

Estudio de la obtención de un alimento a partir de cultivos biofortificados

**Angelica Combariza Vargas
David Sánchez Tamayo
2006**



**Canadian International
Development Agency**



**ESTUDIO DE LA OBTENCIÓN DE UN ALIMENTO PRECOCIDO A PARTIR DE
CULTIVOS BIOFORTIFICADOS**

**ANGÉLICA COMBARIZA VARGAS
DAVID SÁNCHEZ TAMAYO**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI**

2006

**ESTUDIO DE LA OBTENCIÓN DE UN ALIMENTO PRECOCIDO A PARTIR DE
CULTIVOS BIOFORTIFICADOS**

**ANGÉLICA COMBARIZA VARGAS
DAVID SÁNCHEZ TAMAYO**

Trabajo de grado para optar al título de Ingenieros Químicos

**Director Académico
Dr. ALEJANDRO FERNÁNDEZ
Profesor del Departamento de Ingeniería de Alimentos**

**Directora Industrial
Ing. JOHANNA ARISTIZÁBAL
Asistente de Investigación CLAYUCA-CIAT**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI**

2006

Nota de aceptación

El trabajo de grado titulado “Estudio de la obtención de un alimento precocido a partir de cultivos biofortificados”, presentado por Angélica Combariza Vargas y David Sánchez Tamayo como requisito parcial para optar al título de “Ingenieros Químicos” fue calificado como aprobado.

Ing. Nilson Marriaga MSc,
Jurado 1

Ing. Juan Carlos Gómez,
Jurado 2

Dr. Alejandro Fernández,
Director Académico

Ing. Johanna Aristizábal,
Directora Industrial

Santiago de Cali, Marzo 6 de 2006

Dedico este logro a Dios por ser mi guía y fortaleza; a mis padres y hermanos por su permanente apoyo, comprensión, orientación y por ayudarme a cumplir mi sueño; a Jackeline y Jhon Jairo por su cariño y oportunas voces de aliento y a todos mis amigos por su incondicional compañía.

Angélica

*A mi familia porque su confianza nunca
me dejó perder la fe y a los muchachos
porque su compañía me lleno de fortaleza
para realizar este trabajo.*

David

AGRADECIMIENTOS

A la Ingeniera Johanna Aristizábal, Asistente de investigación de CLAYUCA-CIAT y al Dr. Alejandro Fernández, Profesor del Departamento de Ingeniería de Alimentos de la Universidad del Valle, por su orientación y valiosa colaboración en el desarrollo de este proyecto.

A CLAYUCA-CIAT por permitirnos hacer parte de este proyecto, por su aporte financiero, técnico y humano.

También agradecemos a Teresa Sánchez del laboratorio de calidad de yuca de CIAT, a Rigo del laboratorio de propiedades físicas de materiales biológicos por su colaboración y paciencia.

Universidad del Valle, Departamento de Ingeniería de Alimentos, por permitirnos el uso de los laboratorios y de los equipos de extrusión y secado en redilos.

A la Escuela de Ingeniería Química por entregarnos durante estos cinco años los conocimientos y herramientas necesarias para el desarrollo de nuestra carrera profesional.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. ASPECTOS GENERALES.....	4
1.1 CULTIVOS BIOFORTIFICADOS	4
1.2 SITUACIÓN NUTRICIONAL EN COLOMBIA	15
1.3 REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES EN ALIMENTACIÓN HUMANA.....	16
1.4 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	18
1.5 OBJETIVOS	19
1.5.1 <i>Objetivo General</i>	19
1.5.2 <i>Objetivos Específicos</i>	19
2. ASPECTOS TECNOLÓGICOS.....	20
2.1 TECNOLOGÍAS PARA LA PRECOCCIÓN DE HARINAS	20
2.1.1 <i>Extrusión</i>	20
2.1.2 <i>Secado en rodillos</i>	23
2.2 ANTECEDENTES DE PRECOCCIÓN DE HARINAS	25
2.2.1 <i>Estudios realizados en el exterior</i>	25
2.2.2 <i>Estudios realizados en Colombia</i>	31
2.3 PRODUCCIÓN DE HARINAS.....	33
2.3.1 <i>Producción de harina de maíz, fríjol y arroz</i>	33
2.3.2 <i>Producción de harinas de yuca y batata</i>	34
2.3.3 <i>Producción de harina hojas de yuca</i>	36
3. METODOLOGÍA	38
3.1 MATERIALES Y MÉTODOS	38
3.1.1 <i>Localización</i>	38
3.1.2 <i>Materiales</i>	38
3.1.3 <i>Equipos</i>	39
3.1.4 <i>Métodos analíticos</i>	43

3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL	43
3.2.1 Definición de variables de entrada y de respuesta para ensayos preliminares en extrusión.....	44
3.2.2 Planeación de ensayos preliminares en extrusión.....	45
3.2.3 Definición de variables de entrada y de respuesta para ensayos definitivos en extrusión.....	48
3.2.4 Planeación de ensayos definitivos de extrusión.....	49
3.2.5 Experimentos en el secador de rodillos.....	50
3.2.6 Evaluación de las variables de respuesta.....	50
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
4.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS MATERIAS PRIMAS	53
4.1.1 Granulometría.....	53
4.1.2 Análisis físicoquímico.....	55
4.1.3 Análisis Reológico.....	56
4.2 ENSAYOS PRELIMINARES DE EXTRUSIÓN	56
4.2.1 Ensayos a composición constante de la mezcla.....	57
4.2.2 Ensayos con variación en el flujo de alimentación y velocidad de giro del tornillo.....	57
4.2.3 Ensayos con variación en la composición de la mezcla.....	58
4.2.4 Ensayos con variación de la temperatura.....	59
4.3 ENSAYOS DE EXTRUSIÓN DEFINITIVOS	60
4.3.1 Comparación del índice de solubilidad en agua (ISA) de las harinas crudas y de las harinas extruidas.....	62
4.3.2 Análisis de índices de absorción de agua de las harinas crudas y las harinas extruidas.....	64
4.3.3 Análisis de la consistencia de las harinas extruidas.....	65
4.3.4 Análisis reológico de las harinas extruidas.....	67
4.4 RELACIÓN ENTRE LA ENERGÍA ESPECÍFICA APLICADA AL MATERIAL (EEA) Y LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS PRODUCTOS EXTRUDIDOS	69

4.5. ENSAYOS PRELIMINARES DE SECADO EN RODILLOS.....	71
4.6. ENSAYOS DE SECADO EN RODILLOS DEFINITIVOS	72
4.6.1 <i>Análisis de índices de solubilidad en agua de las harinas crudas y las harinas precocidas en agua con posterior secado en rodillos.....</i>	<i>72</i>
4.6.2 <i>Análisis de índices de absorción de agua de las harinas crudas y las harinas con precocción en agua más secado en rodillos.....</i>	<i>73</i>
4.6.3 <i>Análisis de la consistencia de las harinas secadas en rodillos.....</i>	<i>73</i>
4.6.4 <i>Análisis reológico de las harinas secadas en rodillos.....</i>	<i>74</i>
4.7 COMPARACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE PRECOCCIÓN UTILIZADAS .	75
4.8 COMPARACIÓN DE HARINAS PRECOCIDAS OBTENIDAS EN ESTE ESTUDIO CON HARINAS PRECOCIDAS COMERCIALES.	80
4.9 CARACTERIZACIÓN DE NUTRIENTES EN LAS HARINAS PRECOCIDAS SELECCIONADAS.....	82
5. CONCLUSIONES.....	84
6. RECOMENDACIONES.....	86
BIBLIOGRAFÍA.....	87
ANEXOS	93

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Requerimientos nutricionales diarios para niños y aportes nutricionales por 100 g de cada cultivo	17
Tabla 2. Formulación extruida en estudios previos.	26
Tabla 3. Comparación de la composición de las materias primas antes y después de la extrusión.....	29
Tabla 4. Comparación de la composición de las materias primas antes y después de la extrusión.....	31
Tabla 5. Parámetros para la operación óptima del equipo	31
Tabla 6. Materias primas utilizadas, variedad y procedencia	38
Tabla 7. Listado de equipos.	39
Tabla 8. Tipo de análisis y métodos analíticos utilizados.....	43
Tabla 9. Variables de Entrada y de Salida para los ensayos preliminares	45
Tabla 10. Composiciones de las mezclas para los ensayos preliminares.....	46
Tabla 11. Variaciones en las condiciones de operación del equipo.....	46
Tabla 12. Principal aporte nutricional de los diferentes cultivos	47
Tabla 13. Formulación P8	47
Tabla 14. Pruebas preliminares con la composición propuesta (P8)	48
Tabla 15. Variables de Entrada y de Salida para los ensayos definitivos	49
Tabla 16. Composiciones de las mezclas evaluadas en los ensayos definitivos.....	49
Tabla 17. Diseño experimental de los ensayos definitivos	49
Tabla 18. Especificación de la determinación de nutrientes realizadas a cada cultivo.....	52
Tabla 19. Análisis granulométrico de las harinas	54
Tabla 20. Granulometría de las mezclas	54
Tabla 21. Resultados del análisis de nutrientes.....	55
Tabla 22. Valores de ISA e IAA de las materias primas crudas	55
Tabla 23. Valores de ISA de las mezclas de materias primas crudas	62
Tabla 24. Valores de IAA de las mezclas de materias primas crudas.....	64

Tabla 25. Componentes de las harinas precocidas comerciales.....	80
Tabla 26. Caracterización y comparación de las harinas comerciales, y Bienestarina® con las harinas precocidas obtenidas por extrusión y secado de rodillos	81
Tabla 27. Análisis de nutrientes de las materias primas crudas y las harinas precocidas con mejor comportamiento tanto en extrusión como en secado con rodillos	83
Tabla 28. Resumen de las pruebas preliminares	97
Tabla 29. Desempeño del extrusor en las pruebas	101
Tabla 30. Registro de temperaturas a lo largo del barril en cada prueba de extrusión	102
Tabla 31. Humedad de los extrudidos a la salida del equipo y después del secado.....	103
Tabla 32. IAA e ISA de los productos obtenidos por extrusión	104
Tabla 33. Valores de significancia obtenidos del análisis de varianza de las variables de respuesta del proceso	105
Tabla 34. IAA, ISA y consistencia de los productos obtenidos en el secador de rodillos.	105
Tabla 35. Temperatura de gelatinización, viscosidad máxima, inestabilidad del gel e índice de gelificación de las harinas precocidas comerciales y las harinas precocidas obtenidas por extrusión y secado en rodillos.	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Granos de maíz (a) y corte transversal (b).....	5
Figura 2. Producción y rendimiento del maíz en sur América.....	6
Figura 3. Granos de frijol (a) y partes del grano (b)	7
Figura 4. Producción y rendimiento del frijol en Sur América.....	8
Figura 5. Granos de arroz (a) y corte transversal (b)	9
Figura 6. Producción y rendimiento de arroz en Sur América.....	9
Figura 7. Raíces de yuca (a) y corte transversal (b).....	10
Figura 8. Producción de y rendimiento yuca en América del Sur.	11
Figura 9. Batata (a) y corte transversal (b).....	12
Figura 10. Principales Productores y rendimiento de batata en Sur América.....	13
Figura 11. Hojas de yuca y formas de lóbulos.....	14
Figura 12. Sección de un tornillo de Arquímedes.....	21
Figura 13. Corte transversal de un extrusor	21
Figura 14. Diagrama de un secador de rodillos	25
Figura 15. Proceso de producción de extrudidos de mezclas de frijol-arroz.	27
Figura 16. Proceso de producción de extrudidos a partir de harina de maíz y pulpa de merluza.....	30
Figura 17. Diagrama de bloques de la producción de harina de maíz, arroz y frijol	33
Figura 18. Diagrama de bloques de la producción de harina de yuca ó batata	35
Figura 19. Diagrama de bloques de la producción de harina de hoja de yuca.....	37
Figura 20. Equipo de extrusión completo (a) y acercamiento al barril (b)	40
Figura 21. Secador de rodillos utilizado en los ensayos (a) vista lateral, (b) vista superior	42
Figura 22. Perfiles de viscosidad obtenidos para cada materia prima cruda	56
Figura 23. Efecto de la variación de la composición en los valores de ISA y el IAA	58
Figura 24. Efecto de la variación de la temperatura en los valores de ISA e IAA en los ensayos preliminares.	59

Figura 25. Efecto de la temperatura y la composición sobre la energía específica aplicada al material (EEA) en el proceso de extrusión.	61
Figura 26. Efecto de la temperatura y la composición de la mezcla sobre el índice de solubilidad de agua de los productos.	63
Figura 27. Efecto de la temperatura y la composición de la mezcla sobre el índice de absorción en agua de los productos.....	65
Figura 28. Efecto de la temperatura y la composición en la consistencia de los productos extrudidos.....	66
Figura 29. Efecto de la temperatura y la composición en la viscosidad de suspensiones acuosas de las harinas extruidas.....	67
Figura 30. Viscosidades máximas alcanzadas por las harinas precocidas obtenidas por el proceso de extrusión.....	68
Figura 31. Relación entre el indicador de energía específica aplicada (EEA) y el índice de solubilidad en agua (ISA).	69
Figura 32. Relación entre el indicador de energía específica aplicada (EEA) y el índice de absorción de agua (IAA).....	70
Figura 33. Relación entre el indicador de energía específica aplicada (EEA) y la consistencia.....	71
Figura 34. Efecto del tratamiento por rodillos sobre el ISA.....	73
Figura 35. Efecto del tratamiento por rodillos sobre el IAA.....	73
Figura 36. Consistencia de las mezclas tratadas con el secador de rodillos.....	74
Figura 37. Comportamiento de la viscosidad de las suspensiones acuosas de las harinas obtenidas por precocción en agua más secador de rodillos.....	74
Figura 38. Diagrama de bloques del proceso de producción de harina precocida.....	75
Figura 39. Efecto del proceso sobre el ISA de los productos.....	77
Figura 40. Efecto del tipo de proceso sobre el IAA de los productos.....	77
Figura 41. Efecto del proceso sobre la consistencia de los productos.....	79
Figura 42. Efecto del proceso sobre la viscosidad de los productos en suspensiones acuosas.....	79

Figura 43. Comparación de la viscosidad de las harinas seleccionadas obtenidas en el estudio, harinas precocidas comerciales y la Bienestarina®.	82
Figura 44. Curva de calibración de la tolva de alimentación.....	96

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Dimensiones del equipo de extrusión.....	93
Anexo B. Dimensiones del dado del extrusor.....	94
Anexo C. Dimensiones del tornillo del extrusor con relación de compresión 3:1.....	95
Anexo D. Curva de calibración de la tolva de alimentación.....	96
Anexo E. Registro y observaciones de las pruebas de extrusión preliminares	97
Anexo F. Metodología para la determinación de los índices de solubilidad y absorción de agua (ISA e IAA)	98
Anexo G. Metodología para la determinación de la consistencia de las suspensiones.....	99
Anexo H. Prueba de perfil de viscosidad.....	100
Anexo I. Registros de flujo másico, eléctricos e indicador de energía específica aplicada al material en cada prueba.....	101
Anexo J. Perfil de temperaturas promedio en cada prueba de extrusión	102
Anexo K. Humedad de los productos obtenidos en cada prueba de extrusión	103
Anexo L. Valores de los índices de absorción, solubilidad en agua y consistencia de los productos obtenidos en cada prueba de extrusión.....	104
Anexo M. Análisis de varianza	105
Anexo N. Valores de los índices de absorción y solubilidad en agua de los productos obtenidos en cada prueba de secador de rodillos	105
Anexo O. Resultado de los viscoamilogramas (5%).....	106
Anexo P. Productos obtenidos en las pruebas de extrusión.....	107
Anexo Q. Productos molidos obtenidos en las pruebas del secador de rodillos.....	108

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue estudiar el proceso de obtención de harinas precocidas con un adecuado contenido nutricional, utilizando como materia prima harinas a partir seis cultivos biofortificados: raíces de yuca, tubérculos de batata, granos de maíz, arroz y frijol y hojas de yuca. Se realizó la comparación de dos tecnologías de obtención de productos precocidos: extrusión y tratamiento combinado de precocción en agua más secado en rodillos. Se evaluó el efecto de la composición y la temperatura en las propiedades físicas y nutricionales de la harina precocida obtenida.

Se realizaron pruebas preliminares donde se determinaron las condiciones de operación del extrusor de tornillo simple a escala laboratorio utilizando así: velocidad de rotación del tornillo de 300 rpm, 17,64 g/min de flujo másico de alimentación y 30% de contenido de humedad en la harina compuesta. Se definieron cuatro formulaciones consideradas adecuadas nutricionalmente de acuerdo a los requerimientos diarios de nutrientes para niños de cuatro a seis años, mezclando las harinas de los cultivos seleccionados. Se efectuaron 24 experimentos finales variando la temperatura en dos niveles: 90 y 100 °C. Las pruebas en el secador de rodillos se realizaron con una velocidad de 4 rpm, la temperatura de la superficie fue de 90 °C y la separación entre los rodillos fue de 1 mm.

La caracterización de las materias primas y productos fue realizada por medio de análisis granulométrico, contenido de proteína, hierro, zinc y betacarotenos, índice de solubilidad en agua, índice de absorción de agua, viscosidad y consistencia. Estos análisis permitieron seleccionar las formulaciones con características apropiadas fisicoquímicas y nutricionales. Se determinó que la tecnología de extrusión proporciona harinas con mejores características que las harinas obtenidas con el tratamiento combinado de precocción en agua más secado en rodillos.

ABSTRACT

The objective of this work was to study the process to obtain composite precooked flours with an appropriate nutritional content, using as raw materials flours from six biofortified crops: cassava roots, sweet potato tubers; corn, rice and red bean grains and cassava leaves. Comparison of two cooking technologies was carried out: extrusion and combined treatment of precooking in water plus roller drying. The effect of proportion of raw materials in the composite flours and temperature on physical and nutritional properties of precooked flour obtained was evaluated.

Preliminary tests were carried out to determine the best operational conditions for a laboratory single screw extruder as follows: rotation speed of 300 rpm, 17,64 g/min of feed flow and 30% of moisture content in the composite flour. Four formulations considered as nutritionally appropriate according to the daily nutrients requirements for children of four to six years were defined by mixing the flours of the crops selected. Twenty-four final experiments were carried out varying the temperature at two levels: 90 and 100 °C. Tests at roller dryer were carried out with at 4 rpm speed, temperature of the surface was of 90 °C and a rollers separation of 1 mm.

Characterization of raw materials and products were carried out by analysis of granule size distribution of flour, protein, iron and zinc content, water solubility index, water absorption index, viscosity and consistency. These analyses were useful for selection of formulations with the appropriated physiochemical and nutritional characteristics. It was determined that extrusion process provides flours with better characteristics than flours obtained with the combined treatment of precooking in water plus roller drying.

INTRODUCCIÓN

Es un hecho conocido que las enfermedades por deficiencia proteínica se observan constantemente en los países con bajos ingresos económicos; entre los cuales están la mayor parte de los países latinoamericanos. Según la UNICEF, la desnutrición es la principal causa de muerte de lactantes y niños pequeños en países en desarrollo. Se estima que alrededor de unos 2.000 colombianos mueren cada año por desnutrición y los programas para combatirla resultan insuficientes, así lo señalan las estadísticas oficiales del año 2003 divulgadas por el Programa Mundial de Alimentos (PMA). A pesar de que municipios, departamentos y organismos nacionales como el Instituto Colombiano de Bienestar Familiar (ICBF) hacen esfuerzos para combatir la desnutrición y la falta de alimentos, éstos no son suficientes para atender las necesidades de los compatriotas que padecen este flagelo que afecta a 5,7 millones de colombianos; según reportes de la UNICEF del año 2000.

Una alternativa para combatir estos índices de desnutrición, es el uso de cultivos biofortificados para la fabricación de alimentos que hagan parte de los programas de meriendas escolares que se distribuyen entre los niños de escasos recursos. Estos cultivos se obtienen mediante la combinación de las mejores características de las variedades tales como la productividad y alto contenido en proteínas, vitaminas o minerales, para obtener cultivos con mayor contenido nutricional desde su siembra lo que los hace diferentes de los alimentos fortificados en los cuales el valor nutricional es adicionado.

En Colombia, se han realizado estudios para el desarrollo de alimentos precocidos a partir de mezclas de harinas de varios cultivos con el fin de combatir los índices de desnutrición, un ejemplo de estos productos es la Bienestarina®, desarrollada por el ICBF utilizando la tecnología de extrusión que es considerada, junto al secado por rodillos, como unas de las operaciones más eficientes para la precocción de harinas. Otros estudios han evaluado la

influencia de las variables de operación de extrusor y secador de rodillos en las características físicas y organolépticas del alimento precocido obtenido.

Además, teniendo en cuenta que una preocupación permanente en la industria de alimentos en los últimos años ha sido la transformación de tubérculos, semillas, raíces, etc. en productos cuyas características sean más atractivas y por lo tanto comercialmente más ventajosas, estos productos no deben considerarse únicamente como alimentos sociales sino más bien como alimentos que estimularán el desarrollo de dicha industria en los países.

Este trabajo se realizó en el marco del Proyecto: "Combatiendo el hambre oculta en América Latina: Cultivos Biofortificados con Vitamina A, minerales esenciales y calidad proteínica" cuya propuesta fue presentada por un grupo de centros de investigación de América Latina y el Caribe entre los que se destacan CLAYUCA-CIAT, CIMMYT, CIP, EMBRAPA, ICTA y CORPOICA entre otros y fue aprobado en el mes de junio de 2004 por la agencia Canadiense CIDA (Canadian International Development Agency).

Al respecto, este estudio contribuye al aporte científico sobre el proceso técnico para la obtención de harinas precocidas, a partir de cultivos biofortificados. Consecuentemente, la metodología seguida comprendió la selección de una formulación que garantizara un adecuado balance nutricional en el alimento, mezclando las harinas de los cultivos de yuca, hoja de yuca, batata, arroz, maíz y frijón, a continuación se definieron las variables y niveles de operación en el tratamiento termomecánico de las harinas con base en el análisis de la información tecnológica disponible. Así, inicialmente se diseñaron ensayos preliminares en los cuales se definieron las condiciones de operación que garantizaran un comportamiento estable del equipo de extrusión, posteriormente se plantearon cuatro formulaciones y se evaluaron dos niveles de temperatura. Estas cuatro formulaciones también fueron procesadas en el secador de rodillos para efectuar posteriores comparaciones entre las tecnologías de obtención de la harina precocida.

Finalmente, se evaluó la capacidad de absorción de agua y la solubilidad en agua de las harinas obtenidas después del tratamiento termomecánico, se determinó la consistencia de

las suspensiones formadas con las harinas precocidas con el fin de determinar la intensidad del tratamiento termomecánico, también se observó el comportamiento de la viscosidad con los cambios de temperatura mediante un viscógrafo que mide de manera continua la resistencia a la agitación de una suspensión de harina-agua mientras se va elevando la temperatura, de esta manera se detectan los cambios de viscosidad del producto después de la gelificación del almidón.

Para evaluar la conservación de los nutrientes en el producto final, luego del proceso de extrusión y secador de rodillos, se analizó el contenido de proteínas, minerales (Fe y Zn) y betacarotenos antes y después, posteriormente se realizó la comparación entre las dos tecnologías de obtención de harinas precocidas y se determinó con cual se obtienen las mejores características para una harina precocida que pueda ser aceptada comercialmente.

Con base en estos resultados, se definieron las condiciones de operación y la línea de proceso de la obtención de harinas precocidas a partir de cultivos biofortificados.

1. ASPECTOS GENERALES

Los cultivos biofortificados y las harinas precocidas que se utilizan para preparar coladas o papillas, son utilizados frecuentemente en el tratamiento de los problemas de desnutrición. En este capítulo se presentan generalidades sobre los cultivos biofortificados y harinas precocidas, además de un resumen de los requerimientos nutricionales en la alimentación humana y de la situación nutricional en Colombia.

1.1 CULTIVOS BIOFORTIFICADOS

El término biofortificado hace referencia al resultado de la selección y combinación por medio de técnicas de mejoramiento convencional y genética funcional de características de varios tipos de un determinado cultivo tales como la productividad y el alto valor nutritivo, para que las nuevas variedades sean más nutritivas y por consiguiente más atractivas para los agricultores y más benéficas para el consumidor. A diferencia de los llamados “cultivos fortificados”, a los que se les añaden minerales y vitaminas en etapas posteriores a la cosecha, los cultivos biofortificados son capaces de fijar directamente estas sustancias, lo que origina que ya cuenten con estos nutrientes en su composición interna en proporciones mayores a los cultivos tradicionales; por esta razón no es necesario añadirlos con nutrimentos extra. Además de su alto valor nutritivo algunas de las propiedades más relevantes de este tipo de cultivos son la resistencia a suelos con baja fertilidad y sequía, así como rápido crecimiento y madurez temprana.

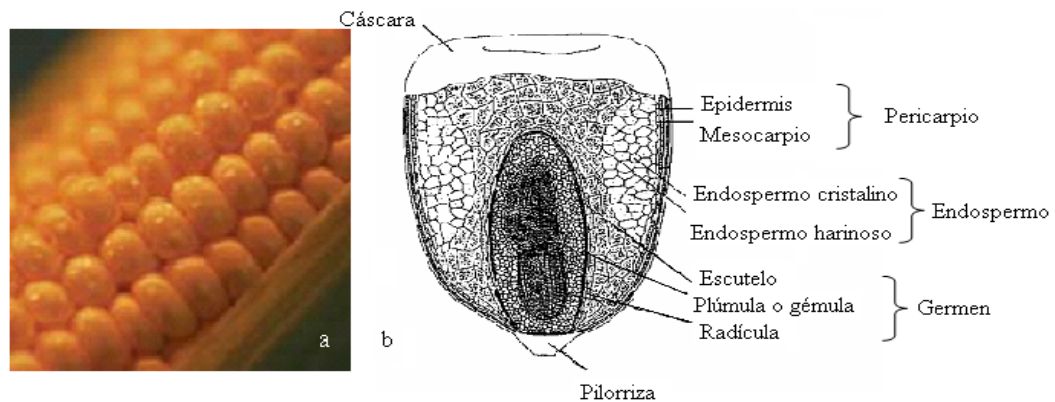
Cultivos biofortificados como el fríjol poseen una concentración más alta de hierro y zinc, el maíz QPM posee un contenido proteico mayor al tradicional, y en la batata biofortificada se ha comprobado que 100 g de este tipo consumidos diariamente prácticamente elimina la deficiencia de vitamina A, debido a que los cultivares de batatas de pulpa anaranjada son ricos en betacaroteno y su contenido es más alto que en cualquier otro alimento, incluyendo

la zanahoria. La batata también es rica en las vitaminas C y E (potente antioxidante en la prevención de la vejez). En la yuca biofortificada se observa un incremento del nivel de los compuestos de la provitamina A, lo cual representa un sistema inmunológico más fuerte, mejor salud para los ojos y menos casos de ceguera, además se encuentran altos contenidos de licopeno (efectivo para la prevención del cáncer de próstata), betacaroteno (precursor de la vitamina A en el organismo humano), luteína (efectiva para prevenir la xeroftalmia ocular), y alto contenido de proteína y de azúcares.

La ventaja de la biofortificación es que se trata de un enfoque más sustentable para hacer los alimentos más nutritivos, en lugar de darle a la gente vitaminas y suplementos (Ortega, 2005).

1.1.1 Maíz. El maíz se utiliza para la fabricación de harina, pero algunas variedades se consumen directamente, como una hortaliza. Es una de las plantas más variables, algunas variedades maduran en poco más de dos meses, mientras que otras necesitan más de un año, el color del grano puede ser rojizo, blanco o amarillo. A continuación se presenta la figura de los granos de maíz y su respectivo corte transversal en donde se señalan sus principales partes.

Figura 1. Granos de maíz (a) y corte transversal (b).

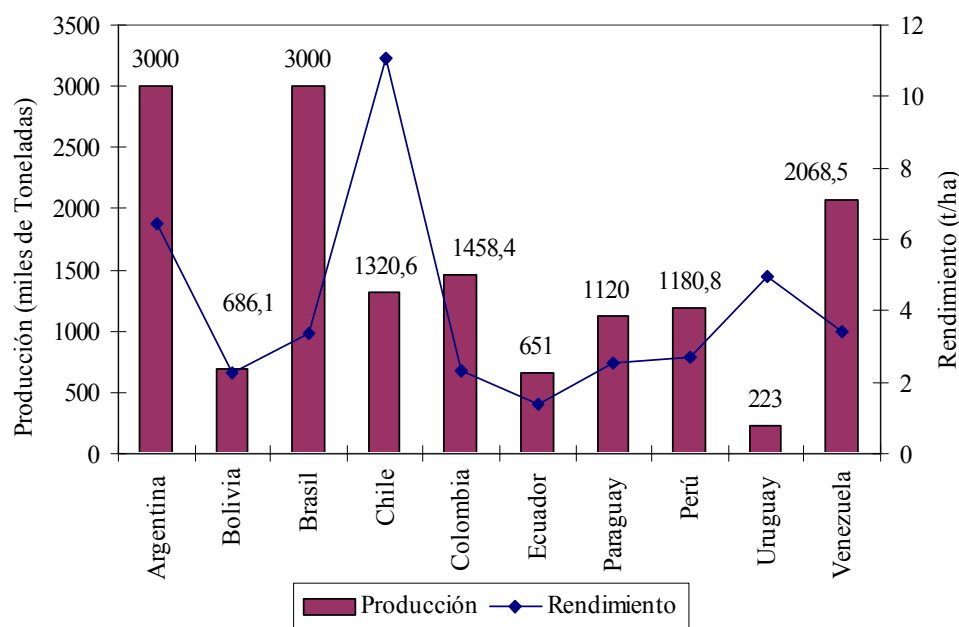


En la actualidad se cultivan con ventaja los maíces híbridos, de gran rendimiento, que se obtienen por cruzamiento de líneas puras previamente seleccionadas mediante autofecundación. La composición química del grano de maíz es variable y compleja; suele contener un 60-70% de almidón y azúcares, un 10% de sustancias nitrogenadas y un 4-8% de materias grasas, estas últimas dentro del pequeño embrión.

Según la FAO (2005) el rendimiento en la producción de maíz en Colombia para el 2004 fue de 2,3 ton/ha sobre una producción total de 1.458.434 toneladas, mientras en el mundo el rendimiento fue de 0,49 ton/ha sobre una producción total de 721.379.361 toneladas.

La Figura 2 muestra los principales países productores en sur América y el rendimiento del cultivo en el 2004.

