor que los almidones pregelatinizados, pero tienen en su mayoría la presencia de almidones intactos, los cuales tienen una mayor cantidad de enlaces débiles y un menor grado de cristalinidad y por lo tanto, gránulos muy frágiles que se destruyen rápidamente y facilita el poder de hinchamiento y la capacidad de absorción

de agua y por ende una mayor disrupción granular, produciéndose más componentes lixiviados hacia el medio circundante y una mayor viscosidad en la pasta formada (Pacheco y Alemán, 2010).

En el caso específico de los almidones pregelatinizados, es importante señalar que si bien estos almidones presentaron los mayores valores de absorción de agua, solubilidad y poder de hinchamiento de todos los almidones estudiados, no mostró el mayor valor de viscosidad máxima. Esto pudo deberse a la baja o nula proporción de gránulos de almidón intactos causado por el tratamiento térmico el cual ocasiona la fragmentación de la estructura intragranular, lo que limitó la absorción de agua y el subsecuente hinchamiento granular, fenómenos necesarios para el desarrollo de esta viscosidad. También podría deberse a la depolimerización de las macromoléculas presentes. Asegura Colonna *et al.* (1984), que la destrucción de la estructura granular es el principal evento físico que ocurre durante la pregelatinización del almidón y que también se produce una degradación macromolecular del polisacárido. Asimismo, las propiedades reológicas resultantes del almidón pregelatinizado están determinadas por el tamaño y la fracción volumétrica de las partículas hinchadas, así como por el tamaño de las macromoléculas solubilizadas y de su posible agregación (González y Pérez, 2003).

Con respecto a la viscosidad máxima experimentada por los almidones fosfatado-acetilado, no se observó un pico de viscosidad en los patrones de RVA, debido al nivel de sustitución por entrecruzamiento y la consecuente inhibición del hinchamiento y absorción de agua de los gránulos. Algunos autores sugieren que durante la modificación por entrecruzamiento, es posible que el efecto del proceso de la reacción química genere la pérdida del orden estructural dentro del gránulo, lo que reduce la

proporción de gránulos de almidón que pudieran ser gelatinizados (Yook *et al.*, 1993; Jyothi *et al.*, 2006; Morikawa y Nishinari, 2000). Cabe destacar que estos almidones no tienen una viscosidad pico sino más bien un incremento progresivo y continuo en la viscosidad a través de todo el proceso de cocinado (Thomas y Atwell, 1999). Esto se confirma también; con lo que mencionan Marusza y Tomasik (1991) que cuando el almidón tiene un alto grado de sustitución al utilizar trimetafosfato de sodio, provocará un descenso en la viscosidad, debido posiblemente a una cantidad mayor de enlaces con los grupos fosfatos que impedirán la formación de la hélice del almidón. Resultados similares fueron reportados por Rodríguez *et al.* (2010), en almidones de plátano entrecruzados, por González y Pérez (2003) al evaluar el perfil amilográfico de los almidones pregelatinizados de yuca y Sívoli (2009) en almidones fosfatado-acetilado de yuca.

Los parámetros de gelatinización son controlados en parte por la estructura molecular de la amilopectina, la composición del gránulo y la arquitectura granular. Aparentemente el comportamiento durante la gelatinización está determinado principalmente por la estructura molecular de la región cristalina, es decir, por la distribución de las cadenas más cortas de amilopectina (con grados de polimerización de 6 a 11), y no por la proporción bajo la cual se encuentran las fracciones de amilosa y amilopectina en la región cristalina (Tester y Morrison, 1990; Nkala *et al.*, 1994; Niba *et al.*, 2001a; Moorthy, 2002). En términos de aplicación en la industria alimentaria, la funcionalidad del almidón está relacionada con sus características de gelatinización y pasting. Cuando se calienta en presencia de agua, los gránulos de almidón se hinchan dramáticamente, así como ocurre la pérdida de su cristalinidad, a una determinada temperatura. La amilosa lixivia de los gránulos a medida que el gránulo se hincha, a medida que continúa el hinchamiento resulta en la ruptura de la estructura de los

gránulos y en la solubilización (al menos parcial) de la amilosa y de algunas moléculas de amilopectina. La red de moléculas de amilosa y amilopectina, los gránulos hinchados y las estructuras de almidones fragmentados son responsables de las características de viscosidad y de gel (Njitang y Mbofung, 2003; Zhang *et al.*, 2005).

Durante el tiempo en el cual la temperatura se mantuvo a 95°C por 15 min, la viscosidad del sistema disminuyó gradualmente, (Tabla 15). Esto es debido posiblemente a que las moléculas de almidón solubles se orientan en la dirección en la cual es agitado el sistema, originándose una disminución en la viscosidad, fenómeno conocido como "Shear Thining" (Bou Rached *et al.*, 2006).

Los bajos valores de viscosidad máxima (B) obtenidos para los almidones fosfatado-acetilado de plátano y cambur verde analizados (Tabla 15), en comparación con los valores de viscosidad que desarrollan los almidones nativos y pregelatinizados indican que estos almidones no pueden ser considerados como buenos agentes espesantes; no obstante, la capacidad de las suspensiones de almidón nativo y modificado para mantener su viscosidad constante durante el calentamiento, sugiere su posible utilización en sistemas o formulaciones de alimentos donde se requiera un gel de consistencia estable a los procesos de transferencia de calor, tales como pasteurización, esterilización y deshidratación, por lo que podrían ser un ingrediente idóneo en la elaboración de productos como salsas sometidas a calentamiento, aderezos para ensalada, sopas instantáneas, colados y pudines, entre otros.

El término estabilidad o "breakdown" se entiende como la diferencia entre la viscosidad máxima y la viscosidad obtenida después del período de calentamiento constante. Es un índice que permite evaluar la fragilidad de los gránulos de almidón

frente al calentamiento continuo y bajo estrés mecánico (Rasper, 1980). Si el valor de estabilidad es alto, indica que habrá menor resistencia de los gránulos hinchados a la desintegración mecánica y menor estabilidad de la suspensión de almidón durante el proceso de cocción (Mazur *et al.*, 1957; Ortega y Eliasson, 2001; Olayide, 2004).

Durante el calentamiento constante, la viscosidad de las suspensiones de almidón puede aumentar, disminuir o permanecer constante. Si la viscosidad aumenta, se debe probablemente a que todavía existen suficientes gránulos de almidón intactos; mientras que si disminuye, puede suponerse que los gránulos hinchados son frágiles y no resisten el proceso de agitación y calentamiento. En cambio, si la viscosidad permanece constante, atiende a que los gránulos de almidón presentan una gran estabilidad frente a la desintegración mecánica (Rasper, 1980; Pitchon *et al.*, 1981; González, 1997; Rao *et al.*, 1997).

En el Tabla 15, se observan también los valores de estabilidad (breakdown), en los almidones nativos este valor fue superior que en el almidón pregelatinizado y este al fosfatado-acetilado para todas las muestras. Esto confirma nuevamente la mayor capacidad de hinchamiento que tienen los gránulos de almidón nativo, su menor estabilidad durante la cocción, lo cual se ve reflejado al mostrar una marcada disminución de la viscosidad una vez alcanzado el valor máximo. De ello se puede inferir que los gránulos son muy frágiles y un menor grado de cristalinidad y por tanto, son más susceptibles a la ruptura por las fuerzas térmicas o mecánicas aplicadas y se destruyen fácilmente con la pérdida de viscosidad en el sistema. Resultados que concuerda con lo expuesto por Pacheco y Alemán (2010) en almidones de topocho nativo y por Ordóñez (2012) en almidones de cambur verde.

El comportamiento del parámetro estabilidad experimentado por los almidones pregelatinizado para todas las muestras, indica una baja estabilidad pues mostraron valores en los almidones de 9 UB para HCP; 10 UB para PGP; 16 UB para F1P y 17 UB para F2P, lo cual podría explicarse por la presencia de gránulos de almidón intactos < 1% (ver MLP), que no sufrieron daño por el tratamiento térmico, los cuales al hincharse son frágiles y no resisten el proceso de agitación y calentamiento, González y Pérez (2003) reportaron el mismo comportamiento en almidones pregelatinizados de yuca.

Caso contrario ocurre con el parámetro de estabilidad reportado por los almidones fosfatado-acetilado para todas las muestras, estos presentaron valores de estabilidad iguales a 0 UB. Los resultados obtenidos indican que los gránulos de almidón fosfatado-acetilado son más resistentes a condiciones de alta temperatura y fuerza de corte, atribuido a la formación de los enlaces cruzados entre las moléculas del almidón los cuales refuerzan los gránulos hinchados, por lo que podrían ser utilizados en la formulación de productos alimenticios que requieran mantener su viscosidad estable durante períodos de calentamiento prolongado y en condiciones de agitación mecánica constante. Resultados similares fueron reportados por Sívoli, (2009) en almidones de yuca fosfatado-acetilados.

Por otra parte, se produjo un aumento en la viscosidad al final del período de enfriamiento (E) y al final del proceso (F) para cada una de las suspensiones de los almidones en estudio (Tabla 15). Este nuevo y gradual incremento de la viscosidad durante el período de enfriamiento es debido a que se restablecen los enlaces de hidrógeno entre las moléculas de amilosa y amilopectina, así como a la reasociación lineal que adquieren las moléculas de amilosa que fueron liberadas por los gránulos

durante el calentamiento, dando lugar a la consistencia tipo gel, además se debe a la pérdida de calor en el sistema y al proceso de retrogradación que se genera. El incremento de la viscosidad durante el período de enfriamiento indica una tendencia de varios constituyentes presentes en la pasta caliente (gránulos hinchados, fragmentos de gránulos hinchados, moléculas de almidón coloidalmente - y molecularmente - dispersas) para asociar o retrogradar, mientras la temperatura de la pasta disminuye (Singh *et al.*, 2003).

Por otro lado, la retrogradación o “setback” se define como la diferencia entre la viscosidad máxima y la viscosidad a 50°C, expresada en unidades Brabender, y es un índice utilizado para expresar la tendencia de los almidones a retrogradar, en consecuencia, mientras mayor sea el valor de este índice, mayor será la tendencia de los componentes de la pasta de almidón a retrogradar, producto del incremento en la viscosidad de la suspensión durante el enfriamiento (Rasper, 1980; Ravindran y Wanasundera, 1992; Satin, 1998).

La diferencia de la viscosidad a 50° C x 10 minutos (F) con respecto a la máxima viscosidad (B) es denominado retrogradación o Setback, los resultados demuestran que todas las suspensiones de almidón de plátano y cambur verde estudiadas presentaron una tendencia a incrementar su viscosidad durante el enfriamiento, desde los 95 hasta los 50 °C, pero fundamentalmente las muestras de almidón fosfatado-acetilado para todas las muestras (HCFA= 24 UB; PGFA= 197 UB; F1FA= 120 UB y F2FA= 149 UB) y de almidón nativo (HCN= 48 UB; PGN= 40 UB; F1N= 154 UB y F2N= 69 UB), ya que los valores de setback para los almidones pregelatinizados fueron de HCP= 8 UB; PGP= 0 UB; F1P= 2 UB y F2P= -5 UB.

El mayor valor de “setback” reportado por los almidones fosfatado-acetilado se evidencia en mayor grado para todas las muestras de cambur verde posiblemente esta diferencia con respecto al almidón de plátano verde se deba a el contenido de amilosa, pues está le confiere una mayor tendencia a retrogradar. Además, cabe destacar, que de acuerdo a lo expuesto por Miyazaki *et al.* (2000), la retrogradación también está determinada por el peso molecular de las cadenas de amilosa y la longitud de las cadenas de amilopectina, ya que almidones con moléculas de amilosa de bajo peso molecular y largas cadenas de amilopectina, tienden a retrogradar con mayor facilidad.

No obstante, los altos valores de setback para estos almidones de cambur verde es atribuido a la presencia de gránulos de almidón muy resistentes, que se encuentran sin fragmentar, embebidos en la red de amilosa, además el entrecruzamiento ocasiona que las moléculas de almidón se encuentren muy cercanas entre si durante la formación del gel y que los grupos introducidos interactúen con las cadenas de almidón generando fuerzas de atracción entre las moléculas, lo que permite que los grupos introducidos puedan actuar como núcleos cristalinos y durante el enfriamiento de la suspensión se da el crecimiento de los cristales, la cual se produce en un alto nivel de cristalización (Takeda *et al.*, 1986; Roger y Colonna, 1992; Hoover, 2001).

Por el contrario, en suspensiones de almidones pregelatinizados los valores de “setback” son bajos para todas las muestras, pero negativo en el caso específico del almidón pregelatinizado de cambur verde (*Musa* AAAB “FHIA-02”), puesto que la viscosidad de los mismos disminuye en el enfriamiento de las pastas, lo que evidencia que en este tipo de almidones, aparentemente el fenómeno de retrogradación es muy lento.

Comportamiento similar a los almidones bajo estudio fue reportado por Pérez, (1997) en almidones de plátano el setback fue menor que el almidón de maíz, del mismo modo Rincón *et al.* (2000) y Jayakody *et al.* (2007) cuyo setback en almidones de ñame osciló entre 60 y 350 UB, mientras que en almidones de maíz este osciló entre 141 y 821 UB (Singh y Singh, 2007; Liu *et al.*, 2008) encontrándose por encima que los reportados en este trabajo de investigación, hecho que es atribuible a la reasociación de las moléculas de amilosa en forma paralela, como consecuencia de la formación de puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo de dichas moléculas, propiciando la formación de agregados de baja solubilidad, permitiendo así la formación de un gel rígido, susceptible de experimentar sinéresis.

4.6.- Propiedades Nutricionales

4.6.1.- Digestibilidad “in vitro” de los almidones nativos y modificados de plátano y cambur verde.

El almidón era considerado hasta hace algunas décadas atrás, completamente digerible y absorbible en el intestino delgado de los seres humanos; sin embargo, diferentes trabajos de investigación demostraron que la digestibilidad de este polisacárido puede variar ampliamente (Theurer, 1992; Björck *et al.*, 1994). De hecho, la forma del alimento, el arreglo supramolecular del almidón, el grado de cristalinidad y la retrogradación, han sido identificados como los principales factores determinantes del proceso de digestión y absorción del almidón en el intestino delgado (Tovar *et al.*, 1991; Hernández *et al.*, 2008).

