

Producción de dextrinas de yuca a partir de almidón nativo

**en la rallandería TODOYUCA ubicada en el
corregimiento Pescador (municipio de Caldono,
departamento del Cauca)**



**William Andrés Luna Imbacuán
Julián Andrés Mera Arroyo**

2006



PRODUCCIÓN DE DEXTRINAS DE YUCA A PARTIR DE ALMIDÓN NATIVO
EN LA RALLANDERÍA TODOYUCA UBICADA EN EL CORREGIMIENTO
PESCADOR (Municipio de Caldono, Departamento del Cauca)

WILLIAM ANDRÉS LUNA IMBACUÁN
JULIÁN ANDRÉS MERA ARROYO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
POPAYÁN (CAUCA)
2006

PRODUCCIÓN DE DEXTRINAS DE YUCA A PARTIR DE ALMIDÓN NATIVO
EN LA RALLANDERÍA TODOYUCA UBICADA EN EL CORREGIMIENTO
PESCADOR (Municipio de Caldono, Departamento del Cauca)

WILLIAM ANDRÉS LUNA IMBACUÁN
JULIÁN ANDRÉS MERA ARROYO

Trabajo de grado en modalidad de proyecto de investigación
Para optar el título de Ingeniero Agroindustrial

Director Industrial

JOHANNA ALEJANDRA ARISTIZÁBAL GALVIS I.Q. CLAYUCA-CIAT

Director Académico

JORGE ELIÉCER CARRERA CATAÑO M.Sc. UNICAUCA

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
POPAYÁN (CAUCA)

2006

Nota de aceptación

Ing. Reinaldo Velasco

Jurado 1

Ing. Héctor Samuel Villada

Jurado 2

Ing. Johanna Aristizábal Galvis

Directora Industrial

CLAYUCA-CIAT

Ing. Jorge Carrera Cataño

Director académico

UNICAUCA

Popayán, marzo de 2006.

Este trabajo esta dedicado especialmente a Dios y a nuestras familias que gracias a su apoyo y esfuerzo constantes, lograron impulsar nuestro desarrollo personal y profesional, sin los cuales no hubiera sido posible la realización de nuestras carreras profesionales.

Andrés y Julián

AGRADECIMIENTOS A

Al profesor Jorge Carrera por confiarnos el desarrollo de este trabajo.

La Universidad del Cauca, por el apoyo en infraestructura de laboratorios, equipos y la asesoría del departamento de Ingeniería Agroindustrial.

El Consorcio Latinoamericano y del Caribe de Apoyo a la Investigación y al Desarrollo de la Yuca –CLAYUCA, por la financiación, apoyo logístico y administrativo para el desarrollo del proyecto.

El Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural por la financiación de este proyecto.

A la directora industrial del proyecto, Johanna Alejandra Aristizábal de CLAYUCA-CIAT, por el esfuerzo y el apoyo ofrecido en todo el transcurso del proyecto.

A Alberto García de CLAYUCA-CIAT, por su colaboración en la parte técnica del proyecto.

A la rallería TODOYUCA, a su personal administrativo y operativo por el apoyo en el desarrollo de la fase experimental.

A Ricardo Ruiz de CETEC, a José Manuel Trujillo de COPRACAUCA, por la colaboración prestada.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. ASPECTOS GENERALES	21
1.1 YUCA	21
1.1.1 Planta y cultivo.	22
1.1.2 Producción.	24
1.1.3 Producción, superficie y rendimiento de yuca en Colombia.	27
1.1.4 Usos de la yuca.	30
1.2 ALMIDÓN	34
1.2.1 Estructura molecular del almidón.	35
1.2.2 Propiedades fisicoquímicas y funcionales del almidón.	36
1.2.3 Usos del almidón.	40
1.2.4 Almidones modificados.	42
1.3 DEXTRINAS	44
1.3.1 Métodos de obtención de dextrinas.	44
1.3.2 Reacciones en el proceso de dextrinización por ruta seca.	47
1.3.3 Usos de las dextrinas.	49
1.4 PLANTAS PROCESADORAS DE YUCA EN COLOMBIA	51
1.4.1 Características generales de las plantas procesadoras de yuca para uso industrial.	51
1.4.2 Distribución de las plantas procesadoras de yuca según suproducción.	52
1.4.3 Producción de las plantas procesadoras de yuca.	53

	pág.
1.4.4 Productos y principal destino de la producción de las plantas procesadoras de yuca.	53
1.4.5 Rallanderías en Colombia.	56
1.5 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	57
1.6 OBJETIVOS DEL PROYECTO	59
2. ASPECTOS TECNOLÓGICOS	60
2.1 PROCESO DE OBTENCIÓN DE ALMIDÓN DE YUCA EN LA RALLANDERÍA TODOYUCA	60
2.1.1 Recepción.	60
2.1.2 Lavado y pelado	61
2.1.3 Rallado o desintegración.	62
2.1.4 Colado o extracción.	63
2.1.5 Sedimentación.	64
2.1.6 Secado.	65
2.1.7 Tamizado.	65
2.2 PROCESO DE OBTENCIÓN DE DEXTRINAS POR RUTA SECA	66
2.2.1 Proceso de producción tradicional de dextrinas.	66
2.2.2 Proceso de producción de dextrinas adaptado a una rallandería.	68
2.3.3 Producción de adhesivos de dextrinas.	70
3. METODOLOGÍA	71
3.1 MATERIALES Y MÉTODOS	71
3.1.1 Localización.	71
3.1.2 Materiales.	71
3.1.3 Equipos.	72
3.1.4 Métodos analíticos.	72

3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL	75
3.3 OBTENCION DE DEXTRINAS POR VIA SECA A PARTIR DE ALMIDON DULCE DE YUCA.	75
3.3.1 Determinacion de balances de materia.	75
3.3.2 Mezcla del catalizador.	76
3.3.3 Formación de pelets.	78
3.3.4 Presecado y tostación de pelets de almidón acidulado.	79
3.3.4 Caracterización de dextrinas obtenidas y comparación con patrón de dextrina de maíz..	82
3.3.6 Secado de otros productos utilizando la tecnología de peletizado-secado.	82
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	83
4.1 OBTENCIÓN DE ALMIDÓN DE YUCA EN LA RALLANDERÍA TODOYUCA.	83
4.1.1 Contenidos de materia seca, almidón y HCN.	83
4.1.2 Balance de materia del proceso de obtención de almidón nativo de yuca.	86
4.1.3 Consumo de energía en el proceso de obtención de almidón de yuca.	87
4.2 ACIDIFICACIÓN DE ALMIDÓN.	88
4.2.1 Acidificación utilizando lechada.	88
4.2.2 Acidificación utilizando una suspensión de almidón.	90
4.2.3 Neutralización de agua sobrenadante.	92
4.3 PELETIZACIÓN DE ALMIDÓN ÁCIDO.	92
4.4 PRESECADO Y TOSTACION.	93

	pág.
4.4.1 Presecado.	93
4.4.2 Tostación o conversión.	95
4.5 CARACTERIZACIÓN DE LAS DEXTRINAS OBTENIDAS.	98
4.6 ENSAYO DE SECADO PARA ALMIDÓN NATIVO, ALMIDÓN AGRIO Y HARINA DE YUCA UTILIZANDO LA TECNOLOGÍA DE PELETIZADO-SECADO	100
4.7 DIAGRAMA DEL PROCESO DE PRODUCCION DE DEXTRINAS POR VIA SECA A PARTIR DE ALMIDON DULCE DE YUCA	103
5. CONCLUSIONES	105
6. RECOMENDACIONES	107
BIBLIOGRAFÍA	109
ANEXOS	115