Figura 2. Producción y rendimiento del maíz en sur América en el año 2004.

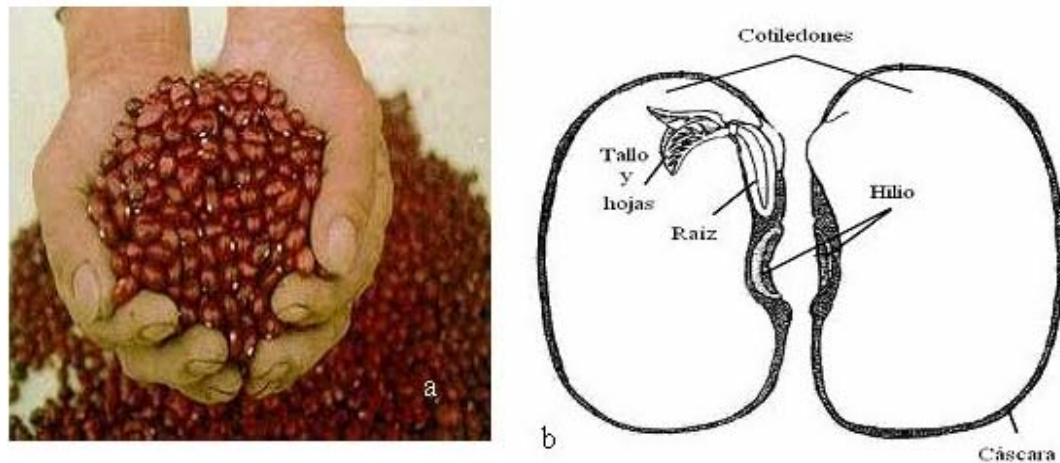


Fuente: Con datos de FAO (2005).

1.1.2 Fríjol. El Fríjol es una rica fuente de proteínas e hidratos de carbono, además de ser una buena fuente de vitamina del complejo B como son la niacina, la riboflavina, el ácido fólico y la tiamina. Igualmente proporciona principalmente hierro y zinc, además de cobre, fósforo, potasio, magnesio, calcio y un alto contenido en fibra. También es una excelente fuente de ácidos grasos poli-insaturados.

En la figura 3 se presentan los granos de fríjol y sus principales partes.

Figura 3. Granos de fríjol (a) y partes del grano (b).

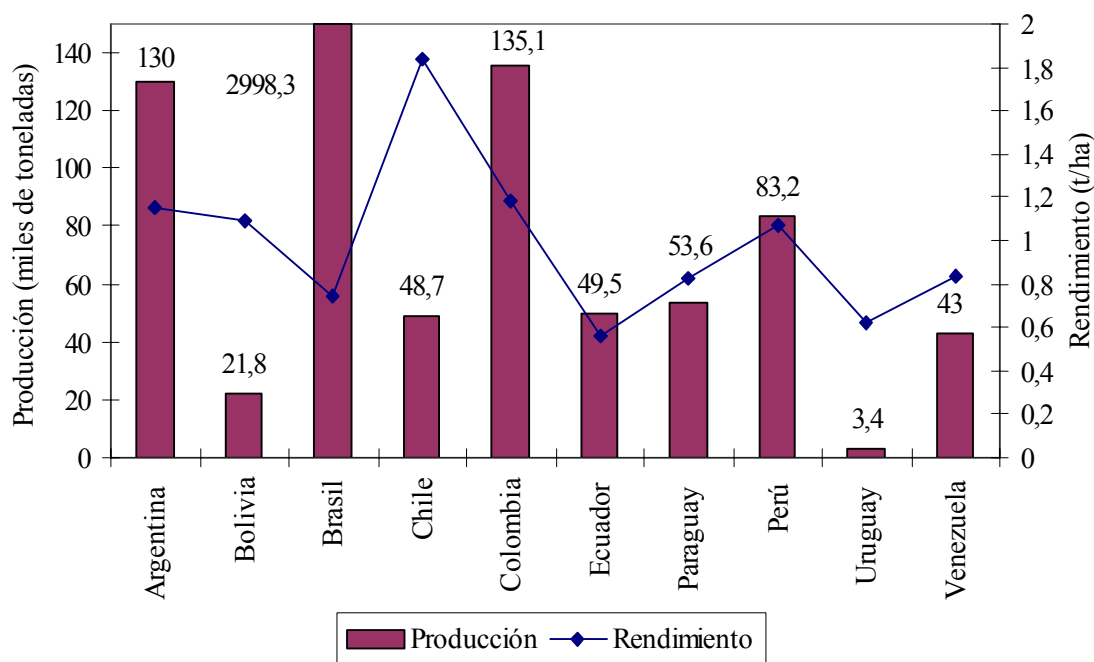


Fuente: Debtwatch (2005).

En el 2004 la producción Colombiana fue de 135.086 toneladas con un rendimiento de 1,19 ton/ha, mientras que en el mundo la producción fue de 18.438.024 toneladas con un rendimiento de 0.7 ton/ha, el siguiente gráfico muestra los principales productores en Sur América y su rendimiento (FAO, 2005).

En la Figura 4 se muestra la producción de los principales países de Sur América su rendimiento por hectárea.

Figura 4. Producción y rendimiento del frijol en Sur América en el año 2004.



Fuente: Con datos de FAO (2005).

1.1.3 Arroz. El arroz es una planta gramínea, su nombre genérico latino es *oryza sativa* y se cultiva generalmente en climas cálidos y en terrenos muy húmedos. Su fruto es una cariósipide que contiene un grano blanco y oval muy harinoso. Hoy día es sin duda, el producto alimentario más importante del mundo, más de 1.000 millones de personas lo tienen como principal alimento. Por desgracia, se entrega al consumo después de haber sido descascarillado, pulido y blanqueado. Así queda privado de sus vitaminas y de las diastasas contenidas en las capas corticales. En la Figura 5 se muestran los granos de arroz y su corte transversal en donde se señalan sus principales partes.

Según la FAO (2005) en el 2004 la producción Colombiana fue de 2.663.239 toneladas con un rendimiento de 5,15 ton/ha, mientras que en el mundo la producción fue de 605.758.530 toneladas con un rendimiento de 4 ton/ha. En la Figura 6 se presentan los datos de producción de arroz en algunos países de Sur América.

Figura 5. Granos de arroz (a) y corte transversal (b).

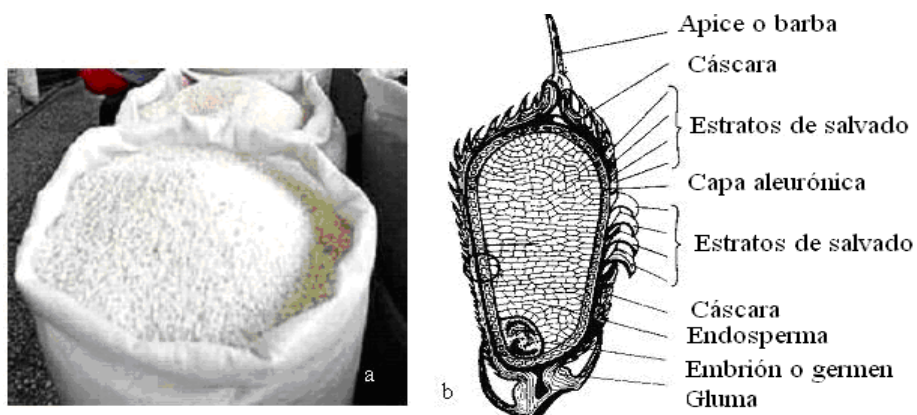
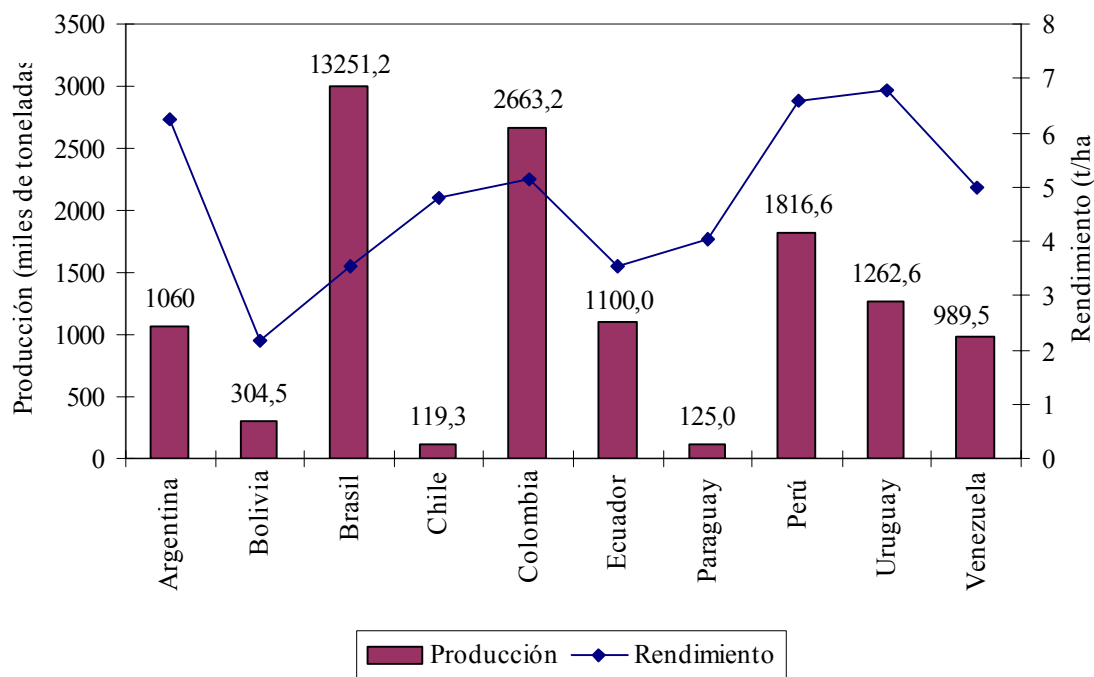


Figura 6. Producción y rendimiento de arroz en Sur América en el año 2004.

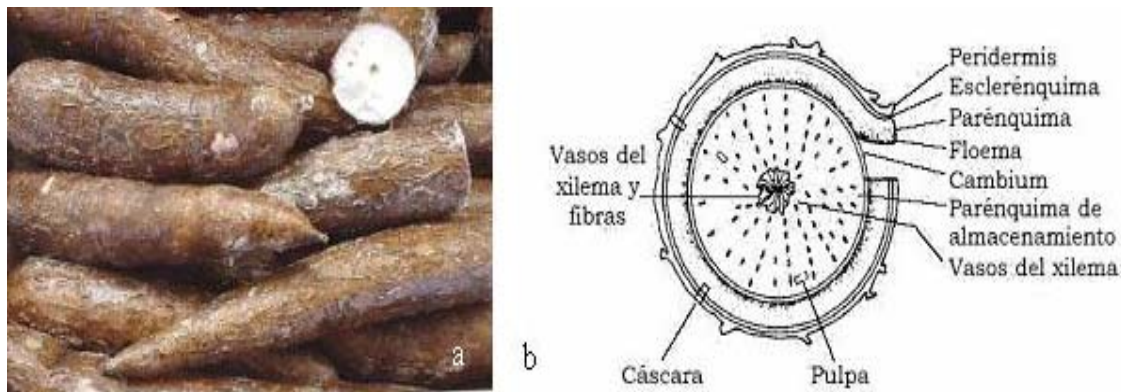


Fuente: Con datos de FAO (2005).

1.1.4 Yuca. La yuca es una planta resistente y de fácil crecimiento, que se puede encontrar desde cero hasta los mil metros por encima del nivel del mar. Es un alimento tradicional en Latino América y permite ser preparada en una extensa gama de formas.

La yuca es un cultivo perenne con alta producción de raíces reservantes, como fuente de carbohidratos y follajes para la elaboración de harinas con alto porcentaje de proteínas. Las características de este cultivo permiten su total utilización, el tallo (estacón) para su propagación vegetativa, sus hojas para producir harinas y las raíces reservantes para el consumo en fresco, la agroindustria o la exportación. En la Figura 7 se muestran las raíces de yuca con su respectivo corte transversal donde se señalan los tejidos que la componen: la cáscara, la pulpa y las fibras centrales desde la parte externa hacia el interior (Ceballos y De la Cruz, 2002).

Figura 7. Raíces de yuca (a) y corte transversal (b).

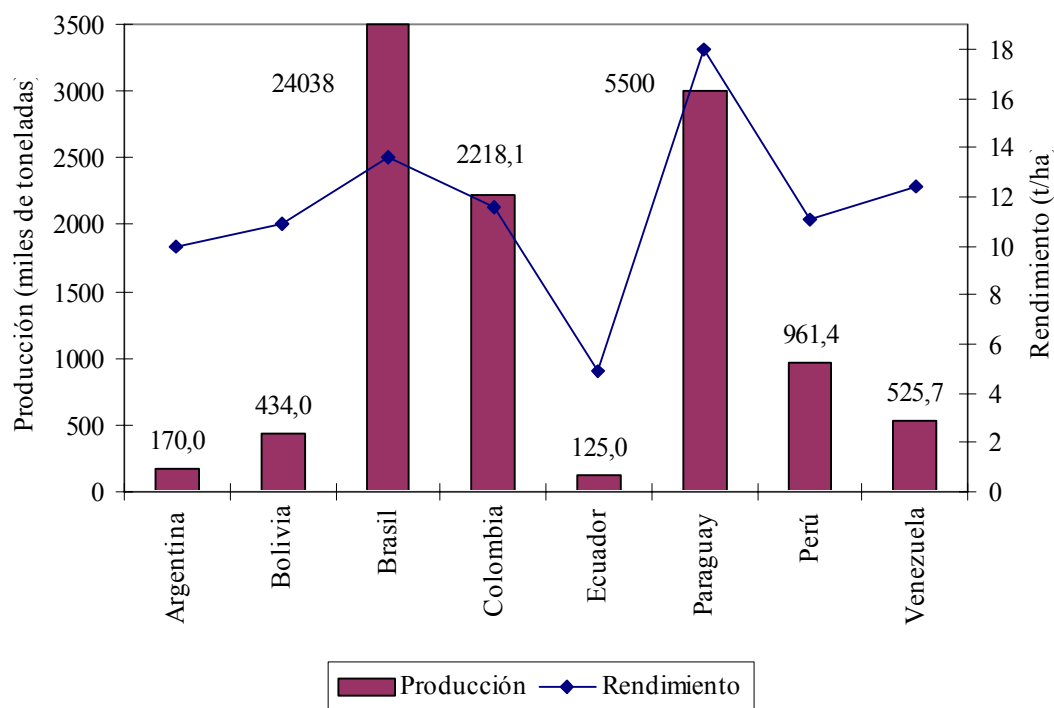


Fuente: Ceballos y De la Cruz (2002).

Investigaciones realizadas por el Centro Internacional de Agricultura Tropical –CIAT– corroboran la importancia de la yuca como cultivo de amortiguación de la pobreza rural, pues ha demostrado su ventaja comparativa en zonas marginales donde, debido a que se adapta a condiciones extremas en comparación con otros cultivos alternativos, siendo la yuca uno de los cultivos más rentables. Asimismo, la yuca es importante como cultivo de subsistencia por su alta producción de calorías por unidad de área, por la cantidad de mano de obra requerida en el cultivo, por la estabilidad de sus rendimientos y por el largo período de cosecha potencial.

En el 2004 la producción Colombiana fue de 2'218,112 toneladas con un rendimiento de 11,5696 ton/Ha, mientras que en el mundo la producción fue de 202'648,218 toneladas con un rendimiento de 10,9469 ton/Ha. En la Figura 8 se presentan los datos de la producción de yuca en algunos países de América del Sur.

Figura 8. Producción de y rendimiento yuca en América del Sur en el año 2004.



Fuente: FAO (2005).

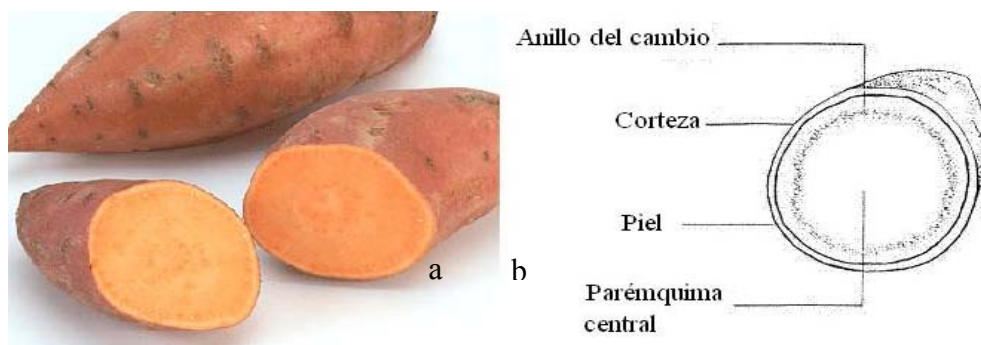
1.1.5 Batata. La batata o camote (*Ipomoea batatas*) a diferencia de la patata, posee un sabor dulce debido a su alto contenido en azúcares, la batata es el tubérculo que se obtiene de la planta del mismo nombre y que se consume como hortaliza. Pesa entre 0,5 y 3 Kg y presenta una forma alargada, aunque existen ejemplares casi esféricos.

Existen más de 400 variedades de batata que se diferencian tanto por el color de su piel y de la carne como por su textura, suave o áspera. Las más comunes son las de piel roja o rosada

y carne blanca. Las variedades más destacables son la batata acuática (*Ipomoea aquatica*), originaria de las zonas tropicales donde se cultiva con exclusividad, y la boniato, que se caracteriza por presentar una carne anaranjada y dulce.

En la Figura 9 se muestra la batata y un corte transversal en el que se señalan sus principales partes.

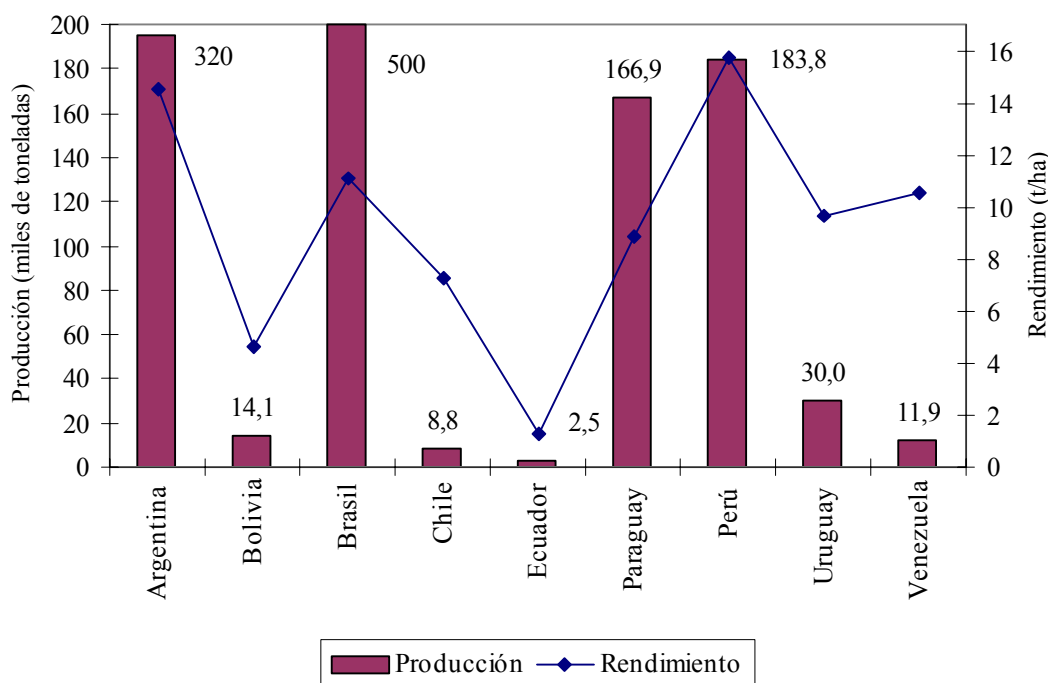
Figura 9. Batata (a) y corte transversal (b).



Fuente: Flowersdirect (2005).

Es una raíz con un elevado contenido de almidón (de un 60% a 70%) y algunas variedades contienen carotenos que pueden ser usados como pigmentos naturales. En la actualidad, se cultiva en 82 países en desarrollo. En el mundo el rendimiento del cultivo es de 14,7513 ton/ha, se considera como el séptimo cultivo alimenticio más importante del mundo en términos de producción. China es el primer productor, con más de 121 millones de toneladas (el 92% de la producción mundial) y un rendimiento de 17 ton/ha, en América Latina, se destacan en su producción Brasil, Argentina, Perú, Haití y Cuba (FAO, 2005). Los principales productores de batata y los rendimientos en Sur América se presentan en la Figura 10.

Figura 10. Principales Productores y rendimiento de batata en Sur América en el año 2004.



Fuente: FAO (2005).

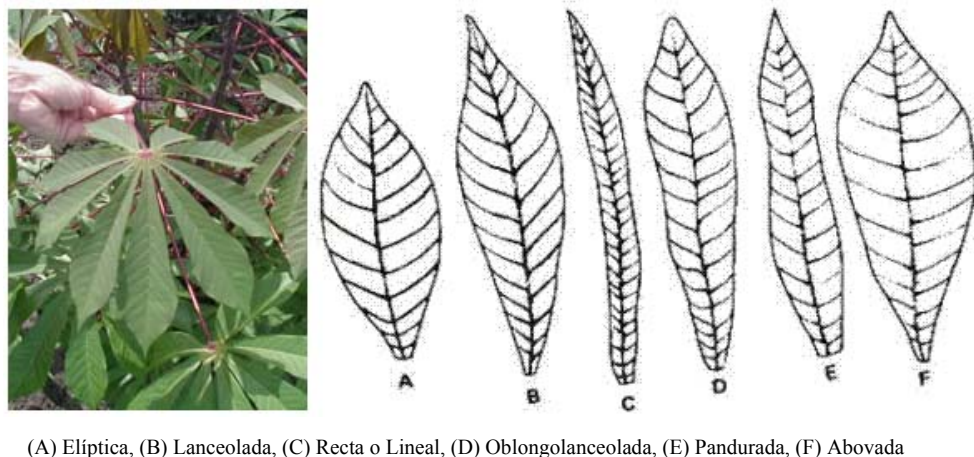
En Cuba, la batata se considera un cultivo de primera necesidad. Además, es una buena alternativa de diversificación alimenticia para los pequeños productores, así como también al explotar su potencial de industrialización podría llegarse a producir a gran escala gracias a su adaptabilidad a los campos de productores marginados que utilizan pocos insumos y de bajo costo. Por su riqueza en hidratos de carbono se puede decir que es un alimento de alto valor energético, en cuanto al contenido vitamínico cabe destacar el aporte de pro-vitamina A, muy superior al de la patata, en especial en las variedades cuyo color de la carne es de un amarillo o anaranjado intenso. Otras vitaminas que se encuentran en mayor proporción en la batata con respecto a la patata son la vitamina E, la C y el ácido fólico, además este tubérculo es buena fuente de potasio y contiene mayor cantidad de sodio que la patata. Dado su contenido de azúcares e hidratos de carbono complejos (almidón) y de su valor energético, la batata es un alimento adecuado para niños, personas que realizan esfuerzos físicos importantes o aquellas que se encuentran debilitadas o convalecientes. Sin embargo,

en caso de sobrepeso u obesidad o de diabetes, se ha moderar la cantidad y frecuencia de consumo.

1.1.6 Hojas de yuca. La gran cantidad de genotipos de yuca cultivados comercialmente y la diversidad de ambientes ecológicos en los cuales se encuentra sembrada la yuca, dificultan una descripción precisa de los caracteres morfológicos (Domínguez, 1981).

La yuca presenta hojas compuestas por la lámina foliar (hoja propiamente dicha, y consta de dos caras que son: el haz o cara superior y el envés o cara inferior) y el pecíolo (tallito que une a la lámina foliar). La lámina foliar es palmeada y profundamente lobulada, según el cultivo, la lámina foliar es de diferentes colores; morado, verde oscuro y verde claro, son los colores básicos. El tamaño de las hojas de yuca depende del cultivar, sin embargo las condiciones ambientales influyen fuertemente; las hojas que se producen en los primeros 3-4 meses son más grandes que las hojas que se producen cuando la planta se encuentra en una edad más avanzada, además una planta que presenta una mayor edad fisiológica presenta menor concentración de proteínas, pero mayor contenido de fibra y materia seca (Ceballos, 2002). Las formas que pueden tener los lóbulos se muestran en la Figura 11-

Figura 11. Hojas de yuca y formas de lóbulos.



Fuente: Domínguez (1981).

La hoja tiene un 77% de agua, 8,2% de proteína cruda, 13,3% de carbohidratos solubles, 1,2% de grasa, 2,2% de fibra cruda en base húmeda y se ha considerado como uno de los vegetales verdes con mayor concentración proteica. Su alto contenido nutricional dada la presencia de sus 18 aminoácidos esenciales, las convierte en un alimento mejor que la quinua y la soya. Contiene minerales como hierro, calcio, potasio, fósforo, magnesio, cobre y zinc, que es uno de los más importantes en la alimentación humana; también alto contenido de beta carotenos y vitaminas A, B1, B2, B6, B12 y C. También posee vitaminas como la niacina que es un depurativo y desintoxicante poderoso, el ácido fólico que es una poderosa vitamina antianémica y el ácido pantoténico que evita el deterioro de los tejidos de la piel.

1.2 SITUACIÓN NUTRICIONAL EN COLOMBIA

Colombia es un país en transición nutricional. Esto quiere decir que aún se presentan los problemas de alimentación propios de los países en vías de desarrollo, pero al tiempo se están incrementando las problemáticas de los industrializados, como la obesidad. Según la encuesta nacional de Nutrición 2005 realizada por el Instituto Colombiano de Bienestar Familiar (ICBF), en Colombia mientras los adultos sufren de sobrepeso y obesidad, los niños tienen anemia y retraso en el crecimiento por mala alimentación.

Contrario a lo que sucede con los adultos de los cuales el 50% padece de sobrepeso u obesidad, la encuesta reveló un grave fenómeno de anemia entre niños, debido a que el 33 por ciento de los menores de 5 años la sufren. De otro lado, aunque el país ha mejorado en los últimos 10 años, es todavía preocupante la proporción de menores que tiene retraso en el crecimiento debido a la mala alimentación: el 12% de niños entre 0 y 4 años está por debajo de la talla. La anemia afecta también el 32% de las mujeres entre 13 y 49 años, así como el 45% de las que están en etapa de gestación.

Los altos índices de sobrepeso se explican por la dieta criolla. A partir de los 4 años, por ejemplo, una de las bebidas que más se consumen es la gaseosa, por encima de la leche, que es el suplemento nutricional por excelencia. Así mismo, los alimentos más apetecidos por los colombianos son el plátano, la papa y el frijol y el arroz. A esto se le suma que las bebidas que más consume la población entre 19 y 50 años son las alcohólicas. Se puede concluir que los colombianos se alimentan mal, su dieta es poco variada y rica en carbohidratos, lo que se traduce en desnutrición y obesidad (ICBF, 2005).

La desnutrición ha aumentado como la obesidad, el hambre y los trastornos alimentarios, tanto en los estratos bajos como en los altos prima una constante, el consumo de vegetales y frutas es muy bajo, lo que ha generado una nutrición desequilibrada. Un trabajo de la Universidad de Antioquia encontró que el 33% de los adolescentes están en riesgo de sufrir trastornos de la conducta alimentaria como anorexia y bulimia. Los datos de la Alcaldía de Bogotá indican que en la capital el 8,6% de los hogares hay al menos un miembro que no come al día por falta de ingresos. El índice de desnutrición entre la población desplazada es mayor que el promedio nacional y se considera que 41% pasa hambre. A pesar de la situación actual, el país había conseguido logros nutricionales en 2000, cuando fue certificado como un país libre de bocio gracias a los programas de fortificación de yodo en la sal de mesa. También se ha puesto en marcha otro programa para fortificar la harina de trigo con hierro y vitaminas del complejo B para combatir la anemia.

1.3 REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES EN ALIMENTACIÓN HUMANA

Requerimiento nutricional es la cantidad promedio de un nutriente que necesita el organismo sano para realizar adecuadamente sus funciones.

En los niños, los factores que determinan las necesidades energéticas son: el metabolismo basal, el crecimiento y la actividad física. Cada uno de ellos requiere de una cantidad de

energía que deberá satisfacerse para evitar el deterioro de la actividad física, del crecimiento y la desnutrición energético-proteica.

En la Tabla 1 se presentan los requerimientos nutricionales diarios para niños entre 7 meses y 9 años de edad, además se presentan los aportes teóricos nutricionales por cada 100 gramos de cada cultivo utilizado.

Tabla 1. Requerimientos nutricionales diarios para niños y aportes nutricionales por 100 g de cada cultivo.

	Requerimientos diarios por edad ¹				Maíz	Arroz	Frijol	Yuca	Batata	Hoja de Yuca
	7-12 meses	1-3 años	4-6 años	7-9 años						
Proteína (g)	kg x 2,2	23	30	24	9,42	5,95	19,87	0,8		6,9
Vit A (µg)	400	400	450	500		0		5	20mg-5345UI	8280
Vit D (µg)	5	5	5	5						
Vit C (µg)	30	30	30	35	0	0	0	40	25	82mg
Tiamina (mg)	0,5	0,7	0,9	1,2	0,39	0,14	0,45	0,06	0,09	0,16
Riboflavina (mg)	0,4	0,5	0,6	0,9	0,2	0,02	0,22	0,04		0,32
Niacina (mg)	4	6	8	12	3,63	2,59	2,63	0,5		1,8
Calcio (mg)	400	500	600	700	7	10	66	36	11	144
Fósforo (mg)	360	800	800	800	210	98	381	48		68
Magnesio (mg)	54	60	76	100	127	35	127			
Hierro (mg)	18,6	11,6	17,8	17,8	2,71	0,35	4,98	1,1	0,8	2,8
Zinc (mg)	8,4	8,3	9,6	11,2	2,21	0,8	5,04			
Yodo (µg)	90	90	90	120						
Vit B12 (µg)	0,7	0,9	1,2	1,8	0,9	0	0			
Energía (kcal)	kg x 105	1300	1700	2400	365	366	329	148	111	60

Fuente: FAO (1984).