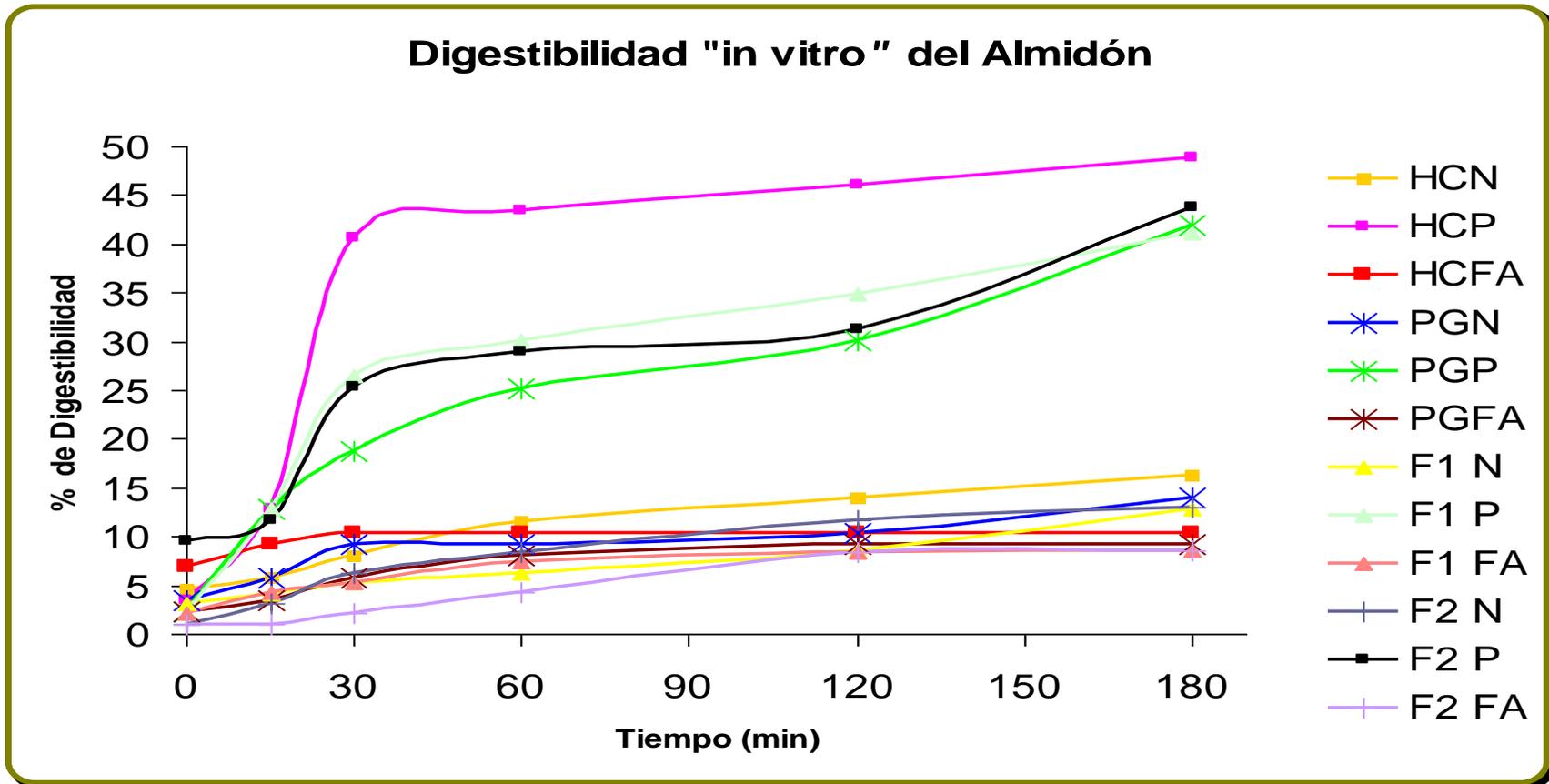
El estudio de la hidrólisis enzimática del almidón *in vitro* permite obtener una información relativa de la biodisponibilidad del almidón *in vivo*. Por ello, las

evaluaciones nutricionales de materiales amiláceos *in vivo*, tienden a ser validadas por ensayos de digestibilidad enzimática *in vitro*, que se refieren al porcentaje (%) de digestibilidad aparente de la materia seca, en la dieta de referencia, siendo diferente el comportamiento según el complejo a tratar, tales como almidones nativos, modificados y con alto contenido de proteínas o grasas (Hoover, 2001).

En este sentido, se indica que en función de la susceptibilidad de los almidones a la hidrólisis enzimática por acción de la α -amilasa pancreática, la velocidad de digestión *in vitro*, se clasifica en rápidamente digerible, cuando el sustrato amiláceo en incubación con la enzima a la temperatura de 37 °C, se convierte en maltosa en 20 min, lentamente digerible, si bajo las condiciones anteriores se convierte en glucosa a los 120 min y almidón resistente, si el sustrato amiláceo se resiste a la acción de las enzimas digestivas (Englyst y Cummings, 1985; Englyst *et al.*, 1992).

Cabe destacar que, la digestibilidad de los almidones nativos se ha atribuido a la interacción de muchos factores, como la fuente de almidón, tamaños de los gránulos, relación del contenido de amilosa/amilopectina, grado de asociación molecular entre los componentes del almidón, grado de cristalinidad (Cone y Wolters, 1990; Franco *et al.*, 1992), longitud de la cadena de amilosa, y la presencia de lípidos que puedan formar complejos con la amilosa (Cummings y Englyst, 1995).

La susceptibilidad de los almidones nativos y modificados de plátano y cambur verde, a la acción de la α -amilasa pancreática, se presenta en la Figura 46, donde se puede observar que para cada una de las muestras evaluadas, se incrementaba el porcentaje de hidrólisis a medida que transcurría el tiempo de incubación enzimática, es



N= Almidón nativo; P= Almidón pregelatinizado; FA= Almidón fosfatado-acetilado.

Figura 46. Digestibilidad “in vitro” de los almidones nativos, pregelatinizados y fosfatado-acetilado de plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “pineo gigante”) “PG”; (*Musa* AAAB “FHIA-01”) “F1” y (*Musa* AAAB “FHIA-02”) “F2”.

decir, que el mayor grado de amilólisis *in vitro*, para los almidones en estudio se obtuvo a las 3 horas de incubación por α -amilasa, con valores comprendidos entre 8,52 y 48,90%. No obstante, a pesar de que el grado de hidrólisis se incrementaba con el tiempo, el comportamiento observado para cada una de las muestras y tratamientos fue diferente.

Es importante señalar que los almidones de plátano y cambur verde experimentaron diferentes respuestas a la tasa de hidrólisis por α -amilasa pancreática, observándose para todos los tratamientos que el almidón de plátano presentó mayor tasa de digestibilidad, atribuido a las diferencias en el tamaño de gránulo, en el grado de cristalinidad y en el grado de interacción entre las moléculas de amilosa, y entre las cadenas de amilosa y amilopectina, asegura Guzman (2011), que estos son los principales factores responsables de la susceptibilidad de los gránulos de diferentes variedades de musáceas a la acción de α -amilasa pancreática porcina.

Para el caso de los almidones nativos y los almidones pregelatinizados (Figura 36), la tasa de hidrólisis aumentó lentamente hasta alcanzar los 30 minutos de incubación respectivamente, ya que para tiempos superiores a éste, el incremento en la tasa de digestión *in vitro* se hizo más evidente. Estos resultados sugieren que la enzima α -amilasa pancreática, empleada para la digestión de las muestras, comienza a expresar su actividad hidrolítica a los 30 minutos de incubación; sin embargo, cabe destacar que conforme aumenta el tiempo de incubación, la tasa de hidrólisis sigue en aumento, porque se incrementa la actividad enzimática, lo cual se traduce en un mayor número de enlaces glucosídicos hidrolizados, siempre y cuando no se agote el sustrato (Belitz y Grosch, 1985; Englyst *et al.*, 1992; Gallant *et al.*, 1992).

En cambio para los almidones modificados fosfatado-acetilado, el comportamiento fue diferente; ya que si bien, la tasa de hidrólisis también aumentaba con el tiempo (Figura 36), ésta se hacía prácticamente constante después de los 120 minutos de incubación enzimática. Este comportamiento sugiere que la enzima α -amilasa, aún después de 3 horas de incubación no fue capaz de incrementar su actividad y provocar la ruptura de un número importante de enlaces glucosídicos, debido a que la modificación empleada provocaron cambios en la estructura química de los polímeros o moléculas que constituyen el almidón, incrementando su resistencia a la hidrólisis enzimática, esto es producto de la presencia de los grupos mono o bifuncionales formados durante el entrecruzamiento (Pérez y Pacheco, 2005).

El mayor porcentaje de hidrólisis (a las 3 horas de incubación), se obtuvo en las muestras de almidón pregelatinizado (HCP= 48,90 %; PGP= 42,02 %; F1P= 41,19 %; F2P= 43,74 %); mientras que para las muestras de almidones nativos y fosfatado-acetilado los valores de hidrólisis, obtenidos una vez transcurrido el tiempo, fueron más bajos, (HCN= 16,36%; PGN= 13,96%; F1N= 12,89%; F2N= 12,94%) y (HCFA= 10,38%; PGFA= 9,21%; F1FA= 8,52%; F2FA= 8,48%), respectivamente.

En cuanto a los almidones pregelatinizado, su elevado porcentaje de hidrólisis se atribuye al tipo de modificación empleada ($T= 152\text{ }^{\circ}\text{C}$), ya que de acuerdo a lo expuesto por Snow y O'Dea, (1981); Holm *et al.*, (1985) y Osorio *et al.*, (2002), el proceso de gelatinización incrementa la susceptibilidad de los gránulos de almidón a la hidrólisis enzimática por α -amilasa pancreática porcina, producto de la ruptura y desintegración de la compacta estructura cristalina, lo que indica que la acción de la enzima tiende a ser más

rápida y eficaz por transformar este sustrato en corto tiempo en azúcares y dextrinas, representando esta respuesta el potencial de energía disponible.

Resultados similares fueron encontrados por Ordoñez (2012) en almidones de cambur verde al obtener una tasa de hidrólisis mayor en los almidones pregelatinizados que su contraparte nativa. Hernández *et al.* (2008) en almidones de papa, maíz y sagu (*Canna edulis*), ya que dichos investigadores comprobaron que los almidones nativos evaluados, presentaron una digestibilidad *in vitro* menor (entre 5 y 8%) que sus respectivos almidones pregelatinizados, con porcentajes de hidrólisis entre 70 y 90%, al ser sometidos a la acción de α -amilasa termoresistente y amiloglucosidasa.

La baja tasa de digestibilidad *in vitro* obtenida para los almidones modificados químicamente (fosfatado-acetilado), está determinada por el tipo de modificación, debido a que al tener un mayor grado de sustitución e incorporación de grupos fosfatos, es decir, mayor predominancia de enlaces cruzados y grupos sustituyentes se disminuye su disponibilidad para las enzimas amilolíticas, reduciendo así la digestibilidad del almidón, y favoreciendo la formación de almidón resistente a la hidrólisis enzimática.

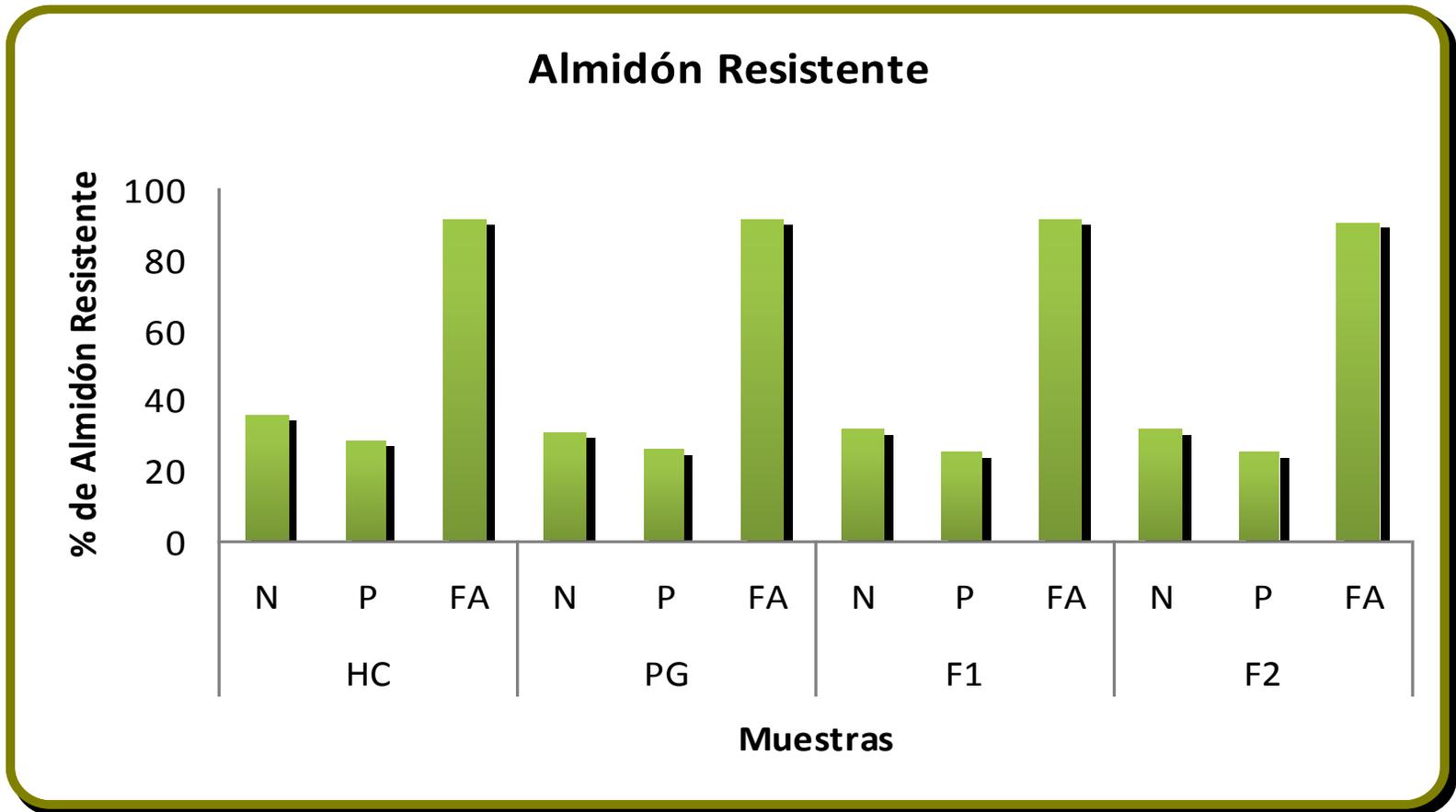
De acuerdo a la clasificación nutricional de los almidones propuesta por Englyst *et al.* (1992) basado en la velocidad con que un alimento libera glucosa bajo las condiciones específicas de estudio, la respuesta observada en todos los almidones en estudio, se corresponde a un almidón que tiende a ser lentamente digerible, ya que la conversión en glucosa ocurre en un tiempo menor a los 120 min, pero no a los 20 min para referirse a los almidones rápidamente digeribles.