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Características de la amilosa y la amilopectina.	38
Tabla 2. Cantidad de plantas procesadoras, por orientación de la producción por departamento en 2003.	54
Tabla 3. Cantidad de plantas procesadoras, por tipo de planta, según el rango de área de secado disponible en 2003.	54
Tabla 4. Cantidad de productos de yuca obtenidos por departamento en 2003.	55
Tabla 5. Cantidad de productos obtenidos del proceso industrial, por principal destino según departamento en 2003.	55
Tabla 6. Cantidad de rallanderías por tipo de infraestructura utilizada en el proceso de sedimentación, según departamento en 2003.	56
Tabla 7. Tipo de análisis y métodos analíticos utilizados.	74
Tabla 8. Contenidos promedio de materia seca, almidón, fibra cruda y HCN total.	83
Tabla 9. Tiempo de operación y caudales de agua de servicio en las etapas del proceso de extracción de almidón para un bache de 300 Kg.	86
Tabla 10. Caudales máxicos en las etapas del proceso de extracción de almidón para un bache de 300 kg.	86
Tabla 11. Caracterización de adhesivos para costura lateral.	99
Tabla 12. Caracterización de adhesivos para cerrado de fondo.	100
Tabla 13. Formulación típica de un adhesivo para cerrado de cajas de cartón.	115
Tabla 14. Formulación típica de un adhesivo para cores o tubos en espiral.	115
Tabla 15. Formulación típica de un adhesivo para costura lateral de bolsas de papel.	116
Tabla 16. Formulación típica de un adhesivo para cerrado de fondo de bolsas de papel.	116

Tabla 17. Formulación típica de un adhesivo para etiquetado de botellas de vidrio.

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Producción mundial de raíces de yuca en el año 2004.	25
Figura 2. Producción de raíces de yuca en continentes y países en desarrollo en el periodo 2000-04.	25
Figura 3. Superficie sembrada de raíces de yuca en continentes y países en desarrollo en el periodo 2000-04.	26
Figura 4. Rendimiento de raíces de yuca en continentes y países en desarrollo en el periodo 2000-04.	26
Figura 5. Producción de yuca en Colombia, Paraguay y Brasil en el año 2004.	27
Figura 6. Superficie sembrada de yuca en Colombia, Paraguay y Brasil en el año 2004.	27
Figura 7. Rendimiento de yuca en Colombia, Paraguay y Brasil en el año 2004.	28
Figura 8. Producción de yuca en Colombia en el periodo 2000-04.	29
Figura 9. Superficie sembrada de yuca en Colombia en el periodo 2000-04.	30
Figura 10. Rendimiento de yuca en Colombia en el periodo 2000-04.	30
Figura 11. Estructura molecular de la amilosa.	36
Figura 12. Estructura molecular de la amilopectina.	36
Figura 13. Forma de los gránulos de almidón de maíz (A), yuca (B) y papa (C).	39
Figura 14. Gelificación de gránulos de almidón.	39
Figura 15. Cinética de gelificación de gránulos de almidón.	40
Figura 16. Clasificación de almidones modificados.	44
Figura 17. Principales aplicaciones de los adhesivos de dextrina.	49
Figura 18. Plantas procesadoras de yuca por tipo de producto.	53
Figura 19. Área de recepción de raíces de yuca.	61
Figura 20. Lavado mecánico de raíces de yuca.	61

	pág.
Figura 21. Rallado mecánico de raíces de yuca.	62
Figura 22. Colado de masa rallada.	63
Figura 23. Recolado de la lechada de almidón.	64
Figura 24. Canales de sedimentación de lechada de almidón.	65
Figura 25. Secado de almidón.	66
Figura 26. Mezclado de una suspensión de almidón con bomba mecánica.	77
Figura 27. Pruebas de peletización de almidón acidulado.	79
Figura 28. Granulador de bloques de almidón.	80
Figura 29. Pruebas de presecado de pelets de almidón.	80
Figura 30. Pruebas de dextrinización de pelets de almidón.	81
Figura 31. Secador de bandejas de lecho fijo utilizado en las etapas de presecado y tostación.	81
Figura 32. Análisis estadístico de materia seca y contenido de HCN en yuca fresca [Imagen tomada del Paquete Estadístico SPSS 14.0]	84
Figura 33. Análisis estadístico de materia seca y contenido de HCN en afrecho [Imagen tomada del Paquete Estadístico SPSS 14.0].	85
Figura 34. Comportamiento de la cantidad de HCL gastado en la acidificación.	88
Figura 35. Comportamiento de la cantidad de HCL gastado con respecto al contenido de sólidos.	90
Figura 36. Comportamiento de la cantidad de HCL adicionado.	91
Figura 37. Comportamiento del pH final obtenido.	91
Figura 38 Comportamiento de la cantidad de carbonato de calcio adicionado.	92
Figura 39: Análisis estadístico de concentración y tipo de aglutinante [Imagen tomada del Paquete Estadístico SPSS 14.0]	93
Figura 40. Análisis estadístico de presecado con un caudal de aire de 0,26 m ³ /s con flujo libre [Imagen tomada del Paquete Estadístico SPSS 14.0].	95

	pág.
Figura 41: Análisis estadístico de presecado con un caudal de aire de 0,21 m ³ /s [Imagen tomada del Paquete Estadístico SPSS 14.0]	97
Figura 42. Comportamiento de la solubilidad en las bandejas con caudal de 0,1 m ³ /s, y flujo de aire libre [Imagen tomada del Paquete Estadístico SPSS 14.0].	97
Figura 43. Comportamiento de la solubilidad en las bandejas con caudal de 0,1 m ³ /s, y sistema de homogenización de aire [Imagen tomada del Paquete Estadístico SPSS 14.0].	98
Figura 44. Amilograma de almidón nativo secado solar y artificial.	100
Figura 45. Amilograma de harina de yuca secado solar y artificial.	101

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Materiales utilizados en el estudio para la producción de dextrinas de yuca.	72
Cuadro 2. Equipo utilizados en la producción de almidón dulce, dextrinas y su caracterización.	73
Cuadro 3. Especificaciones de los equipos utilizados en la producción de almidón dulce, dextrinas y su caracterización.	73
Cuadro 4. Análisis de correlación en el proceso de acidificación de lechada [Cuadro tomado del Paquete Estadístico SPSS 14.0].	89
Cuadro 5. Análisis estadístico del proceso de secado con caudal de 0,26 m ³ /s con flujo libre [Cuadro tomado del Paquete Estadístico SPSS 14.0].	94
Cuadro 6. Análisis estadístico del proceso de secado con caudal de 0,21 m ³ /s y sistema de homogenización [Cuadro tomado del Paquete Estadístico SPSS 14.0]	95
Cuadro 7. Descripción de las corrientes de cada una de las etapas del proceso de producción de dextrinas a nivel de rallandería.	103
Cuadro 8. Descripción de las corrientes de cada una de las etapas del proceso de producción de dextrinas a nivel de rallandería.	103