¹ Comunicación personal Alberto Pradilla. Nutricionista. apradillaf@yahoo.com

1.4 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

En Colombia, de cada 100 niños y niñas menores de 5 años, 13 tienen una estatura baja que no corresponde a su edad, igualmente, 7 de cada 100 niños y niñas menores de 5 años tienen bajo peso con relación a la edad, un indicador de desnutrición global. Esta es una situación injusta que vulnera el derecho de niños y niñas al más alto nivel de alimentación y nutrición, más aún en un país que cuenta con las condiciones y los recursos suficientes para llevar a cabo proyectos que combatan esta problemática (UNICEF, 2000).

Con apoyo del Consorcio Latinoamericano y del Caribe de Apoyo a la Investigación y Desarrollo de la Yuca – CLAYUCA-CIAT se realizó el presente estudio para sentar las bases tecnológicas de procesamiento para el desarrollo de harinas precocidas con adecuado contenido nutricional.

El estudio se basó en el uso de los métodos de extrusión y secador de rodillos utilizados comúnmente en la preparación de alimentos precocidos, estas son técnicas muy útiles para fabricar productos alimentarios con texturas definidas y características funcionales específicas para obtener pasabocas, algunos cereales de desayuno, alimentos infantiles, golosinas y comida para animales (EUFIC, 2004).

Por estas razones el presente trabajo pretende proporcionar un producto precocido a partir de cultivos biofortificados (yuca, batata, maíz, arroz, hoja de yuca y frijol) que tenga un alto valor nutricional, que sea de fácil producción y preparación.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo General

Evaluar las condiciones técnicas para la producción de una harina precocida a partir de cultivos biofortificados.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Definir una formulación que garantice un adecuado balance nutricional en el alimento a desarrollar con la mezcla de los cultivos yuca, batata, maíz y fríjol.
- Evaluar las condiciones para la transformación de las materias primas seleccionadas mediante modificaciones termomecánicas que garanticen la adecuada reconstitución del producto.
- Definir una línea preliminar de proceso para la producción del producto precocido.

2. ASPECTOS TECNOLÓGICOS

En este capítulo se describen las principales tecnologías utilizadas en la precocción de harinas como son la extrusión y el secado por rodillos, también se hace referencia a los trabajos realizados sobre el tema tanto en Colombia como en el exterior y que sirvieron de apoyo en el desarrollo de esta investigación. Además, se presentan los métodos utilizados para la obtención de las harinas de las raíces, tubérculos y granos utilizados como materia prima.

2.1 TECNOLOGÍAS PARA LA PRECOCCIÓN DE HARINAS

La precocción es un tratamiento térmico, en algunos casos termomecánico que se realiza para obtener entre otras cosas la gelatinización de los almidones, inactivación de enzimas y microbios, disminución del tiempo de cocción necesario para la preparación de los alimentos y facilidad de almacenamiento. Las harinas precocidas de cereales y farináceos presentan una opción interesante como vehículos para el enriquecimiento con proteínas y tienen, además la ventaja de facilitar la preparación alimentos tradicionales (Zapata, 1979).

En la actualidad son muchas las tecnologías utilizadas en el procesamiento de alimentos, para la precocción de harinas las más conocidas son la extrusión y el secado por rodillos, estas tecnologías son manejadas por razones de seguridad, conveniencia y conservación de sabor de los alimentos tratados.

2.1.1 Extrusión. Determinados alimentos como algunos productos de aperitivo, cereales, golosinas e incluso algunas comidas para animales se producen gracias a un método de procesamiento conocido como extrusión. Este proceso se puede definir como una operación mediante la cual la materia prima granular (Ej. harinas) es transportada,

mezclada, amasada, cocida, pasteurizada, presurizada, solubilizada, moldeada y expandida por la acción mecánica de uno o dos tornillos que giran dentro de un barril estacionario, obligando a la materia prima a fluir a través de un orificio diseñado para tal fin, obteniendo una gran variedad de texturas formas y colores. El equipo de extrusión consiste esencialmente en un tornillo de Arquímedes que conduce y calienta los ingredientes convirtiéndolos en una masa plastificada continua mientras rota al interior de un barril herméticamente cerrado. (Harper, 1978). En la Figura 12 se muestra una sección de un tornillo de Arquímedes.

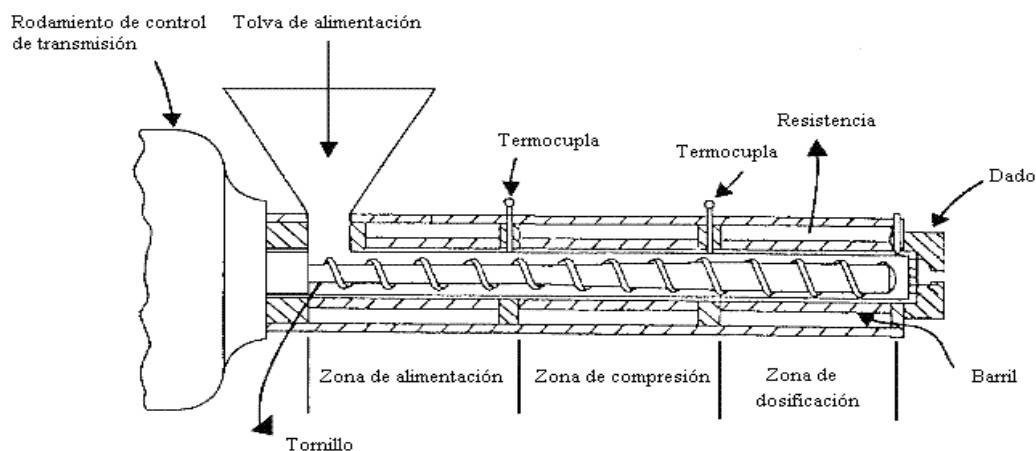
Figura 12. Sección de un tornillo de Arquímedes.



Fuente: (Miller, s.f., 7).

Al final del barril se coloca un disco perforado con una abertura menor que el diámetro del tornillo con el fin de aumentar la presión del material al interior del barril y de restringir su salida mientras se realiza la cocción como se muestra en la Figura 13.

Figura 13. Corte transversal de un extrusor.



Fuente: (Harper, s.f., 2).

Por lo general, los alimentos extrudidos pueden manufacturarse a partir de todos los granos de cereales, oleaginosas y legumbres. También se utilizan almidones modificados, así como otros hidrocoloides, emulsificantes, grasas, sales y dulcificantes. Todos ellos contribuyen a la estructura del producto.

Una de las ventajas que ofrece el procesamiento de extrusión, en comparación con otros métodos de fabricación de alimentos, es que con frecuencia existe una mayor latitud en cuanto a la selección de ingredientes (la máquina puede ajustarse para manejar una amplia gama de fórmulas).

De acuerdo con la definición, las condiciones generadas por un extrusor permiten el desempeño de varias funciones y por lo tanto, hacen que la extrusión tenga varias aplicaciones industriales en campos tan disímiles como la metalurgia, los plásticos y los alimentos (EUFIC, 2004).

Efecto de la extrusión en los componentes de los alimentos. La velocidad de rotación del tornillo, la humedad de la alimentación y la temperatura al final del barril son variables que afectan significativamente las características de desempeño del extrusor y las propiedades de los productos extrudidos (Bradie y Mellowes, 1991).

La mezcla de cereales y fuentes de proteína como legumbres, pueden transformarse en alimentos listos para consumir o precocidos, conservando un alto contenido de proteína, mediante un tratamiento térmico por extrusión con el que se desnaturalizan proteínas mejorando su digestibilidad y se inactivan los factores antinutricionales existentes en los ingredientes alimenticios crudos. (Chakraborty y Bhattacharyya, s.f.)

- **Almidón:** El almidón se presenta como amilosa (un polímero lineal más soluble) y amilopectina (ramificada). La amilopectina promueve el inflado y la amilosa ofrece una textura quebradiza. Se pueden también agregar almidones modificados a fin de dar mayor resistencia y dureza a la superficie del producto. Las cantidades relativas de

amilosa y amilopectina también influyen sobre la dirección de la expansión - la amilosa ocasiona una mayor expansión lineal, en tanto que la amilopectina lo hace más en forma radial. Los almidones crudos derivados de los cereales y raíces, presentan una aglomeración granular de moléculas, estos gránulos tienen una capacidad relativamente pequeña de absorción de agua a temperatura ambiente; sin embargo, al calentar los gránulos de almidón en presencia de agua se da lugar a una estructura condensada homogénea como una gel, la cual tiene una alta capacidad de absorción de agua. El proceso de conversión del almidón crudo a gel se conoce como gelatinización.

- **Proteínas:** Las proteínas como el gluten crean elasticidad, limitando la expansión, mientras que otras como la caseína, pueden mejorar esta propiedad al ofrecer un mejor reposo en su máximo punto de inflado. La extrusión contribuye con la desnaturalización de la proteína mejorando su digestibilidad (Woodroffe, 1993).
- **Azúcares:** Los azúcares por lo general se licuan y actúan como lubricantes, reduciendo la conversión mecánica de energía. Los productos con altos contenidos de azúcar requieren mayor tiempo de residencia para cocinarse. El azúcar generalmente coadyuva a crear una estructura celular más suave y más fina.

2.1.2 Secado en rodillos. El secador de rodillos es un secador de contacto continuo ampliamente usado en la industria de alimentos para el secado de productos inicialmente en forma líquida. El secado por rodillos es utilizado para remover el contenido de humedad de un producto determinado con el fin de preservarlo durante el almacenamiento y a la vez reducir los niveles de crecimiento y actividad microbiana².

La variedad de arreglos disponibles para la alimentación asegura que soluciones, suspensiones y pastas con un amplio rango de viscosidades puedan secarse. Este tipo de

² GAVRIELIDOU, Heat transport to starch slurry gelatinizing between the drums of a double drum dryer, citado por ACEVEDO, Andrés. Estudio del proceso de obtención de hojuelas precocidas de yuca utilizando la tecnología de secado-cocción en un secador de rodillos, 2005. p. 24-25.

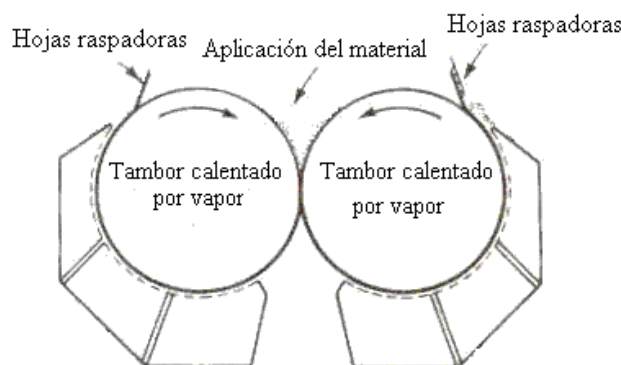
secadores satisface muchos productos sensibles al calor, ya que la exposición a las altas temperaturas está limitada a unos pocos segundos. También, si se requiere, el secado puede realizarse bajo condiciones de vacío. Ejemplos típicos de productos alimenticios secados con éxito en secadores de rodillos incluyen patatas instantáneas, jarabe de maíz y comida de bebé. Sin embargo, este secador no es conveniente para materiales que no se adhieran al rodillo y para materiales termoplásticos.

En la alimentación al secador de rodillos, una película espesa es aplicada en la superficie externa de un rodillo caliente el cual rota lentamente sobre su eje horizontal. La capa de material permanece adherida al rodillo aproximadamente el 80% de una revolución, durante este tiempo la humedad se evapora dejando una capa de sólidos que es removida de la superficie del rodillo por un raspador. La velocidad de rotación del tambor o rodillo se puede variar para satisfacer las condiciones, pero las velocidades típicas están entre 4 y 12 rpm. Los tambores son huecos y se calientan internamente por condensación de vapor u otro medio de calentamiento. Los tamaños de los rodillos en secadores industriales son aproximadamente 1.2 m de diámetro y 3.5 m de longitud.

El producto removido del rodillo es frecuentemente polvo pero, en ciertos casos, se puede obtener hojuelas o astillas (como papas fritas). La superficie externa del rodillo puede ser lisa o acanalada. En el primer caso, el producto es polvo, mientras que en el otro caso es normal que se formen cordones o “varas” en las ranuras.

En la Figura 14 se muestra el diagrama de un secador de rodillos.

Figura 14. Diagrama de un secador de rodillos.



Fuente: Perry (1992).

2.2 ANTECEDENTES DE PRECOCCIÓN DE HARINAS

Dentro del programa multinacional de tecnología de alimentos en el I.I.T.³ se ha trabajado extensamente en esta área, habiéndose estudiado diferentes alternativas de proceso para precocción. Se han analizado, además, las relaciones entre las condiciones de proceso y las propiedades funcionales de las harinas producidas y se han diseñado o adaptado metodologías para el control de los procesos. El mayor volumen de trabajos se ha hecho usando como materias primas el maíz y el arroz y se ha buscado primordialmente un grado de precocción adecuado para el empleo de las harinas precocidas en la elaboración de arepas y pastas alimenticias.

A continuación se mencionan algunos trabajos en los que se realizaron ensayos de extrusión y secado con rodillos utilizando harinas de tubérculos, raíces y granos.

2.2.1 Estudios realizados en el exterior. En el seminario sobre “La investigación tecnológica en cocción-extrusión de alimentos en América latina”, se presentaron varios resultados en cuanto a la extrusión de mezclas. Grimas (1979) realizó ensayos inicialmente

³ Instituto de Investigaciones Tecnológicas.

con maíz blanco 100%, pero el control del extrusor se hacía muy difícil a temperaturas de 99 a 108 °C, además el producto adquirió un sabor diferente y era pegajoso a la hora de hacer tortillas. Se desarrolló entonces un producto a base de maíz, soya, harina de yuca y arroz partido. Este producto se extruyó a 163 °C con una humedad aproximada de 18%. La formulación utilizada se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Formulación extruida en estudios previos.

Componente	Porcentaje (%)
Soya	10%
Harina de arroz	5%
Harina de yuca	5%
Maíz	80%

Fuente: Grimas (1979).

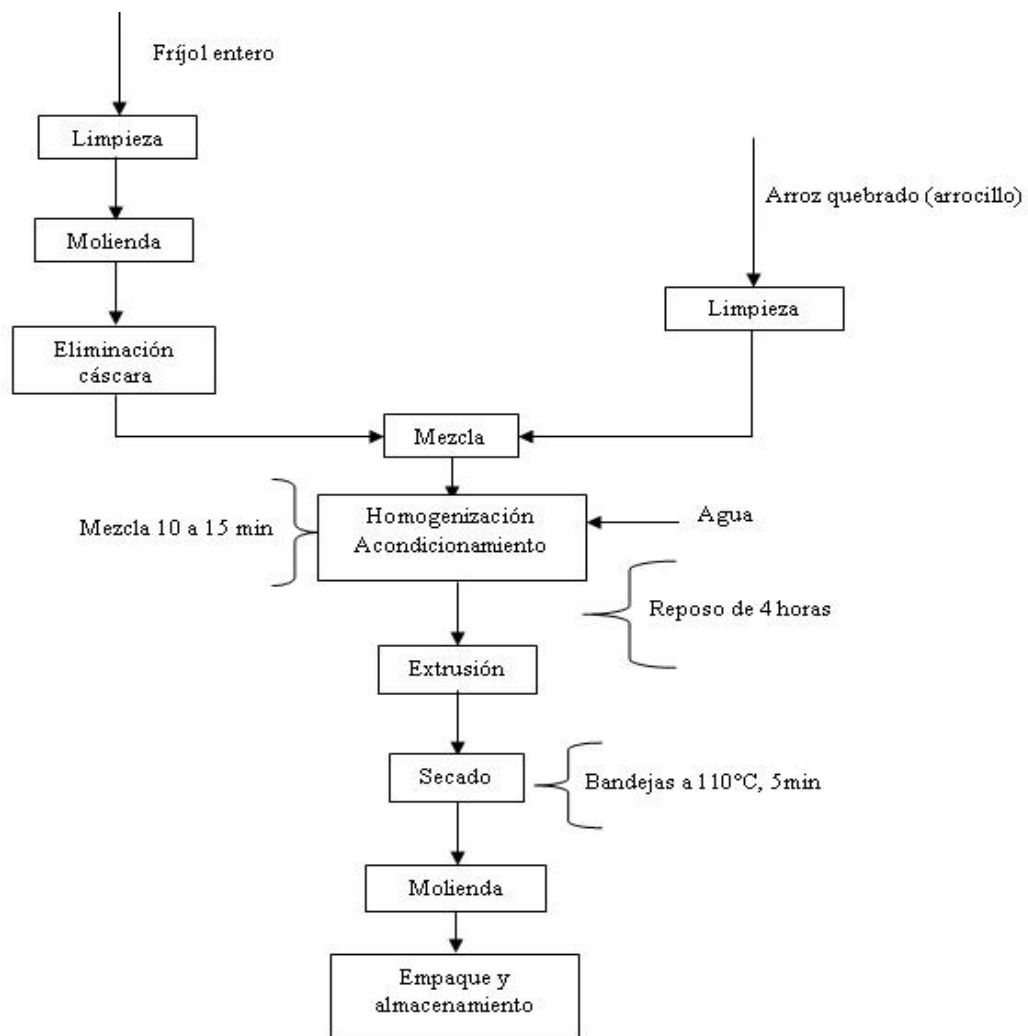
Grimanesa (1991) realizó estudios sobre la influencia de las variables como composición, tipo de tornillo, humedad, temperatura y velocidad de giro del tornillo en la extrusión de una mezcla de arroz (A)-fríjol (F). Los experimentos se realizaron a las siguientes condiciones:

Composición:	20% F-80% A y 30% F-70% A
Humedad:	15%, 20% y 25%
Relación de compresión:	1:1 y 3:1
Temperatura:	150 °C y 150-180 °C
Velocidad del tornillo:	80 y 150 rpm

En este estudio se concluyó que con un tornillo con relación de compresión 1:1 se obtienen productos insuficientemente cocidos, estos mejoran si se somete a un perfil de temperatura alto con las rpm más bajas y con humedades altas (25%). Con el tornillo de relación de compresión 3:1 y con humedades de 25%, se obtienen productos insuficientemente cocidos

independientemente de las otras variables. Humedades de 15 y 20% con velocidad del tornillo baja (80 rpm) producen mezclas completamente cocidas. En la Figura 15 se muestra el diagrama de bloques del proceso de producción de extrudidos utilizando mezclas de frijol y arroz.

Figura 15. Proceso de producción de extrudidos de mezclas de frijol-arroz.



Fuente: Grimanesa (1991).

Los métodos de evaluación de producto utilizados:

- Prueba amilográfica

- Índice de absorción y solubilidad en agua y poder de hinchamiento.
- Prueba de consistencia
- Densidad del producto extrudido
- Relación de expansión

La extrusión de harina de papa ha sido menos estudiada en comparación con otros cereales, Della (1995), en sus estudios encontró dos diferencias principales cuando se compara con otros almidones: Alta viscosidad de fundición y fundición temprana en el extrusor. Ambas condiciones determinan la dificultad del proceso caracterizado por los altos requerimientos energéticos. Estas dificultades se pueden superar acortando la longitud del tornillo en la cual la harina es una fase fundida homogénea.

Sobre el efecto de extrusión de almidones de papa nativos y pregelatinizados también se ha encontrado que el almidón nativo no puede ser extrudido sólo a bajas humedades y con dados pequeños, por consiguiente se recomienda utilizar humedades mayores a 30% total base húmeda.

Figuerola (1990), realizó un estudio de la elaboración de harinas precocidas de frijol utilizando secador de rodillos y extrusión, encontrando que las condiciones óptimas de operación del proceso de extrusión son: temperatura de salida de 150 °C, granulometría de la harina 20 mallas y 19% de humedad. En el secador de rodillos a 3 rpm y 125 °C de temperatura en la superficie de los rodillos se obtuvieron los índices de solubilidad más altos que a 5 y 7 rpm. La comparación entre los procesos mostró que la extrusión-cocción tiene mayor factibilidad técnica y económica de implementación a nivel agroindustrial para la producción de una harina de frijol y soya.

Carvalho (1979), en su estudio tiene en cuenta que los cereales representan más del 50% de la proteína disponible en el mundo y que estos se pueden combinar para complementarse entre sí, por ejemplo se puede mezclar un cereal con bajo contenido de lisina como el maíz con uno que si posea este aminoácido como la soya. El objetivo de su trabajo fue la

obtención de harinas precocidas para la preparación de cremas, sopas o bebidas instantáneas. En este estudio se utilizó un extrusor marca Wenger, modelo X-5, y las viscosidades se determinaron en un equipo Brabender. La materia prima está compuesta por harinas de maíz y arroz 70% y harina de Soya 30%.

Condiciones de operación

Rotación del tornillo	500 rpm
Alimentación	7,5 kg/h

En la Tabla 3 se presenta la composición de las materias primas y los productos obtenidos.

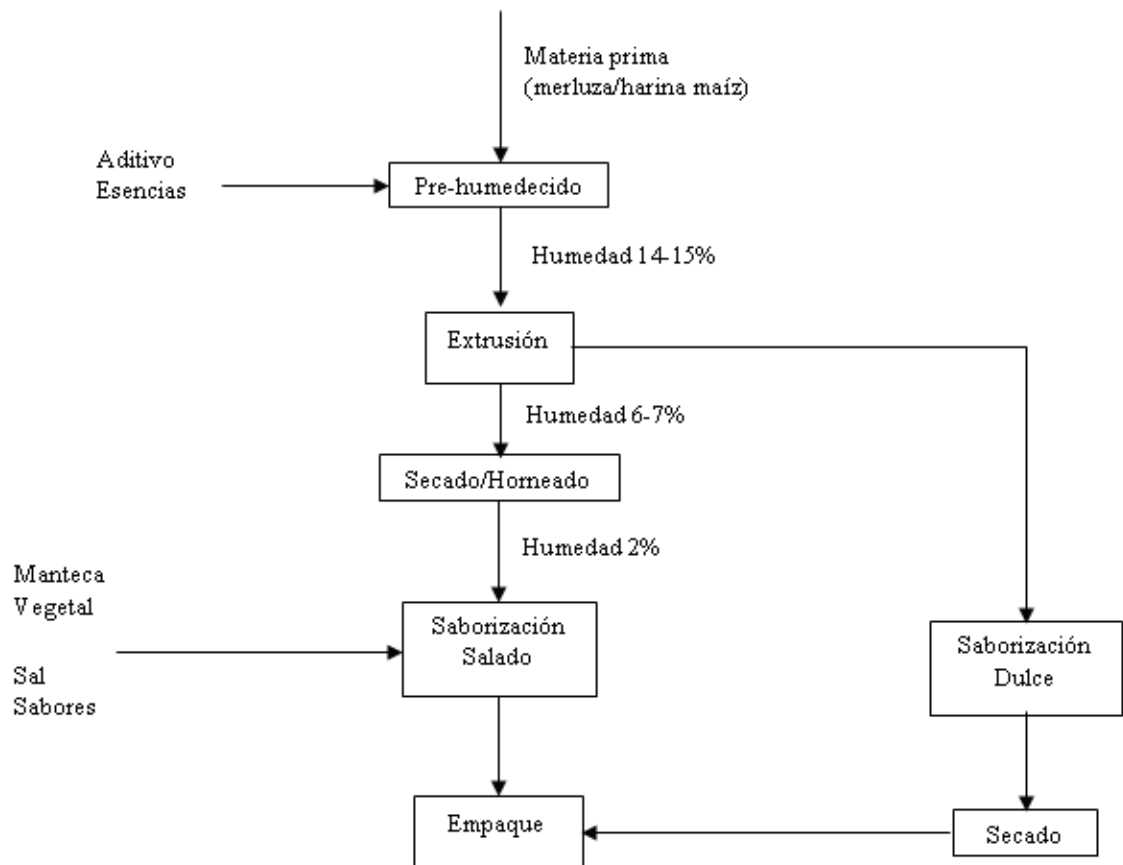
Tabla 3. Comparación de la composición de las materias primas antes y después de la extrusión en el trabajo de Carvalho.

Material	Proteína %	Materia grasa %	PDI %	Actividad ureática %	PER
Harina sin extrudir					
Maíz	7,5	1,13	4,60	Ausente	-
Maíz + soya	19,6	0,97	17,90	0,60	-
Arroz	9,50	1,12	6,30	Ausente	-
Arroz + soya	20,00	0,87	18,80	0,50	-
Extrudidos					
Maíz	8,60	0,85	-	Ausente	0,5
Maíz + soya	21,10	0,72	7,00	Ausente	2,3
Arroz	9,80	0,56	7,10	Ausente	1,3
Arroz + soya	22,0	0,75	7,70	Ausente	2,1
PDI:	Índice de dispersibilidad de proteína				
PER:	Coeficiente de eficiencia proteica				

Otros estudios (Maza, 1998) describen la utilización de la pulpa de merluza deshidratada en la elaboración de bocaditos expandidos por extrusión de maíz. En la Figura 16 se presenta el diagrama de bloques del proceso. La adición de pulpa seca eleva la calidad del producto

sin alterar sus propiedades físicas y organolépticas. El procesamiento se lleva a cabo con una materia prima (mezcla merluza - maíz) con una humedad menor al 15%, 143 rpm y una temperatura superior a 150 °C.

Figura 16. Proceso de producción de extrudidos a partir de harina de maíz y pulpa de merluza.



Fuente: Maza (1998).

En la Tabla 4 se presentan el contenido de humedad, proteína, grasa, ceniza y carbohidratos antes y después del proceso de extrusión.

Tabla 4. Comparación de la composición de las materias primas antes y después de la extrusión de Maza.

Composición	Merluza	Maíz	Extrudido
Humedad	10,49	15,44	6,04 – 7,5
Proteína	80,45	6,36	12,9 – 14,5
Grasa	2,81	1,08	0,13 – 0,5
Ceniza	2,96	0,36	0,67 – 0,75
Carbohidratos	- -	76,76	78,79 – 79,6

2.2.2 Estudios realizados en Colombia. Álvarez y Saavedra (1997), en su proyecto “Formulación, obtención y evaluación de extrudidos a partir de harina de yuca” obtuvieron extrudidos a partir de formulaciones con harina de yuca 100% y mezclas de harinas yuca-maíz y yuca-soya a diferentes porcentajes (85, 80 y 75% de yuca), encontrándose mayor continuidad de flujo en el equipo al trabajar con harina de yuca 100% y con mezcla yuca-maíz (80-20%). La mayor dificultad se presentó al trabajar con mezclas yuca-soya, pues existieron mayor número de atascamientos.

En la Tabla 5 se encuentran resumidos los valores encontrados para los parámetros de operación.

Tabla 5. Parámetros para la operación óptima del equipo.

Harina o Mezcla de Harinas	Velocidad del Tornillo (rpm)	Velocidad de Alimentación (g/min)	Humidificación (ml/min)
Yuca	505	126-142	22
Yuca-Maíz	537	136-139	16
Yuca-Soya	550	136	16

Otras condiciones definidas fueron: la temperatura de alimentación (entre 45 y 55 °C) y los diámetros de partícula promedio utilizados (0,556 mm para yuca, 0,670 mm para maíz y

0,193 mm para soya). Las formulaciones que permitieron mejor continuidad de flujo en el equipo se mezclaron con bicarbonato de sodio y aceite, pero los resultados obtenidos no se consideraron buenos, en el primer caso por la presencia de sabores residuales y en el segundo por atascamiento del extrusor. Finalmente, se estudiaron los resultados obtenidos y se propuso la utilización de los extrudidos, como harina precocida para consumo en coladas y deditos, pues no se encontraron las cualidades necesarias para el consumo directo.

Ocoró (2005), realizó un trabajo de extrusión termoplástica de harina de yuca, en donde evaluó los efectos de la variedad y de la presencia de cáscara en la harina. En este estudio se utilizó un extrusor de tornillo simple a escala de laboratorio, se variaron la temperatura (95-105 °C), la velocidad de giro del tornillo (350 y 550 rpm) y el contenido de humedad de la harina (13 y 15%). Los resultados de este estudio indicaron que la presencia de cáscara no tuvo un efecto global significativo sobre la energía específica aplicada al material en el proceso de extrusión, pero sí afectó las características de los productos. Se logró obtener varios productos con apariencia agradable, con valores de fuerza de fractura (dureza) apropiados para consumo humano.

Acevedo (2005), realizó un estudio con un secador de rodillos para obtener hojuelas precocidas de yuca. En esta investigación se establecieron varias condiciones del proceso, se compararon dos cultivares de yuca y se evaluó el efecto de la velocidad de giro de los rodillos en las características del producto final mediante ensayos de consistencia, pegajosidad, índices de solubilidad y absorción de agua y viscosidad. Se encontró que al aumentar el tiempo de retención del material en la superficie de los rodillos aumentó el grado de gelatinización del almidón provocando hinchamiento y daño de la estructura de los gránulos de almidón aumentando su solubilidad. Las hojuelas obtenidas presentaron mucha pegajosidad y bajo valor de consistencia (poca fluidez).

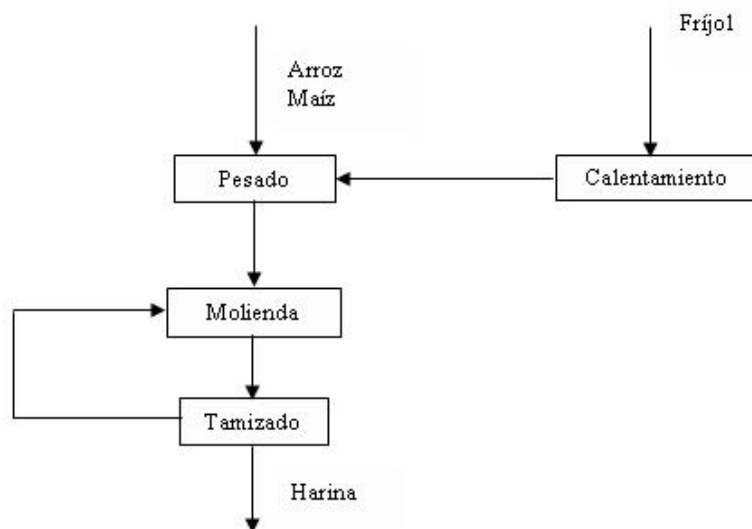
2.3 PRODUCCIÓN DE HARINAS

La producción de harinas de tubérculos, raíces y grano, se ha convertido en una respuesta a los problemas de almacenamiento y por ende a los de conservación y distribución de estos alimentos, aunque el consumo en fresco de estos cultivos es el más apetecido, los productos procesados constituyen una opción de aplicación diferente para las industrias locales comerciales ya que permiten darle un valor agregado y desarrollar nuevos mercados.