4.6.2.- Almidón resistente

El Almidón resistente es definido como la suma del almidón y sus productos de degradación que no son absorbidos en el intestino delgado de individuos sanos. El almidón resistente es subdividido en cuatro categorías dependiendo de la causa de la resistencia (Englyst *et al.*, 1992): RS1, almidón físicamente inaccesible debido a que se encuentra atrapado en una matriz no digerible; RS2, gránulos de almidón nativo con cristalinidad; RS3, amilosa retrogradada; y RS4, almidón modificado químicamente.

En vista de que la tasa y extensión del proceso de digestión del almidón, y que el contenido de almidón resistente en los alimentos, puede afectar cierto número de funciones fisiológicas e incluso generar ciertos efectos beneficiosos sobre la salud, en términos generales, se considera que la determinación de almidón resistente, tiende a ser un elemento útil para la predicción por ejemplo, de la respuesta glucémica postprandial, reducción de la secreción de insulina y lípidos en la sangre que inducen los alimentos (Woleve y Brand, 1995; Osorio *et al.*, 2004; Asp *et al.*, 1996; Pacheco, 2001), por ello se evaluó la proporción de almidón resistente en almidones nativos y modificados de plátano y cambur verde.

En la Figura 47, se muestra el contenido de almidón resistente presente en los almidones nativos, pregelatinizados y fosfatado-acetilado de plátano y cambur verde, donde se observa que los almidones fosfatado-acetilado presentaron los mayores valores de almidón resistente (HCFA= 91,31 %; PGFA= 90,76%; F1FA= 90,78%; F2FA= 90,40%) seguido de los almidones nativos (HCN= 35,79%; PGN= 31,04%; F1N= 31,20 %;



N= Almidón nativo; P= Almidón pregelatinizado; FA= Almidón fosfatado-acetilado.

Figura 47. Contenido de almidón resistente de los almidones nativos, pregelatinizados y fosfatado-acetilado de plátano (*Musa* AAB subgrupo Plátano “Hartón”) “HC” y cambur verde (*Musa* AAA Sub grupo Cavendish “píneo gigante”) “PG”; (*Musa* AAAB “FHIA-01”) “F1” y (*Musa* AAAB “FHIA-02”) “F2”.

F2N= 31,39%) y por último los almidones pregelatinizados (HCP= 27,94%; PGP= 25,56%; F1P= 25,25%; F2P= 24,95%) para todas las muestras. Se observan diferencias entre el almidón de plátano con respecto a los almidones de cambur (*Musa* AAA Cavendish “pineo gigante”; *Musa* AAAB “FHIA-01” y “FHIA-02”) atribuidas a el tamaño del gránulo, la relación amilosa-amilopectina, el grado de asociación existente entre los componentes moleculares del almidón, el grado de cristalinidad, la longitud de la cadena de amilosa y la presencia de complejos lípido-amilosa (Cummings y Englyst, 1995; Zhou *et al.*, 2002; Guraya *et al.*, 2001).

Con respecto a los almidones nativos de plátano y cambur verde, se observa que estos reportan un alto contenido de almidón resistente sin previa gelatinización, lo que confirma la baja digestibilidad de estos almidones y que se corrobora en la Figura 46. Resultados similares fueron encontrados por Aparicio *et al.* (2010), en almidones nativos de plátano cuyo valor de almidón resistente se encontró en 38%, del mismo modo, Ordoñez (2012), en almidones de cambur (*Musa* AAAB “FHIA-01” y “FHIA-02”) encontro valores de 31,35 y 33,40%, respectivamente.

El contenido de almidón resistente disminuyó en los almidones pregelatinizados con doble tambor para todas las muestras como era de esperarse, ya que la aplicación de altas temperaturas produce una parcial o completa destrucción de la estructura cristalina de los gránulos de almidón, lo cual contribuye al deterioro extenso de la estructura del almidón, liberando los gránulos de cualquier impedimento físico para su digestión por las enzimas amilolíticas (Tovar *et al.*, 2005). Lo que se corrobora con los resultados de la digestibilidad *in vitro* del almidón (ver Figura 46).

Para el caso específico de los almidones fosfatado-acetilado para todas las muestras se produjo un aumento considerable del contenido de almidón resistente, hecho atribuible a el alto contenido de grupos fosfatos presentes en estos almidones con un alto grado de sustitución (3,7%) que reducen considerablemente la digestibilidad del almidón, lo cual concuerda con lo dicho por Aparicio *et al.* (2010) al estudiar almidones de plátano entrecruzados con trimetafosfato de sodio, ellos concluyen que el contenido de almidón resistente esta relacionado con el nivel de fosforilación del almidón. Del mismo modo Woo y Seib, (2002) usaron una mezcla de trimetafosfato/tripolifosfato a diferentes proporciones (1:99 a 99:1 respectivamente) para fosforilar el almidón de trigo e incrementar los niveles de almidón resistente, ellos encontraron que a medida que incrementaba la incorporación de fósforo (0,03 a 0,32 %) incrementaba proporcionalmente el contenido de almidón resistente tipo 4 (<1,0 a 95,7 %). Por lo antes expuesto, éstos almidones se clasificación según Englyst *et al.*, (1992) en almidones resistente tipo 4.

Desde el punto de vista nutricional, las bajas tasas de hidrólisis del almidón *in vitro* asociado al alto contenido de almidón resistente, determinado en los almidones de plátano y cambur verde, son fundamentales para recomendar su utilización en alimentos dirigidos a personas con regímenes especiales de alimentación, tales como diabéticos.

V.- CONCLUSIONES

Los almidones de plátano y cambur verde nativos, así como sus respectivos almidones modificados, presentaron un alto grado de pureza, indicativos del alto grado de eficiencia alcanzado en los procesos de extracción de los mismos.

El grado de sustitución de los almidones fosfatado-acetilado alcanzado se encuentra dentro de los parámetros establecidos para su uso en productos alimenticios.

La microscopía electrónica de barrido mostró que los gránulos de almidón de plátano y cambur variados en longitud y ancho, comprobándose a través de difracción de rayor láser que dichos gránulos presentan tamaños de 13 a 46 μm , Éstas características morfométricas de los almidones de este estudio permitieron corroborar en gran medida los resultados obtenidos para las propiedades viscoelásticas, térmicas y funcionales de las mismas.

La composición química y las propiedades físicas y químicas de los almidones nativos de plátano y cambur verde fue similar para todos los parámetros estudiados.

El tratamiento térmico aplicado surtió en modificar la composición química, física, fisicoquímica, de los almidones de este estudio. Exceptuando el perfil de gelatinización, los almidones pregelatinizados de plátano y cambur verde presentaron mayores valores para todas las propiedades funcionales en estudio, lo que permitió obtener almidones gelatinizados con unas características tales que estos puedan considerarse como almidones instantáneas y de fácil utilización en sistemas que no requieran la aplicación

de altas temperaturas, efecto que es de gran interés ya que esto permite la diversificación del uso de los almidones en cualquier otro sistema alimenticio.

El tratamiento con trimetafosfato de sodio y anhídrido acético modificaron la composición química, física y físicoquímica de los almidones bajo estudio. El perfil de gelatinización demostró la resistencia de los gránulos de almidón a altas temperaturas y fuerza de corte manteniéndose constante durante el tiempo de análisis, lo que le otorga propiedades reológicas para ser considerados en la elaboración de nuevos productos que requieran mantener su viscosidad en el tiempo durante períodos de calentamiento prolongado y en condiciones de agitación mecánica constante.

La digestibilidad *in vitro* de los almidones pregelatinizados se incrementó con el proceso térmico aplicado, mientras que en los almidones fosfatado-acetilado disminuyó por la formación de enlaces cruzados, mientras que el contenido de almidón resistente se incrementó con la modificación química por el grado de sustitución alcanzado (entrecruzamiento), éste disminuyó en los almidones pregelatinizados motivado a la pérdida de la estructura granular, por dicho comportamientos estos almidones pueden ser dirigidos a la formulación de alimentos para regímenes especiales..

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACEVEDO, N. 2011. Efecto de algunas modificaciones físicas y químicas sobre las propiedades funcionales y nutricionales del almidón de ñame (*Discorea alata*) Tesis de Grado. Universidad Central de Venezuela. Maracay. Venezuela.
- ACOSTA, H; VILLADA, H; TORRES. G; RAMÍREZ, J. 2006. Morfología superficial de almidones termosplásticos. Información Tecnológica 17(3): 63-70.
- ADAMS, M. R. 1980. The small-scale production of vinegar from bananas. Tropical Products Institute. 56/62 Grays Inn Road London WC1X8LU. Overseas Development Administration.
- ADEBOWALE, K; AFOLABI, T; LAWAL, O. 2002. Isolation. chemical modification and physicochemical characterisation of bambarra groundnut (*Voandzeia subterranean*) starch and flour. Food chemistry 78:305-311.
- ADEBOWALE, K; AFOLABI, T; OLU-OWOLABI, I. 2006. Functional. physicochemical and retrogradation properties of sword bean (*Canavalia gladiata*) acetylated and oxidized starches. Carbohydrate Polymers 65: 93-101.
- ADEBOWALE, K; LAWAL, O. 2003. Functional properties and retrogradation behaviour of native and chemically modified starch of mucuna bean (*Mucuna pruriens*). Journal Science Food Agriculture 83: 1541-1546.

- ADEBOWALE, K; OLU-OWOLABI, B; OLAWUMI, E; LAWAL, O. 2005. Functional properties of native, physically and chemically modified breadfruit (*Artocarpus artilis*) starch. *Industrial and Crops Products* 21: 343-351.
- AGAMA, E; BARBA DE LA ROSA, A; MÉNDEZ-MONTEALVO, G; BELLO-PÉREZ, L. 2008. Physicochemical and biochemical characterization of starch granules isolated of pigmented maize hybrids. *Starch/Stärke* 60: 433-441.
- AGBOOLA, S; AKINGBALA, J; OGUNTIMEIN, G. 1991. Physicochemical and functional properties of low DS cassava starch acetates and citrates. *Starch/ Stärke* 43:62–66.
- AKUBOR, P. I; OBIO, S. O; NWADOMERE, K. A; OBIOMAH, E. 2003. Production and quality evaluation of banana wine. *Plant Foods for Human Nutrition* 58. 1:6.
- ALEMÁN, S.; PACHECO, E; PÉREZ, E; SCHROEDER, M. 2011. Elaboration of blackberry (*Rubus glaucus* Benth.) jellies with native and modified banana starches (*Musa ABB*). *African Journal of Food Science* 5(4): 181-187.
- ALVES, R; GROSSMAN, M; SILVA, S. 1999. Gelling properties of extruded yam (*Dioscorea alata*) starch. *Food Chemistry* 67: 123-127.
- AMANI, N; KAMENAN, A; ROLLAND-SABATÉ, A; COLONNA, P. 2005. Stability of yam starch gels during processing. *African Journal of Biotechnology* 4 (1): 94-101.

AMERICAN ASSOCIATION OF CEREAL CHEMIST (AACC). 2000. Laboratory Method. Ed. St. Paul. Minn.USA.

AMERICAN ASSOCIATION OF CEREAL CHEMIST (AACC). 2003. Laboratory Method. Ed. St. Paul. Minn.USA.

APARICIO, A; FLORES, E; GARCÍA, F; BELLO, L. 2006. Caracterización térmica y funcional de almidón resistente obtenido por lintnerización y autoclave a partir de almidón de plátano macho. IX Congreso de Ciencia de los Alimentos y V Foro de Ciencia y Tecnología de Alimentos.

APARICIO, A; FLORES, E; GARCÍA, F; BELLO, L. 2010. Obtención de Almidón Resistente a Partir de Almidón de Plátano Entrecruzado y su caracterización Fisicoquímica. XXV Congreso de Ciencia de los Alimentos y V Foro de Ciencia y Tecnología de Alimentos.

APARICIO, A; FLORES, E; TOVAR, J; GARCÍA, F; GUTIÉRREZ, G; BELLO, L. 2005. Resistant starch-rich powders prepared by autoclaving of native and lintnerized banana starch: partial characterization. *Starch/ Stärke* 57: 405-412.

APARICIO, A; WALISZEWSKI, K; BELLO, L; MONROY, J. 2003. Changes of banana starch by chemical and physical modification. *Carbohydrates Polymers* 52:237-242.