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Formulaciones típicas de los adhesivos de dextrina.	115
Anexo B. Determinación de la dureza de los pelets de dextrina.	118
Anexo C. Procedimiento para la determinación de la solubilidad en agua fría de las dextrinas.	119
Anexo D. Análisis estadísticos utilizando la herramienta SPSS 14.0.	120

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue validar el proceso de producción de dextrinas en la rallandería TODOYUCA, con el fin de impulsar el desarrollo de esta agroindustria generando un producto de mayor valor agregado. Se analizaron las condiciones del proceso de la rallandería y se determinó la eficiencia del proceso por medio de un balance de materia; luego se definieron las condiciones de operación y las etapas del proceso que deberían ser adaptadas para la producción de dextrinas de yuca a partir de almidón nativo; la metodología seguida se basó en el conocimiento científico y tecnológico disponible (Aristizábal, 2004). La evaluación de las dextrinas obtenidas se realizó por medio de pruebas de solubilidad en agua fría, poder viscosante, coloración con yodo y además se evaluaron las características de los adhesivos obtenidos a partir de dextrinas de yuca y de maíz; finalmente se evaluó la posibilidad de incorporar la tecnología de peletizado-secado para la producción de almidón nativo, almidón agrio y harina de yuca determinando las características funcionales y reológicas de estos productos luego de la aplicación de esta tecnología.

SUMMARY

The objective of this work was to validate the process of dextrins production in the “rallandería” TODOYUCA, to improve of the development of this agroindustry and generating a more valued product. The conditions of the process were analyzed and the efficiency was measured by means of material balance; then were defined the operating conditions, and the stage process that should be adapted for the production of cassava dextrins obtained from native starch, the methodology of the process was based on the available scientific and technological Knowledge (Aristizábal, 2004). The evaluation of the obtained dextrins was accomplished by means of tests of solubility in cold water and viscosity, finally the characteristics of the adhesive obtained from cassava dextrins and corn were compared, were also evaluated of incorporating the pelletization and drying technology for the production of native starch, sour starch and cassava flour it was accomplished by the evaluation of these products after application of this technology.

INTRODUCCIÓN

Las rallanderías son un tipo de agroindustria que realiza la extracción del almidón de las raíces de yuca por medio de procesos mecánicos y artesanales; ubicadas en el sector rural, principalmente en el norte del departamento del Cauca; el principal producto de esta agroindustria es el almidón agrio que es utilizado para la elaboración de productos tradicionales como el pandebono, pandeyuca, besitos, rosquillas entre otros. Este tipo de agroindustria es fuente de empleo de muchas familias en el sector rural pero no se ha desarrollado debido a que no se han generado otros productos que incursionen en nuevos mercados.

El almidón tiene una amplia gama de aplicaciones en la industria de alimentos, de papel y cartón, textil, farmacéutica, minera entre otros. Uno de los productos que tiene muchas aplicaciones en la industria son los almidones modificados; dentro de los cuales se encuentran las dextrinas que son utilizadas para la producción de adhesivos, necesarios en la industria de papel y cartón para el cerrado de cajas, bolsas multipliego, elaboración de tubos en espiral entre otros (Aristizábal, 2004). Estudios previos (Aristizábal, 2004) demostraron que es posible la producción de dextrinas de yuca las cuales presentan mejores características comparadas con las dextrinas de maíz, que son las utilizadas normalmente para la producción de adhesivos. Sin embargo, el método de mezclado es ineficiente, y fue necesario evaluarlo, además de las operaciones de secado y peletizado, con el objetivo de estructurar un proceso de producción aplicable en una rallandería.

Al respecto este proyecto buscó validar el proceso de producción de dextrinas de yuca a partir de almidón nativo en la rallandería TODOYUCA, consecuentemente la metodología seguida contempló la definición de las condiciones de operación para la producción de almidón en la rallandería,

evaluando cada etapa del proceso de producción de almidón. Se evaluaron las condiciones de operación, las unidades de proceso para la producción de dextrinas en la rallandería.

En el estudio para el proceso de obtención de almidón de yuca se realizaron análisis para determinar el contenido de almidón y así determinar la eficiencia de extracción, también se realizaron análisis de contenido de fibra, proteína, cenizas, extracto etéreo y contenido de cianuros. Para la obtención de dextrinas se evaluaron dos tipos de mezclado incorporando una nueva tecnología con la utilización de una bomba mecánica; para la etapa de presecado se evaluaron dos caudales de proceso y la inclusión de un sistema de homogenización de flujo de aire y temperatura, y para la etapa de tostación se evaluó un caudal fijo y la utilización del sistema de homogenización de flujo de aire y temperatura para disminuir los gradientes de temperatura y mejorar la uniformidad de conversión; finalmente se evaluó la incorporación de la tecnología de peletizado-secado en la producción de almidón nativo, almidón agrio y harina de yuca, evaluando los sus propiedades funcionales y reológicas según el caso.

1. ASPECTOS GENERALES

La yuca es uno de los cultivos mas difundidos en el mundo aunque su comercialización a nivel mundial es reducida. Es básicamente un producto vegetal de autoconsumo en los países productores, casi en su totalidad en países del tercer mundo, se ha convertido en la base de la dieta de amplias poblaciones de África central y de países en desarrollo, debido a las facilidades de producción y procesamiento (Cartay, 2004).

Uno de los más importantes productos obtenidos a partir de la yuca es el almidón, que se obtiene procesando las raíces en etapas básicas de lavado, rallado, extracción del almidón y separación del agua. El almidón tiene diversas aplicaciones en la industria dependiendo del tipo de tratamiento al que se somete; dentro de la gama de productos que se pueden obtener a partir del almidón se encuentran los almidones modificados y las dextrinas entre otros. En este capítulo se presentan los aspectos relacionados con la yuca, el almidón y las dextrinas, sus propiedades y aplicaciones.

1.1 YUCA

La yuca (*Manihot esculenta* Crantz) es una especie de amiláceas que se cultiva en los trópicos y subtrópicos. El origen de la yuca y el sitio donde tuvo lugar su domesticación aun no ha sido establecido definitivamente. A pesar de que se ha sugerido que la yuca se habría originado en lugares tan diversos como África, Asia, islas del Pacífico, Mesoamérica y América del sur (Renvoize, 1973), existe un reconocimiento muy generalizado, de que este cultivo se originó en América tropical, específicamente en el nordeste del Brasil. En la cuenca amazónica es donde el género botánico al que pertenece la yuca muestra su mayor variabilidad genética. También se observa en Mesoamérica un centro secundario de diversidad genética. Numerosas evidencias apuntan a

que el área de domesticación de la yuca comprende una vasta región desde México hasta Brasil. Esta especie se habría cultivado desde hace, por lo menos, 5.000 años (Simmonds, 1976).

1.1.1 Planta y cultivo. Hay actualmente más de 5.000 variedades de yuca y cada una tiene características peculiares. Sus flores (masculina y femenina) son pequeñas y la polinización cruzada es frecuente. El fruto es dehiscente y las semillas pequeñas y ovaladas. La raíz es cónica y tiene una corteza externa y otra interna (de color blanco o rosado). Los tallos maduros se cortan en estacas de 30-70 cm de longitud, con las cuales se propaga la planta (Alarcón y Dufour, 1998).