2.3.1 Producción de harina de maíz, frijol y arroz. La producción de cada una de estas harinas se hace de manera similar. Los granos limpios son introducidos en un molino de rodillos metálicos de superficie lisa que van triturando el grano para obtener la harina. La granulometría de la harina se fija mediante la separación entre los rodillos y el número de pasos del material por el proceso de molienda, una vez obtenida la harina se pasa a través de una serie de tamices con el fin de seleccionar el tamaño de partícula deseado.

En la producción de harina de frijol se llevan a cabo los mismos pasos pero antes de introducir los granos en el molino, estos se someten a un calentamiento por 30 minutos a 60°C con el fin de reducir la humedad del grano para evitar el apelmazamiento de material en los rodillos del molino. La Figura 17 muestra el diagrama de bloques de dicho proceso:

Figura 17. Diagrama de bloques de la producción de harina de maíz, arroz y frijol.



2.3.2 Producción de harinas de yuca y batata. Las etapas de producción de las harinas de yuca y batata son: pesado, lavado, troceado, secado y molienda.

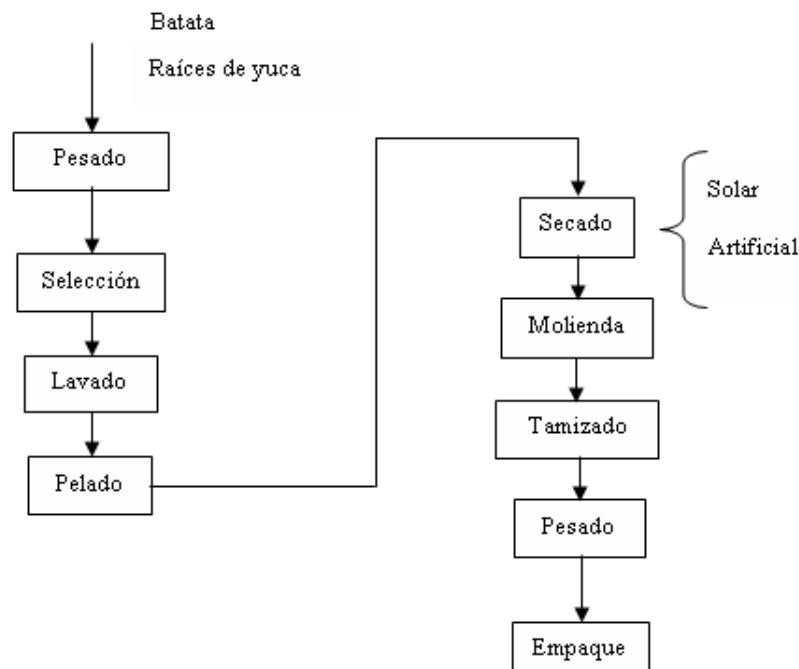
- *Recepción y pesaje de la materia prima:* En esta operación se reciben las raíces de yuca ó la batata y se pesan para su control y entrada.
- *Selección y adecuación:* Con la selección de las raíces; se eliminan las raíces pequeñas o que presenten algún síntoma de deterioro, ataque de plagas o enfermedad. Si se requiere se retira el tocón o pedúnculo de las raíces y las raíces muy grandes se parten en dos. Cuando se procesa batata se realiza el mismo procedimiento de selección.
- *Lavado:* Un buen lavado se refleja en el bajo contenido de cenizas en el producto final. Esta operación se realiza en una máquina lavadora consiste de un tambor metálico de forma cilíndrica. Para el lavado se debe usar agua potable que se aplica a presión dentro del tambor a un flujo de 32 litros por minuto durante cinco minutos. La acción combinada, tanto el agua como de la fricción entre raíces y paredes del tambor remueve las impurezas y la mayoría de la cascarilla de la yuca, este desecho sale por las perforaciones en el tambor hacia una malla que separa el desecho del agua. En el procesamiento de la batata el lavado retira la tierra y demás partículas en la superficie del tubérculo, pero no retira la cáscara de la batata ya que esta se encuentra muy adherida a la pulpa. Para mejorar la calidad microbiológica del producto final se realiza una desinfección aplicando al final del lavado una solución de hipoclorito de sodio en agua a 200 ppm..
- *Troceado:* Esta operación de reducción de tamaño es necesaria para aumentar el área de transferencia de calor de la materia prima y acelerar el secado del material. Se efectúa en una máquina trozadora (Ostertag, 1992).
- *Secado:* El secado es la operación más relevante del proceso, tradicionalmente se ha secado en patios por exposición al sol, sin embargo esta práctica presenta grandes

inconvenientes relacionados con la calidad microbiológica del producto final. En esta operación se reduce la humedad por evaporación de los trozos de material hasta alcanzar un nivel inferior al 13 % en base húmeda. Pueden ser utilizadas tecnologías de secado artificial, con sistemas de aire caliente usando lecho semifluidizado o secadores de bandejas. El contenido de humedad de la harina depende del método de secado, tiempo de secado, del periodo y las condiciones de almacenamiento. Por lo general la humedad de esta harina está entre 4.4% y 13.2%. Si se utiliza un secador solar puede obtenerse un contenido de humedad menor a 8%, mientras que con secadores artificiales puede reducirse dicho contenido a 2 ó 3%.

- *Molienda*: Se utilizan tamices y un ro-tap para obtener la granulometría requerida de la harina.

En la Figura 18 se muestra el diagrama de bloques del proceso de producción de harina de yuca y harina de batata.

Figura 18. Diagrama de bloques de la producción de harina de yuca ó batata.



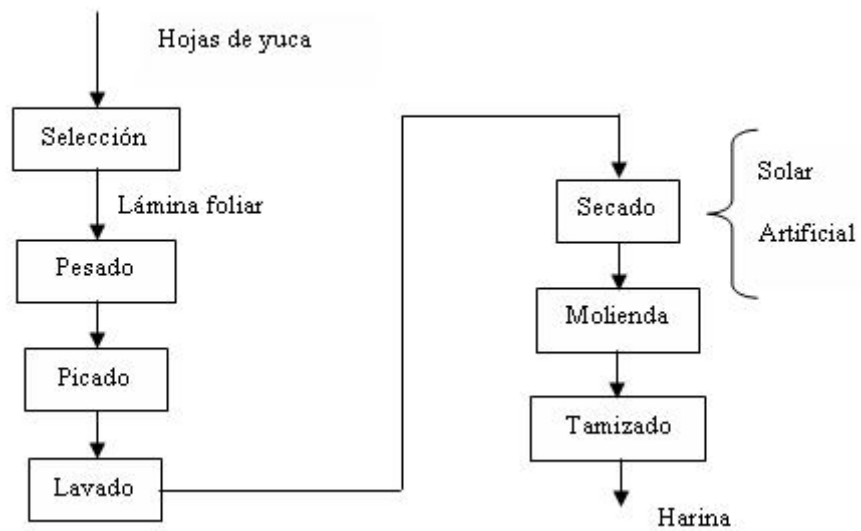
2.3.3 Producción de harina hojas de yuca. Inicialmente se reciben las hojas de yuca y se pesan para su control y entrada al proceso, posteriormente se realiza la selección y adecuación teniendo en cuenta la sanidad del producto. Se eliminan hojas que presenten daños mecánicos (golpes, cortaduras, hojas marchitas), ataque microbiológico, o por insectos, así como el material extraño, es decir, palos, piedras o partículas distintas a la materia prima en cuestión. La adecuación de la materia prima seleccionada, es una operación en la cual se trata de que ésta quede completamente lista para ingresar al proceso, en esta etapa se retiran los pecíolos. El pesaje de materia prima se realiza con el fin de determinar la cantidad real que ingresa al proceso de obtención de harina (Giraldo, 2005).

- *Picado.* Esta operación busca reducir de tamaño las hojas y facilitar el secado dado que el área de transferencia de calor de la materia prima se aumenta, además tiene como objetivo principal la liberación del ácido cianhídrico que ocurre de forma natural cuando se realizan cortes, propiciando así que la linamarasa actúe sobre la linamarina.
- *Lavado y Desinfección.* Es una etapa que permite obtener un producto limpio y de mejores características microbiológicas. En la etapa de lavado se utiliza agua potable, para la desinfección se utiliza una solución de hipoclorito de sodio en una concentración de 20 ppm durante 10 minutos. La solución desinfectante también es utilizada para los equipos en una concentración de 50 ppm.
- *Secado.* Para secar la lámina foliar de yuca se pueden utilizar dos tipos de secado como son el secado solar; donde el gasto de energía es nulo pero el tiempo de secado es prolongado, lo que no garantiza en todos los casos la calidad del producto final; y el secado artificial a una temperatura de 60°C durante 24 horas, donde el producto final puede presentar características mejores en calidad microbiológica al compararlo con el anterior.
- *Molienda.* En esta etapa la materia prima pasa a través de un molino para obtener la reducción de tamaño requerida.

- *Tamizado.* La harina obtenida se pasa por varios tamices para obtener la granulometría deseada.

El diagrama de bloques de este proceso se muestra en la Figura 19.

Figura 19. Diagrama de bloques de la producción de harina de hoja de yuca.



3. METODOLOGÍA

3.1 MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación se describe la localización donde se desarrolló la fase experimental, junto a los materiales, equipos y métodos de análisis utilizados.

3.1.1 Localización. La fase experimental se llevó a cabo en la planta piloto de CLAYUCA-CIAT ubicada en la ciudad de Palmira (Valle del Cauca). Las pruebas físico-químicas de las materias primas y producto final se realizaron en el Laboratorio de Calidad de yuca y en el laboratorio de Propiedades Físicas de Materiales Biológicos del Departamento de Ingeniería de Alimentos en la Universidad del Valle.

3.1.2 Materiales. Durante el desarrollo del proyecto los materiales utilizados en los ensayos fueron: harina de yuca, batata y hoja de yuca, maíz, frijol, arroz y agua. La especificación de los materiales y su procedencia se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6. Materias primas utilizadas, variedad y procedencia.

Cultivo	Variedad	Procedencia
Maíz	CORPOICA H112.	Programa CIMMYT *
Frijol	Calima	Programa de frijol CIAT
Arroz	CT-11275	Programa de arroz CIAT
Yuca	Variedad CM 523-7 (Ica Catumare)	Programa CLAYUCA **
Batata	Variedad Tainung 66	Programa CLAYUCA
Hoja de yuca	Variedad MCOL 1505 (Verdecita)	Programa CLAYUCA

*Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo.

** Consorcio Latinoamericano y del Caribe de Apoyo a la Investigación y al Desarrollo de la Yuca

3.1.3 Equipos. Los equipos utilizados durante los ensayos se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Listado de equipos.

Producción de harinas de yuca y batata	Producción de harina de maíz, frijol y arroz	Producción de la harina precocida por extrusión	Producción de la harina precocida por secador de rodillos
Báscula de 500 kg	Molino de martillos	Extrusor	Secador de Rodillos
Lavadora de raíces de yuca	Molino de rodillos	Balanza	Calderín
Trozadora tipo Colombia	Bandejas de secado	Bandeja	Molino CYCLOTEC modelo1093
Bandejas de secado	Horno 60 °C	Horno 60 °C	Tamices y agitador
Secador de flujo transversal	Tamices y agitador	Molino CYCLOTEC modelo1093	
Molino cilíndrico de aspas	Balanza	Tamices y agitador	
Ciclones			
Tamices y agitador			

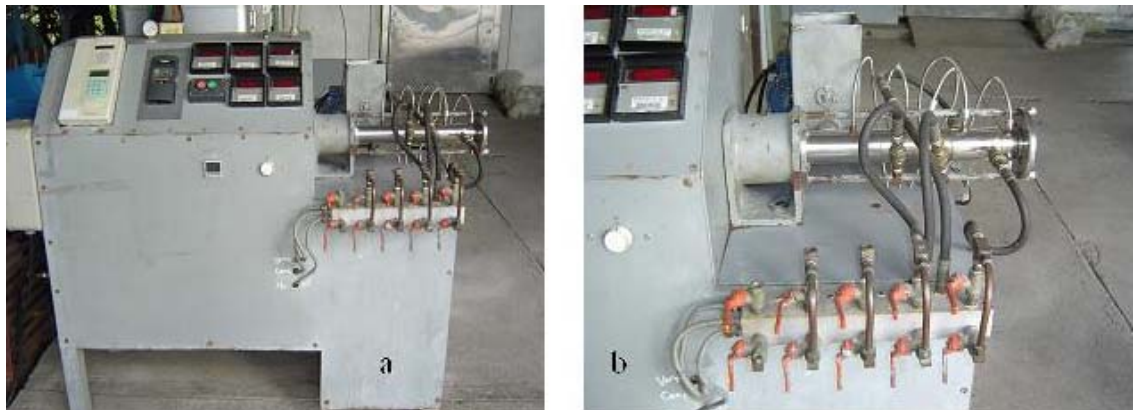
Características generales del extrusor. El equipo es un extrusor en acero inoxidable de tornillo simple a escala de laboratorio que tiene las siguientes características:

- Un barril compuesto por un juego de 3 camisas, 2 de las cuales permiten circulación de agua en su interior
- Cinco termocuplas tipo J, que permiten obtener el perfil de temperatura a lo largo del barril
- Longitud del tornillo: 39 cm aprox. Número de pasos del tornillo: 27 pasos
- Tolla de alimentación de tornillo simple
- Relación de compresión del tornillo: 3:1
- Tornillo con conicidad creciente en la raíz y decreciente en los filetes.
- Número de orificios del dado: 1 (4,2 mm)
- Controlador de temperatura: NAIS KT4
- Resistencias: 1
- Regulador de alimentación: Siemens Micromaster 420
- Motor para la operación del tornillo: 4,8Hp

- Variador de giro del tornillo: ToyoDenki modelo VF61 (3R722)
- Motor de la tolva: 0,4 Hp, 60Hz.

La Figura 20 muestra el equipo de extrusión utilizado en los ensayos, en el Anexo A se presentan las dimensiones del equipo, en los Anexos B y C se muestran las dimensiones del dado y el tornillo respectivamente.

Figura 20. Equipo de extrusión completo (a) y acercamiento al barril (b).



Procedimiento de operación del extrusor. Inicialmente debe prepararse la mezcla y realizar la determinación de humedad para poder acondicionar dependiendo de la humedad requerida para el ensayo, posteriormente la mezcla se almacena a 5 °C en bolsas de polietileno por un periodo de 24 horas. Antes de cada prueba el material acondicionado se deja reposar hasta temperatura ambiente.

- Cuando la muestra está lista, se prende la resistencia que controla la temperatura del dado para que alcance la temperatura de trabajo deseada.
- Una vez se alcance la temperatura, se inicia el giro del tornillo a las revoluciones requeridas.

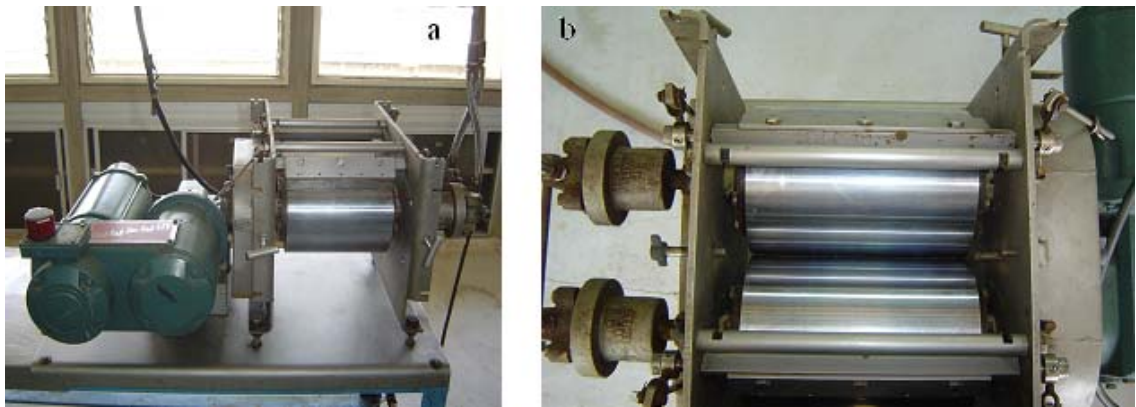
- Se alimenta al extrusor material húmedo (si el ensayo así lo requiere) y una vez agotado este alimento, se procede a agregar la harina “seca” con la humedad especificada, fijando la frecuencia de la corriente eléctrica del motor para controlar la alimentación del material.
- Si al ingresar material seco, se hace notable un aumento en el perfil de temperatura, por efectos de fricción, se pueden manipular las válvulas que permiten el paso de agua de enfriamiento a las chaquetas para evitar que se queme el material y el equipo se obstruya.
- Cuando se haya terminado el ensayo, el equipo debe limpiarse inmediatamente para impedir que el tornillo se pegue y asegurar que el material que se trate posteriormente no se mezcle con este remanente.
- Los extrudidos se introducen en un horno por 24 horas a 60 °C, con el fin de precocer las muestras para realizar los análisis posteriores. La humedad final de los extrudidos “secos” se midió en un analizador de humedad marca “Mettler Toledo” modelo LP16J, en el cual se depositan 5 g de muestra pasada por un molino CYCLOTEC modelo 1093, posteriormente, la balanza del analizador de humedad se programa a 120°C por 10 minutos con el fin de remover el agua libre.

Características generales del secador de rodillos. Este equipo está constituido por dos rodillos paralelos de área superficial 960 cm², que se calientan internamente mediante vapor saturado, los rodillos giran en sentidos contrarios y su velocidad de giro se regula por medio de un moto reductor. (Ver Figura 21).

La rotación de los rodillos hace que el material pase a través de la separación entre ellos y se divida en dos películas que se adhieren a la superficie de cada rodillo, el tiempo de secado corresponde al tiempo que tarda el rodillo en dar una vuelta sobre su eje, la película es removida de los rodillos por medio de unas hojas raspadoras dispuestas al ancho de cada

cilindro y con una inclinación de 45°. Las variables más importantes dentro de la operación de un secador de rodillos son: velocidad de rotación de los rodillos, presión de vapor, separación de los rodillos, cantidad y concentración del alimento. Las ventajas de este tipo de secado es que se pueden alcanzar altas temperaturas y se requieren tiempos de residencia cortos.

Figura 21. Secador de rodillos utilizado en los ensayos (a) vista lateral, (b) vista superior.



Procedimiento de operación del equipo. Debe prepararse una suspensión al 20% p/p que se somete a cocción durante 3 minutos, posteriormente se deja aclimatar para poder iniciar con el ensayo de la siguiente manera:

- Ajustar la separación entre rodillos y asegurarse que las cuchillas estén raspando uniformemente la superficie de los rodillos.
- Encender el calderín que proporcionará el vapor saturado requerido para el calentamiento de los rodillos. (La presión debe estar en 25 psi para iniciar la prueba)
- Fijar la velocidad de giro de los rodillos mediante el moto reductor
- Abrir completamente las válvulas de acceso del vapor
- Alimentar el material
- Limpiar la superficie de los rodillos después de cada prueba

3.1.4 Métodos analíticos. Tanto la materia prima como el producto final fueron caracterizados en primera instancia como medida de control y en segundo lugar para realizar la evaluación de las variables de respuesta. La Tabla 8 registra los métodos analíticos utilizados y el laboratorio donde se llevaron a cabo.

Tabla 8. Tipo de análisis y métodos analíticos utilizados.

Análisis	Laboratorio – Método analítico
Fisicoquímico	Laboratorio Calidad de yuca - CIAT
Materia seca (%)	ICONTEC. 2002. <i>Alimentos para animales: Yuca integral seca para consumo animal</i> . NTC 3528. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), Bogotá, Colombia.
IAA (g gel/g muestra) e ISA (%)	Anderson, R., Conway, H.F., Pheiser, V.F. & Griffin, E.L. 1969. Gelatinisation of corn grits by roll and extrusion cooking. <i>Cereal Science Today</i> , 14: 4-12.
Viscograma	ISI 2000. <i>Determination of viscosity of starch by Brabender</i> . ISI 19-6e. In <i>Laboratory methods</i> . Science Park, Aarhus, Denmark, International Starch Institute (ISI). (available at http://www.starch.dk/isi/methods/index.htm).
Proximal	Laboratorio de servicios analíticos -CIAT
Proteína (%)	AOAC. 1955. <i>Nitrogen (total) of flour</i> . Association of Analytical Chemists International (AOAC 13.31). 7 ed. MD, USA, Gaithersburg.
Fibra cruda (%)	AOAC. 1955. <i>Fibre crude of flour</i> . Association of Analytical Chemists International (AOAC 13.20). MD, USA, Gaithersburg.
Extracto etéreo (%)	AOAC. 1955. <i>Ethereal extract of flour</i> . Association of Analytical Chemists International (AOAC 13.19). MD, USA, Gaithersburg.
Cenizas (%)	AOAC. 2000. <i>Ash of flour</i> . Association of Analytical Chemists International (AOAC). 7 ed. MD, USA, Gaithersburg.
Físico	Laboratorio calidad alimentos - UNIVALLE
Consistometría	Protocolo de los autores

3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

Debido a que no hay referencias de trabajos de extrusión que involucren la mezcla de las materias primas proyectadas en este trabajo y que el equipo utilizado sólo se ha empleado para procesamiento de harina de yuca, surgió la necesidad de dividir el diseño experimental en dos fases: ensayos preliminares y ensayos definitivos.

Los ensayos preliminares se realizaron con el fin de observar la operabilidad del equipo y encontrar unas condiciones de operación apropiadas para la extrusión de mezclas de diferente composición buscando determinar la influencia en el proceso de tener cada cultivo como componente mayoritario en cinco mezclas (P2 a P6) teniendo como punto de partida el comportamiento de una mezcla con igual contenido de cada harina (P1), además se quiso observar el comportamiento de las mezclas sin incluir la harina de hoja de yuca (P7).

Con estos ensayos preliminares se encontraron unas condiciones de operación que proporcionan un comportamiento estable en el equipo, y con éstas se realizaron los ensayos definitivos.

3.2.1 Definición de variables de entrada y de respuesta para ensayos preliminares en extrusión. Las condiciones de operación del equipo con las que se trabajó en los ensayos se escogieron teniendo en cuenta condiciones de trabajo reportadas en la literatura con extrusión de harina de yuca (Ocoró, 2005). Se evaluaron dos velocidades de tornillo (300 y 350 rpm) teniendo en cuenta el tiempo de residencia e intensidad deseada del tratamiento mecánico, los cuales no debían ser tan altos para no degradar demasiado los almidones. También se evaluó la conveniencia de utilizar harina con mayor humedad para iniciar las corridas, ya que según Ocoró esto ayuda a estabilizar el equipo. En la Tabla 9 se muestran las variables de entrada con sus respectivos niveles, así como las variables de salida analizadas en los ensayos preliminares.

Tabla 9. Variables de Entrada y de Salida para los ensayos preliminares.

Variables de Entrada	Niveles Variables de Entrada	Variables de Salida
Humedad de la mezcla	25, 30 y 35%	
Temperatura en la última sección del barril	80, 90, 100 y 110 °C	Comportamiento del equipo en cuanto a estabilidad y facilidad de control.
Composición de la mezcla	P1, P2, P3, P4, P5, P6 y P7	Aspecto externo del extrudido
Velocidad de alimentación	17,64 y 37,6 g/min	Índices de solubilidad en agua e índices de absorción de agua de los extrudidos.
Velocidad de giro del tornillo	300 y 350 rpm	

Los niveles de temperatura evaluados se escogieron teniendo en cuenta el grado de cocción que se busca para obtener un producto con expansión (Ocoró, 2005). La rata de alimentación se trabajó a 17,64 y 37,6 g/min para evitar taponamiento por acumulación de material en la entrada al barril. En el Anexo D se muestra la curva para expresar la alimentación en términos de gramos/minuto a partir del control de la frecuencia de la corriente eléctrica fijada a la entrada del motor (Hz).

3.2.2 Planeación de ensayos preliminares en extrusión. Se plantearon siete formulaciones y 17 ensayos preliminares como se describen en la Tabla 10 y la Tabla 11 respectivamente.

Tabla 10. Composiciones de las mezclas para los ensayos preliminares.

	% en base húmeda de cada componente					
	Yuca	Batata	Maíz	Arroz	Fríjol	Hoja
P1	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	2,5
P2	39,5	14,5	14,5	14,5	14,5	2,5
P3	14,5	39,5	14,5	14,5	14,5	2,5
P4	14,5	14,5	39,5	14,5	14,5	2,5
P5	14,5	14,5	14,5	39,5	14,5	2,5
P6	14,5	14,5	14,5	14,5	39,5	2,5
P7	20	20	20	20	20	0

Los primeros ocho ensayos se realizaron con la composición P7, en ellos se varió la tasa de alimentación, la humedad de la mezcla, la velocidad de giro del tornillo y se realizaron pruebas iniciando con material de mayor humedad como se describió anteriormente.

Tabla 11. Variaciones en las condiciones de operación del equipo.

No. Prueba	Composición	Humedad mezcla (%)	Temperatura (°C)	Humedad inicial mezcla (%)	Alimentación (g/min)	Vel. Tornillo (rpm)
1	P7	25	90	40 ⁺	37,6	300
2	P7	35	90	40 ⁺	37,6	300
3	P7	25	90	-	37,6	300
4	P7	25	90	40-35 ⁺	37,6	300
5	P7	30	90	35 ⁺	37,6	300
6	P7	30	90	-	37,6	300
7	P7	30	90	-	37,6	350
8	P7	30	90	-	17,64	300
9	P1	30	90	-	17,64	300
10	P2	30	90	-	17,64	300
11	P3	30	90	-	17,64	300
12	P4	30	90	-	17,64	300
13	P5	30	90	-	17,64	300
14	P6	30	90	-	17,64	300
15	P1	30	110	-	17,64	300
16	P1	30	80	-	17,64	300
17	P1	30	100	-	17,64	300

(+) Humedad de arranque en la mezcla para operatividad del equipo

(-) No se inicia con material húmedo para el arranque de la prueba

Las pruebas preliminares se realizaron con las siguientes condiciones:

- Ensayos a composición constante de la mezcla con variación en la humedad: Se realizaron con la formulación P7 a una temperatura de 90 °C, y con una velocidad de giro de tornillo de 300 rpm.
- Ensayos con variación en la tasa de alimentación y velocidad de giro del tornillo: Se utilizó la composición P7, la temperatura de trabajo fue de 90 °C, la humedad de la mezcla se trabajó en 30%.
- Ensayos con variación en la composición de la mezcla: Estas pruebas se realizaron con una humedad de mezcla de 30%, velocidad del tornillo de 300 rpm, rata de alimentación de 17,64 g/min y temperatura de la sección final del barril de 90 °C.
- Ensayos con variación de la temperatura: Se utilizó la mezcla P1 con una humedad de 30%, una tasa de alimentación de 17,64 g/min y una velocidad de giro de tornillo de 300 rpm.

Posteriormente, se planteó una formulación (P8) teniendo en cuenta el aporte nutricional de cada cultivo de acuerdo con lo que se muestra en la Tabla 12, los requerimientos diarios de vitaminas, proteína, minerales y energía para niños (mostrado anteriormente en la Tabla 1), y el comportamiento de las harinas en las pruebas iniciales; con esta composición, se realizaron cinco pruebas con variación de humedad y de temperatura. En la Tabla 13 se muestra la formulación de mezcla planteada.

Tabla 12. Principal aporte nutricional de los diferentes cultivos.

	Cultivos con mayor aporte
Proteína	Fríjol - Maíz
Vit A	Batata - Hoja de yuca
Vit C	Yuca - Batata
Tiamina	Arroz - Maíz - Fríjol
Riboflavina	Maíz - Fríjol
Niacina	Arroz - Maíz - Fríjol
Calcio	Yuca - Fríjol – Hoja de yuca
Fósforo	Arroz - Maíz - Fríjol
Magnesio	Arroz - Maíz - Fríjol
Hierro	Fríjol – Maíz - Hoja de yuca
Zinc	Maíz - Fríjol

Tabla 13. Formulación P8.

Componente	%
Arroz	30
Maíz	15
Fríjol	25
Yuca	17,5
Batata	10
Hoja de Yuca	2,5

En la Tabla 14 se muestra el planteamiento de las pruebas preliminares con la composición propuesta (P8) variando la temperatura, la humedad de la mezcla e iniciando en algunos ensayos con material de mayor humedad. Se fijó la velocidad de tornillo en 300 rpm dado que en los ensayos a 350 rpm se presentaron problemas de atascamiento.

Tabla 14. Pruebas preliminares con la composición propuesta (P8).

No. Prueba	Composición	Humedad mezcla (%)	Temperatura (°C)	Humedad inicial mezcla (%)	Alimentación (g/min)	Vel. Tornillo (rpm)
18	P8	25	90	-	17,64	300
19	P8	25	90	35	17,64	300
20	P8	35	90	40	17,64	300
21	P8	30	90	-	17,64	300
22	P8	30	100	-	17,64	300

(-) No se inicia con material húmedo.

En el Anexo E se puede observar el registro y algunas observaciones de los resultados de los ensayos preliminares.

3.2.3 Definición de variables de entrada y de respuesta para ensayos definitivos en extrusión. Para los ensayos finales, con base en los resultados de los ensayos preliminares, se eligieron como factores experimentales o variables de proceso la composición (4 composiciones o niveles) y la temperatura (2 niveles: 90 y 100 °C); la velocidad de giro del tornillo (1 nivel: 300 rpm), la tasa de alimentación (1 nivel: 17,64 g/min) y la humedad de la mezcla (1 nivel: 30%). Los niveles de temperatura corresponden a los datos leídos en la última sección del barril, en la zona inmediatamente anterior al dado. En la Tabla 15 se presenta el resumen de las variables de entrada con sus respectivos niveles y las variables de salida analizadas en los ensayos definitivos.

Tabla 15. Variables de Entrada y de Salida para los ensayos definitivos.

Variables de Entrada	Niveles Variables de Entrada	Variables de Salida
Temperatura	90 – 100 °C	ISA e IAA Consistencia
Composición	C1, C2, C3 y C4	Comportamiento reológico Análisis de nutrientes

3.2.4 Planeación de ensayos definitivos de extrusión. En la Tabla 16 se describen las mezclas que se sometieron a los tratamientos térmicos y mecánicos, especificando el contenido de cada cultivo en las mezclas realizadas (C1 a C4).

Tabla 16. Composiciones de las mezclas evaluadas en los ensayos definitivos.

Composición	% en base húmeda de cada componente					
	Arroz	Maíz	Fríjol	Yuca	Batata	Hoja de yuca
C1	30	15	25	17,5	10	2,5
C2	15	30	25	17,5	10	2,5
C3	25	15	30	17,5	10	2,5
C4	30	15	25	20	10	0

Se empleó un diseño factorial multinivel. El orden experimental se realizó con el paquete computacional STATGRAPHICS Plus 5.0 (licenciado para la Universidad del Valle, Departamento de Ingeniería de Alimentos) considerando dos réplicas de cada prueba para un total de 24 experimentos. Los resultados se sometieron a un análisis de varianza utilizando este mismo programa. El orden experimental se presenta en la Tabla 17.