- ARAUJO, C; RINCÓN, A; PADILLA, F. 2004. Caracterización del almidón nativo de *Dioscorea bulbifera* L. Archivos Latinoamericanos de Nutrición 54(2): 241-244.
- ARAYA, H; CLAVIJO, C; HERRERA, C. 2006. Capacidad antioxidante de frutas y verdura cultivadas en Chile. Archivos Latinoamericanos de Nutrición 54(4): 361-365.
- ARIAS, P; DANKERS, C; LIU, P; PILKAUSKAS, P. 2004. La economía mundial del banana 1985-2002. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).
- ASP, N; BJÖCK, I. 1992. Resistant Starch. Trends in Food Science and Technology 3:111-114.
- ASP, N; VAN AMELSVOORT, M; HAUTVAST, J. 1996. Nutritional implications of resistant starch. Nutrition Research 9: 1-31.
- ASPINAL, G. 1983. The Polysaccharides. Vol 3, New York. Estados Unidos de América, Academic Press.
- ATICHOKUDOMCHAI, N; SHOBSNGOB, S; VARAVINIT, S. 2000. Morphological properties of acid-modified tapioca starch. Starch/Stärke 53: 283-289.
- BAKER, L; RAYAS, O. 1998. Freeze-thaw stability of amaranth starch and the effects of salts and sugars. Cereal Chemistry 75: 301-307.

- BAKRY, F; CARREL, F; JENNY, C; HORRY, JP. 2008. Chapter 1: Genetic improvement of banana. Breeding plantation tree crops: Tropical Species. 3-50.
- BELITZ, H. y GROSCH, W. 1985. Química de los alimentos. Editorial Acribia. Zaragoza, España
- BELLO, L; AGAMA, E; SANCHEZ, L; PAREDES, O. 1999. Isolation and partial characterization of banana starches. Journal of Agricultural and Food Chemistry 47: 854-857.
- BELLO, L; CONTRERAS, S; ROMERO, R; SOLORZA, J; JIMENEZ, A. 2002. Propiedades químicas y funcionales del almidón modificado de plátano (*Musa paradisiaca* L. var. Macho). Agrociencia 36: 169-180.
- BELLO, L; GONZALEZ, R; SANCHEZ, M; GUTIERREZ, F; VARGAS, A. 2006. Extrusión de almidones de fuentes no convencionales para la producción de almidón resistente. Agrociencia 40: 441-448.
- BELLO, L; MALDONADO, F; VILLAGOMEZ, J; TORO, J. 1998. Effect of fatty acids on clarity of starch pastes. Starch/Stärke 50(9): 383-386.
- BELLO, L; OTTENHOF, M; AGAMA, E; FARHAT, I. 2005. Effect of storage time on the retrogradation of banana starch extrudate. Journal of Agricultural and Food Chemistry 53:1081-1086.

- BELLO, L; PAREDES, O. 1999. El almidón: lo comemos pero no lo conocemos. *Ciencia* 50(3): 29-33.
- BELLO, L; SAYAGO, S; VILLAGOMEZ, J; MONTIEL, L. 2000. Almidón de plátano y calidad sensorial de dos tipos de galletas. *Agrociencia* 34: 533-560.
- BELLO-PÉREZ, L.; MEZA-LEON, K; CONTRERAS-RAMOS, S; PAREDES-LOPEZ, O. 2001. Functional properties of corn, banana and potato starch blends. *Acta Científica Venezolana* 52: 62-67.
- BELLO-PÉREZ, L; CONTRERAS-RAMOS. M; ROMERO-MANILLA, R; ZOLORZA-FERIA, J; JIMÉNEZ-APARICIO, A. 2002. Propiedades químicas y funcionales del almidón modificado de plátano *Musa paradisiaca L.* (Var. Macho). *Agrociencia* 36: 169-180.
- BEMILLER, J. N. 1997. Starch modification: Challenges and prospects. *Starch/Stärke* 49: 127–130.
- BERTOFT, E. 2004. Lintnerization of two amylose-free starches of A and B- crystalline types, respectively. *Starch/Stärke* 56: 167- 180.
- BETANCUR, D; CHEL, L; CAMELO, R; DAVILA, G. 2001. Physicochemical and functional characterization of baby lima bean (*Phaseolus lunatus*) starch. *Starch/Stärke* 53(5). 219-226.

- BEYER, H; BARLUENGA, J; WALTER, W. 1987. Manual de Química Orgánica. Editorial Reverté, 1084 p.
- BISWAS, A; SHOGREN, R; SELLING, G; SALCH, J; WILLETT, J; BUCHANAN, C. 2008. Rapid and environmentally friendly preparation of starch esters. Carbohydrate Polymers 74: 137-141.
- BJÖRCK, I; GRANFELDT, Y; LILJEBERG, H; TOVAR, J; ASP, N. 1994. Food properties affecting the digestion and absorption of carbohydrates. American Journal of Clinical Nutrition 59: 699-705.
- BLADWI, P. M. 2001. Starch- granule associated proteins and polypeptides a review. Starch / Stärke 53: 475-503.
- BLANCO, A; TOVAR, J; FERNÁNDEZ, M. 2004. Caracterización nutricional de los carbohidratos y composición centesimal de raíces y tubérculos tropicales cocidos, cultivados en Costa Rica. Archivos Latinoamericanos de Nutrición 54(3):322-327.
- BLAZEK, J; SALMAN, H; LOPEZ, A; GILBERT, E; HANLEY, T; COPELAND, L. 2008. Structural characterization of wheat starch granules differing in amylose content and functional characteristics. Carbohydrate Polymers, In Press.
- BOU RACHED, L; VIZCARRONDO, C; RINCÓN, A; PADILLA, F. 2006. Evaluación de harinas y almidones de mapuey (Dioscorea trifida), variedades blanco y morado. Archivos Latinoamericanos de Nutrición 56 (4): 375-383.

- BROUNS, F; KETTLITZ, B; AMGOMI, E. 2002. Resistant starch and the butyrate revolution. *Food Science and Technology* 13: 251-261.
- BRYANT, C; HAMAKER, B. 1997. Effect of lime on gelatinization of corn flour and starch. *Cereal Chemistry* 74: 171-175.
- BULÉON, A; COLONNA, P; PLANCHOT, V; BALL, S. 1998. Starch granules: structure and biosynthesis. *International Journal of Biological Macromolecules* 23(2): 85-112.
- CABRERA, A; MADRIGAL, M; VÁZQUEZ, G. 2010. Extracción y Caracterización Química de Almidón de Plátano y Banano de las Variedades FHIA-01, 20, 21 y 23. IX Congreso de Ciencia de los Alimentos y V Foro de Ciencia y Tecnología de Alimentos 307-314.
- CAGAMPANG G; PEREZ C; JULIANO B. 1973. A gel consistency for eating quality of rice. *Journal Science Food and Agriculture* 24:1589-1594.
- CAIRNS, P; BOGRACHEVA, T; RING, S; HEDLEY, C; MORRIS, V. 1997. Determination of the polymorphic composition of smooth pea starch. *Carbohydrate Polymers* 32: 275-282.
- CARMONA, R; SÁNCHEZ, M; MÉNDEZ, G; GARZA, B; BELLO, L. 2009. Effect of the cross-linked reagent type on some morphological, physicochemical and

functional characteristics of banana starch (*Musa paradisiaca*). *Carbohydrate Polymers* 76: 117–122.

CARR, J. 1993. Starch, hydrocolloids and stabilizers. *Food Technology* 47 (10): 100-104.

CARREÑO, S;ARISTIZAABAL, L. 2003. Utilisation de bananes plantain pour produire du vin. *InfoMusa*, 12(1): 2ed4.

CHAMPION, J.1968. *El Plátano*. Madrid: Blume pp 234.

CHANG, Y; LIN, J. 2007. Effects of molecular size and structure of amylopectin on the retrogradation thermal properties of waxy rice and waxy cornstarches. *Food Hydrocolloids* 21(4):645-653.

CHARM, S. 1962. The nature of role of fluid consistency in food engineering applications advance. *Food Research Oxford*, 11: 356-361.

CHEESMAN, J. 1948. Classification of the bananas III. Critical notes on species, *Musa paradisiaca* L, and *Musa sapientum* L, *Kew bulletin*. 2: 145-154.

CHEN, J; JANE, J. 1994b. Preparation of granular cold-water-soluble starches prepared by alcoholic-alkaline treatment. *Cereal Chemistry* 71: 623-626.

- CHEN, J; JANE, J. 1994a. Preparation of granular cold-water-soluble starches prepared by alcoholic-alkaline treatment. *Cereal Chemistry* 71: 618-622.
- CHEN, Z; HUANG, J; SOURS, P; SCHOLS, H; VORAGEN, A. 2005. Granule size affects the acetyl substitution on amylopectin populations in potato and sweet potato starches. *Carbohydrate Polymers* 62: 333-337.
- CHI, H; XU, K; WU, X; CHEN, Q; XUE, D; SONG, C; ZHANG, W. 2008. Effect of acetylation on the properties of corn starch. *Food Chemistry* 106: 923-928.
- CHIANG, B; CHUNG, W; CHU, L. 1987. A Pilot scale study for banana starch production. *Starch/Stärke* 1: 5-8.
- CHIUN, W; SHAN, W; LIH, L. 2001. The composition of taro mucilage and its effect on the physicochemical properties of taro flour and starch. *Journal Agriculture and Food Chemistry* 39: 291-297.
- CHUN, J; LIM, S; TAKEDA, Y; SHOKI, M. 1997. Properties of high-crystalline rice amylopectin prepared in acid-alcohol media as fat replacers. *Cereals Food World* 42: 813-819.
- COLONNA, P ; DOUBLIER, J ; MELCION, J ; DE MONREDON, F ; MERCIER, C. 1984. Extrusion cooking and drum drying of wheat starch, I, Physical and macromolecular modifications. *Cereal Chemistry* 61:538-543.

- COLONNA, P; BULEÓN, A; MERCIER, C. 1987. Physically modified starches. In: starch: Properties and potential. Galliard. T. (ed). Critical reports on Applied Chemistry 13: 79-114.
- COLONNA, P; MERCIER, C. 1984. Pisum sativum and vicia faba carbohydrates 5, macromolecular structure of wrinkled pea and smooth pea starch components. Carbohydrate Research 126: 233-247.
- COLONNA, P; TAYEB, J; MERCIER, C. 1989. Extrusion cooking of starch and starchy products. In: Extrusion Cooking. Ass Cereal Chemists. St Paul. Minnesata. USA. Pp: 247-319.
- CONE, J; WOLTERS, M. 1990. Some properties and degradability of isolated starch granules. Starch/Stärke 42: 298–301.
- COOKE, D; GIDLEY, M. 1992. Loss of crystalline and molecular order during starch gelatinization. Carbohydrate Research 227: 103-112.
- COOREMAN, L; RENSBURG, H; DELCOUR J. 2005. Pasting profiles and solubility of native and cross-linked corn starch in dimethylsulfoxide-water mixtures. Journal of Cereal Science 22:251-257.
- COVENIN. 1985. Harina de arroz. N° 2300-85. Comisión Venezolana de Normas Industriales. Caracas. Venezuela.

- CUMMINGS, J; ENGLYST, H. 1995. Gastrointestinal effects of food carbohydrate. *American Journal of Clinical Nutrition* 61: 938S–945S.
- DA MOTA, R; LAJOLO, F; CIACCO, C; CORDENUNSI, B. 2000. Composition and functional properties of banana flour from different varieties. *Starch/Stärke* 52: 63-68.
- DARAMOLA, B; OSANYINLUSI, S. 2006. Production, characterization and application of banana (*Musa* spp) flour in whole maize. *African Journal of Biotechnology* 5 (10): 992-995.
- DAVIES, G. 1993. Production domestique de la bière de banane dans la région de Mpigi, Ouganda. *InfoMusa* 2(1):12ed15.
- DE GRAAF, A; BROEKRCELOFS, A; JANSSEN, M; BEENACKERS, M. 1995. The kinetics of the acetylation of gelatinized potato starch. *Carbohydrate Polymers* 28:137-144.
- DE LA TORRE, L; CHEL, L; BETANCUR, D. 2008. Functional properties of square banana (*Musa balbisiana*) starch. *Food Chemistry* 106; 1138- 1144.
- DEFLOOR, I; DEHING, I; DELCOUR, J. 1998. Physico-chemical properties of cassava starch. *Starch/Stärke* 50 (2-3):58-64.

- DELPRETTI, F; DALY, M; RODRÍGUEZ, L; ARRENDONDO, P; DÍAZ, E; DÍAZ, A. 2004. Respuesta clínica de un alimento a base de topocho-pescado en niños con diarrea aguada. Archivos Venezolanos de Puericultura y Pediatría 67(2): 75-80.
- DOUBLIER, J; COLONNA, P; MERCIER, C. 1986. Extrusion cooking and drum drying of wheat starch, II. Rheological characterization of starch pastes. Cereal Chemistry 63:240-246.
- EASTMAN, J; MOORE, C. 1984. Cold water soluble granular starch for gelled food composition. U.S. Patent 4465702.
- EERLINGER, R; CILLEN, G; DELCOUR, J. 1994. Enzyme-resistant starch. IV. Effect of Endogenous lipids and added sodium dodecyl sulfate on formation of resistant starch. Cereal Chemistry 71: 170-177.
- ELLIS, R; COCHRANE, M; DALE, M; DUFFUS, C; LYNN, A; MORRISON, I; PRENTICE, R; SWANSTON, J; TILLER, S. 1998. Starch production and industrial use. Journal of the Science of Food and Agriculture 77:289-311.
- ELOMAA, E; ASPLUND, T; SOININEN, P; LAATIKAINEN, R; PELTONEN, S, HYVÄRINEN, S; URTTI, A. 2004. Determination of the degree of substitution of acetylated starch by hydrolysis, ¹H NMR and TGA/IR. Carbohydrate Polymer 57: 261-267.

ENGLYST, H; CUMMINGS, J. 1985. Digestion of the polysaccharides of some cereal foods in the human small intestine. American Journal of Clinical Nutrition 42:778-787.

ENGLYST, H; KINGMAN, S; CUMMINGS, J. 1992. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. European Journal of Clinical Nutrition 46 (suppl, 2):33-50.

FAISANT, N; BULEÓN, A; COLONNA, O; MOLIS, C; LARTIGUE, S; GALMICHE, J; CHAMP, M. 1995. Digestión of raw banana starch in the small intestine of healthy humans: structural features of resistant starch. British Journal of Nutrition 73: 111-123.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) 2009. Principales países productores de bananas 2007. Dirección de estadística 2009. Disponible en <http://www.fao.org>.