La yuca pertenece a la familia de las *Euphorbiaceae*, es un arbusto de 2-3 m de altura, con tallo arborescente, nudoso, hueco, de color verde, de inflorescencias paniculadas y con hojas anchas y palmeadas que tienen de 3-7 lóbulos. Las raíces, la parte comestible de la planta (en algunas regiones se consumen también las hojas), irradian desde el tallo hasta la parte interna del suelo. Su número por planta difiere de acuerdo con la variedad, de las muchas existentes, o de las condiciones agroecológicas del lugar de cultivo. Por lo general, el peso de las raíces es de 3-7 kg por planta (Schnee, 1973; Pittier, 1926). La piel de la raíz está formada por una capa suberosa de color oscuro, el corcho, y por la corteza, que comprende el filodermo y el floema. Por debajo de la corteza se encuentra la reserva de almidones, que es la porción aprovechable de la raíz para el consumo, tanto humano como animal, y para los usos industriales. La piel representa un 15% de la raíz y tiene un espesor de aproximadamente 1,5 mm. La mayor parte, el 85% de la raíz, constituye la parte utilizable para el consumo (Carrizales, 1984).

La planta tiene una gran capacidad de adaptación climática. Crece tanto en las regiones áridas, secas y xerófilas, como en las selvas tropicales lluviosas, lo que ha beneficiado su difusión. Se adapta bien a las distintas condiciones de humedad, cultivándose en zonas hasta con 2.000 mm de precipitación anual,

así como en zonas de escasa pluviosidad. De igual manera se comporta satisfactoriamente a distintas temperaturas, variando entre 15 y 35 °C (Cartay, 2004).

La planta requiere para su cultivo de suelos predominantemente francos y de buen drenaje, perjudicándola el exceso de humedad y la acidez. La propagación se efectúa generalmente por estacas de 25-30 cm de largo y de 3 cm más o menos de diámetro. Para este fin, se utiliza sólo la parte central del tallo. La densidad de siembra recomendable es de 12.500 estacas por hectárea. La raíz de la planta se cosecha de 7-12 meses después de la siembra, dependiendo de la variedad utilizada. Puede dejarse un tiempo enterrada, sin cosechar, puesto que se conserva bien en esas condiciones, esperando para ser cultivada y comercializada. La raíz, una vez cosechada, resulta perecedera en un corto plazo. Los rendimientos del cultivo varían de acuerdo a la variedad y la tecnología utilizadas (Cartay, 2004).

La raíz de yuca contiene dos glucósidos cianogénicos linamarina (glucosido ligado) y lotaustralina (glucósido libre). Cuando la linamarina se hidroliza por la acción de una enzima, la linamarasa, se produce el ácido cianhídrico también conocido como ácido prúsico que es un tóxico particularmente violento cuando presenta altos niveles de concentración, las plantas de la yuca presentan distintos grados de concentración de ese ácido por eso se pensaba que existían dos plantas de yuca completamente distintas: la yuca dulce y la yuca amarga. Ahora se ha comprobado que se trata de variedades o clones de la misma planta (Cartay, 2004). El carácter dulce o amargo de una variedad de yuca, está determinado mayormente por su contenido de ácido cianhídrico, depende básicamente de las condiciones agroecológicas existentes en la zona de cultivo. Es decir, una yuca dulce puede ser dulce en una región y amarga en otra dependiendo de las condiciones edafoclimáticas (Cartay, 2004). Ambos clones, tanto dulces como amargos, contienen el glucósido cianogénico, pero las variedades dulces en menor concentración que las amargas. Aparentemente, en los suelos fértiles se incrementa el sabor amargo de la yuca y la concentración de principios venenosos. En la práctica, las yucas amargas

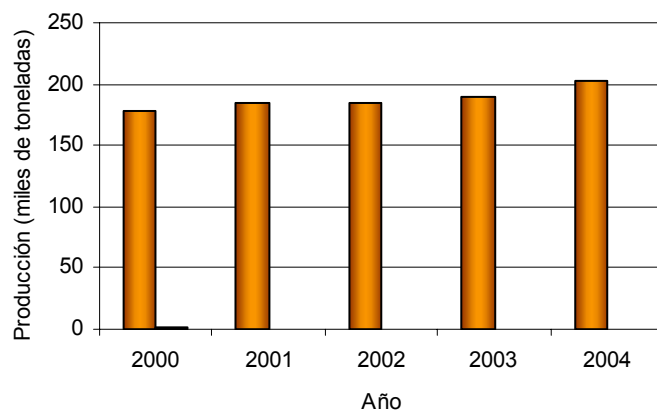
son más comunes en el área amazónica y en el Caribe, mientras que el cultivo las dulces se encuentra más generalizado en el norte de la América del Sur (Cartay, 2004).

Cuando las células de la raíz son molidas, aplastadas o ralladas, el ácido cianhídrico se libera bajo la acción de enzimas. La concentración de glucósido puede variar desde 0,005-0,02% en las amargas, y de 0,005-0,0075% en las dulces. Sin embargo, contrariamente a lo que se cree, no existe una relación muy bien definida entre el sabor amargo o dulce y el contenido de principios tóxicos. Las yucas amargas pueden o no ser venenosas (Cartay, 2004).

1.1.2 Producción. Superficie sembrada y rendimiento mundial de yuca. En condiciones experimentales y en monocultivo, la yuca rinde hasta 90 t/ha de raíces con 25-30 t/ha de materia seca. Con 1000 kg de yuca fresca se pueden obtener 280 kg de harina o 230 kg de almidón o 350 kg de trozos secos o 170 L de alcohol (Alarcón y Dufour, 1998).

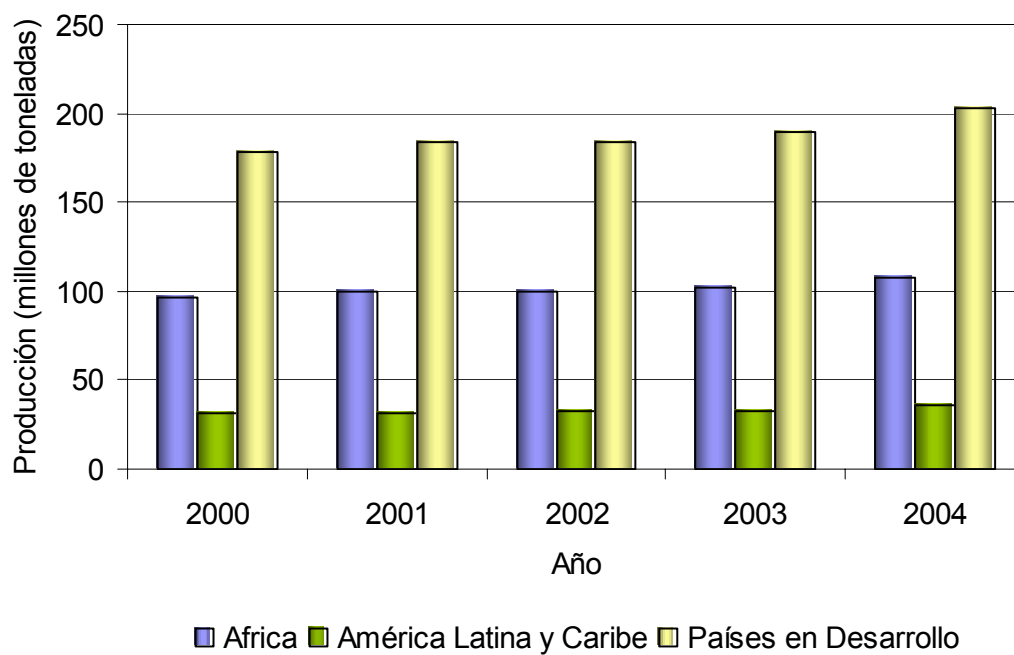
La producción mundial de yuca en el 2004 llegó a más de 202 millones de toneladas anuales (se producían solo 70 millones en 1960); de las cuales 53,3% (108 millones) se produjo en África, 29,1% (58 millones) en Asia y el 17,5% (35 millones) se produjo en América Latina y el Caribe, y una pequeña fracción que corresponde al 0,7% (1,4 millones) se produjo en América del Norte y Central (FAO, 2005). La figura 1 muestra la producción mundial de raíces de yuca en el año 2004. Las figuras 2, 3 y 4 muestran la producción; superficie sembrada y rendimiento en África, América Latina y el Caribe y en los países en desarrollo en el año 2004 respectivamente.