Tabla 17. Diseño experimental de los ensayos definitivos.

No. Ensayo	Composición	Temperatura (°C)
1	C2	100
2	C3	90
3	C3	100
4	C1	100
5	C2	90
6	C4	90

7	C1	90
8	C4	100
9	C3	90
10	C1	100
11	C4	100
12	C1	90
13	C2	90
14	C2	100
15	C3	100
16	C4	90
17	C3	90
18	C1	90
19	C4	100
20	C3	100
21	C2	100
22	C2	90
23	C4	90
24	C1	100

3.2.5 Experimentos en el secador de rodillos. En relación con las pruebas realizadas en el secador de rodillos, no se presenta un diseño experimental, ya que la operación de este equipo permite tener acceso a unas pocas variables como son la velocidad de giro de los rodillos y la separación entre ellos, pero no se incluye la temperatura, por esta razón los ensayos preliminares se hicieron con el fin de determinar la velocidad de giro y separación a las cuales el producto fuera de fácil remoción de la superficie de los rodillos; posteriormente en los ensayos definitivos en el secador, se trataron las cuatro mezclas (C1, C2, C3 y C4) a 90 °C que es la temperatura que proporciona el vapor saturado del calderín.

3.2.6 Evaluación de las variables de respuesta. A los productos inicialmente se les efectuó una inspección cualitativa, donde se observó uniformidad, color, aspecto interior y de la superficie. Las principales variables cuantitativas de respuesta del proceso son el índice de solubilidad en agua (ISA) y el índice de absorción de agua (IAA), estos análisis permiten determinar el grado de cocción de los productos.

El IAA es una medida de la capacidad de absorción de agua de los componentes en la mezcla después del proceso, mayoritariamente es el almidón el que exhibe dicha

característica cuando es pregelatinizado. El ISA se refiere a todos los solubles que hay en la mezcla procesada. En el anexo F se describe el procedimiento para determinar ISA e IAA.

Otros análisis realizados fueron el de *consistencia* y el *perfil de viscosidad*, estos análisis permiten determinar el grado de espesamiento a partir de las características de fluidez y observar el comportamiento de la viscosidad con los cambios en la temperatura de una suspensión acuosa preparada con las harinas obtenidas de los productos. En el anexo G se describe el procedimiento utilizado para determinar la consistencia y el anexo H describe la prueba de determinación del perfil de viscosidad.

Durante la ejecución de los ensayos de extrusión se registraron parámetros eléctricos tales como el voltaje (V) y el amperaje (A) entregado al motor del tornillo, estos parámetros se utilizaron para calcular la energía específica aplicada al material en cada prueba (EEA) de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$EEA \left(\frac{Wh}{kg} \right) = \frac{(\text{Voltaje}(V) \times \text{Amperaje}(A))_{\text{con carga}} - (\text{Voltaje}(V) \times \text{Amperaje}(A))_{\text{sin carga}}}{\text{Flujo Másico Salida} \left(\frac{kg}{h} \right)} \times \sqrt{3} * \cos \phi \quad (\text{Ec. 1})$$

El flujo másico de salida del extrusor en cada prueba se determinó por triplicado, pesando la cantidad de producto recogido en la descarga del extrusor en un minuto; este peso fue ajustado a peso seco después de conocer la humedad del producto.

Con el objetivo de determinar el efecto de los tratamientos térmico-mecánicos realizados en los equipos de extrusión y secado con rodillos sobre los componentes nutricionales, se realizó el análisis de la composición de nutrientes de los productos finales que presentaron los valores más aceptables de ISA, IAA y consistencia. Adicionalmente, con este análisis se compararon los datos de los nutrientes antes y después de ser sometidos al proceso y se evaluaron los resultados entre los dos tipos de tratamientos utilizados (extrusión y secado en rodillos).

En la Tabla 18 se muestran los nutrientes analizados en cada materia prima utilizada.

Tabla 18. Especificación de la determinación de nutrientes realizadas a cada cultivo.

Cultivo	Proteína	Fibra cruda	Extracto etéreo	Ceniza	Hierro	Zinc
Arroz	X	X	X	X	X	X
Maíz	X	X	X	X	X	X
Yuca	X	X	X	X		
Batata	X	X	X	X		
Fríjol	X	X	X	X	X	X
Hoja de Yuca	X	X	X	X		

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados de la caracterización de las materias primas utilizadas en el proceso de extrusión y de cocción con posterior secado en rodillos, se muestran el análisis de las variables de respuesta evaluadas y la caracterización de nutrientes de los productos finales seleccionados, comparando el efecto del uso de cada tecnología en la obtención de una harina precocida empleando los cultivos seleccionados.

4.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS MATERIAS PRIMAS

Luego de haber obtenidos las harinas a partir de los granos (maíz, arroz y frijol) , de las raíces de yuca, de los tubérculos de la batata y de la lámina foliar de la planta de yuca, éstas fueron caracterizadas por medio de *análisis granulométrico* para garantizar un tamaño uniforme de las harinas utilizadas, se realizó un *análisis fisicoquímico* que incluyó los análisis de humedad, índice de solubilidad, índice de absorción en agua, fibra cruda, proteína, extracto etéreo, ceniza y nutrientes tales como hierro, zinc, carotenos (dependiendo del material) y *análisis reológico* que determinó el comportamiento de la viscosidad de las harinas en suspensiones acuosas y de parámetros característicos como temperatura de gelatinización, viscosidad máxima, facilidad de cocimiento, inestabilidad del gel e índice de gelificación.

4.1.1 Granulometría. Este análisis determinó la distribución de tamaño de las partículas de cada materia prima utilizada. En la Tabla 19 se muestra el análisis granulométrico de las harinas de cada cultivo

Tabla 19. Análisis granulométrico de las harinas.

Malla	Abertura (μm)	Retenido sobre la malla (%)					
		Arroz	Maíz	Frijol	Yuca	Batata	Hoja de yuca
50	300	57,28	78,5	33	3,03	4,85	44
70	212	5,83	17,77	60	27,27	5,83	15
100	150	5,83	1,87	6	66,67	61,17	8
140	106	12,62	0,93	1	3,03	12,62	9
Colector	0	18,45	0,93	0	0	15,53	24

Se puede observar que el tamaño de partícula obtenido en los procesos de producción de harina, en su mayoría fue superior a 150 μm , pero inferior a 212 μm , en literatura (Ocoró, 2005) se hace referencia a que un tamaño de partícula muy fino causa mayor fricción y en consecuencia mayor calentamiento a través del barril, lo cual puede contribuir con problemas de operación y estabilidad del equipo, por esta razón se decidió trabajar con granulometría menor a 212 μm . El análisis granulométrico de las mezclas se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20. Granulometría de las mezclas.

Malla	Abertura (μm)	Retenidos (%)			
		C1	C2	C3	C4
70	212	0	0	0	0
80	177	25,14	26,94	27,85	25,03
100	150	60,84	63,42	59,63	62
140	106	6,19	4,44	5,61	5,87
Colector	0	7,83	5,20	6,91	7,10

La distribución granulométrica de cada mezcla no difiere ampliamente, lo cual hace que los resultados obtenidos sean comparables. El tamaño de partícula de las materias primas debe controlarse estrictamente para lograr uniformidad en la absorción de humedad, así como en la cocción en general, deben evitarse partículas con tamaños disímiles, ya que esto puede ocasionar irregularidades.

4.1.2 Análisis fisicoquímico. En la Tabla 21 se muestran los resultados de los análisis de nutrientes que se realizó a cada cultivo de acuerdo como se especificó anteriormente en la Tabla 18.

Tabla 21. Resultados del análisis de nutrientes.

Cultivo	Proteína (g/kg)	Fibra cruda (g/kg)	Extracto etéreo (g/kg)	Ceniza (g/kg)	Hierro (g/kg)	Zinc (g/kg)
Arroz	56,77	21,80	6,60	5,60	0,36	0,02
Maíz	73,58	60,20	54,60	15,80	0,41	0,02
Batata	40,74	55,80	13,80	59,00	0,93	0,02
Frijol	186,52	122,60	22,60	57,60	0,87	0,03
Yuca	31,57	34,20	8,00	33,20	0,47	0,01
Hoja de Yuca	255,02	346,40	84,80	75,80	0,40	0,04

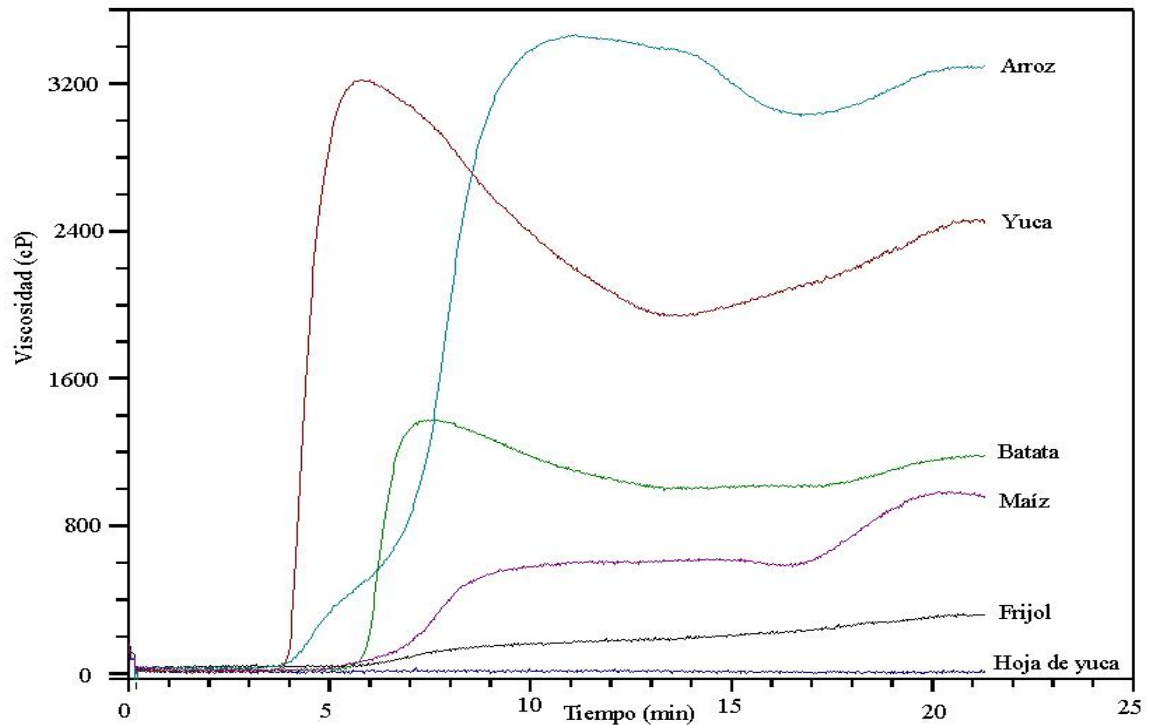
Índice de solubilidad y de absorción de agua (ISA e IAA) de las materias primas. Las harinas de cada cultivo se analizaron para determinar los valores de IAA e ISA, dichos valores se presentan en la Tabla 22.

Tabla 22. Valores de ISA e IAA de las materias primas crudas.

Cultivo	Humedad (%)	ISA (%)	IAA(g gel / g muestra)
Arroz	10,81	2,12	2,13
Maíz	11,31	9,74	3,64
Yuca	11,80	7,86	3,42
Batata	10,20	15,94	2,73
Frijol	5,20	10,06	3,00
Hoja de Yuca	7,60	23,96	3,18

4.1.3 Análisis Reológico. Este análisis se realizó mediante un viscograma donde se midió de manera continua la resistencia a la agitación de una suspensión de harina-agua al 5% p/p mientras ésta se calienta. Los resultados se muestran en la Figura 22.

Figura 22. Perfiles de viscosidad obtenidos para cada materia prima cruda.



Se puede observar que las harinas de yuca y arroz desarrollan las viscosidades máxima más altas entre las harinas de todos los cultivos utilizados, mientras que la viscosidad de la harina de hoja de yuca y la harina de frijol no aumentan considerablemente durante el desarrollo de la prueba.

4.2 ENSAYOS PRELIMINARES DE EXTRUSIÓN

A continuación se presentan los resultados de las pruebas preliminares, y el análisis de las diferentes variables estudiadas en el comportamiento del equipo y en la apariencia de los productos.

4.2.1 Ensayos a composición constante de la mezcla. En estas pruebas se observó el efecto de la humedad en el comportamiento del equipo y en la apariencia de los productos extrudidos para una misma composición. Se encontró que humedades por debajo de 30% no son recomendadas, ya que la fluidez del material dentro del extrusor no es suficiente para permitir una salida continua del producto, ocasionando acumulación dentro del barril y por consiguiente un sobreesfuerzo del motor del tornillo. También se determinó que los cambios de humedad dentro de una misma prueba no contribuyen con el buen desempeño del equipo, cuando se pasa material con alta humedad (40%) y después se introduce material seco (25%) se presenta un bloqueo en la entrada al barril, causado por el cambio de humedad que hace que la harina se compacte y no permita la alimentación al tornillo. Por esta razón se decidió utilizar humedad del 30% en los ensayos siguientes. Si se utilizan humedades mayores el producto sale demasiado húmedo e insuficientemente precocido y al someterlo a un proceso de secado adquiere una consistencia bastante dura que hace muy difícil su molienda.

4.2.2 Ensayos con variación en el flujo de alimentación y velocidad de giro del tornillo.

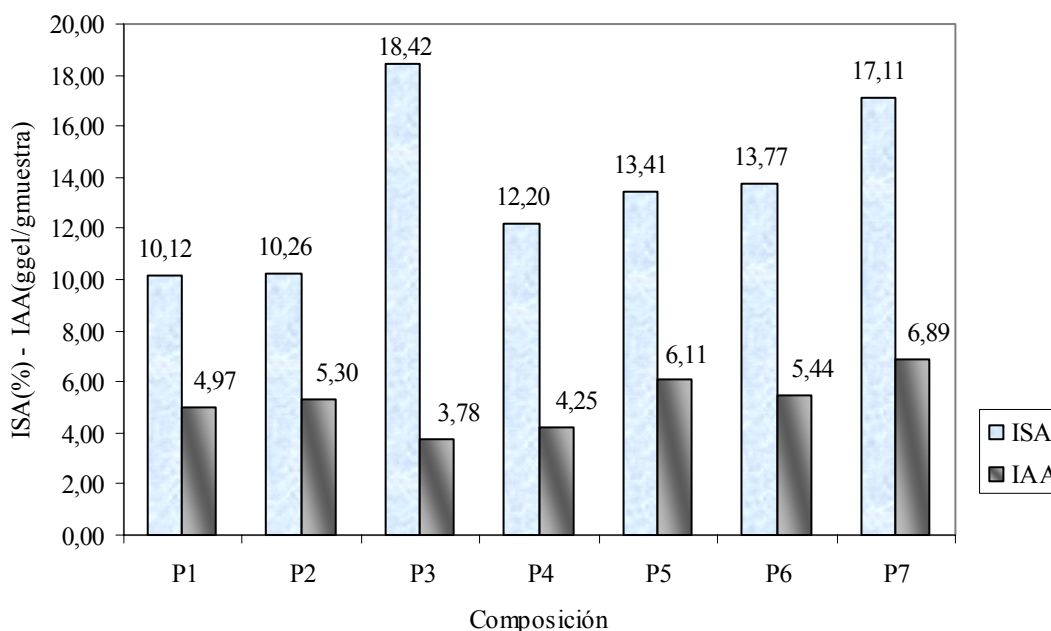
La rata de alimentación resultó ser una de las condiciones más importantes dentro del proceso, ya que de ella depende que el tornillo no se quede sin alimentación o que haya un exceso de material entrando en el barril. Se realizaron ensayos a 17,64 y 37,6 g/min y se encontró que las pruebas realizadas con más de 17,64 g/min de rata de alimentación, presentaron problemas de taponamiento en la entrada al barril, así que se determinó que 17,64 g/min es una condición apropiada para realizar la alimentación al extrusor.

En cuanto a la velocidad de giro del tornillo, 300 rpm funcionaron bien en el tratamiento de todas las composiciones propuestas, mientras que los ensayos realizados a 350 rpm ocasionaron comportamiento inestable en el equipo, manifestándose con grandes aumentos en la temperatura y con la salida de un producto de apariencia poco uniforme.

4.2.3 Ensayos con variación en la composición de la mezcla. Los resultados de estos ensayos mostraron que la mezcla de harinas cuando las proporciones de batata son mayores al 19,5%, ocasionan encostramiento del material en el barril y en la tolva de alimentación, taponando el flujo de salida, e impidiendo el funcionamiento continuo del equipo.

Con respecto a los índices de solubilidad (ISA) y absorción de agua (IAA), en la Figura 23 se puede observar que el ISA más alto se obtuvo con la formulación P3 que es la que contiene mayor cantidad de batata, pero dada su dificultad para extrudir, no se incluyó en alta proporción en las composiciones planteadas para los ensayos definitivos; se decidió incluir en las mezclas altas proporciones de maíz, arroz y frijol dado su buen comportamiento en el proceso, los resultados aceptables de ISA e IAA, y los datos de aporte nutricional reportados anteriormente (Tabla 12). En cuanto a la presencia o no de la harina de hoja de yuca, se recomienda utilizar pequeñas cantidades, ya que su inclusión aunque no afecta el desempeño del equipo, si afecta la apariencia del producto, imprimiéndole una coloración verdosa.

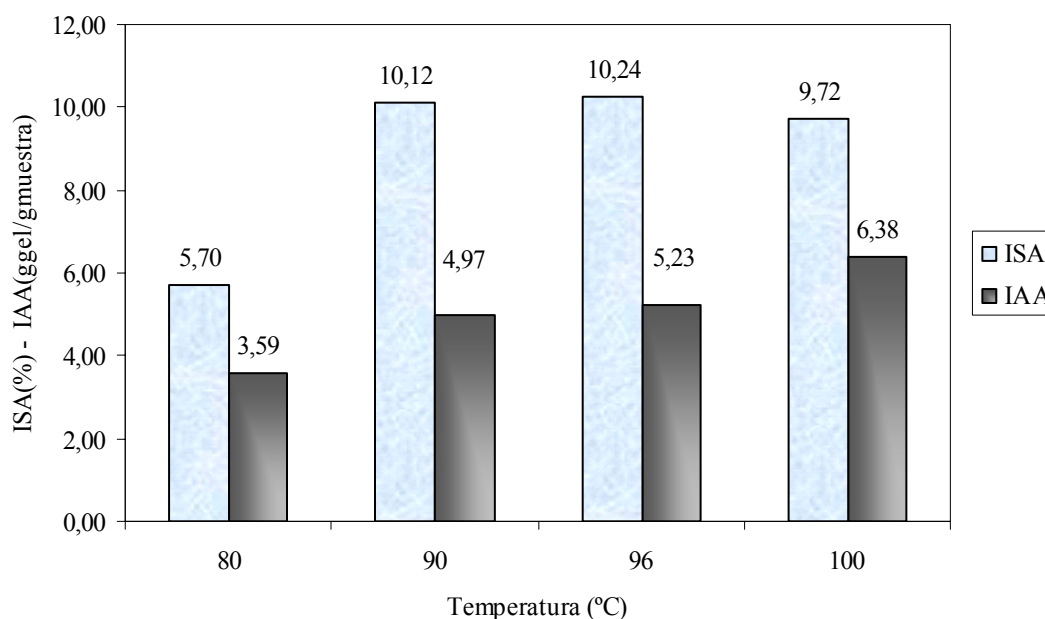
Figura 23. Efecto de la variación de la composición en los valores de ISA y el IAA.



4.2.4 Ensayos con variación de la temperatura. Estos ensayos indicaron que el equipo tiene un comportamiento adecuado entre 80 y 100 °C, aunque a 80 °C aparentemente la cocción es insuficiente y el material sale muy húmedo y quebradizo, lo cual se confirma con el bajo índice de solubilidad obtenido; a 110 °C el control de la temperatura del equipo se hace muy difícil y presenta un comportamiento muy inestable que se manifiesta en la apariencia del producto y el atascamiento del material dentro del barril.

Los valores de ISA e IAA obtenidos entre 90 y 100 °C indican un buen grado de precocción, además casi duplican los valores de ISA de las pruebas a 80 °C, por esta razón en los ensayos definitivos se evaluaron estos dos niveles de temperatura. El comportamiento de los índices de solubilidad y absorción con la temperatura en las pruebas preliminares se presentan en la Figura 24.

Figura 24. Efecto de la variación de la temperatura en los valores de ISA e IAA en los ensayos preliminares.



4.3 ENSAYOS DE EXTRUSIÓN DEFINITIVOS

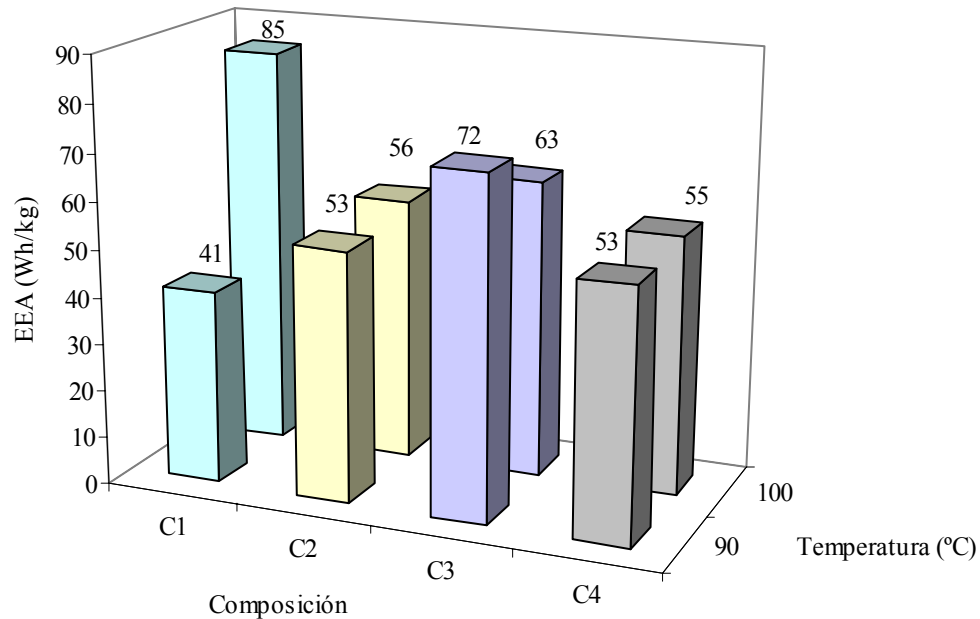
Las pruebas de extrusión preliminares mostraron que unas condiciones de operación que permiten un buen funcionamiento del equipo son:

- Velocidad de giro del tornillo: 300 rpm
- Temperatura: Entre 90 °C y 100 °C
- Humedad: 30%
- Rata de alimentación: 17,64 g/min
- No utilizar material con mayor humedad para iniciar la prueba
- Disminuir el contenido de batata en la mezcla para evitar atascamiento del equipo.

Los datos de voltaje y corriente registrados por el extrusor cuando operaba sin carga estuvieron alrededor de 38 V y 11 A respectivamente, cercanos a los datos promedio obtenidos en el desempeño de cada prueba 40 V y 12 A. La humedad utilizada para desarrollar las pruebas (30%) contribuyó a mejorar la fluidez de la mezcla en extrusión dentro del barril, reduciendo la potencia requerida del motor y la energía mecánica aplicada al material, por esta razón no se observa un cambio significativo en los valores de voltaje y corriente. El comportamiento de la energía específica aplicada durante los ensayos puede observarse en la Figura 25.

En el Anexo I, se presentan los datos de voltaje, amperaje, flujo másico de salida y la energía específica aplicada para cada ensayo realizado.

Figura 25. Efecto de la temperatura y la composición sobre la energía específica aplicada al material (EEA) en el proceso de extrusión.



Se observa que el mayor valor de EEA se presentó en la prueba a 100 °C para la composición C1, pero a 90 °C el valor de EEA para esta mezcla fue el menor de todos. Para las mezclas C1, C2 y C4 al aumentar la temperatura se incrementa el valor de la EEA, mientras que en la mezcla C3, se produce un efecto inverso; por lo tanto no se obtuvo ninguna conclusión con respecto al sentido del efecto de la composición sobre la EEA al cambiar la temperatura.

Como se mencionó anteriormente la EEA depende del voltaje, la corriente y el flujo másico de salida, que en cierta medida se relaciona con el tiempo de residencia del material en el barril y la fluidez de la mezcla. A 100 °C la mezcla C1 con arroz como componente mayoritario pudo haber experimentado menor fluidez de la pasta dentro del barril, haciendo más lenta la salida del producto y por ende aumentando la cantidad de energía aplicada al material. Para la EEA no se encontraron diferencias significativas por efecto de la temperatura ni de la composición. De manera global, en la interacción de composición y temperatura no hay diferencias estadísticas significativas.

En el Anexo J, se muestra el registro de los perfiles de temperatura promedio en cada ensayo experimental en el extrusor. El Anexo K muestra la humedad de los productos a la salida del extrusor y la humedad final de los extrudidos secos.

4.3.1 Comparación del índice de solubilidad en agua (ISA) de las harinas crudas y de las harinas extruidas. El ISA está relacionado con la cantidad de sólidos solubles en una muestra seca. El ISA permite verificar el grado de severidad del tratamiento en función de la degradación, gelatinización, dextrinización y consecuente solubilización del almidón. Los resultados del ISA y el IAA para las 24 pruebas se presentan en el Anexo L. La Tabla 23 muestra los valores de humedad y del ISA para las mezclas crudas.

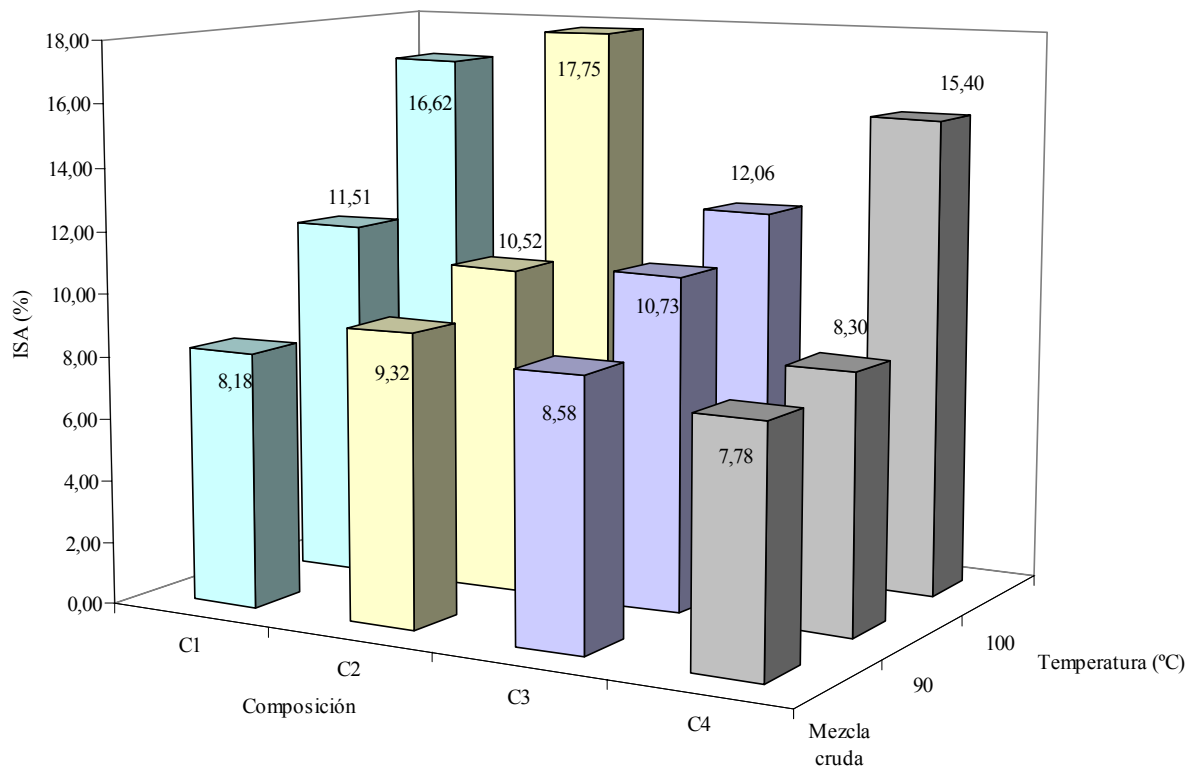
Tabla 23. Valores de ISA de las mezclas de materias primas crudas.

Composición	Humedad (%)	ISA (%)
C1	9,51	8,18
C2	9,6	9,32
C3	9,23	8,58
C4	9,62	7,78

En la Figura 26 se muestran los índices de solubilidad de las harinas crudas y luego de que éstas fueron sometidas al proceso de extrusión (90 y 100 °C).

El análisis de varianza de los datos obtenidos para las harinas extruidas se presentan en el Anexo M.

Figura 26. Efecto de la temperatura y la composición de la mezcla sobre el índice de solubilidad de agua de los productos.



En general, los productos extrudidos a 100 °C presentan un mayor índice de solubilidad en agua que los extrudidos a 90 °C, lo que indica un efecto de la temperatura sobre el ISA, independiente de la composición de la mezcla. Este efecto muestra que una mayor temperatura de cocción constituye un tratamiento más severo, incrementando la solubilidad de varios de los componentes químicos en la mezcla, principalmente del almidón. La mezcla que presenta un mayor ISA es la C2 que contiene mayor proporción de maíz, también se puede observar entre las composiciones C1 y C4 (con y sin hoja de yuca respectivamente) que la adición de hoja de yuca puede aumentar la solubilidad de los productos extrudidos.

El efecto de la interacción temperatura/composición en el índice de solubilidad en agua, fue observado a través del análisis de varianza. Tanto la temperatura como la composición tuvieron un efecto bastante significativo en los valores del ISA.

4.3.2 Análisis de índices de absorción de agua de las harinas crudas y las harinas extruidas. La Tabla 24 muestra los valores de IAA para las mezclas crudas.

Tabla 24. Valores de IAA de las mezclas de materias primas crudas.