FEDEAGRO (Confederación Nacional de Asociaciones de Productores Agropecuarios). 2010. Producción de cambur y plátano de Venezuela para el periodo 1992-2010. Consulta on line 20/02/2012. Disponible en: <http://www.fedeagro.org/produccion/Rubros.asp>.

FEDEAGRO (Confederación Nacional de Asociaciones de Productores Agropecuarios). 2009. Producción de cambur y plátano de Venezuela para el período 1992-2010.

Consulta on line 15/07/2009. Disponible en:
<http://www.fedeagro.org/produccion/Rubros.asp>.

FLORES, E; GARCÍA, F; HUICOCHEA, E; NUÑEZ, A; GONZÁLEZ, R; BELLO, L.
2004. Rendimiento del proceso de extracción del almidón a partir de frutos de plátano (*Musa paradisiaca*), Estudio en planta piloto. Acta Científica Venezolana 55: 86-90.

FRANCO, C; CABRAL, R; TAVARES, D. 2002. Structural and physicochemical characteristics of lintnerized native and sour cassava starches. Starch/Stärke 54:469- 475.

FRANCO, C; DO RIO PRETO, S; CIACCO, C; GERALDO, B. 1992. Factors that affect the enzymic degradation of natural starch granules: Effect of the size of the granules. Starch/Stärke 44: 422–426.

FREDRIKSSON, H; SILVERIO, J; ANDERSSON, R; ELIASSON, A; ÅMAN, P.
1998. The influence of amylose and amylopectin characteristics on gelatinization and retrogradation properties of different starches. Carbohydrate Polymers 35(3-4):119-134.

FREITAS, R; PAULA, R; FREITOSA, J; ROCHA, S; SIERAKOWKI, M. 2004. Amilose contents, rheological properties and gelatinization kinetics of yam (*Dioscorea alata*) and cassava (*Manihot utilissima*) starches. Carbohydrates Polymers 55: 3-8.

- FU, Y; CHEN, S; LAI, Y. 2004. Centrifugation and foam fractionation effect on mucilage recovery from Dioscorea (yam) tuber. *Journal of Food Science* 69(9): 509-514.
- GALENO, F. 2006. Digestibilidad *in vitro* y aprovechamiento por el gorgojo de arroz de almidones nativos y modificados de apio y plátano. Tesis de Licenciatura. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- GALLANT, D; BOUCHET, B; BALDWIN, P. 1997. Microscopy of starch: evidence of a new level of granule organization. *Carbohydrate Polymers* 32(3-4): 177-191.
- GALLANT, O; BOUCHET, B ; BULEON, A ; PEREZ, S. 1992. Physical characteristics of starch granules and susceptibility to enzymatic degradation. *European Journal of Clinical Nutrition* 46: 3S-16S.
- GARCÍA, A; WALTER, W. 1998. Physicochemical characterization of starch from peruvian sweet potato selection. *Starch/Stärke* 50(8): 331-337.
- GARCÍA, D; PACHECO, E. 2009. Hidrólisis enzimática *in vitro* y microscopia electrónica de la harina horneada y extruídida de arracacha. *Agronomía Tropical* 59(3): 297-308.
- GARCIA, E; LAJOLO, F. 1988. Starch transformation during banana ripening: The amylase and glucosidase behavior. *Journal of Food Science* 53: 1181–1186.

- GARCIA, T; CHAPARRO, L; DURAN, L; AVILA, E; BARRIOS, B. 2007. Efecto del etefon (ethrel) y el tiempo del almacenamiento sobre la maduración del plátano (*Musa* AAB cv Harton) bajo refrigeración. *Bioagro* 19 (2): 91-98.
- GARCÍA, V; COLONNA, P; BOUCHET, B; GALLANT, D. 1997. Structural changes of cassava starch granules after heating at intermediate water contents. *Starch / Stärke* 49: 171-179.
- GEBRE, T; ABABA, A; SCHMIDT, P. 1998. Some physico-chemical properties of Dioscorea starch from Ethiopia. *Starch/Stärke* 50: 241-246.
- GIESE, J. 1995. Measuring physical properties of foods. *Food Technology* 49(2): 54-63.
- GONZÁLEZ, Z; PÉREZ, E. 2002. Effect of acetylation on some properties of rice starch. *Starch/Stärke* 54(3-40):148-154.
- GONZÁLEZ, J. 2004. Transformación genética del plátano (*Musa sp, Cv, "Hartón"*) mediante *Agrobacterium tumefaciens*. Tesis Doctoral. Universidad Central de Venezuela.
- GONZALEZ, O; PACHECO, E. 2006. Propiedades físicas y reológicas de la harina de banana verde (*Musa* AAA) en la elaboración de geles de piña (*Ananas comosus* L, Merr.) *Revista Facultad Agronomía* 32:27- 40.

- GONZALEZ, Z. 1997. Evaluación de almidones de arroz y trigo modificados por métodos químicos: acetilación y oxidación. Trabajo de Ascenso. Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela.
- GONZALEZ, Z; PEREZ, E. 2003. Evaluación fisicoquímica y funcional de almidones de yuca (*manihot esculenta* crantz) pregelatinizados y calentados con microondas. Acta Científica Venezolana 54 (2):127-137.
- GOÑI, I; GARCÍA, L; MAÑAS, E; SAURA, F. 1996. Analysis of resistant starch: a method for foods and food products. Food Chemistry 56: 445-449.
- GUNARATNE, A; HOOVER, R. 2002. Effect of the heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches. Carbohydrate Polymers 112-117.
- GURAYA, H; JAMES, CH, CHAMPAGNE, E. 2001. Effect of enzyme concentration and storage temperature on the formation of slowly digestible starch from cooked debranched rice starch. Starch / Stärke 53: 131-139.
- GUYLÈNE, A; PARFAIT, B; FAHRASMANE, L. 2009. Bananas, raw materials for making processed food products. Food Science and Technology 20: 78-91.
- GUZMAN, R: 2011. Estudio integral de dos variedades de musas (*musa spp*) i. elaboración de productos a base de harinas ii. Producción de maltodextrinas y uso

en microencapsulación de antioxidantes. Tesis Doctoral. Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Universidad Central de Venezuela, Caracas-Venezuela.

HADDAD, O. 2000. Estudio de la Resistencia en Musáceas a la Sigatoca negra y amarilla, Aspectos químicos, bioquímicos, moleculares y genéticos. Proyecto CONICIT G-97000-700 segundo avance, Universidad Central de Venezuela.

HADDAD, O; BORGES, O. 1973. Los Bananos en Venezuela, Estudio y descripción de clones de plátano y cambur. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas (CONICIT), Caracas-Venezuela.

HADDAD, O; LEAL, F. 1996. Situación actual y perspectivas de la producción de cambur de exportación y otras musáceas en el estado Aragua. Fundacite. (Venezuela). 42 p.

HAN, X; HAMAKER, B. 2002b. Functional and microstructural aspects of soluble corn starch in pastes and gels. *Starch / Stärke* 52: 76-80.

HAN, X; CAMPANELLA, O; GUAN, H; KEELING, P; HAMAKER, B. 2002a. Influence of maize starch granule-associated protein on the rheological properties of starch pastes. Part I, Large deformation measurements of paste properties. *Carbohydrate Polymers* 49. 315–321.

HAN, X; CAMPANELLA, O; GUAN, H; KEELING, P; HAMAKER, B. 2002b. Influence of maize starch granule-associated protein on the rheological properties

of starch pastes, Part II. Dynamic measurements of viscoelastic properties of starch pastes. *Carbohydrate Polymers* 49: 323–330.

HAN, X; HAMAKER, B. 2002a. Partial leaching of granule-associated proteins from rice starch during alkaline extraction and subsequent gelatinization. *Starch/Stärke* 54: 454–460.

HAPPI, B; PRADO, A; BERNARD, A; TCHANGO, B; PAQUOT, A. 2007. Effects of the stage of maturation and varieties on the chemical composition of banana and plantain peels. *Food Chemistry* 103:590–60.

HART, H; CRAINE, E; HART, J; HADAD, M. 2007. *Química orgánica*. 12^a ed. Ed McGraw-Hill, pp.538-564.

HARUMI, N. 1996. Fosfatacao do amido de mandioca via extrusao. Thesis, M.Sc. Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Brazil.

HEINS, D; KULICKE, M; KÄUPER, P; THIELKING, H. 1998. Characterization of acetyl starch by means of NMR spectroscopy and SEC/MALLS in comparison with hydroxyethyl starch. *Starch/Stärke* 50(10): 431-437.

HERNÁNDEZ, O; EMALDI U; TOVAR, T. 2008. In vitro digestibility of edible films from various starch sources. *Carbohydrate Polymers* 71: 648–655.

- HOLM, J; BJÖRCK, I; ASP, N; SJÖBERG, L; LUNDQUIST, I. 1985. Starch availability in vitro and in vivo after flaking, steam-cooking and popping of wheat. *Journal of Cereal* 3: 193-206.
- HOOD, L; MERCIER, C. 1978. Molecular structure of unmodified and chemically modified manioc starches. *Carbohydrate Research* 61: 53-66.
- HOOVER, R. 2001. Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: A review. *Carbohydrate Polymers* 45(3): 253-267.
- HOOVER, R; VASANTHAN, R. 1994. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical of cereal, legume, and tuber starches. *Carbohydrate Research* 252: 22-53.
- HOOVER, R; SAILAJA, Y; SOSULSKI, F. 1996. Characterization of starches from wild and long grain brown rice. *Food Research International* 29: 99–107.
- HOOVER, R; SOSULSKI, F. 1986. Effect of cross linking on functional properties of legume starches. *Starch/Stärke* 38: 149–155.
- HOWLING, D. 1980. The influence of structure of starch on its rheological properties. *Food Chemistry* 6:51-56.

- HSUA, C-L., CHENB, W; ., WENGA, Y-M; , TSENGA C-Y. 2003. Chemical composition, physical properties, and antioxidant activities of yam flours as affected by different drying methods. *Food Chemistry* 83: 85–92.
- HSUA, L; CHENB, W; WENGA, M; TSENGA Y. 2003. Chemical composition, physical properties, and antioxidant activities of yam flours as affected by different drying methods. *Food Chemistry* 83: 85-92.
- HUANG, D; ROONEY, L. 2001. Starches for snack foods, *Snack foods processing*, Eds. Lusas. E.W.. Rooney, L. W. Lancaster, Pennsylvania. Technomic Publishing Company, Inc. 115-130 p.
- HUANG, J. 2006. Function-structure relationships of acetylated pea starches, Ph. D thesis Wageningen University, Netherlands.
- HUANG, J; SCHOLS, H; KLAVER, R; JIN, Z; VORAGEN, A. 2007b. Acetyl substitution patterns of amylase and amylopectin populations in cowpea starch modified with acetic anhydride and vinyl acetate. *Carbohydrates Polymers* 7:542-550.
- HUANG, J; SCHOLS, H; KLAVER, R; SULMANN, E; VORAGEN, A. 2007a. Characterization of differently sized granule fractions of yellow pea cowpea and chickpea starches after modification with acetic anhydride and vinyl acetate. *Carbohydrates Polymers* 67: 11-20.

HUNTER LAB MANUAL. 2001. Hunter Associates Laboratory Universal software version 3,8 ISO 9001 certified.

INIBAP. 2001. Anual Report 2000, Biodiversidad de musa, Pp 14-19. Montpellier-Francia. Disponible en: <http://bananas.bioiversityinternational.org/>.

INIBAP. 2005. Red Internacional para el Mejoramiento del Banano y Plátano: Biodiversidad de musa. Disponible en: <http://bananas.bioiversityinternational.org/>.

INIBAP/IPGRI (International network for the Improvement of Banana and Plantain/International Plant Genetic Resources Institute).1998. Bananas, Paris. Disponible en: <http://bananas.bioiversityinternational.org/>.

INSTITUTO NACIONAL DE NUTRICIÓN (INN); Fundación CAVENDES. 2000. Energía y nutrientes para la población Venezolana. Serie Cuadernos Azules. Caracas, Venezuela, Rev, 2000 N° 53,125 p.

ISHIGURO. 2000. Retrogradation of potato starch. Starch / Stärke 8(1): 12-18.

JACOBS, H; DELCOUR, J. 1998. Hydrothermal modifications of granular starch with retention of the granular structure. Journal of Agriculture and Food Chemistry 46: 2895-2905.

JACOBSON, M; OBANNI, M; BeMILLER, J. 1997. Retrogradation of starches from different botanical sources. Cereal Chemistry 74: 571-578.

JANE, J; KASEMSUWAN, T; LEAS, S; ZOBEL, H; ROBYT, J. 1994. Anthology of starch granule morphology by scanning electron microscopy. *Starch/Stärke* 46: 121-129.

JANE, J; KASEMSUWAN, T; LEAS, S; ZOBEL, H; ROBYT, J. 1994. Anthology of starch granule morphology by scanning electron microscopy. *Starche/Stärke* 46: 121-129.

JANE, J; RADOSAVLEVIC, M; SEIB, P. 1992. Location of amylose in normal starch granules. I, Susceptibility of amylose and amylopectin to cross-linking reagents. *Cereal Chemistry* 69:405-409.

JATOWENKO, W. 1986. Acetylated starch and miscellaneous organic esters. In O. B. 77-372.

JAYAKODY, L; HOOVER, R. 2002. The effect of lintnerization on cereal starch granules. *Food Research International* 35(7):665-680.

JAYAKODY, L; HOOVER, R; LIU, Q; DONNER, E. 2007. Studies on tuber starches, II. Molecular structure, composition and physicochemical properties of yam (*Dioscorea spp.*) starches in Sri Lanka. *Carbohydrate Polymers* 10:1016-1023.

JIMENEZ, A; JIMENEZ, I; PULIDO, R; SAURA, F. 2001. Antioxidant activity of fresh and processed edible seaweeds. *Journal of Science and Food Agriculture* 81: 530-534.