Figura 1. Producción mundial de raíces de yuca en el año 2004.



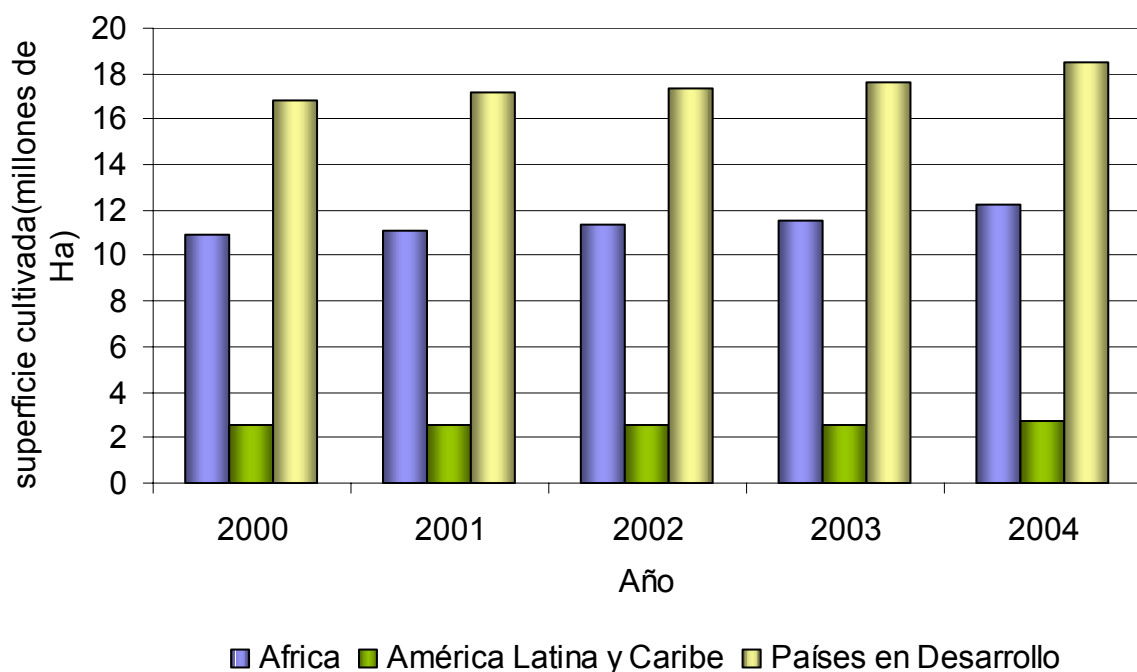
Fuente: FAO, 2005

Figura 2. Producción de raíces de yuca en continentes y países en desarrollo en el periodo 2000-04.



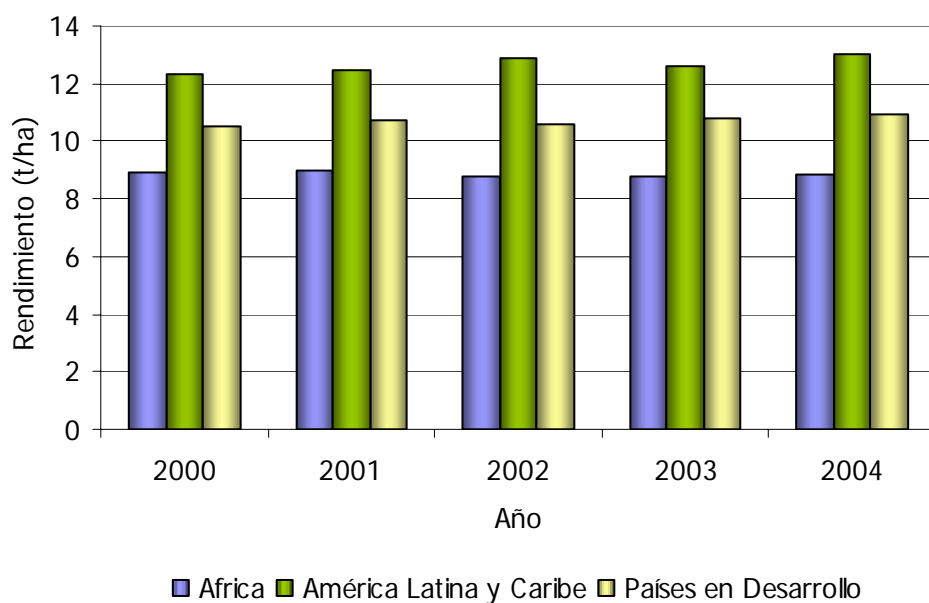
Fuente: FAO, 2005

Figura 3. Superficie sembrada de raíces de yuca en continentes y países en desarrollo en el periodo 2000-04.



Fuente: FAO, 2005

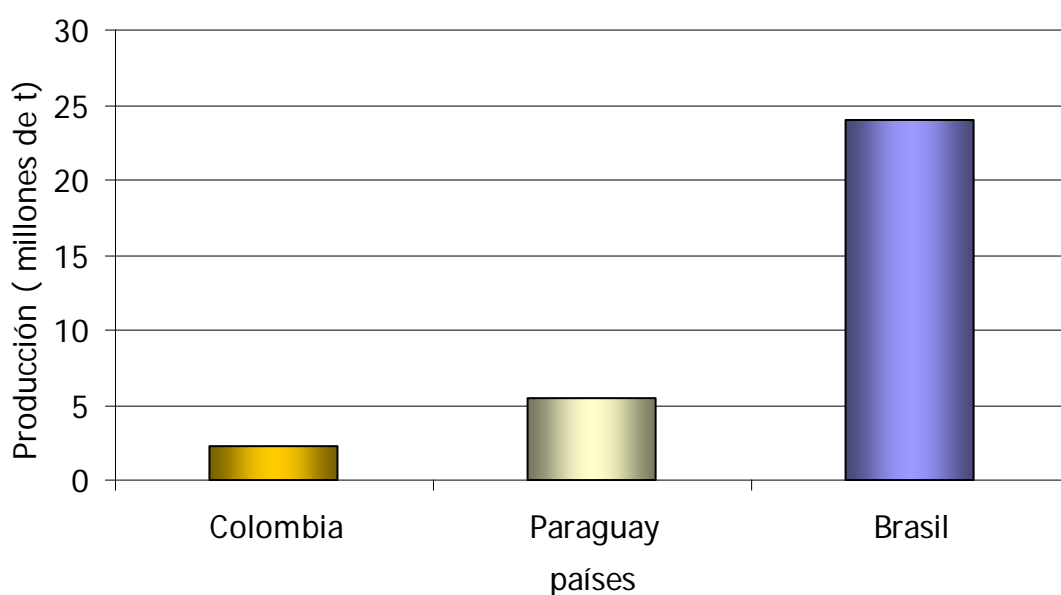
Figura 4. Rendimiento de raíces de yuca en continentes y países en desarrollo en el periodo 2000-04.