Composición	IAA (g gel/ g muestra)
C1	2,89
C2	3,11
C3	2,93
C4	2,89

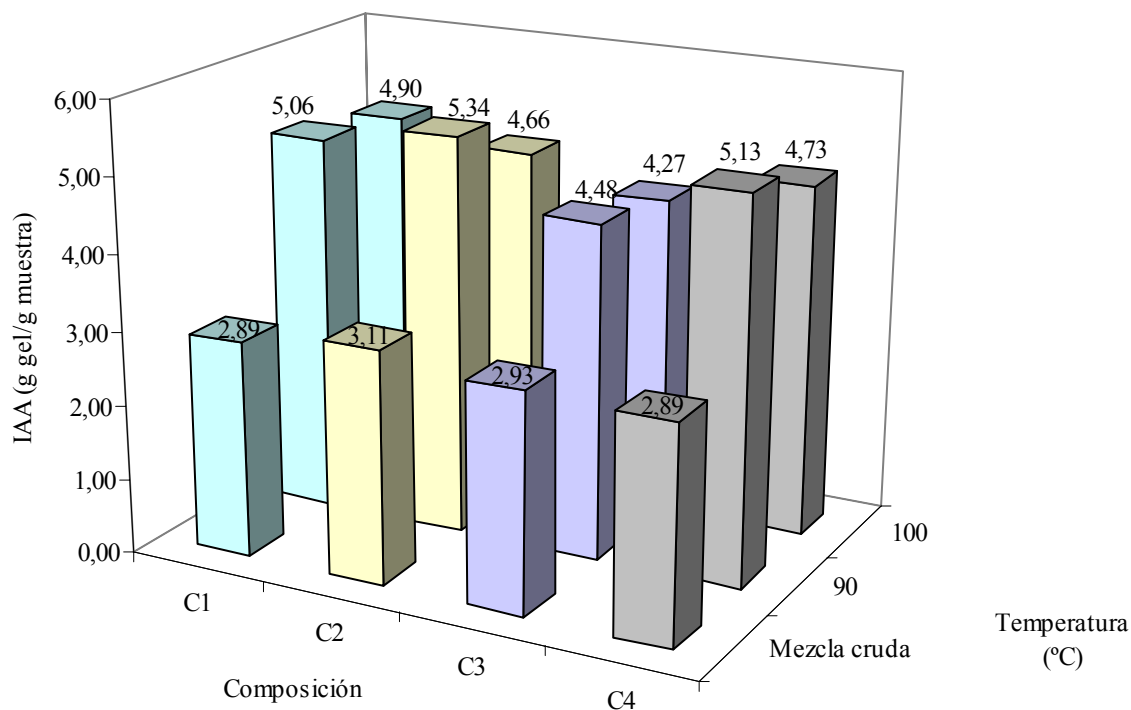
La capacidad de absorción de agua del almidón puede servir como una prueba del grado de gelatinización. Según Faubion et al. (1982)⁴, el IAA depende de la disponibilidad de los grupos hidroxílicos (-OH) para ligarse a las moléculas de agua y de la capacidad de formación de gel de las moléculas. El almidón sometido a tratamiento térmico, alcanza un máximo de absorción, el cuál está relacionado con el grado de transformación del mismo, seguido del descenso en el IAA con el comienzo de la dextrinización, en la que las moléculas de almidón empiezan a romperse en pequeñas moléculas, contribuyendo con el aumento del ISA.

En la Figura 27 se puede observar que los valores de IAA presentaron una disminución con el aumento de la temperatura, caso contrario a los valores del ISA, también puede notarse que C2 a 90 °C presenta el IAA más alto, mientras que el valor más bajo se presenta para C3 (formulación con fríjol como componente mayoritario).

⁴ FAUBION, et al., High-temperature short-time extrusion cooking of wheat starch and fluor, citado por ASCHERI, et al., 1998

Las características intrínsecas de los gránulos de almidón de cada materia prima, los hacen más o menos susceptibles a la degradación durante el tratamiento térmico, por ejemplo, Aschieri (1998) reporta que la harina de arroz posee gránulos muy resistentes, consecuentemente sería de esperarse que las mezclas con mayor contenido de arroz tengan una mayor absorción debido a que sus gránulos de almidón no han sufrido dextrinización como se observa en el gráfico para las mezclas C1 y C4 a 100 °C.

Figura 27. Efecto de la temperatura y la composición de la mezcla sobre el índice de absorción en agua de los productos.



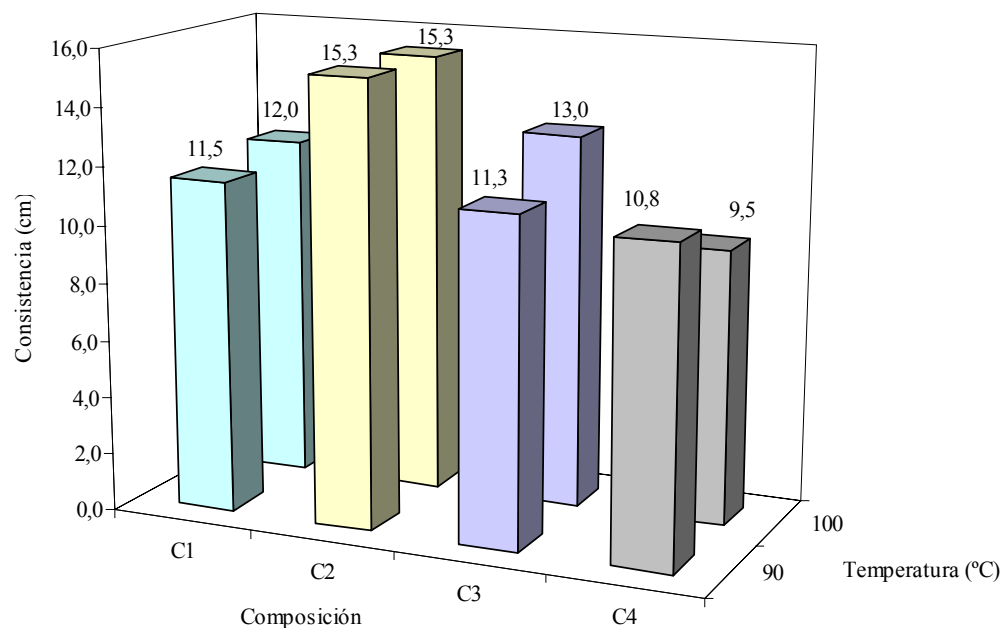
La temperatura y la composición no tuvieron efectos globales importantes en los valores del índice de absorción de agua ($p < 0,05$).

4.3.3 Análisis de la consistencia de las harinas extruidas. La consistencia de una suspensión acuosa de una harina es una propiedad importante asociada con la fluidez de un

líquido en la medida que se afecta por su viscosidad. Esta es una medida de la capacidad de formación de una pasta por absorción de agua de los componentes en la harina.

El valor de la consistencia de las harinas crudas medido por la distancia recorrida en el consistómetro, dio como resultado valores fuera del rango manejado por el equipo, equivalente a 23 cm, ya que estas mezclas son muy fluidas y no desarrollan viscosidad en frío. La Figura 28 muestra los valores de la consistencia de cada mezcla extruida a 90 y 100 °C.

Figura 28. Efecto de la temperatura y la composición en la consistencia de los productos extrudidos.



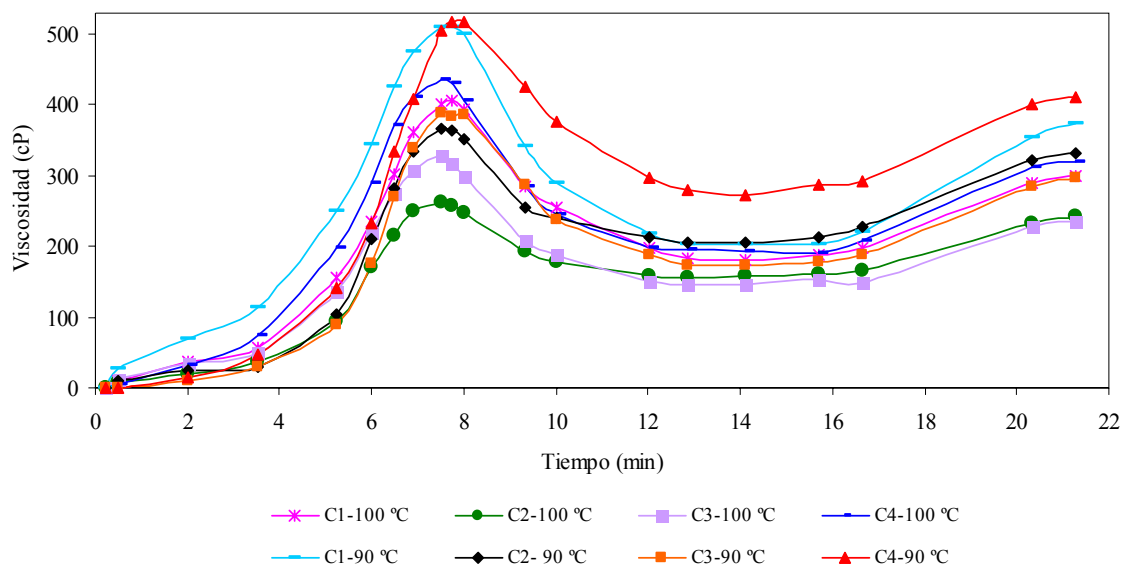
Los valores más altos de ISA se alcanzaron para las mezclas C1 y C2 a 100 °C seguido de la mezcla C4 a la misma temperatura, los valores más altos de IAA se obtuvieron para las mismas mezclas pero a 90 °C. Las medidas de consistencia que se obtuvieron para las mezclas C1 y C4 tratadas a 100 °C fueron bajas, indicaron una consistencia más viscosa, la

consistencia de la mezcla C2 fue muy fluida. Se observó que los efectos de la temperatura y la composición sobre la consistencia del producto no fueron significativos.

4.3.4 Análisis reológico de las harinas extruidas. La viscosidad de una suspensión es otra forma de evaluar el grado de cocción alcanzado durante el tratamiento térmico de materiales farináceos y almidones. Tratamientos severos destruyen la estructura granular del almidón haciendo que la viscosidad de pasta sea baja. Dentro de los componentes de la materia prima el almidón es posiblemente el compuesto más directamente relacionado con las propiedades reológicas de los productos extruidos.

En la Figura 29 se muestran el comportamiento reológico de las harinas compuestas después del proceso de extrusión (90- 100 °C).

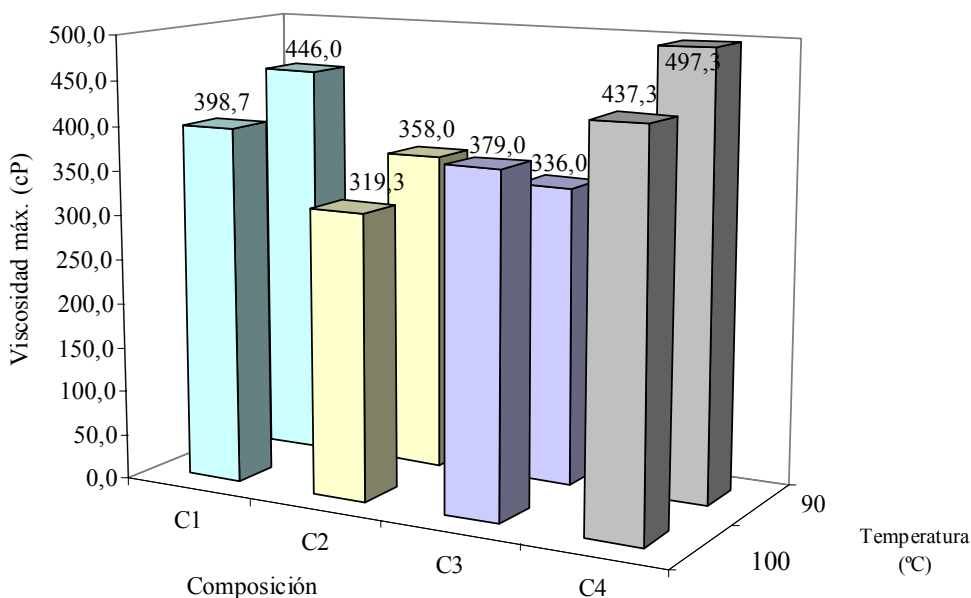
Figura 29. Efecto de la temperatura y la composición en la viscosidad de suspensiones acuosas de las harinas extruidas.



Las mezclas que desarrollaron mayores viscosidades fueron C1 y C4 extruidas a 90 y 100 °C. Cuando se comparan estas dos mezclas tratadas a una misma temperatura, se puede observar que con C4 se obtienen viscosidades mayores debido a que esta tiene más contenido de harina de yuca que la mezcla C1 tal como se observó en los viscogramas de las materias primas por separado, la harina de yuca desarrolló la mayor viscosidad. Las viscosidades máximas alcanzadas por las harinas precocidas obtenidas en el proceso de extrusión a 90 y 100 °C se pueden observar en la Figura 30.

La viscosidad máxima se afectó significativamente por la composición, de manera global, la temperatura no tuvo un efecto importante sobre la viscosidad máxima.

Figura 30. Viscosidades máximas alcanzadas por las harinas precocidas obtenidas por el proceso de extrusión.



La sustitución de harina de hoja de yuca por harina de yuca contribuye en el aumento de la viscosidad máxima obtenida para una suspensión, debido a la ausencia de almidón en la harina de hoja de yuca, por lo que la absorción de agua por parte de esta harina es muy

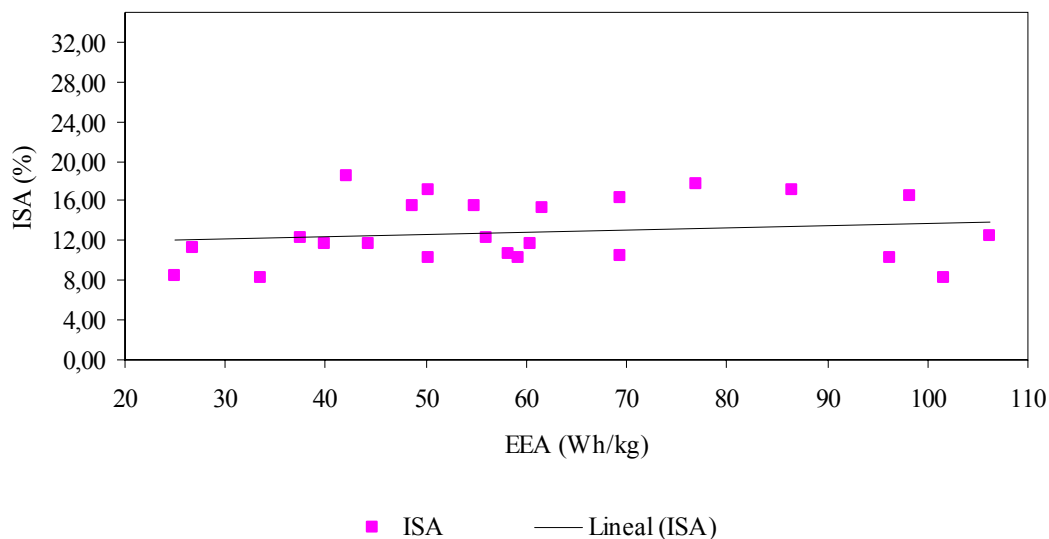
baja, beneficiando la falta de consistencia del producto y por consiguiente la disminución de la viscosidad.

4.4 RELACIÓN ENTRE LA ENERGÍA ESPECÍFICA APLICADA AL MATERIAL (EEA) Y LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS PRODUCTOS EXTRUDIDOS

En las Figuras 31 y 32 se puede observar la incidencia de la energía específica aplicada, sobre los valores del ISA e IAA.

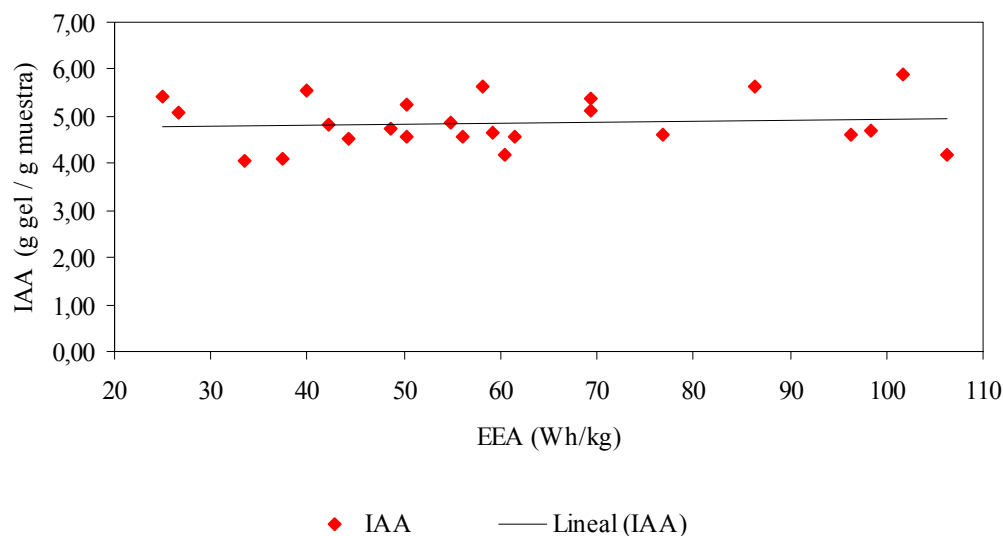
La solubilidad en agua de los productos extrudidos a 90 y 100 °C mostró una tendencia ligeramente a aumentar con el incremento del valor de EEA, el índice de absorción de agua también aumentó ligeramente al aumentar el valor de la energía específica.

Figura 31. Relación entre el indicador de energía específica aplicada (EEA) y el índice de solubilidad en agua (ISA).



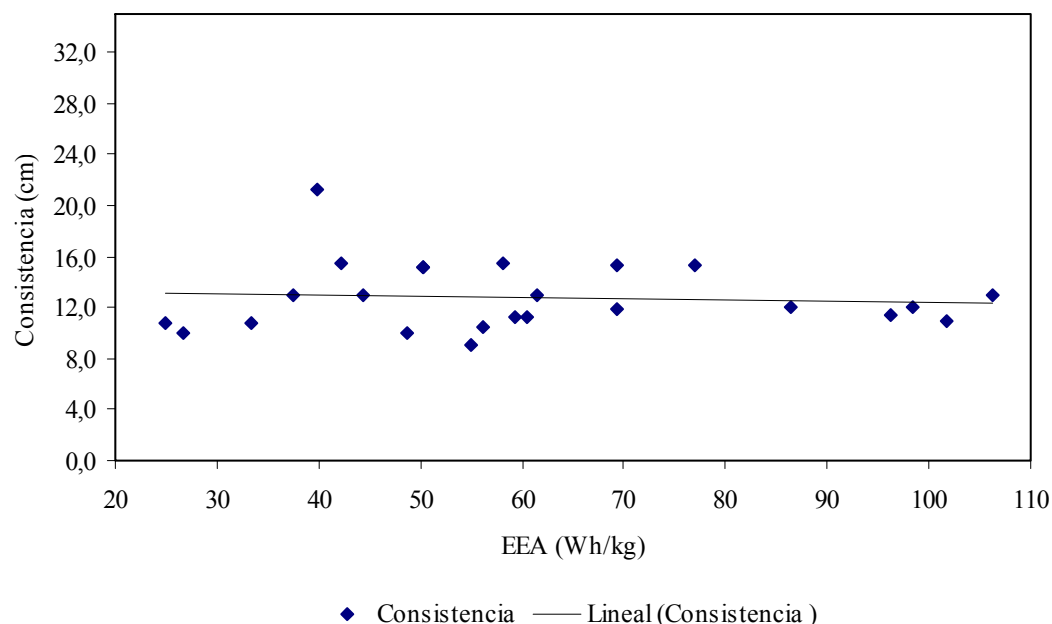
Cuando el material se expone a tratamiento intenso por fricción, los gránulos de almidón contenidos en la materia vegetal se hace muy sensible a degradación mecánica; inicialmente ocurre la alineación molecular, sin embargo, si la fricción persiste ocurrirá la fragmentación por esfuerzo, en consecuencia el IAA de los productos se reduce mientras que el ISA aumenta por la contribución de las porciones fragmentadas de bajo peso molecular (Miller, s.f., 1).

Figura 32. Relación entre el indicador de energía específica aplicada (EEA) y el índice de absorción de agua (IAA).



A medida que aumenta la EEA disminuyó el valor de consistencia de las suspensiones acuosas formadas con las harinas precocidas, indicando una disminución en la fluidez, debido a que la energía que se aplicó al material contribuyó con la gelatinización del almidón incrementándose la absorción de agua del material haciendo la pasta más viscosa y reduciendo el indicador de consistencia (Lamberti et al., 2004). En la Figura 33 se puede observar este comportamiento.

Figura 33. Relación entre el indicador de energía específica aplicada (EEA) y la consistencia.



4.5. ENSAYOS PRELIMINARES DE SECADO EN RODILLOS

Con los ensayos preliminares en el secador de rodillos se determinaron condiciones de operación que permitieron un apropiado funcionamiento del equipo. Inicialmente se determinó la concentración adecuada de la solución de alimentación al secador, realizando ensayos de cocción en agua hasta ebullición a las concentraciones de 10, 12, 15 y 20% de sólidos en la mezcla, se encontró que concentraciones menores al 20% de mezcla cruda calentadas hasta ebullición y con sostenimiento por 3 minutos, no adquirieron una consistencia espesa que permitiera una adecuada alimentación al secador. Para concentraciones por encima de 20% el material no fluía debido a su alta viscosidad; por esta razón se determinó que 20% es una concentración adecuada para realizar las pruebas en el secador. Por otro lado, trabajar con un material con mayor contenido de agua aumentaría el consumo de energía en el proceso de secado; también se tuvo en cuenta en los ensayos preliminares la velocidad de giro de los rodillos ésta se evaluó entre 1 y 6 rpm,

obteniendo que a 1 rpm el tiempo de residencia es muy alto, lo que ocasionó que el material se quemara. A una velocidad de giro de 6 rpm el material no alcanzaba a deshidratarse debido al reducido tiempo de contacto con la superficie de los rodillos. Finalmente, los ensayos se realizaron a 4 rpm ya que se obtuvieron hojuelas secas y fácilmente removibles de la superficie del tambor.

4.6. ENSAYOS DE SECADO EN RODILLOS DEFINITIVOS

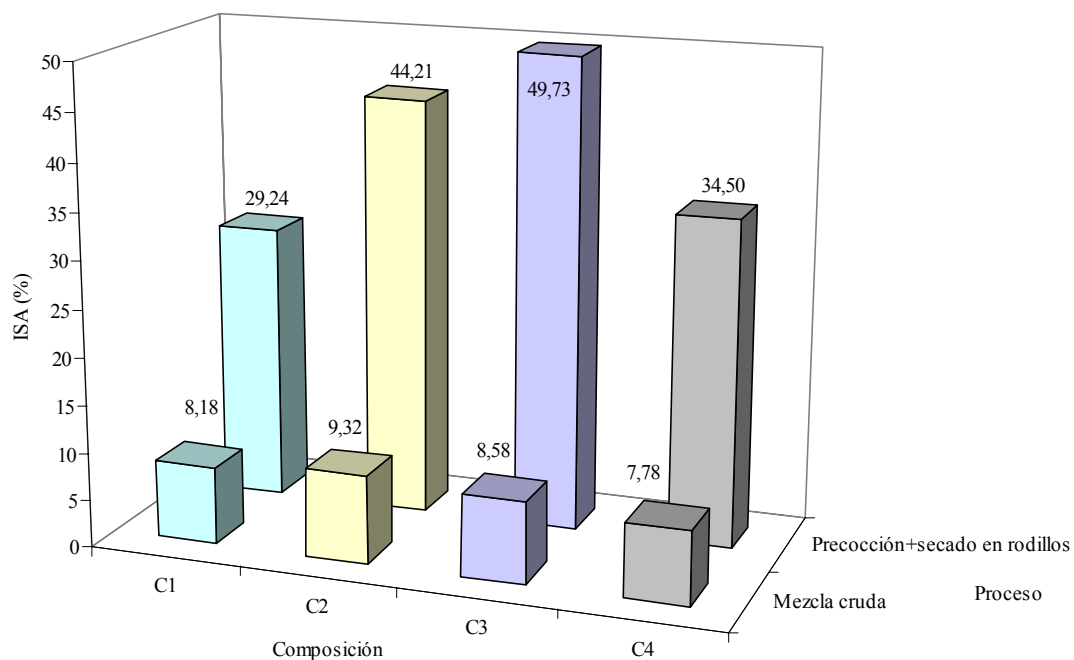
Las condiciones de operación utilizadas en las pruebas con el secador de rodillos fueron:

- Velocidad de giro de los rodillos: 4 rpm
- Temperatura: Entre 90 y 92 °C
- Presión de vapor del calderín 25 psi
- Concentración: 20%
- Tiempo de cocción previa: 3 minutos
- Separación entre rodillos: 1 mm

4.6.1 Análisis de índices de solubilidad en agua de las harinas crudas y las harinas precocidas en agua con posterior secado en rodillos. La Figura 34 muestra los efectos del proceso de secado por rodillos sobre el índice de solubilidad comparado con la mezcla cruda.

El mayor valor de índice de solubilidad se obtuvo para la mezcla C3 correspondiente a casi 50%, mientras que el valor más bajo fue 29% que se obtuvo con la mezcla C1, los valores aumentaron considerablemente comparados con los de las mezclas crudas, esto se debe a que además del tiempo de residencia sobre los rodillos, el material fue expuesto a cocción antes de alimentarlo al secador ocasionando un tratamiento mucho mayor a los gránulos de almidón.

Figura 34. Efecto del tratamiento por rodillos sobre el ISA.



4.6.2 Análisis de índices de absorción de agua de las harinas crudas y las harinas con precocción en agua más secado en rodillos. La Figura 35 muestra los efectos del proceso de secado por rodillos sobre el índice de absorción de agua comparado con la mezcla cruda.

Figura 35. Efecto del tratamiento por rodillos sobre el IAA.

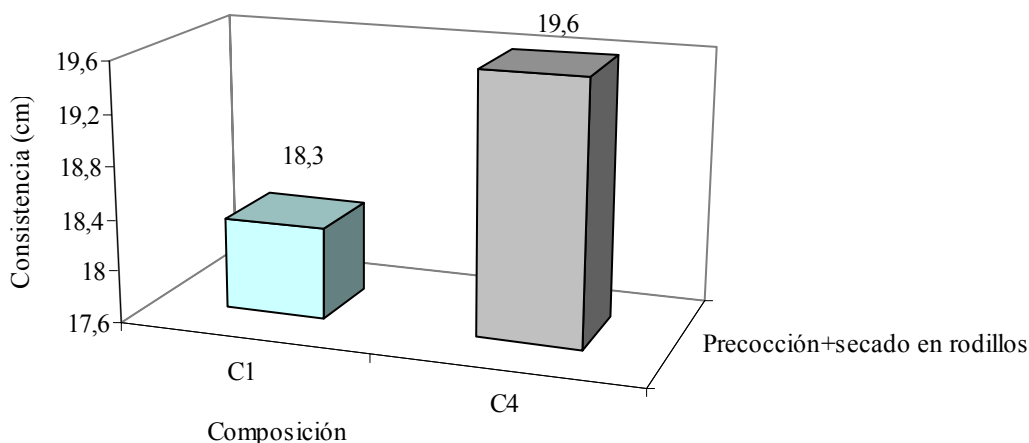
En la figura anterior se puede observar que para las mezclas C2 y C3 los valores del índice de absorción de agua son mayores para las mezclas crudas que para las tratadas en el secador, esto se debe a que la severidad del tratamiento térmico, hace que los gránulos de almidón se fraccionen y al mezclarlos con agua no alcanzan el peso suficiente para sedimentar y formar gel.

4.6.3 Análisis de la consistencia de las harinas secadas en rodillos. La Figura 36 muestra los efectos del proceso de secado por rodillos sobre la consistencia de las mezclas.

Teóricamente, el índice de absorción de agua está directamente relacionado con el desarrollo de consistencia para las suspensiones de harinas precocidas, las mezclas con las

que se obtuvo mayor IAA, C1 y C4, son aquellas que pueden desarrollar mayor viscosidad, y por lo tanto se obtienen mejores valores de consistencia.

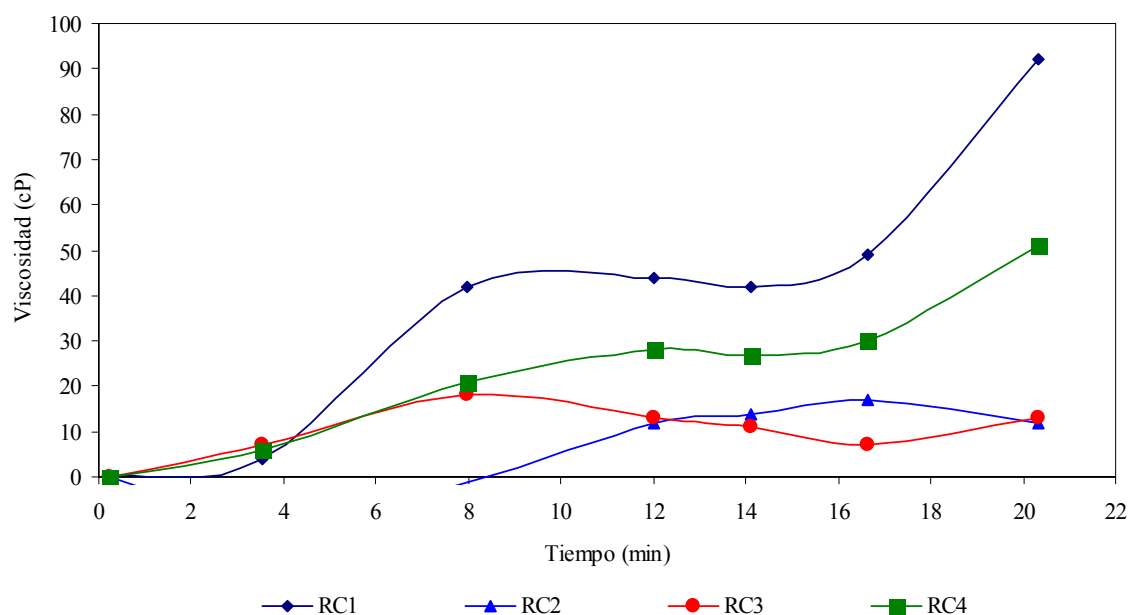
Figura 36. Consistencia de las mezclas tratadas con el secador de rodillos.