- JOSLYN, M. 1970. Methods in food analysis. Food Science and Technology. Academic Press, New York, USA.
- JUAREZ, E; AGAMA, E; SAYAGO, S; RODRIGUEZ, A; BELLO, L. 2006. Composition. Digestibility and Application in Breadmaking of Banana Flour. Plant Foods for Human Nutrition 61(3): 131-137.
- JULIANO, B. A. 1971. Simplified assay for milled rice amylose. Cereal Science Today 16: 334-360.
- JYOTHI, N; MOORTHY, N; RAJASELKARAN, N. 2006. Effect of cross-linking with epichlorohydrin on the properties of cassava (*manihot esculenta* Cranz) starch. Starch/Stärke 58: 292-299.
- KALENGA, K; LAMERTINE, F; VANSOEST, P. 1990. Characterization of starch and fiber of banana fruit. Journal of Food Science 46: 1885-1990.
- KARIM, A; NADIHA, M; CHEN, F; PHUAH, Y; CHUI, Y; FAZILAH, A. 2008. Pasting and retrogradation properties of alkali-treated sago (*Metroxylon sago*) starch. Food Hydrocolloids 22: 1044-1053.
- KARIM, A; NORZIAH, M; SEOW, C. 2000. Methods for the study of starch retrogradation. Review Food Chemistry 71:9-36.

- KARLSSON, M; MEEMAN, A; BJÖRCK, I; ELIASSON, A. 2007. Some physical and nutrition characteristics of genetically modified potatoes varying in amylose/amylopectin ratios. *Food Chemistry* 100: 136-146.
- KASEMSUWAN, T; JANE, J. 1994. Location of amylose in normal starch granules. *Cereal Chemistry* 71: 282-289.
- KAUR, L; SINGH, J; SINGH, N. 2006. Effect of cross-linking on some properties of potato (*Solanum tuberosum* L) starches. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 86: 1945-1954.
- KAYISU, K; HOOD, L; VANSOEST, P. 1981. Characterization of starch and fibre of banana fruit. *Journal of Food Science* 46: 1885-1890.
- KERR, R; CLEVELAND, F. 1959. Orthophosphate esters of starch. U.S, patent 2.884.413.
- KONG, X; BERTOFT, E; BAO, J; CORKE, H. 2008. Molecular structure of amylopectin from amaranth starch and its effect on physicochemical properties *International Journal of Biological Macromolecules* 43(4):377-382.
- KUAKPETOON, D; WANG, Y. 2008. Locations of hypochlorite oxidation in corn starches varying in amylose content. *Carbohydrate Research* 343:90-100.

- KWANG, S; BYOUNGSEUNG, Y. 2006. Effect of acetylation on rheological properties of rice starch. *Starch/Stärke* 58: 177-185.
- LABOREM, G; MARÍN, C; WAGNER, M; RANGEL, L; ESPINOZA, M; DELGADO, A. 2001. Evaluación de los atributos de fruta de musáceas en su primer ciclo. *Agronomía Tropical* 51(4): 593-603.
- LAURENTIN, A; EDWARDS, C. 2005. Carbohydrates: Resistant starch and oligosaccharides. En B, Caballero, L. Allen. y A, Prentice (Eds.). *Encyclopedia of Human Nutrition*. 2da ed. Oxford: Elsevier 1: 322-329.
- LAWAL, O. 2004. Succinyl and acetyl starch derivatives of a hybrid maize: physicochemical characteristics and retrogradation properties monitored by differential scanning calorimetry. *Carbohydrates Research* 339: 2673-2682.
- LEHMANN, U; JACOBASCH, G; SCHMIEDL, D. 2002. Characterization of Resistant Starch Type III from Banana (*Musa acuminata*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50: 5236-5240.
- LEONEL, M; BIANCO, D; REIS, M. 2004. Physicochemical and microscopical characterizations of sweet potato, canna, cassava and cocoyam starches and their expansion properties after photochemical modification. *Brazilian of Journal Food Technology* 7(2):129-137.

- LEONEL, M; SARMENTO, S; CEREDA, M. 2003. New starches food industry, *Curcuma longa* and *Curcuma zedoaria*. Carbohydrate Polymers 54: 385-388.
- LESCOT, T. 1990. The importance of plantains and cooking bananas in Africa: outlets for the subtropical zones. Infomusa 9(1) : 25ed28.
- LESCOT, T. 2008. La diversité génétique des bananiers en chiffres. Les dossiers de fruit tropical pp 155.
- LEWANDOWICZ, G ; FORNAL, J. 1998. Effect of microwave radiation on microstructure of tuber and cereal starches. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences 7(48):85S-91S.
- LEWANDOWICZ, G; FORNAL, J; WALKOWSKI, A. 1997. Effect of microwave radiation on physico-chemical properties and structure of potato and tapioca starches. Carbohydrate Polymers 34:213-230. 1997.
- LEWANDOWICZ, G; JANKOWSKI, T; FORNAL, J. 2000. Effect of microwave radiation on physico-chemical properties and structure of cereal starches. Carbohydrate Polymers 42:193-199.
- LIGHT, J. 1990. Modified food starches: why, where and how. Cereal foods World 35:1081-1084.

- LII, C; CHANG, S; YOUNG, Y. 1982. Investigation of the physical and chemical properties of banana starches. *Journal of Food Science* 47: 1493–1497.
- LIM, S; SEIB, A. 1993. Preparation and properties of wheat corn starches phosphates. *Cereal Chemistry* 76(6): 938-943.
- LING, L; OSMAN, E; FERNANDES, M; REILLY, J. 1982. Physical properties of starch from Cavendish banana fruit. *Starch/Stärke* 34: 184–188.
- LIU, H; RAMSDEN, L; CORKE, H. 1998. Physical properties of cross-linked and acetylated normal and waxy rice starch. *Starch/Stärke* 51(7): 249-252.
- LIU, H; RAMSDEN, L; CORKE, H. 1999. Physical properties of cross-linked and acetylated normal and waxy rice starch. *Starch/Stärke* 51(7): 249-252.
- LIU, H; YU, L; XIE, F; CHEN, L. 2006. Gelatinization of cornstarch with different amylose/amylopectin content. *Carbohydrate Polymers* 65(3):357-363.
- LIU, Q; CHARLET, G; YELLE, S; ARUL, J. 2002. Phase transition in potato starch-water system I. Starch gelatinization at high moisture level. *Food Research International* 35: 397-407.
- LIU, Q; GU, Z; DONNER, E; TETLOW, I; EMES, M. 2007. Investigation of digestibility in vitro and physicochemical properties of A- and Btype starch from soft and hard wheat flour. *Cereal Chemistry* 84:15–21.

- LIU, Y; OCTAVIANI, V; ZHOU, W. 2008. Effect of high pressure on some physicochemical properties of several native starches. *Journal of Food Engineering* 88(1):126-136.
- LOPÉZ, M. 1989. *El Plátano*, Habana: Pueblo y educación. Pp 25.
- LUALLEN, T. 1985. Starch as a functional ingredient. *Food Technology* 39(1): 59-63.
- MACHADO, S; DE QUEIROZ, J; LOPES, M; MILAGRES, F; PINHEIRO, H. 2007. Antioxidant in mango (*Mangifera indica* L.) pulp. *Plant Foods for Human Nutrition* 62:13–17.
- MALI, S; KARAM, L; PEREIRA, L; GROSSMANN, M. 2004. Relationships among the Composition and Physicochemical Properties of Starches with the Characteristics of Their Films. *Journal Agricultural and Food Chemistry* 52: 7720-7725.
- MALI, S; SILVA, R; GROSSMANN, M; SILVA, S; BORSATO, D. 2001. Optimization of the production of acetylated distarch adipates using the novel software “MULTIPLEX”. *International Journal of Food Science and Technology* 36: 641-647.
- MANNI, D; SANTIAGO, L. 2008. Desarrollo De Biomateriales A Partir De Almidón De Amaranto Modificado. *Asociación Argentina de materiales, 2do Encuentro de Jóvenes Investigadores en Ciencia y Tecnología de Materiales.*

- MANRIQUE, N; GONZALEZ, R; OTHMAN, M; GARCIA, F; BELLO, L. 2007. Caracterización de mezclas de almidones de mango y plátano pregelatinizados mediante diferentes condiciones de extrusión. *Agropecuaria* 41:637-645.
- MARCHAL, J. 1993. The quality of dessert bananas and plantains. *Fruit* 8(1):40-44.
- MARRIOTT, J; LANCASTER, P. 1983. Bananas and plantains. In H, T, Chan Jr. (Ed.). *Handbook of tropical foods* (pp. 85e143). New York/Basel: Marcel Dekker. Inc.
- MARTIN, C; SMITH, A. 1993. Starch Biosíntesis. *The Plant Cell* 7: 971-985.
- MARTÍN, J; LÓPEZ, E. 2009. Modificación física del almidón de yuca y evaluación de la susceptibilidad a la hidrólisis enzimática por una alfa amilasa. *Revista Colombiana de Química* 38(3):395-408.
- MARTÍN, V. 2010. Digestibilidad in vitro y aprovechamiento por el gorgojo de arroz de almidones de Plátano, variedades hartón común, Cambur negro, topocho cenizo, hh-12 y Cambur 012. Tesis de Licenciatura. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- MARTÍNEZ, C; PRODOLLIET, J. 1996. Determination of amylose in cereal and non-cereal starches by colorimetric assay: Collaborative study. *Starch/Stärke* 48: 81-85.

- MARTÍNEZ, F; LÓPEZ, J; ZAZUETA, J; MORALES, E. 2005. Preparación y propiedades de almidones pregelatinizados de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y jícama (*Pachyrhizus erosus*). *Agrociencia* 39: 275-283.
- MARTÍNEZ, F; LÓPEZ, M; SAN MARTÍN, E; ZAZUETA, J; VELEZ, M. 2007. Effects of high energy milling on some functional properties of jicama starch (*Pachyrhizus erosus* L. Urban) and cassava starch (*Manihot esculenta* Crantz). *Journal of Food Engineering* 78: 1212-1220.
- MARTÍNEZ, G; DELGADO, E; RODRÍGUEZ, D; HERNÁNDEZ, J; DEL VALLE; R. 2008. Breve análisis sobre la producción de musáceas en Venezuela. *Producción Agropecuaria. (Venezuela)* 1(1): 24-29.
- MARTINEZ, G; TREMONT, O; HERNANDEZ, J. 2004. Manual técnico de propagación de musáceas. (Venezuela) (4):21p.
- MARUSZA, K; TOMASIK, P. 1991. Highly phosphorylated starch. *Starch/ Stärke* 46: 66-69.
- MAZUR, E; SCHOCH, T; KITE, F. 1957. Graphical analysis of the Brabender viscosity curves of various starches. *Cereal Chemistry* 34: 141-152.
- MC CREADY, R; GUGGIOL, J; SILVEIRA, J; OWENS, H. 1957. Determination of starch and amylose in vegetable. *Analytic Chemistry* 22:1156-1158.

- McGRANCE, S; CORNELL, H; RIX, C. 1998. A simple and rapid colorometric method for the of amylase in starch products. *Starch/Stärke* 50: 158-163.
- MERCA, F; JULIANO, B. 1981. Physicochemical properties of starch of intermediate amylose. *Starch/Stärke* 33: 253-260.
- MEZA, K; BELLO, L; CONTRERAS, S; PAREDES, O. 2001. Functional properties of corn, banana and potato starch blends. *Acta Científica Venezolana* 52: 62-67.
- MILES, M; MORRIS, V; RING, S. 1985. Gelation of amylose. *Carbohydrate Research* 135: 257-269.
- MILLAN, C; MENDEZ, M; OTTENHOF, M; FARHAT, I; BELLO, L. 2005. Determination of the molecular and structural characteristics of Kenia, Mango and Banana starches. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53:495-501.
- MIYAZAKI, K; KUMAMOTO, T; KAGOSHIMA, K; KUMAMOTO, O. 2000. Retrogradation of Sweetpotato starch. *Starch/Stärke* 52(1): 13-17.
- MOHAMEED, H; ABU, B; EASSA, A. 2006. Flow properties of corn starch milk sugar system prepared at 368,15 K. *Journal of Food Engineering* 77(4): 958-964.
- MONTES, E; SALCEDO, J; ZAPATA, J; CARMONA, J; PATERNIA, S. 2008. evaluación de las propiedades modificadas por vía enzimática del almidón de

ñame (*Discorea trifida*) utilizando α -amilasa (Termamyl® 120L. Tipo L) Revista de la Facultad de Químicas y Farmacia 1(15): 51-60.

MOORTHY, S. 2002. Physicochemical and functional properties of tropical tuber starches. *Starch/Stärke* 54: 559-592.

MORIKAWA, K; NISHINARI, K. 2000. Rheological and DSC studies of gelatinization of chemically modified starch heated at various temperatures. *Carbohydrate Polymers* 43: 241-247.

MORRINSON, W. 1981. Starch lipids: A reappraisal. *Starch/ Stärke* 33(12): 408-410.

MORTON, R; SOLAREK, D. 1984. Starch derivatives: Production and uses. In: *Starch Chemistry and Technology*. 2nd Ed. (Eds. R.L. Wistler. J. N. BeMiller. E. F. Paschall). Academic Press, New York, pp: 311-366.

MYERS, M; MORELL, K; JAMES, G; BALL, G. 2000. Recent progress towards understanding biosynthesis of the amylopectin crystal. *Plant Physiology* 122:989-997.

NAKASONE, H. Y; PAULL, R. E. 1999. *Tropical fruits, Banana*. Wallingford. UK/New York, USA: CABI Publishing, pp. 103-131.

NAVA, C. 1980. La producción de semillas de musáceas. *In* Encuentro Nacional de Investigadores de Plátano y Cambures. Memorias, (Venezuela) pp: c.1.1-c.1.15

NAVA, C. 1997. El plátano, Su cultivo en Venezuela. Maracaibo. Editorial Astro Data.
S.A

NAVA, C. 1999. El comercio de plátanos y bananos. Memorias del primer seminario Venezolano sobre plantas agámicas tropicales. Pp 18-32. Universidad Central de Venezuela, Maracay.

NIBA, L; BOKANGA, M; JACKSON, F; SHLIMME, D; LI, B. 2001a. Properties and starch granular characteristics of flour from various *Manihot esculenta* (cassava) genotypes. Journal of Food Science 67 (5): 1701-1705.