Fuente: FAO, 2005

Entre los continentes productores de yuca en el mundo se destaca la producción de África seguida de América Latina y Caribe. África es el continente de mayor producción y superficie sembrada, siendo Nigeria el país de mayor producción. Se destaca la no producción de yuca en Europa y los países desarrollados (FAO, 2005). En las figuras 5, 6 y 7 se presenta la producción, superficie sembrada y rendimiento de los principales países productores de yuca en Suramérica respectivamente; donde Brasil es el principal productor de yuca seguido de Paraguay existen otros países productores como son Colombia, Perú, Ecuador y Venezuela. En el año 2004, Brasil produjo 24.038.888 t, sembró 1.773.267 ha, y obtuvo un rendimiento de 13,5 t/ha, Paraguay produjo 5.500.000 t, sembró 306.000 ha, y obtuvo un rendimiento de 17,9 t/ha, Colombia produjo 2.218.112 t, sembró 191.719 ha, y obtuvo un rendimiento de 11,6 t/ha (FAO, 2005).

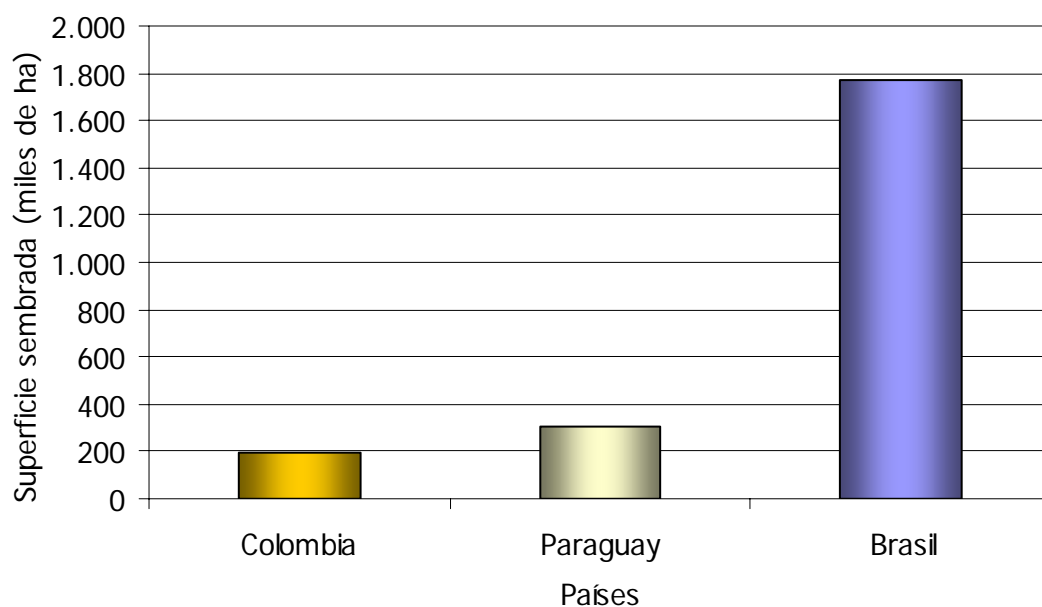
Figura 5. Producción de yuca en Colombia, Paraguay y Brasil en el año 2004.



Fuente: FAO, 2005

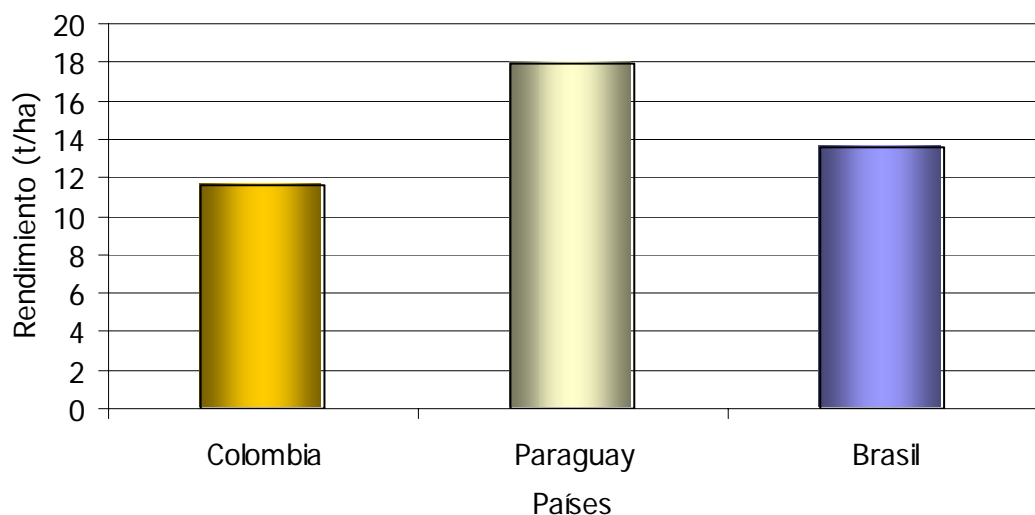
1.1.3 Producción, superficie y rendimiento de yuca en Colombia. Debido a la estacionalidad de las lluvias en Colombia, gran parte de la producción nacional se concentra en ciertas épocas del año, la principal zona productora de yuca en Colombia es la costa atlántica.

Figura 6. Superficie sembrada de yuca en Colombia, Paraguay y Brasil en el año 2004.



Fuente: FAO, 2005

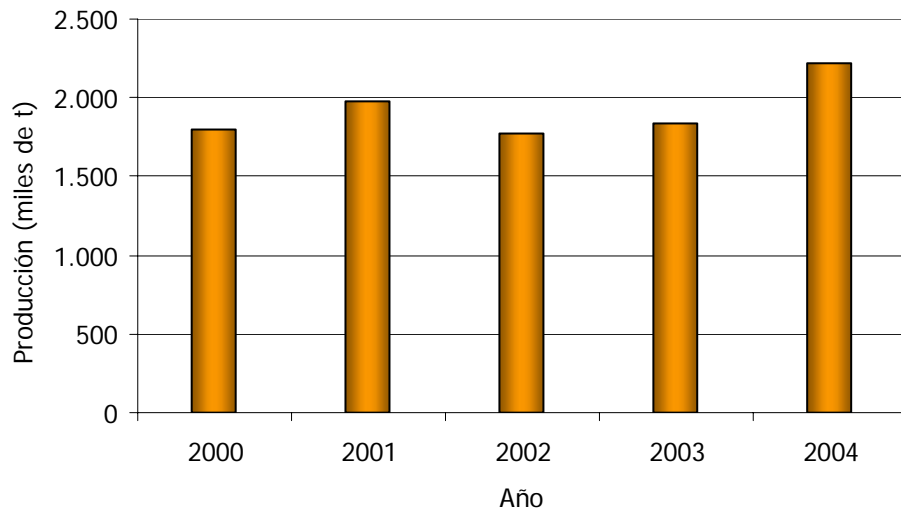
Figura 7. Rendimiento de yuca en Colombia, Paraguay y Brasil en el año 2004.