El IAA para las mezclas C2 y C3 indica una baja capacidad de absorción de agua y por lo tanto las suspensiones de estas mezclas no desarrollaron la consistencia necesaria para realizar la prueba en el consistómetro debido a que su alta fluidez no permitió registrar un valor de la distancia recorrida por la suspensión.

4.6.4 Análisis reológico de las harinas secadas en rodillos. Se realizaron viscogramas de las harinas, con el fin de observar el comportamiento de la viscosidad y tener una referencia de la intensidad del tratamiento realizado. En la Figura 37 se puede apreciar el comportamiento de la viscosidad de cada formulación, después del proceso térmico. Los mayores valores de viscosidad se obtuvieron para las mezclas C1 y C4.

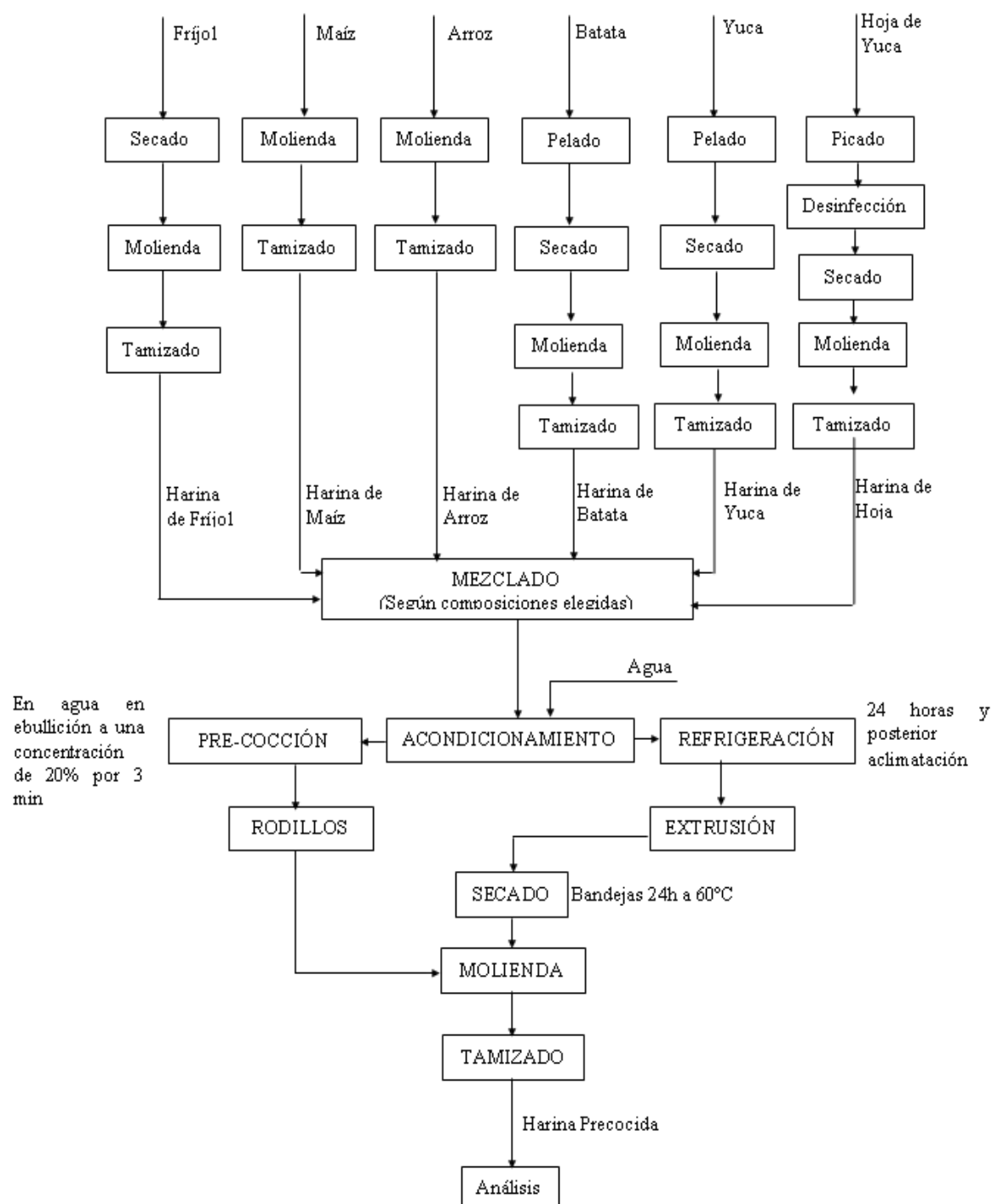
Figura 37. Comportamiento de la viscosidad de las suspensiones acuosas de las harinas obtenidas por precocción en agua más secador de rodillos.



4.7 COMPARACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE PRECOCCIÓN UTILIZADAS

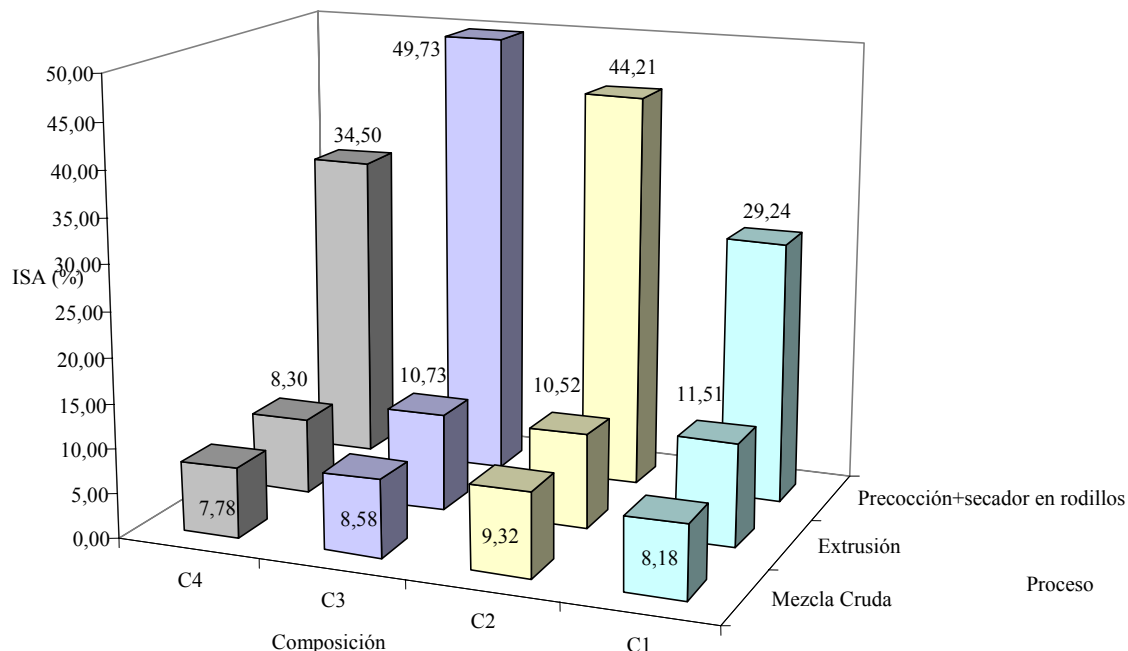
Los análisis realizados a las harinas precocidas obtenidas por las dos tecnologías se compararon con el fin de observar la diferencia entre los valores de los índices de solubilidad y absorción de agua, consistencia y viscosidad. La Figura 38 muestra el diagrama de bloques del proceso completo de producción de harina precocida por extrusión y por secado en rodillos.

Figura 38. Diagrama de bloques del proceso de producción de harina precocida.



En la Figura 39 se compara el índice de solubilidad de los productos obtenidos por secador de rodillos y por extrusión a una misma temperatura (90°C), teniendo como base los valores del ISA de la materia prima cruda.

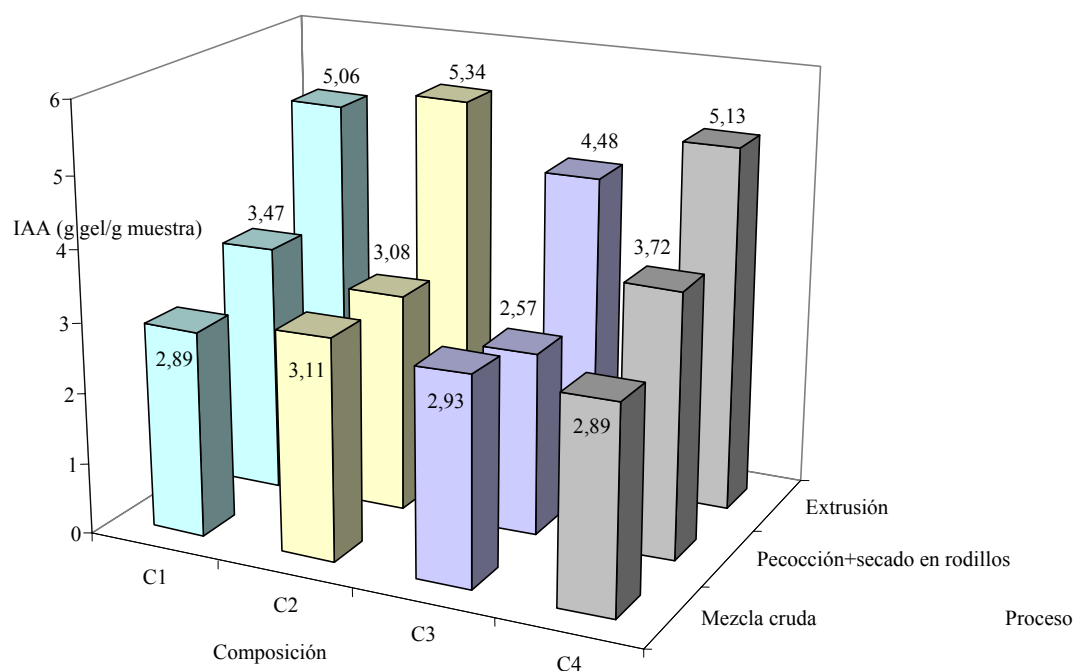
Figura 39. Efecto del proceso sobre el ISA de los productos.



Los productos obtenidos del secador de rodillos presentan un ISA mucho más alto que el de los productos extrudidos, esto se debe a que el material alimentado a los rodillos tuvo previamente un tratamiento de cocción por 3 minutos en agua en ebullición, lo que provocó un mayor tratamiento térmico de los gránulos de almidón.

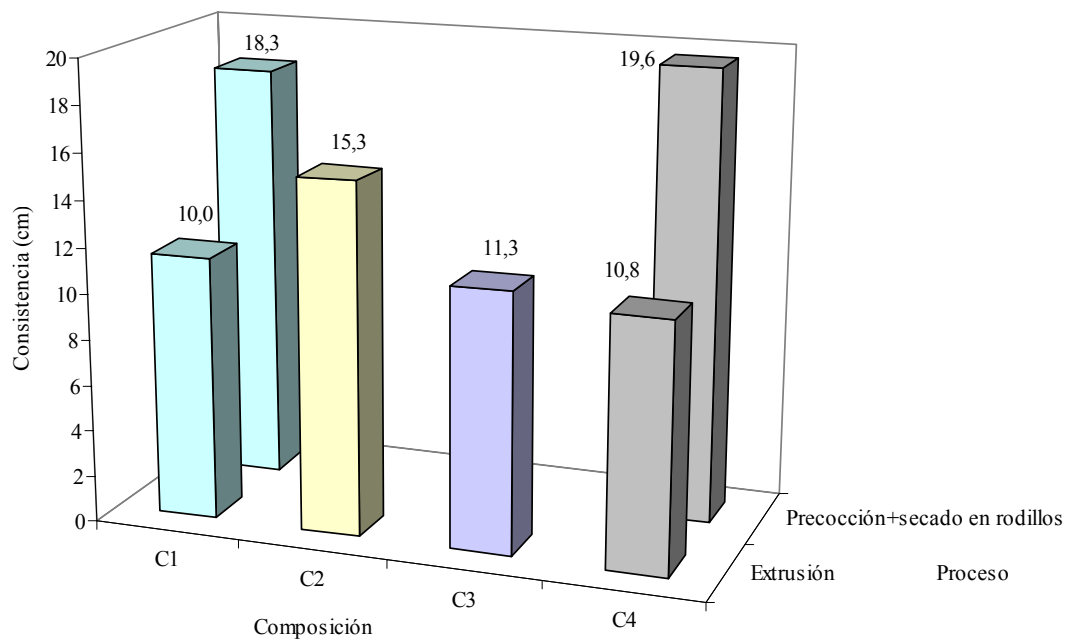
En la Figura 40 se muestra que el tratamiento de las materias primas por extrusión produce un mayor aumento de los índices de absorción que el que produce el tratamiento combinado de cocción en agua y secado en rodillos, ya que como se mencionó anteriormente la precocción y posterior secado en los rodillos ocasiona un tratamiento térmico o mecánico más drástico del almidón, lo cual contribuye con el aumento de los solubles y con la disminución de la absorción.

Figura 40. Efecto del tipo de proceso sobre el IAA de los productos.



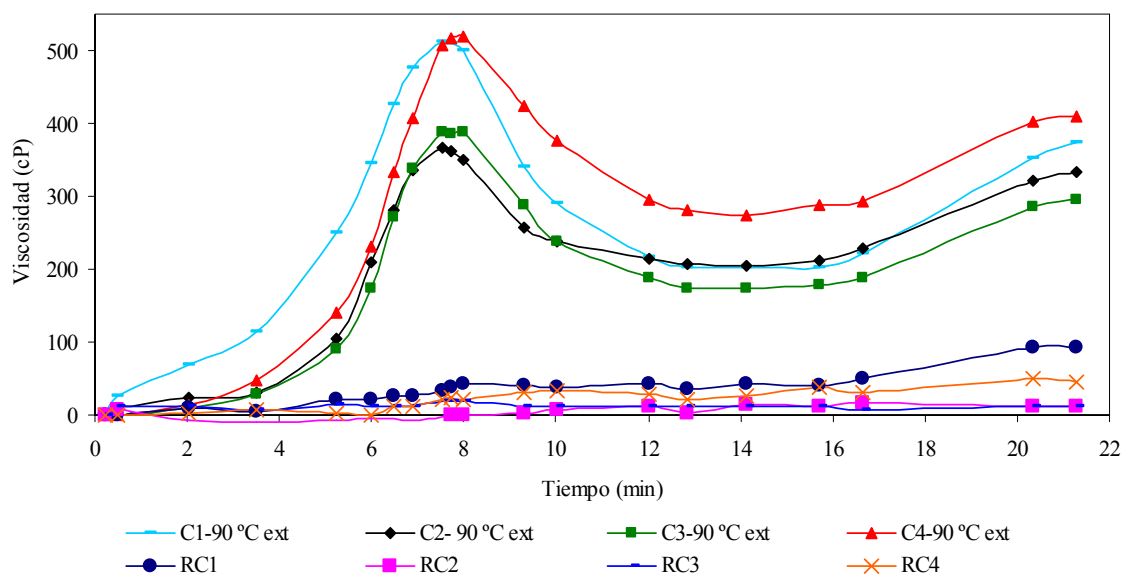
En la Figura 41 se muestra la comparación de los valores de consistencia obtenidos para ambos tratamientos (cocción mas secado en rodillos y extrusor) y se puede observar que la severidad del tratamiento térmico realizado por cocción más secado en rodillos puede perjudicar el desarrollo de consistencia de las suspensiones, mientras que con el proceso de extrusión los granos de almidón tuvieron menos modificación, por lo que adquieren mayor viscosidad y por consiguiente su fluidez en suspensiones acuosas disminuye.

Figura 41. Efecto del proceso sobre la consistencia de los productos.



El resultado de las pruebas viscosgráficas para las harinas extruidas a 90 °C y las harinas secadas en rodillos se muestran en la Figura 42.

Figura 42. Efecto del proceso sobre la viscosidad de los productos en suspensiones acuosas.



El tratamiento por extrusión comparado con el tratamiento combinado de precocción en agua más secado en rodillos produce harinas con mayor capacidad de formar soluciones viscosas, como era de suponerse de acuerdo a los resultados de consistencia, las mezclas C2 y C3 tratadas con el proceso combinado de precocción más deshidratación por rodillos, presentaron los valores más bajos de viscosidad que se reflejaron en la imposibilidad de adquirir consistencia adecuada para ser medida con el consistómetro como se mostró en la Figura 41. En el Anexo O se muestran los resultados de los análisis de desarrollo de viscosidad de los productos obtenidos por extrusión, proceso combinado (cocción + secado en rodillos), harinas crudas y harinas comerciales.

4.8 COMPARACIÓN DE HARINAS PRECOCIDAS OBTENIDAS EN ESTE ESTUDIO CON HARINAS PRECOCIDAS COMERCIALES.

En el mercado existen harinas precocidas comerciales tales como Soya plátano, Siete granos y una muestra no comercial producida por el ICBF denominada Bienestarina®. Con el fin de tener algunos valores de referencia se evaluó el IAA e ISA y la consistencia de estas 3 harinas precocidas comerciales. En la Tabla 25 se muestra los componentes de las harinas comerciales analizadas.

Tabla 25. Componentes de las harinas precocidas comerciales.

Marca comercial	Componentes
Bienestarina®	Trigo
	Maíz
	Torta de soya
	Leche en polvo
	Plátano
Siete granos	Arroz
	Frijol
	Lenteja
	Torta de soya
Soya Plátano	Avena
	Maíz
	Soya
	Plátano

La caracterización de estas harinas se presenta en la Tabla 26, en la que se observa que los valores de IAA en estas harinas precocidas son menores a los obtenidos en los productos de ésta investigación mediante los métodos de extrusión y tratamiento combinado de cocción en agua más secado en rodillos siendo ésta una característica conveniente ya que el hinchamiento de los gránulos causado por la absorción de agua contribuye con el aumento de la viscosidad. En cuanto al índice de solubilidad, el tratamiento combinado aumenta considerablemente estos valores, pero comparado con las harinas actualmente en uso por la comunidad colombiana, los valores obtenidos por extrusión son muy aceptables, además hay que tener en cuenta que la intensidad del tratamiento combinado modifica mayormente los gránulos de almidón disminuyendo la absorción de agua, la viscosidad y por consiguiente la consistencia se hace muy fluida.

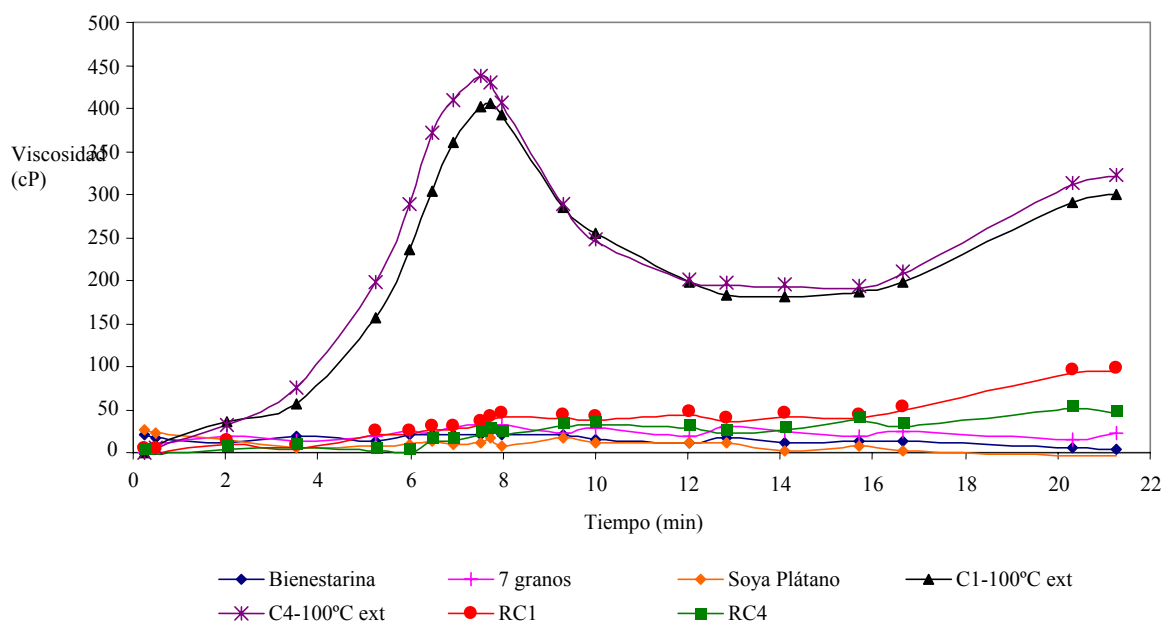
Tabla 26. Caracterización y comparación de las harinas comerciales, y Bienestarina® con las harinas precocidas obtenidas por extrusión y secado de rodillos.

Harina precocida	Propiedad			
	ISA (%)	IAA (g gel/g muestra)	Consistencia (cm)	V máx (cP)
Bienestarina®	31,77	3,33	6,8	40
Siete granos	14,57	2,79	-*	67
Soya Plátano	16,23	2,69	9,0	25
C1	16,62	4,90	12,0	398,7
C4	15,40	4,73	9,5	437,3
RC1	29,24	3,47	18,3	48
RC4	34,50	3,72	19,6	30

* Consistencia muy fluida fuera del rango de medición del equipo.

En la Figura 43 se presenta el viscograma de las harinas precocidas comerciales, la Bienestarina® y las harinas precocidas obtenidas, donde se observa que las harinas C1 y C4 tratadas por extrusión desarrollan viscosidades mayores que las harinas comerciales, la Bienestarina® y las obtenidas por precocción en agua y posterior secado en rodillos.

Figura 43. Comparación de la viscosidad de las harinas seleccionadas obtenidas en el estudio, harinas precocidas comerciales y la Bienestarina®.



Las altas viscosidades obtenidas para las harinas extruidas, pueden traducirse en menores tiempos de cocción al ser preparadas para el consumo. Los Anexos P y Q muestran el registro fotográfico de las harinas obtenidas con el extrusor y con el secador de rodillos respectivamente.

4.9 CARACTERIZACIÓN DE NUTRIENTES EN LAS HARINAS PRECOCIDAS SELECCIONADAS

Con el objetivo de determinar el efecto de los tratamientos térmico-mecánicos realizados por la extrusora y la precocción en agua con posterior secado en rodillos, se realizó el análisis de la composición de proteína y minerales de los productos finales de los procesos, comparando estos valores con los análisis de estos elementos como materia prima.

En la Tabla 27 se muestran los resultados de los análisis de nutrientes de cada cultivo utilizado y de las harinas precocidas seleccionadas. Para determinar la composición teórica de nutrientes de cada mezcla crudas, se promedió el aporte de cada nutriente en la mezcla.

Tabla 27. Análisis de nutrientes de las materias primas crudas y las harinas precocidas con mejor comportamiento tanto en extrusión como en secado con rodillos.

Harina	Micronutrientes			
	Proteína (g/kg)	Fe (g/kg)	Zn (g/kg)	Betacarotenos (µg/g)
Arroz	56,77	0,36	0,02	-
Maíz	73,58	0,41	0,02	-
Batata	40,74	0,93	0,02	0,49
Frijol	186,52	0,87	0,03	-
Yuca	31,57	0,47	0,01	0,13
Hoja de yuca	255,02	0,40	0,04	180,68
Aporte teórico esperado				
Mezcla C1	90,67	0,57	0,02	4,54
Mezcla C4	87,98	0,58	0,02	0,075
Aporte en las harinas precocidas obtenidas				
Extrudidos C1	101,71	0,74	0,02	0,05
Extrudidos C4	94,48	0,83	0,02	0,001
Rodillos C1	90,50	0,52	0,02	2,68
Rodillos C4	85,07	0,51	0,02	0,05

Con respecto a los aportes teóricos esperados, la mezcla C1 es más rica en proteína debido a la presencia de la hoja de yuca, en cuanto a minerales no hay diferencia notable en su contenido en ambas mezclas (C1 y C4).

En cuanto a los minerales, en el proceso de extrusión se presenta un aumento en el contenido de hierro que pudo ocurrir por el desgaste del tornillo y posterior incorporación de las limaduras de hierro; el contenido de zinc no experimenta cambios en sus valores para ninguno de los dos tratamientos.

5. CONCLUSIONES

Es factible técnicamente obtener una harina precocida con alto valor nutricional sin necesidad de agregar micronutrientes en etapas posteriores al proceso aprovechando los aportes que realizan los cultivos biofortificados.

La extrusión de mezclas de harinas de yuca, arroz, frijol, batata, maíz y hoja de yuca produce harinas precocidas con altos valores de índice de absorción de agua, buena consistencia y altas viscosidades por cocción en agua.

Las formulaciones C1 (arroz: 30%, maíz: 15%, frijol: 25%, yuca: 17,5%, batata: 10% y hoja de yuca: 2.5%) y C4 (arroz: 30%, maíz: 15%, frijol: 25%, yuca: 20%, batata: 10%) extruidas a 100 °C, tienen un adecuado balance nutricional representado en su contenido de proteínas y minerales, además presentaron unas características adecuadas al comportamiento de harinas precocidas en comparación con las harinas comerciales y Bienestarina®.

Mezclas de harinas con proporciones de batata mayores al 19,5% dan lugar a atascamiento del material en el barril y en la tolva de alimentación.

La temperatura y la composición tuvieron un efecto significativo sobre el índice de solubilidad en agua de los productos extrudidos, en general, los productos extrudidos a 100 °C resultaron tener mayor ISA que los extrudidos a 90 °C.

De acuerdo con los análisis fisicoquímicos realizados a los productos obtenidos, el tratamiento combinado de precocción produce mayor cocción que el tratamiento por extrusión

Los contenidos de proteína, hierro y zinc no se vieron disminuidos después del tratamiento combinado de precocción en agua con secado en rodillos y el de extrusión.

El contenido de betacarotenos en las harinas precocidas disminuye en gran proporción luego del proceso de extrusión.

La inclusión de hoja de yuca en la mezclas a extrudir no afecta el desempeño del equipo y contribuye con el aumento proteína presente en la mezcla, pero afecta la apariencia del producto, imprimiéndole una coloración verdosa.

6. RECOMENDACIONES

La velocidad de giro del tornillo y la humedad son variables muy importantes en el proceso de extrusión, por esta razón en estudios posteriores realizados en el mismo equipo, se deben trabajar varios niveles de estas variables, así sean cercanos.

Para trabajar nuevas formulaciones, es necesario realizar nuevas pruebas preliminares, ya que debe tenerse en cuenta que cada estudio realizado depende de las materias primas utilizadas y de la configuración propia de cada equipo. Si piensa incluir nuevamente batata en dicha formulación, no se debe exceder el 19%, para evitar problemas de atascamiento del equipo.

Si se quiere llevar a cabo el proceso a mayor escala, deben realizarse nuevamente ensayos preliminares ya que en la extrusión no se garantiza la reproducción de los resultados cuando hay un cambio de equipo.

Evaluar cual sería la mejor dentro de las posibles aplicaciones del producto tales como papillas, coladas, bebidas o similares.

Debe realizarse un análisis sensorial al producto para determinar la necesidad de adicionar saborizantes y colorantes con el fin de mejorar la aceptabilidad de la harina.

BIBLIOGRAFÍA

ACEVEDO, Andrés Felipe. Estudio del proceso de obtención de hojuelas precocidas de yuca utilizando la tecnología de secado-cocción en un secador de rodillos. Palmira, 2005. Trabajo de grado (Ingeniero Agroindustrial). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y administración

AFINIDADES, Boletín sobre cooperación en investigación agrícola. [online]. ISSN 0122-8056, Enero 2004. Disponible en: <<http://www.clayuca.org/clayucanet/edicion7/cida.htm>>

ALVAREZ, Ana y SAAVEDRA, Miguel. Formulación, obtención y evaluación de productos extrudidos a partir de harina de yuca. Cali, 1997, 80 p. Trabajo de grado (Ingeniero químico). Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería química.

ASCHERI, Jorge Luís *et al.* Producción de Snacks a partir de mezclas de harinas de arroz y camote, por extrusión termoplástica. Parte II: Propiedades funcionales y sensoriales. En: Alimentaria, Junio 1998, p.79-86

BAKER C. G. Industrial Drying of Foods; Chapman & Hall; Primera edición; Londres, 1997; p.122 – 124.

BANCO DE LA REPÚBLICA. Agricultura. [online] Biblioteca Luís Ángel Arango, Colombia Disponible en: <<http://www.banrep.gov.co/blaavirtual/home.htm>>

BOLETÍN CCI: SIM. Perfil de Producto: Frijol. [online].abril - junio 2000, no. 8. Disponible en internet: <<http://www.cci.org.co/publicaciones/Perfil%20de%20producto/perfilfrijol8.pdf>>

BOLETÍN CCI: SIM. Perfil de Producto: Yuca. [online]. Octubre - diciembre 1999, no. 6. Disponible en internet: <[http://www.cci.org.co/publicaciones/ Perfil%20de% 20producto /perfilyuca6.htm](http://www.cci.org.co/publicaciones/Perfil%20de%20producto/perfilyuca6.htm)>

BRADIE, Neela y MELLOWES, Winston. Effect of extrusion variables on cassava extrudates. En: Journal of food science. Vol. 56, No. 5 (1991); p. 1334-1337

CADAVID, Luis Fernando; ALBÁN, Álvaro Andrés y GIL, Jorge Luis. Yuca y batata, una alianza de grandes proyecciones. Boletín Electrónico del Consorcio Latinoamericano y del Caribe de Apoyo a la Investigación y Desarrollo de la Yuca – CLAYUCA- [online]. Colombia, 2004, edición No.3. Disponible en internet: <http://www.clayuca.org/clayucanet/noticia_batata.htm>

CARVALHO, Rubens. Estudos Sobre a Aplicação Da Técnica De Extrusão em Farinhas Simples e Mistas, A Base de Milho, Arroz e Soja. Anales del seminario sobre extrusión cocción de alimentos en América latina. Santiago de Chile, 18-20 de Abril de 1979

CEBALLOS, Hernán y DE LA CRUZ, Gabriel Antonio. Taxonomía y Morfología de la Yuca. En: CEBALLOS, Hernán y OSPINA, Bernardo. La Yuca en el Tercer Milenio: Sistemas modernos de producción, procesamiento, utilización y comercialización. Cali: CIAT, 2002. p. 17-44.