NIBA, L; BOKANGA, M; JACKSON, R; SCHLIMME, D; LI, B. 2001b. Physicochemical properties and starch granular characteristics of flour from various *Manihot esculenta* (cassava) genotypes. Journal of Food Science 67(5): 1701-1705.

NIELSEN, S. 2003. Food Analysis. Tercera edición. Kuwer academic-Plenum publishers. Nueva York, pp 257.

NIMSUNG, P; THONGNGAM, M; NAIVIKUL, O. 2007. Compositions. morphological and thermal properties of green banana flour and starch. Kasetsart Journal (Natural Science), 41: 324 – 330.

NJITANG, Y; MBBOFUNG, C. 2003. Development of taro (*Colocassia esculenta*) flour as an ingredient for processing: effect of gelatinization and drying

temperature on the drying kinetics and colour of flour. *Journal of Food Engineering* 58: 259-265.

NKALA, D; SIBANDA, S; TOMASIK, P; PALASINSKI, M. 1994. Isolation and properties of starch from wild yam from Zimbabwe. *Starch/Stärke* 46: 85-88.

NOCELO-CEN, L; BETANCUR-ANCONA, D. 2005. Chemical and functional properties of *Phaseolus lunatus* and *Manihot esculenta* starch blends. *Starch/Stärke* 57: 431-441.

NUÑEZ, M; BELLO, L; TECANTE, A. 2004. Swelling-solubility characteristics, granule size distribution and rheological behavior of banana (*Musa paradisiaca*) starch. *Carbohydrates Polymers* 56: 65-75.

OLAYIDE, S. 2004. Composition, physicochemical properties and retrogradation characteristics of native, oxidised, acetylated and acid-thinned new cocoyam (*Xanthosoma sagittifolium*) starch. *Food Chemistry* 87: 205-218.

ORDOÑEZ, R. 2012. Evaluación físico - química y propiedades funcionales del almidón nativo y modificado de musáceas variedad *Musa* AAAB subgrupo 'FHIA-01' y *Musa* AAAB subgrupo 'FHIA-02'. Tesis de grado. Universidad Central de Venezuela, Maracay, Venezuela.

ORTEGA, F; ELIASSON, A. 2001. Gelatinization and retrogradation behaviour of some starch mixtures. *Starch / Stärke* 53: 520-529.

- OSORIO, P; AGAMA, E; CARMONA, R; TOVAR, J; PAREDES, O; BELLO-PÉREZ, L. 2004. Resistant starch and in vitro starch digestibility of cooked “ayocote” bean (*Phaseolus coccineous*). *Interciencia* 29(9): 510-514.
- OSORIO, P; BELLO-PÉREZ, L; AGAMA, E; VARGAS, A; TOVAR, J; PAREDES, L. 2002. In vitro digestibility and resistant starch content of some industrialized commercial beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Food Chemistry* 78: 333-337.
- PACHECO, E. 2001. Evaluación nutricional de sopas deshidratadas a base de harina de plátano verde. Digestibilidad *in vitro* del almidón. *Acta Científica Venezolana* 52: 278-282.
- PACHECO, E; TECHEIRA, N. 2009. Propiedades químicas y funcionales de almidón nativo y modificado de ñame (*Dioscorea alata*). *Interciencia* 34(4):280-285.
- PACHECO, E; ALEMÁN, S. 2010. Propiedades químicas y funcionales del almidón nativo y modificado de musáceas, variedad (*Musa* ABB). *Acta Científica Venezolana* 61 (1-2): 38-46.
- PACHECO, E; PEREZ, R; SCHNELL, M. 2004. Evaluación nutricional y sensorial de polvos para bebidas a base de papaya, plátano verde y salvado de arroz, índice glucémico. *Interciencia* 29 (1): 46-51.

- PACHECO, E; SEQUERA, B; HERRERA, I. 1998. Plant starches and oils, their influence on digestion in rats. *Journal of Science of Food and Agriculture* 77: 381-386.
- PACHECO, E; TESTA, G. 2005. Evaluación nutricional física y sensorial de panes de trigo y plátano verde. *Interciencia* 30 (5): 300-304.
- PAL, J; REKHA, S; PUSHPA, R. 2002. Physicochemical properties of hydroxypropyl derivate from corn and amaranth starch. *Carbohydrate Polymers* 48: 49-53.
- PANGBORN, R; GIBBS, Z; TASSAN, C. 1988. Effect of hydrocolloids on apparent viscosity and sensory properties of select beverages. *Journal of Texture Study* 9: 415-436.
- PAREDES, O; BELLO, L; LOPEZ, M. 1994. Amylopectin; structural, gelatinization and retrogradation studies. *Food Chemistry* 50(4):411-417.
- PAREDES, O; SCHEVENIN, M; HERNÁNDEZ, D; CÁRABEZ. A. 1989. Amaranth starch isolated and partial characterization. *Starch/Stärke* 41: 205-207.
- PASCHALL, F. 1964. Phosphorylation with inorganic phosphate salts, methods. *Carbohydrate Chemistry* 4: 214-296.
- PERERA, C; HOOVER, R. 1999. Influence of hydroxypropylation on retrogradation properties of native and treated potato starches. *Food Chemistry* 64: 361-375.

- PERERA, C. HOOVER, R; MARTIN, A. 1997. The effect of hydroxypropylation on the structure and physicochemical properties of native, defatted and heat-moisture treated potato starch. *Food Research International* 30: 235-247.
- PÉREZ, E. 1994. Caracterización de las propiedades funcionales de almidones nativos y modificados. I. Métodos físicos de extrusión, deshidratación con doble tambor e irradiación gamma y microondas. Trabajo de Ascenso para optar a la categoría de Profesor Asociado ante la Ilustre Universidad Central de Venezuela.
- PERÉZ, E. 1997. Characterization of starch isolated from plantain (*Musa paradisiaca* normales). *Starch/Stärke* 49 (2): 45-49.
- PÉREZ, E. 2000. Determination of the Correlation Between Amylose and Phosphorus Content and Gelatinization Profile of Starches and Flours Obtained From Edible Tropical Tubers Using Differential Scanning Calorimetry and Atomic Absorption Spectroscopy. Thesis of Master in Science, University of Wisconsin-Stout, November.
- PÉREZ, E. 2001. Modificación de las propiedades funcionales de harina y almidones de ocumo criollo (*Xanthosoma sagittifolium*), ocumo chino (*Colocasia esculenta*) y batata (*Ipomoea batatas*) para su aprovechamiento en la formulación de alimentos horneados. Tesis Doctoral. Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela.

- PÉREZ, E.; LARES, M. 2004. Scale laboratory method for isolation of starch from pigmented sorghum. *Journal Food Engineering* 64: 515-519.
- PÉREZ, E; BORNEO, R; MELITO, C; TOVAR, J. 1999. Chemical, physical, and morphometric properties of peruvian carrot (*Arracacia xanthorrhiza* B.) *Starch*. *Acta Científica Venezolana* 50: 240-244
- PÉREZ, E; PACHECO, E. 2005. Características químicas, física y reológicas de la harina del almidón nativo aislado de *Ipomea batata* LAM. *Acta Científica Venezolana* 56: 12-20.
- PÉREZ, E; SCHULTZ, F; PACHECO, E. 2005. Characterization of some properties of starches isolated from *Xanthosoma sagittifolium* (tannia) and *Colocasia esculenta* (taro). *Carbohydrate Polymers* 60: 139-145.
- PEREZ, E. 1996. Algunas experiencias sobre modificación química de almidón, realizadas en Venezuela. Conferencia Internacional del Almidón, Quito, Ecuador.
- PESHIN, A. 2001. Characterization of starch isolated from potato tubers (*Solanum tuberosum* L.). *Journal of Food Science and Technology* 38(5): 447-449.
- PITCHON, E; O'ROURKE, J; JOSEPH, T. 1981. Process for cooking or gelatinizing materials. U.S. Patent. 4: 280.851.

- QI, B; KEITH, G; ORCHARD, J. 2000. Effect of cooking on banana and plantain texture. *Journal of the Agriculture and Food Chemistry* 48: 4221-4226.
- RAO, M; OKECHUKWU, P; DA SILVA, P; OLIVEIRA, J. 1997. Rheological behavior of heated starch dispersions in excess water: Role of starch granule. *Carbohydrate Polymers* 33: 273-283.
- RASPER, V. 1980. Theoretical aspects of amylographology in "The amylograph handbook" Shuey W. C. y Tipples K, H, Eds. The American Association of Cereal Chemists, St Paul, Minnesota, USA
- RAVINDRAN, G; WANASUNDERA, J. 1992. Chemical changes in yam tubers (*D. alata* and *D. esculenta*) during storage. *Tropical Science* 35: 57-62.
- RICHARD, W. 2005. Seminario: "color y apariencia". Hunter Associates Laboratory.
- RINCON, A; ARAUJO, C; CARRILLO, F; MARTÍN, E. 2000. Evaluación del posible uso tecnológico de algunos tubérculos de las dioscoreas: ñame congo (*Dioscorea bulbifera*) y mapuey (*Dioscorea trifida*). *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* 50(1): 286-290.
- RINCÓN, A; RACHED, L; ARAGOZA, L; PADILLA, F. 2007. Efecto de la acetilación y oxidación sobre algunas propiedades del almidón de semillas de Fruto del pan (*Artocarpus altilis*). *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* 57(3): 45-48.

- RIVERA, M; ALMANZA, S; NUÑEZ, M; BELLO, L; RODRIGUEZ, L. 2010. Almidones de plátano (*musa paradisiaca* l.) y maíz (*zea mays* l.) acetilados en horno de microondas: caracterización parcial. XII Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos 10901-10911.
- ROBLES, M; GORINSTEIN, S; MARTÍN, O; ASTIAZARÁN, H; GONZÁLEZ, G; CRUZ, R. 2007. Frutos tropicales mínimamente procesados: potencial antioxidante y su impacto en la salud. INCI 32(4):227-232.
- RODRIGUEZ, M; NUÑEZ, M; BELLO, L. 2010. Características morfológicas, térmicas y de formación de pasta de almidones entrecruzados de plátano. XII Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos 771-776.
- RODRIGUEZ, J; HERNÁNDEZ, E; AGAMA, E; TOVAR, J; BELLO, L. 2008. Characterization of a fibre-rich powder prepared by liquefaction of unripe banana flour. Food Chemistry 107 :1515–1521.
- RODRÍGUEZ, S. 1994. Generalidades sobre el cultivo de plátano (*Musa* spp.). Conferencia MINAG. 12 p.
- ROGER, P; COLONNA, P. 1992. The influence of chain length on the hydrodynamic behaviour of amylose. Carbohydrate Research 227: 73-83.
- ROGOLS, S. 1986. starch modifications: A view into the future. Cereals Food World 31(12): 869-874.

- ROUBERT, E. 2005. Des marche's d'avenir. Référence Innovation 1: 74-75.
- RUTENBERG, M; SOLAREK, D. 1994. Starch derivates: production and uses. Food Hydrocolloids 344-349.
- RUTENBERG, R; SOLAREK, D. 1984. Starch derivatives: Production and uses. En: Starch Chemistry and Technology. 2dn Ed. Eds. R.L. Whistler. J. N. BeMiller. E. F. Paschall, Academic Press, New York, EUA, Pp. 311-366.
- SALAZAR, J. 1999. Producción y perspectiva de las musáceas en la agricultura Venezolana. Memorias del primer seminario Venezolano sobre plantas agámicas tropicales. Pp 162-171. Universidad Central de Venezuela, Maracay.
- SALAZAR, R; MARCANO, M. 2005. Evaluación de la harina de ñame (*Dioscorea alata*) como potencial ingrediente en la elaboración de productos de panadería. V Congreso Iberoamericano de Ingeniería de Alimentos.
- SALINAS, Y; ROBLES, R; SAN MARTÍN, E; PÉREZ, P. 2006. Antioxidant activity in masa and tortilla from pigmented maize grains. Memories of 4th international congress on pigments in foods, Berlin: Springer 131–133.
- SÁNCHEZ, M; ALMANZA, S; NUÑEZ, M; BELLO, L; RODRIGUEZ, L. 2010. Almidones de plátano (*musa paradisiaca* L.) y maíz (*zea mays* L.) acetilados en horno de microondas: caracterizacion parcial. XII Congreso Nacional de Ciencia y Tecnologia de Alimentos 901-911.

- SANDOVAL, A; FARHAT, I; FERNANDEZ, A. 2007. Comportamiento reológico de harinas y almidones de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) durante un proceso de extrusión. Revista Facultad de Química Farmacéutica 14(1): 6-15.
- SANDOVAL, J; BRENES, G; PÉREZ, L. 1991. Micropropagación de plátano y banano en el CATIE. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 186 p. (Serie Técnica, Informe técnico 22).
- SASAKI, T; MATSUKI, J. 1998. Effect of starch structure on swelling power. Cereal Chemistry 7: 525–529.
- SATIN, M. 1999. Functional properties of starches. Disponible en: <http://www.fao.org>. pp. 1-12.
- SATIN, M. 1998. Functional properties of starches. New York. Online: www.fao.org/ag/ags/agsi/starch41.htm.
- SAURA, F; GOÑI, I. 2006. Antioxidant capacity of the Spanish Mediterranean diet. Food Chemistry 94: 442–447.
- SCHMITZ, C; DE SIMAS, K; SANTOS, K; JOAO, J; DE MELLO, R; AMANTE, E. 2006. Cassava starch functional properties by etherification - hydroxypropilation. International Journal of Food Science 41: 681-687.

- SCHOCH, T. 1964. Fatty substances in starch. In methods in carbohydrate chemistry. (Wistler. R. L. Ed.). New York: Academy Press, 5:56-61.
- SHIN, S; BIEN, J; PARK, K; MOON, T. 2004. Effect of partial acid hydrolysis and heat-moisture treatment on formation of resistant tuber starch. *Cereal Chemistry* 81(2): 194-198.
- SHOGREN, R. 2003. Rapid preparation of starch esters by high temperature/pressure reaction. *Carbohydrate Polymers* 52: 319-326.
- SHUEY, W; TIPPLES, K. 1991. *The Amylograph Handbook. Physical Testing Methods Committee. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN, USA.*
- SHUJUN, W; JINGLIN, Y; WENYUAN, G; JIPING, P; HONGYAN, L; JIUGAO, Y. 2007. Granule structural changes in native Chinese Yam (*Dioscorea opposita* var. *Anguo*) starch during acid hydrolysis. *Carbohydrate Polymers* 69: 286-292.
- SIMMONDS, N. 1966. *Bananas*. 2 ed. Londres: Longmans e bananier plantain, ed. Maisonneuve and Larose, Paris, 143 p.
- SIMMONDS, N; SHEPHERD, K. 1955. The taxonomy and origins of the cultivated banana. *Journal Linn Society Botany* 55:302-312.