Fuente: FAO, 2005

Las figuras 8, 9 y 10, muestran la producción, superficie sembrada y rendimiento de yuca en Colombia en el periodo 2000-04 (FAO, 2005).

Figura 8. Producción de yuca en Colombia en el periodo 2000-04.



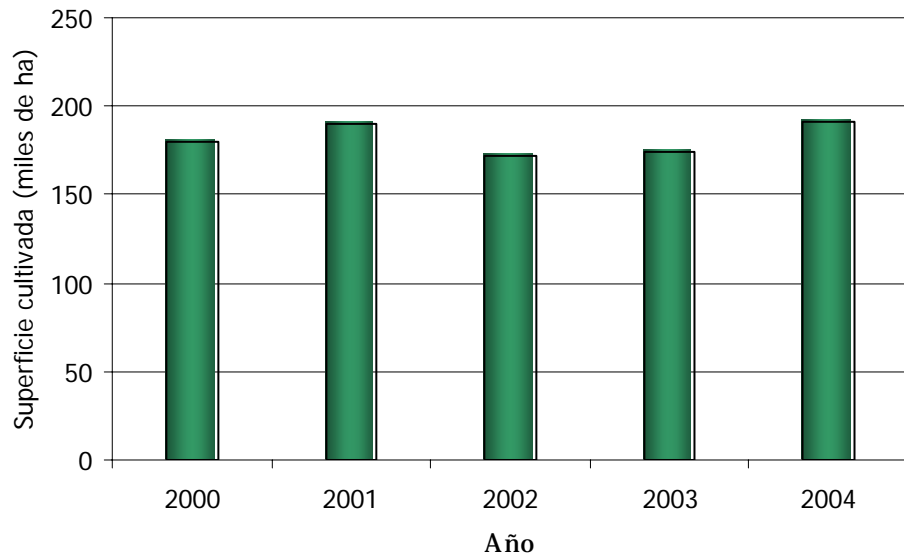
Fuente: FAO, 2005

Como se observa en la figura 8, seg en el periodo 2000-03, la producción de yuca fue estable, presentándose un aumento en la producción en el año 2004 (FAO, 2005).

En la figura 9, se observa que en el periodo de estudio 2004, dos años presentaron un importante crecimiento en la superficie sembrada, estos fueron los años 2001 y 2004, donde se sembraron alrededor de 190.000 ha de yuca en Colombia, este valor fue relativamente mayor comparado con el promedio de los demás años del periodo que fue de 175.000 ha (FAO, 2005).

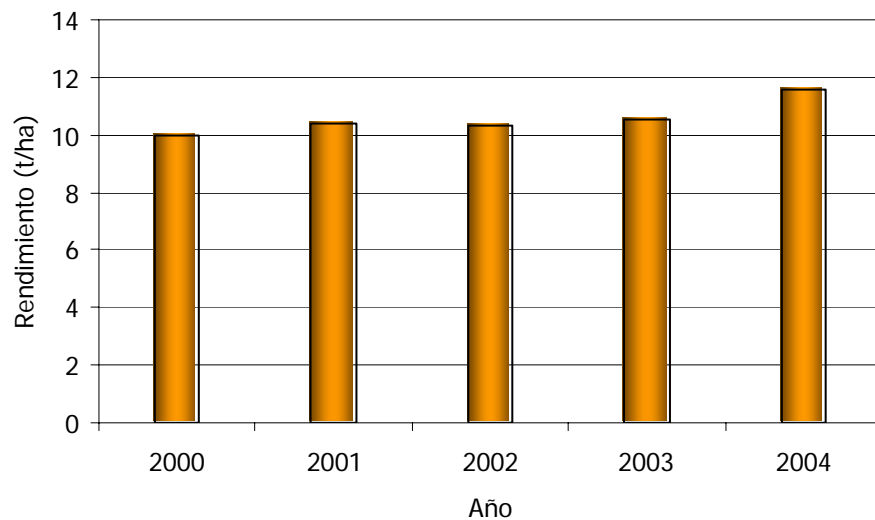
En la figura 10 en el periodo de estudio 2000-04, se observa que el rendimiento se mantuvo estable y solamente en el año 2004 se presentó un leve aumento de 11,6 t/h (FAO, 2005).

Figura 9. Superficie sembrada de yuca en Colombia en el periodo 2000-04.



Fuente: FAO, 2005

Figura 10. Rendimiento de yuca en Colombia en el periodo 2000-04.



Fuente: FAO, 2005

1.1.4 Usos de la yuca. La yuca tiene una enorme importancia para la seguridad alimentaria y la generación de ingresos, especialmente en las regiones propensas a la sequía y de suelos áridos; siendo el cuarto producto básico más importante después del arroz, el trigo y el maíz. Tanto sus raíces

como sus hojas son adecuadas para el consumo humano; Las primeras son fuente de hidratos de carbono y las segundas son fuentes de vitaminas, proteínas y minerales, particularmente carotenos y vitamina C. (Ceballos, 2002).

Una amplia gama de productos pueden ser elaborados a partir de la yuca, se destaca su uso en la alimentación humana, alimentación animal, en la producción de almidón y sus derivados como son los almidones modificados, jarabes de glucosa, alcohol entre otros.

- *Alimentación humana.* En Colombia existen muchas formas de procesar la yuca para el consumo humano, tradicionalmente se hierva la raíz de 10-40 minutos en la preparación de sancochos y sopas. El tiempo de ebullición requerido depende de la variedad, por lo cual, este es uno de los factores para tener en cuenta en el proceso de selección de variedades para tal fin, sólo deben utilizarse variedades dulces, ya que las amargas conservan su sabor después de la cocción y además pueden ser peligrosas por su toxicidad (Ceballos, 2002).

La yuca también se consume frita, recientemente se ha venido desarrollando una interesante industria de croquetas precocidas y congeladas. Esta alternativa soluciona, por un lado la rápida perecibilidad de las raíces y permite agregarle valor mediante su procesamiento. Esto a su vez, facilita el acceso de zonas urbanas a la yuca pues la comercialización de raíces frescas siempre ha presentado los problemas de mercadeo a los que se hizo mención (Ceballos, 2002).

La yuca también puede ser procesada para la elaboración de almidón agrio y harina de yuca "productos muy consumidos en países como Brasil y Colombia", el almidón agrio es usado en panificación de productos tradicionales, como pandebono, pandeyuca, rosquillas, besitos. La harina de yuca puede ser usada

para la producción de harinas compuestas trigo-yuca, para la elaboración de pan, tortas, galletas, entre otros (Ceballos, 2002).