CHAKRABORTY, Pratap y BHATTACHARYYA, Susanta. Extrusion Technology in Food Processing. s.f. [online]. Calcutta: Jadavpur University [consultada 1 febrero 2005]. Disponible en: <<http://www.pfonline.com/features/processing/proc1/proc1.html>>

DELLA VALLE, G., et al. The Extrusion Behavior of Potato Starch, s.p.i.1995

DOMÍNGUEZ, Carlos E. YUCA: Investigación, Producción y utilización. Documento de trabajo #50. Programa de Yuca. Cali. CIAT. 1981. 656 p.

EUFIC, Extrusión: nuevas formas y texturas. Food Today [online]. 2004, no. 31 [consultada 1 febrero 2005]. Disponible en Internet: <<http://www.eufic.org/sp/food/pag/food31/food31.htm>>

FAO, Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. [online]. Base de datos estadísticos de la FAO, 2005 última actualización febrero 2005. [consultada 23 diciembre 2005]. Disponible en <<http://faostat.fao.org/faostat/collections?version=ext&hasbulk=0&subset=agriculture&language=ES>>

----- . Guía de los alimentos básicos del Mundo, Roma, 1984, p.51

FIGUEROA, C. Elaboración de harinas precocidas de frijol común endurecido y soya utilizando dos procesos industriales: secado por rodos y extrusión. Guatemala, 1990. Trabajo de grado. (Ingeniero químico) Universidad de San Carlos de Guatemala

GAVRIELIDOU, M., et al. Heat transports to starch slurry gelatinizing between the drums of a double drum dryer. En: Journal of food engineering. No. 35. (2002) p. 703-714.

GIRALDO, Andrés. Estudio de la obtención de harina de hojas de yuca (Manihot Esculenta Crantz) para consumo humano. Popayán, 2006. Trabajo de grado (Ingeniero Agroindustrial) Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería.

GRIMANESA P., Estudio de algunas características funcionales y organolépticas de mezclas arroz-frijol precocidas por extrusión utilizadas en alimentos infantiles. Quito, Ecuador, 1991

GRIMAS D., Desarrollo y producción de alimentos extrudidos en Costa Rica. Seminario de la investigación tecnológica en cocción-extrusión de alimentos en América Latina. Chile, abril de 1979

HARPER, Judson. Extrusion processing of food. En: Food Technology. Vol.32, no.7 (julio 1978) p. 3

HARPER, Judson. Experiencias con extrusión de soya: Potencial futuro, desarrollo, nutrición y mercadeo de productos. Colorado State University, U.S.A. s.f., p.2.

ICBF, *et al.* Encuesta nacional de la situación nutricional y de consumo de alimentos. Documento Ejecutivo. Colombia, 2005

LAMBERTI, M. *et al.*. Starch transformation and structure development in production and reconstitution of potato flakes. En: Food Technology. Vol 37 (2004), p.417-427.

MAZA R, Elaboración de producto proteinizado expandido por extrusión. Instituto Tecnológico Pesquero del Perú. Callao, febrero 1998.

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL DE COLOMBIA, Anuario estadístico del sector agropecuario y pesquero. Dirección Política Sectorial. Bogotá, Colombia, 2003

MYER, R.O. y FROSETH J.A., 1989. Extruded bean mixtures serve as protein in swine, chicks diets. Feedstuffs, Vol 61, no. 13, Marzo 27, 1989.

MILLER, Robert. Tecnología de extrusión de alimentos. En: Oficina regional para México, Centro América y el Caribe, Extrusión: Manual, s.f., Auburn, New Cork. p. 1-9.

NRDC, National Research Development Corporation, Potato Flour. [online]. Nueva Delhi, India. 2005. Disponible en: <<http://www.nrdcindia.com>>.

OCORÓ, María Urany. Extrusión termoplástica de harina de yuca: Efectos de la variedad y de la presencia de cáscara en la harina. Cali, 2005. Trabajo de grado. (Ingeniera química) Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería química.

ORTEGA E., Raíces y tubérculos biofortificados: Una innovación contra el hambre y la desnutrición en el mundo. [online] Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA-CENIAP). Venezuela, 2005. Disponible en: <http://www.ceniap.gov.ve/ceniaphoy/articulos/n8/arti/ortega_e2/ortega_e2.htm#LA%20BIOFORTIFICACIÓN>.

OSTERTAG, C. WHEATLEY C. Proyecto de producción y comercialización de harina de yuca para consumo humano. Cali. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) - Universidad del Valle- Fondo de Desarrollo Rural Integrado (DRI), 1992.

PERRY, R., GREEN, D. y MALONEY, J. Manual del Ingeniero Químico. 6 ed.: McGraw-Hill. México, 1992. Tomo V. p. 20-23.

RIAZ M. Extruders in food applications; U.S.A, Technomic publishing, 2000. p. 2

SALGAR, Lina María. Grupo Semillas [online]. El cultivo de maíz en Colombia Revista no.2. Disponible en internet: <[http://www.semillas.org.co/articulos.htm?x=46067&cmd\[111\]=c-1-22](http://www.semillas.org.co/articulos.htm?x=46067&cmd[111]=c-1-22)>.

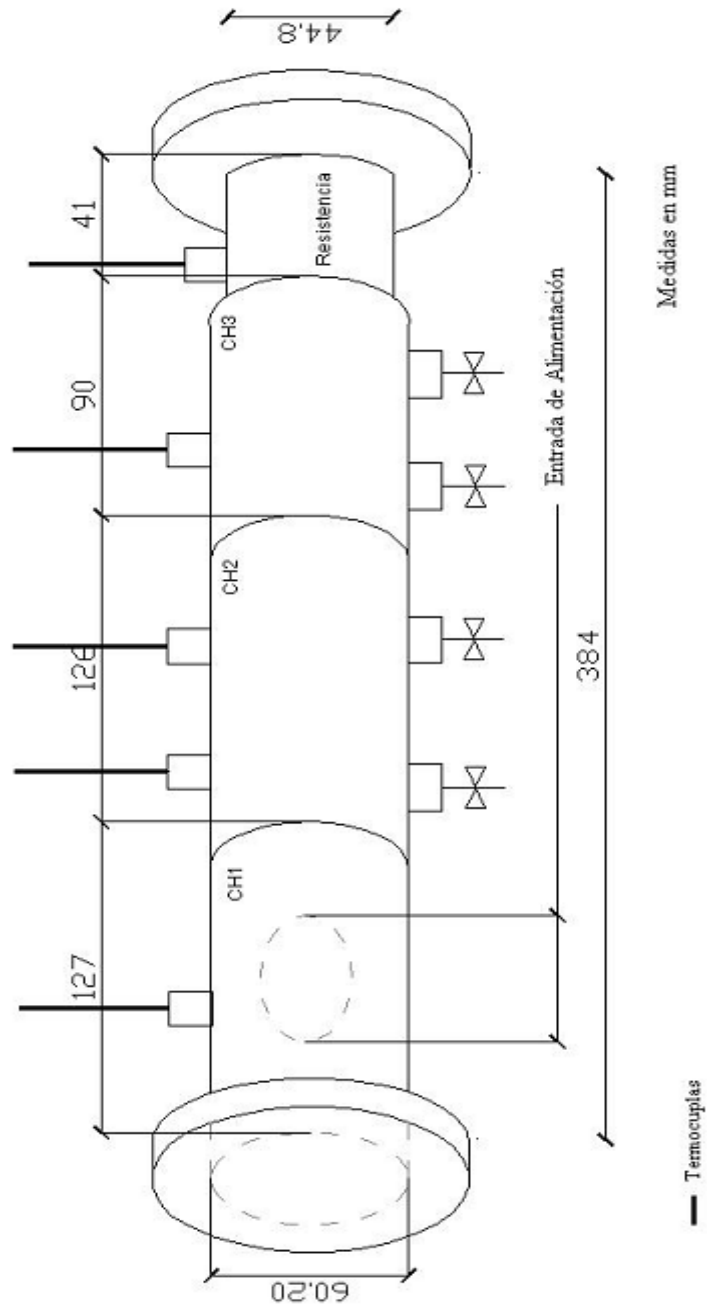
UNICEF, Situación nutricional de los niños menores de 5 años [online]. Colombia, 2000, [consultada 18 enero 2005]. Disponible en internet: <<http://www.unicef.org.co/05-nut.htm>>

VAN HAL M, Quality of Sweetpotato flour during processing and storage. Lima, Perú, Food Rev. Int.,16(1), 2000, p. 1-37.

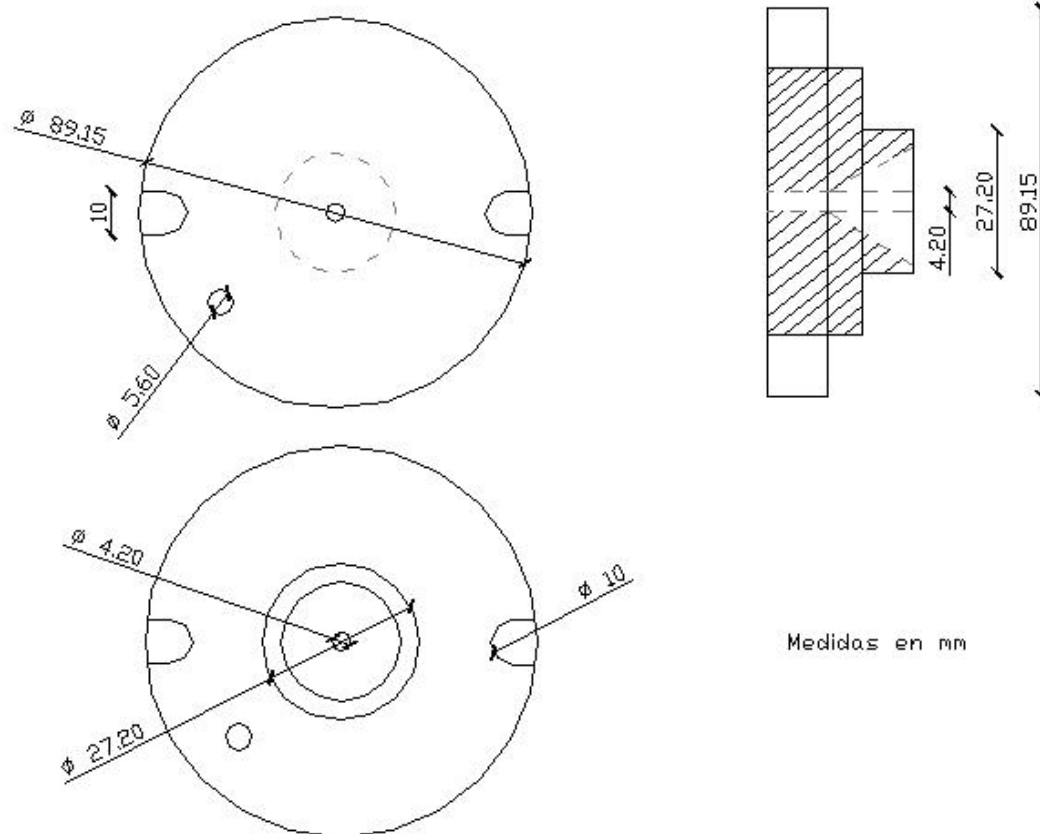
WOODROOFE, J.M. Dry Extrusion Applications in the Feed Industry. Australia, Artículo PDF, s.p.i., 1993.

ZAPATA, Luís Eduardo. Investigación y desarrollo en extrusión de alimentos en el instituto de investigaciones tecnológicas de Bogota (Colombia). Seminario sobre la investigación tecnológica en cocción-extrusión de alimentos en América Latina. Abril 18,1979.

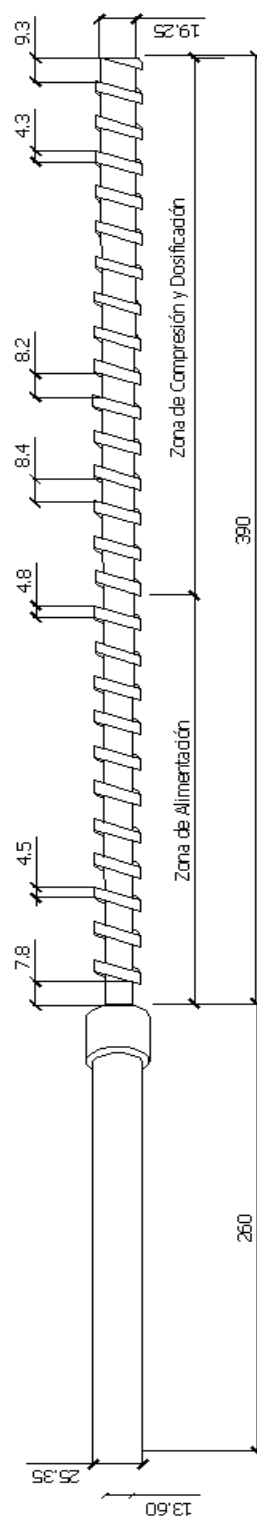
Anexo A. Dimensiones del equipo de extrusión



Anexo B. Dimensiones del dado del extrusor



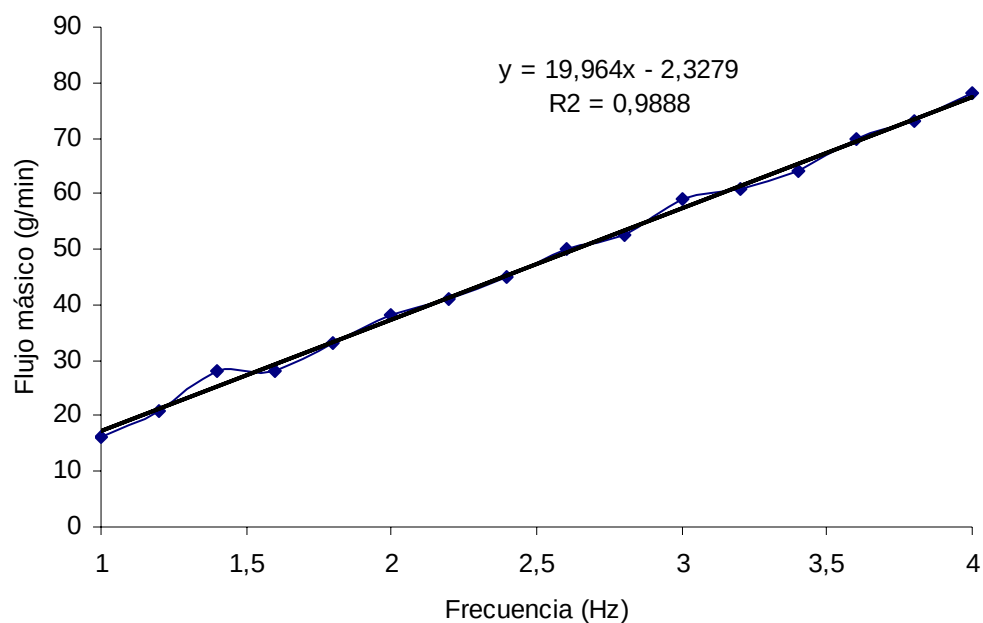
Anexo C. Dimensiones del tornillo del extrusor con relación de compresión 3:1



Anexo D. Curva de calibración de la tolva de alimentación

Esta curva de calibración se realizó con el fin de saber el flujo de alimentación al extrusor teniendo los datos de frecuencia de alimentación, esto se hizo tomando el peso de harina depositado en un recipiente en un periodo de tiempo determinado.

Figura 44. Curva de calibración de la tolva de alimentación



Anexo E. Registro y observaciones de las pruebas de extrusión preliminares

Tabla 28. Resumen de las pruebas preliminares

Prueba	Condiciones	Observaciones	ISA	IAA
1	20% M,Y,B,F,A, 300rpm,2Hz,40-25%H,90°C	Se atascó x cambio de humedad	N.M.	N.M.
2	20% M,Y,B,F,A, 300rpm,2Hz,40 -35%H,90°C	Se atascó el tornillo	N.M.	N.M.
3	20% M,Y,B,F,A, 300rpm,2Hz,25% H,90°C	Se atascó x humedad muy baja	N.M.	N.M.
4	20% M,Y,B,F,A, 300rpm,2Hz,40-35%H,90°C	Se atascó x cambio de humedad	N.M.	N.M.
5	20% M,Y,B,F,A, 350rpm,2Hz, 35%H,90°C	Se atascó la tolva y el tornillo	N.M.	N.M.
6	20% M,Y,B,F,A, 300rpm,2Hz, 30%H,90°C	Se obtuvo buen producto	N.M.	N.M.
7	20% M,Y,B,F,A, 350rpm,2Hz, 30%H,90°C	Se atascó el tornillo	N.M.	N.M.
8	20% M,Y,B,F,A, 300rpm,1Hz, 30%H,90°C	Se obtuvo buen producto	17,11	6,89
8*	20% M,Y,B,F,A, 300rpm,1Hz, 30%H,100°C	Se obtuvo buen producto	16,08	6,84
9	P1, 300rpm, 1Hz, 90°C, 30%H	Se obtuvo buen producto	12,32	4,97
9*	P1, 300rpm, 1Hz, 96°C, 30%H	Se obtuvo buen producto	10,24	5,23
10	P2, 300rpm,1Hz, 90°C, 30%H		10,26	5,30
11	P3, 300rpm, 1Hz, 90°C, 30%H	Taponó la tolva	18,42	3,78
12	P4, 300rpm, 1Hz, 90°C, 30%H		12,20	4,25
13	P5, 300rpm, 1Hz, 90°C, 30%H		13,41	6,11
14	P6, 300rpm, 1Hz, 90°C, 30%H		13,77	5,44
15	P1, 300rpm, 1Hz, 110°C, 30%H	Comportamiento inestable, material no uniforme	N.M.	N.M.
16	P1, 300rpm, 1Hz, 80°C, 30%H		5,70	3,59
17	P1, 300rpm, 1Hz, 100°C, 30%H		9,72	6,38
18	P8, 300rpm, 1Hz, 90°C, 25%H	Se atascó	N.M.	N.M.
19	P8, 300rpm, 1Hz, 90°C, 30-25%H	Producto con buena expansión, pero con color verdoso	12,94	4,89
20	P8, 300rpm, 1Hz, 90°C, 40-25%H	Se atascó la tolva	N.M.	N.M.
21	P8, 300rpm, 1Hz, 90°C, 30%H		14,01	6,40
22	P8, 300rpm, 1Hz, 100°C, 30%H	Muestra con buen aspecto	13,58	6,61

N.M: No se obtuvo muestra

Anexo F. Metodología para la determinación de los índices de solubilidad y absorción de agua (ISA e IAA)

Los índices reabsorción y solubilidad en agua se obtuvieron suspendiendo 2,5 g (b.s.) del extrudido molido ($< 200\mu\text{m}$) en 50 g de agua destilada; esta suspensión se agita durante 30 minutos a temperatura ambiente, se pesan dos alícuotas de 10 g cada una y se centrifugan en un equipo marca EPPENDORF modelo 5804 R versión 15 amp, a 5000 rpm por 10 minutos. El sobrenadante se seca a 60°C por 24 horas.

El IAA se calcula como el cociente entre el peso del gel (sedimento) y la cantidad de producto seco contenido en la alícuota, como se muestra en la ecuación 2.

$$IAA = \frac{\text{PesoGel}(g)}{\text{PesoMuestra}(g)} \quad (\text{Ec.2})$$

El ISA se calcula como el cociente entre el peso del sobrenadante seco y el peso del producto seco contenido en la alícuota.

$$ISA = \frac{\text{PesoSobrenadanteSeco}(g)}{\text{PesoMuestra}(g)} \quad (\text{Ec.3})$$

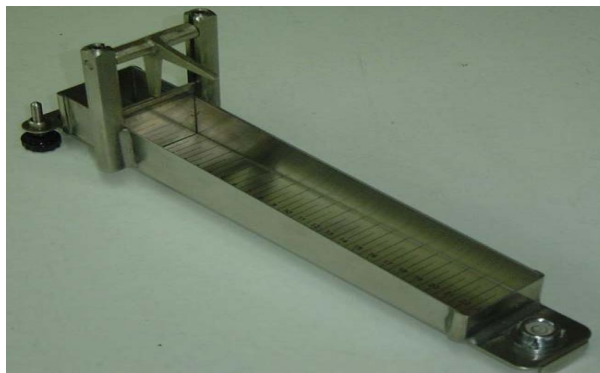
El peso de la muestra se calcula de la siguiente manera:

$$\text{PesoMuestra} = \frac{2,5g(b.s.) \times \text{PesoAlícuota}}{(agua + 2,5g)} \quad (\text{Ec. 4})$$

Anexo G. Metodología para la determinación de la consistencia de las suspensiones

Materiales

- Consistómetro Bostwick
- Agitador magnético
- Beaker 300 mL
- Varilla agitación
- Cronómetro
- Balanza digital



Procedimiento

La operación del consistómetro se debe realizar sobre una mesa firme. Cerrando la compuerta y ajustando la burbuja del nivelador en el centro del círculo y antes de empezar cualquier prueba. La burbuja de nivelación debe estar concéntrica al círculo exterior para lograr este objetivo se giran manualmente los tornillos localizados en la parte posterior del consistómetro

En el beaker se vierte la cantidad de agua correspondiente para cada muestra y se agita utilizando el agitador magnético a la mitad de la velocidad total, se vierten poco a poco los 12 gramos de muestra sobre el agua en agitación para impedir la formación de grumos, de presentarse esta situación se debe utilizar la varilla de agitación para disolverlos. Una vez la mezcla sea uniforme se aumenta un nivel la velocidad de agitación y se contabiliza un tiempo de 5 minutos. Pasados los 5 min. La muestra se retira inmediatamente del agitador y se vierte en el compartimiento del consistómetro lo más rápido posible. Se deben contabilizar 30 segundos desde que se presiona el gatillo de liberación hasta el momento en que se registra la distancia recorrida por la muestra. La distancia registrada debe ser un promedio entre el máximo y el mínimo punto alcanzador por el extremo de la muestra.

Anexo H. Prueba de perfil de viscosidad

Se realiza con el amilógrafo y mide de manera continua la resistencia a la agitación de una suspensión de harina-agua mientras se va elevando la temperatura a la velocidad constante de 6 °C/minuto a partir de 25 °C y hasta 90 °C con sostenimiento de la temperatura durante 5 minutos, posteriormente la temperatura sigue descendiendo a la misma velocidad hasta 50°C donde se sostiene por 2 minutos. De esta forma se detectan los cambios de viscosidad del producto después de la gelificación del almidón.

Los valores determinados por medio del amilograma son:

Tgel. La temperatura de gelatinización es la temperatura en la que empieza a subir la curva del amilograma, es decir cuando los gránulos se hinchan y empieza a subir la viscosidad. Se expresa en grados centígrados (°C)

Vmáx. La viscosidad máxima es la viscosidad en la parte superior de la curva de viscosidad. Se expresa en centipoises.

Fcocción. Facilidad de cocimiento. Es la diferencia entre el tiempo en que se alcanzó la viscosidad máxima y el tiempo en que se alcanzó la temperatura de gelatinización. Es decir, es el tiempo que transcurre en alcanzar la viscosidad máxima desde el momento en que empiezan los gránulos a hincharse. Se expresa en minutos (min).

Inest. Gel. Inestabilidad del gel. Es la diferencia entre la viscosidad máxima y la viscosidad que se alcanza a una temperatura de 90 °C. Se expresa en centipoises (cP).

Ind. Gel. Índice de gelificación. Es la diferencia entre la viscosidad a los 90 minutos la cual es a una temperatura de 50 °C y la viscosidad que se alcanza a 90 °C. Se expresa en centipoises (cP).

**Anexo I. Registros de flujo másico, eléctricos e indicador de energía específica
aplicada al material en cada prueba**

Tabla 29. Desempeño del extrusor en las pruebas

Prueba	Flujo de salida (g/min) (bs)	Voltaje(V)	Amperaje (A)	EEA (Wh/kg)
1	16,82	36	12	42
2	16,70	40	12	59
3	16,68	40	12	37
4	16,83	40	12	86
5	17,74	40	12	58
6	17,91	40	12	102
7	18,06	39	11	27
8	17,55	40	11	49
9	16,63	40	12	96
10	16,80	41	12	98
11	17,70	40	12	55
12	17,76	40	12	40
13	19,17	40	12	69
14	18,45	40	12	50
15	19,39	40	12	106
16	15,95	39	11	33
17	16,12	39	11	60
18	15,05	40	11	56
19	17,95	40	12	62
20	17,36	39	11	44
21	17,27	40	12	77
22	18,03	40	12	50
23	17,63	40	12	25
24	17,09	40	12	69

Anexo J. Perfil de temperaturas promedio en cada prueba de extrusión

Tabla 30. Registro de temperaturas a lo largo del barril en cada prueba de extrusión

Prueba	Temperaturas				
	T1	T2	T3	T4	T5
1	21	25	27	43	101
2	27	30	30	38	91
3	29	29	31	42	101
4	30	30	31	44	100
5	32	31	32	44	91
6	35	33	35	46	91
7	35	34	36	48	91
8	35	36	37	50	101
9	36	35	37	45	91
10	38	34	36	48	101
11	37	34	35	47	101
12	37	38	37	46	91
13	24	25	27	38	91
14	29	29	30	39	100
15	32	35	38	44	101
16	31	28	31	40	91
17	33	32	34	43	86
18	35	37	38	44	90
19	36	34	37	47	101
20	35	35	38	53	101
21	36	36	38	52	101
22	40	40	42	50	91
23	37	32	35	47	91
24	39	39	39	51	101

Anexo K. Humedad de los productos obtenidos en cada prueba de extrusión

Tabla 31. Humedad de los extrudidos a la salida del equipo y después del secado

Prueba	Humedad a la salida del extrusor	Humedad final de la harina precocida
1	24,61	3,61
2	27,19	4,00
3	24,56	3,60
4	24,16	3,49
5	24,18	3,69
6	26,34	3,80
7	24,68	3,80
8	23,47	3,70
9	24,54	3,71
10	24,57	3,51
11	23,78	4,01
12	24,06	3,90
13	20,18	3,99
14	18,08	3,79
15	16,08	3,80
16	27,51	4,19
17	24,29	3,50
18	24,30	3,81
19	23,43	3,80
20	25,53	3,79
21	23,10	3,71
22	23,25	3,70
23	23,61	3,80
24	24,19	4,00

Anexo L. Valores de los índices de absorción, solubilidad en agua y consistencia de los productos obtenidos en cada prueba de extrusión

Tabla 32. IAA, ISA y consistencia de los productos obtenidos por extrusión

Prueba	Composición	Temperatura (°C)	ISA (%)	IAA promedio (g gel/g muestra)	Consistencia (cm)
1	C2	100	18,44	4,83	15,5
2	C3	90	10,27	4,66	11,3
3	C3	100	12,20	4,10	13,0
4	C1	100	17,00	5,62	12,0
5	C2	90	10,73	5,64	15,5
6	C4	90	8,24	5,90	10,9
7	C1	90	11,31	5,07	10,0
8	C4	100	15,56	4,76	10,0
9	C3	90	10,23	4,61	11,4
10	C1	100	16,58	4,69	12,1
11	C4	100	15,41	4,86	9,0
12	C1	90	11,66	5,55	21,3
13	C2	90	10,47	5,13	15,3
14	C2	100	17,16	4,55	15,2
15	C3	100	12,39	4,20	12,9
16	C4	90	8,26	4,06	10,8
17	C3	90	11,71	4,17	11,2
18	C1	90	12,34	4,55	10,5
19	C4	100	15,24	4,57	13,0
20	C3	100	11,57	4,52	13,0
21	C2	100	17,66	4,62	15,3
22	C2	90	10,34	5,24	15,2
23	C4	90	8,38	5,42	10,8
24	C1	100	16,28	5,38	11,8

Anexo M. Análisis de varianza

Tabla 33. Valores de significancia obtenidos del análisis de varianza de las variables de respuesta del proceso

Factor	ISA	IAA	EEA	Consistencia	Visc. máx.
Temperatura	0,0000*	0,3310	0,4058	0,7552	0,2990
Composición	0,0000*	0,1902	0,8070	0,0686	0,0057*
Temperatura*Composición	0,0000*	0,3654	0,2562	0,5328	0.4418

* Efecto significativo ($p < 0,05$)

Anexo N. Valores de los índices de absorción y solubilidad en agua de los productos obtenidos en cada prueba de secador de rodillos

Tabla 34. IAA, ISA y consistencia de los productos obtenidos en el secador de rodillos

	ISA (%)	IAA (g gel/g muestra)	Consistencia (cm)
C1	29,24	3,47	18,3
C2	44,21	3,08	-*
C3	49,73	2,57	-*
C4	34,50	3,72	19,6

* Los valores se salen del rango de medición del equipo debido a su excesiva fluidez

Los ensayos en el secador de rodillos se realizaron a 90°C, con las cuatro composiciones utilizadas en los ensayos de extrusión. No se hicieron variaciones.

Anexo O. Resultado de los viscoamilogramas (5%)

Tabla 35. Temperatura de gelatinización, viscosidad máxima, inestabilidad del gel e índice de gelificación de las harinas precocidas comerciales y las harinas precocidas obtenidas por extrusión y secado en rodillos.

Prueba	Temp. gelat. (°C)	V.max (cP)	Inest. gel (cP)	Ind. gel (cP)
1	59,35	266	108	50
2	59,55	390	214	83
3	59,30	329	182	59
4	59,20	408	225	84
5	60,00	368	166	82
6	59,35	529	250	91
7	59,50	516	315	126
8	59,55	410	203	84
9	59,85	353	187	80
10	59,20	398	179	57
11	59,20	440	241	79
12	60,25	433	184	68
13	59,20	378	158	98
14	59,25	386	134	48
15	59,25	453	219	64
16	59,20	577	132	46
17	59,50	265	-2	-53
18	59,15	389	165	51
19	59,40	462	206	77
20	59,80	355	144	53
21	59,60	306	98	29
22	59,70	328	106	70
23	59,15	386	160	93
24	59,60	390	162	79
RC1	59,70	48	14	45
RC2	59,35	32	-2	-2
RC3	59,96	28	10	-1
RC4	59,65	30	12	-5
Harina de frijol	60,40	140	-47	111
Harina de hoja	59,20	40	26	-1
Harina de batata	59,35	1380	381	175
Harina de yuca	59,80	3208	1208	397
Harina de arroz	60,50	3447	238	16
Harina de maíz	59,50	537	-48	382
Harina soya-plátano	60,00	25	18	1
Bienestarina®	59,60	40	27	16
Harina 7 granos	59,90	67	57	45

Anexo P. Productos obtenidos en las pruebas de extrusión

C1-90 °C



C1-100 °C



C2-90 °C



C2-100 °C



C3-90 °C



C3-100 °C



C4-90 °C



C4-100 °C



Anexo Q. Productos molidos obtenidos en las pruebas del secador de rodillos

RC1



RC2



RC3



RC4