- SINGH, J; KAUR, L; MCCARTH, O. 2007. Factors influencing the physico-chemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications -A review. *Food Hydrocolloids* 21(1): 1-22.
- SINGH, J; SINGH, N. 2003. Studies on the morphological and rheological properties of granular cold water soluble corn and potato starches. *Food Hydrocolloids* 17:63-72.
- SINGH, K; SINGH, N. 2007. Some properties of corn starches II: Physicochemical, gelatinization, retrogradation, pasting and gel textural properties. *Food Chemistry* 101 (4): 1499-1507.
- SINGH, N; SINGH, N. 2005. Characteristic of acetylated starches prepared using starches separated from different rice cultivars. *Journal Food Engineering* 70: 117-127.
- SINGH, N; CHAWLA, D; SINGH, J. 2004. Influence of acetic anhydride on physicochemical, morphological and thermal properties of corn and potato starches. *Food Hydrocolloids* 17: 63-72.
- SINGH, N; SINGH, J; KAUR, L; SINGH, S; SINGH, G. 2003. Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. *Food Chemistry* 81:219-231.

- SITOHY, M; SAID, E; LABIB, S; RAMADAN, M. 2000. Physicochemical properties of different types of starch phosphate monoesters. *Starch/Stärke* 52(4): 101-105.
- SIVOLI, L. 2009. Cambios en la estructura granular, molecular y cristalina del almidón de yuca por efecto de la modificación química (fosfatación-acetilación). Tesis Doctoral. Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Universidad central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- SIVOLI, L; PÉREZ, E; RODRÍGUEZ, P; DE ABRISQUETA, A; RAYMÚNDEZ, M. 2005. Cambios en la estructura granular durante el proceso de modificación química (fosfatado - acetilado) del almidón de yuca analizados por microscopía óptica y electrónica. *Acta Microscópica* 14(1 y 2):6-9.
- SMITH RJ. 1967. Characterization and analysis of starches. En *Starch V. Chemistry and Technology*. Whistler RL and Paschall EF. (ed) Vol II Academic Press New York USA Chapter 25.
- SNOW, P; O'DEA, K. 1981. Factors affecting the rate of hydrolysis of starch in food. *American Journal of Clinical Nutrition* 34: 2721-2727.
- SOMOGYI, N. 1952. Notes on sugar determination. *Journal Biology Chemistry* 195: 19- 23.
- SWINKLES, J. 1985. Composition and properties of commercial native starches. *Starch/Stärke* 37:1-5.

- SWINKLES, M. 1987. Industrial starch chemistry: Properties, modifications and applications of starches, AVEBE. The Netherlands Pp 205-208.
- TAKEDA, Y; TOKUNAGA, N; TAKEDA, C; HIZUKURI, S. 1986. Physicochemical properties of sweet potato starches. *Starch / Stärke* 38: 345-350
- TEIXEIRA, M; CIACCO, F; TAVARES, D; BONEZZI, A. 1998. Occurrence and characterization of resistant starch from corn and banana starch. *Ciencia y Tecnología de Alimentos* 18: 246–253.
- TESTER, R; KARKALAS, J; QI, X. 2004. Starch composition, fine structure and architecture. *Journal Cereal Science* 39: 151–165.
- TESTER, R; MORRISON, W. 1990. Swelling and gelatinization of cereal starches. I. effects of amylopectin, amylose, and lipids. *Cereal Chemistry* 67(6): 551-557.
- TEZENAS, H. 1985. *Le bananier plantain*. ed. Maisonneuve and Larose, Paris. 143 p.
- THEURER, C. 1992. Starch digestion: understanding and potential for improvement. *The Journal of Nutrition* 170-174.
- THOMAS, D; ATWELL, W. 1999. Starch structure in starches, practical guide for the food industry. Eagan Press Handbook Serie. ST. Paul Mn. USA. 1-12.
- TIAN, S; RICKARD, J; BLANSHARD, M. 1991. Physicochemical properties of sweet potato starch. *Journal Science Food Agriculture* 57: 459-491.

- TORRES, K. 2007. Optimización de la Etapa de hidrólisis ácida en el proceso de fosfatación del almidón por extrusión para la encaapsulación de aceite esencial de naranja. Tesis de Grado para obtener el título de Licenciada en Química de Alimentos. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México.
- TOVAR, J; BJÖRCK, I; ASP, N. 1991. Incomplete digestion of legume starch in rats: A study of precooked flours containing retrograded and physically inaccessible starch fractions. *The Journal of Nutrition* 1500-1507.
- TOVAR, J; FERNÁNDEZ, M; BLANCO, A. 2005. Digestibilidad *in vitro* del almidón en preparaciones cocidas y molidas de Fríjol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista Interciencia* 30(12): 780-783.
- TOVAR, J; MELITO, C. 1996. Steam-cooking and dry heating produce resistant starch in legumes. *Journal of Agriculture and Food Chemistry* 44: 2642-2645.
- TSAI, M; LI, C; LII, C. 1997. Effects of granular structures on the pasting behaviors of starches. *Cereal Chemistry* 74(6): 750-757.
- TURNER, D. W. 1994. Bananas and plantains. In B. Shaffer. & P. C. Anderson (Eds.), *Subtropical and tropical crops. Handbook of environmental physiology of fruit crops*, Vol, 2 (pp. 37e64). Boca Raton. FL: CRC Press.
- UNLU, E; FALLER, J. 1998. Formation of resistant starch by a twin-screw extruder. *Cereal Chemistry* 75: 346–350.

- VALMAYOR, R; JAMALUDDIN, S; SILAYOI, B; KUSUMO, S; DANH, L; PASCUA, O; ESPINO, R. 2000. Banana cultivar name and synonyms in Southeast Asia. Disponible en: <http://bananas.bioversityinternational.org/>.
- VAN DER BURGT, Y; BERGSMA, J; BLEEKER, I; FOXHOL, M; KAMERLING, J; VLIEGENTHART, J. 1999. Structural studies on methylated starch granules. *Starch/Stärke* 2 (3): 40 – 43.
- VASANTHAN, T; YEUNG, J; HOOVER, R. 2001. Dextrinization of starch in barley flours with thermostable alpha-amylase by extrusion cooking. *Starch/Stärke* 53: 616-622.
- VERGARA, N; GRANADOS, E; AGAMA, E; TOVAR, J; RUALES, J; BELLO, L. 2007. Fibre concentrate from mango fruit: Characterization, associated antioxidant capacity and application as a bakery product ingredient. *Lebensmittel-Wissenschaftund Technologie* 40: 722–729.
- VILLARROEL, M; ACEVEDO, C; YANEZ, E; BIOLLEY, E. 2000. Propiedades funcionales de la fibra del musgo *Sphagnum magellanicum* y su utilización en la formulación de productos de panadería. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* 53 (4): 400 – 406.
- VON LOESECKE, H.1950. Bananas. 2 ed. New Cork: Interscience

- VUYLSTEKE, A; HARTMAN, B; TENKOVANO, E. 1999. Perspectiva de los mejoradores con respecto a la biotecnología para el mejoramiento de Musa. Infomusa. Revista Internacional sobre Banano y Plátano 8(1): 1-15.
- WALISZEWSKI, K; APARICIO, M ; BELLO, L ; MONRAY, J. 2003. Changes of banana starch by chemical and physical modification. Carbohydrate Polymers 52: 237-242.
- WANG, J; WHITE, P; POLLAK, I; LANE, J. 1993. Amylopectin and intermediate materials in starch from mutant genotypes of the on 43 inbred line. Cereal Chemistry 70 (5): 521-525.
- WANG, L; WHITE, P. 1994. Structure and properties of amylose, amylopectin, and intermediate materials of oat starch. Cereal Chemistry 71(3): 263-268.
- WANG, Y; WANG, L. 2003. Physicochemical properties of common and waxy corn starches oxidized by different levels of sodium hypochlorite. Carbohydrate Polymers 52: 207–217.
- WANG, Y; TRUONG, V; WANG, L. 2003. Structures and rheological properties of corn starch as affected by acid hydrolysis. Carbohydrate Polymers 52: 327-333.
- WATTANCHANT, S; MUHAMMAD, K; RAHMAN, R. 2003. Effect of crosslinking reagents and hydroxypropylation levels n dual-modified sago starch properties. Food Chemistry 80: 463-471.

- WEN, L; RODIS, P; WASSERMAN, P. 1990. Starch fragmentation and protein insolubilization during twin-screw extrusion of corn meal. *Cereal Chemistry* 67:268-275.
- WHISTLER, R; DANIELS, R. 1990. Function of polysaccharides. *In: Food Additives*. Marcel Dekker N.Y. pp: 399-406.
- WHISTLER, R; BEMILLER, J; PASCHALL, E. (1984). *Starch: chemistry and technology*. Academic Press, Inc.
- WHISTLER, R; PASCHALL, E. 1964. Methods in carbohydrate chemistry. In Whistler R, Paschall. E (Eds) IV. *Starch*, Academic Press, New York. NY. USA. Pp. 57-61.101-103. 308-309.
- WHISTLER, R; PASCHALL, E. 1965. "Swelling Power". *Methods in Carbohydrate Chemistry*, Vol II. Ed. Academic Press. New York. USA
- WHISTLER, R; PASCHALL, E. 1967. *Starch: Chemistry and Technology*. Vol I, Ed. Academic Press. New York. USA.
- WOLEVER, M; BRAND, M. 1995. Sugar and glucose control. *American Journal of Clinical Nutrition* 62:212-227.
- WOO, K; SEIB, A. 2002. Cross-linked resistant starch: preparation and properties. *Cereal Chemistry* 79(6): 819-825.

- WOOLNOUGH, J; BIRD, A; MONRO, J; BRENNAN, C. 2010. The effect of a brief salivary α -amylase exposure during chewing on subsequent in vitro starch digestion curve profiles. *International Journal of Molecular Sciences* 11: 2780-2790.
- WOOTON, M; BAMUNUARACHI, A. 1978. Water binding capacity of commercially produced native and modified. *Starch/Stärke* 30: 306-309.
- WURZBURG, B. 1986a. Forty years of industrial starch research. *Cereal Food World* 31(12): 897-903.
- WURZBURG, O.B. 1986b. *Modified starches: Properties and Uses* CRC. Press. Boca Raton Florida, pp 3-53.
- XU, Y; MILADINOV, V; HANNA, M. 2004. Synthesis and characterization of starch acetates with high substitution. *Cereal Chemistry* 81: 735-740.
- YADAV, A; GUHA, R; THARANATHAN, R; RAMTEKE, S. 2006. Influence of drying conditions on functional properties of potato flour. *Journal European Food Research and Technology* 223(4):553-560.
- YOOK, C; UN-HUA, P; KWAN-HWA, P. 1993. Gelatinization and retrogradation characteristics of hydroxypropylated and cross-linked rices. *Journal of Food Science* 58(2): 405-407.

- YOSHIMOTO, Y; TASHIRO, J; TAKENOUCI, T; TAKEDA, Y. 2000. Molecular structure and some physicochemical properties of high-amylose barley starches. *Cereal Chemistry* 77 (3): 279-285.
- YU, B; SATOSHI, F; KISHIHARA, S. 1999. Physicochemical properties of huaishan (rhizoma *Dioscorea*) and matai (*Eleocharis dulcis*) starches. *Starch/Stärke* 51:5-10.
- YUAN, Y; ZHANG, L; DAI, Y; YU, J. 2007. Physicochemical properties of starch obtained from *Dioscorea nipponica* Makino comparison with other tuber starches. *Journal of Food Engineering* 82: 436–442.
- ZAMUDIO, P; VARGAS, A; GUTIÉRREZ, F; BELLO, L. 2010. Caracterización físicoquímica de almidones doblemente modificados de plátano. *Agrociencia* 44: 283-295.
- ZAMUDIO, P; VARGAS, A; PEREZ, J; BOZQUEZ, E; BELLO, L. 2006. Films prepared with oxidized banana starch: mechanical and barrier properties. *Starch/Stärke* 58: 274-282.
- ZENG, M; MORRIS, C; BATEY, I; WRIGLEY, C. 1997. Sources of variation for starch gelatinization, pasting, and gelation properties in wheat. *Cereal Chemistry* 74(1):63-71.

- ZHANG, G; HAMAKER, B. 1999. SDS-Sulfite increases enzymatic hydrolysis of native sorghum starches. *Starch/Stärke* 51: 21-25.
- ZHANG, P; WISTLER, L; BEMILLER, J; HAMAKER, B. 2005. Banana starch: production, physicochemical properties, and digestibility—a review. *Production. Carbohydrate Polymers* 59: 443-458.
- ZHENG, G; HAN, H; BHATTY, R. 1999. Functional properties of cross-linked and hydroxypropylated waxy hull-less barley starches. *Cereal Chemistry* 76: 182-188.
- ZHENG, G; SOSULKI, F. 1998. Determination of water separation from cooked starch and flour pastes after refrigeration and freeze-thaw. *Journal of Food Science* 63(1):134-139.
- ZHOU, M; ROBARDS, K; GLENNIE-HOLMES, M; HELLIWELL, S. 1998. Structure and pasting properties of oat starch. *Cereal Chemistry* 75:273–281.
- ZHOU, Z; ROBARDS, K; HELLIWELL, S; BLANCHARD, C. 2002. Composition and functional properties of rice. *International Journal of Food Science and Technology* 37: 849-868.
- ZHU, T; JACKSON, D; GEERA, B. 2008. Comparison of amylose determination methods and the development of a dual wavelength iodine binding technique. *Cereal Chemistry* 85(1): 51-58.