En Brasil, una gran proporción de la yuca es consumida como *farinha* en la preparación de diversos platos típicos. La *farinha* se obtiene primeramente pelando, rallando y exprimiendo las raíces (lo que eventualmente elimina el glucósido cianogénico). Existen diversas alternativas para exprimir la masa de raíces ralladas desde el tradicional tipití hasta métodos más sofisticados como filtros-prensas, la masa se ralla nuevamente y luego es horneada, secada y molida; en esas condiciones es envasada y comercializada. Una vez exprimida la masa de las raíces puede ser amasada hasta formar una torta plana que se asa a la plancha para obtener una especie de pan o galleta llamada *cazabe*, común en las islas del Caribe, Venezuela y Colombia (Ceballos, 2002).

Otra alternativa para el consumo humano de la yuca, que esta creando sus propios interesantes mercados, son los *chips* de yuca frita. Este producto esta siendo producido de manera comercial en Colombia, Venezuela, Brasil y en otros países, e incluso es exportado a zonas de Estados Unidos donde la población latina es predominante (Ceballos, 2002).

En otras regiones del mundo, la yuca es consumida de maneras muy diversas. Existen variantes de harinas muy tradicionales como el *gaplek* de Indonesia o el *kokonte* de Ghana. En países como Nigeria, el *gari* es una manera muy popular del consumo de yuca. Las raíces se lavan, pelan y rallan, tal como se hace para la producción de *farinha* en Brasil, pero con la diferencia de que la masa resultante es colocada en bolsas y luego es exprimida con pesos que se colocan sobre estas (piedras o maderos). El proceso es lento y la masa permanece así por varios días, durante los cuales la misma fermenta. La masa así tratada se tuesta o fríe (a menudo con aceite de palma) hasta que se seca y después se empaca en bolsas para ser almacenada o comercializada (Ceballos, 2002).

- *Alimentación animal.* Por su alto valor energético, la yuca ofrece muy buenas oportunidades para la alimentación animal en la forma de trozos secos, *chips* o procesados en forma de pelets. Este uso es el mayor destino al cual se dirige la producción de yuca, siendo Tailandia el país líder en producción. Los trozos secos pueden ser incorporados en la formulación de alimentos balanceados para aves y porcinos, en la piscicultura y para otros animales domésticos. La obtención de trozos se realiza exponiendo el materia al aire y al sol, por lo cual es un proceso totalmente natural, donde se emplea gran número de personas para el volteo de los trozos. Los costos de construcción de los patios son exorbitantes. Por otra parte, se necesita un periodo sin lluvias relativamente largo, y esto no es posible en zonas de Colombia, en la costa Caribe (particularmente en los departamentos de Sucre, Córdoba y Magdalena). Sin embargo, existen métodos de secado, que puede ser secado en capa fija o secado artificial (Ceballos, 2002).

La yuca puede ser utilizada en nutrición animal sin ser previamente secada. En muchos lugares del mundo se ensilan tanto la raíz como las hojas; este proceso permite almacenar el producto por un largo periodo y, al mismo tiempo, reducir los niveles de glucósidos cianogénicos aun cuando inicialmente sean muy altos. De esta manera, una importante actividad porcina de Asia se beneficia de esta alternativa, la cual tiene la ventaja adicional de combinar la fuente de energía de las raíces con el alto contenido de proteínas de las hojas. Los trozos de yuca fresca cortados y oreados al aire libre por unas pocas horas también pueden ser ofrecidos a porcinos y bovinos, con excelentes resultados (Buitrago, 1990).

- *Almidones.* Una de las utilidades de yuca más importantes es la producción de almidón. Su extracción puede realizarse en plantas artesanales con capacidad de unas pocas toneladas de almidón al mes y en enormes plantas con capacidades hasta de 400.000 t/año. En el proceso las raíces son lavadas y peladas, luego son maceradas finamente (rallado), enseguida se separa el almidón y el agua que lo arrastra, y por otro lado las fibras y proteína

que las raíces contienen. Finalmente el almidón obtenido se seca solar o artificialmente, es empacado y comercializado (Ceballos, 2002).

Se puede obtener dos tipos de almidón de yuca: el almidón sin fermentar o llamado almidón *nativo*, o fermentado llamado almidón *agrio*. La producción de del almidón agrio es muy popular en los *rallanderos* del norte del departamento del Cauca. En los últimos años se destaca un uso creciente de la yuca para la producción de almidones en países como Brasil y Tailandia (Ceballos, 2002).

- *Alcohol*. La yuca tiene un alto potencial para producir alcohol. Luego de la crisis petrolera de la década de los 70s, Brasil hizo planes para sustituir parte del combustible derivado del petróleo con alcohol producido a partir de caña de azúcar o yuca. A pesar del escepticismo inicial, los resultados demostraron que el enfoque de este estudio para resolver la crisis energética tenía considerable sustento. Por ejemplo, Brasil produjo en 1980 alcohol para sustituir 20% de la gasolina necesaria para sus automóviles, sin embargo actualmente, por competitividad en costos, se produce a partir de caña. A medida que el suministro de productos derivados del petróleo sea más difícil, la demanda de sustitutos del petróleo se intensificara (Cock, 1989).

1.2 ALMIDÓN

El almidón es una de las sustancias de reserva dominantes en la naturaleza, puede hallarse depositado como pequeños gránulos en las semillas, tubérculos y raíces de distintas plantas. El almidón es una mezcla de dos polímeros: la amilosa, que es lineal, y la amilopectina que es ramificada (Ceballos y De la Cruz, 2002).

El almidón es el único producido universalmente en pequeños gránulos sintetizados en los aminoplastos, están formados por capas concéntricas o excéntricas de distinto espesor y tienen tamaño (2-150 μm), distribución de tamaños y forma variables directamente relacionados con el sistema

biosintético de las plantas y por condiciones físicas impuestas por el entorno del tejido. El 70% aproximadamente de la masa de un grano de almidón se considera amorfo y el 30% aproximadamente cristalino. En las zonas amorfas se localiza la mayor parte de la amilosa aunque también una fracción considerable de amilopectina. Las zonas cristalinas están formadas predominantemente por amilopectina (Swinkels, 1996).

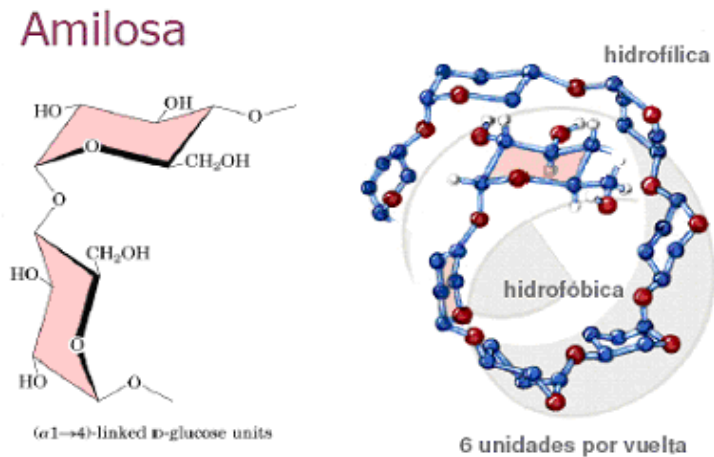
Al calentar la suspensión de almidón, las moléculas vibran rigurosamente, rompiendo enlaces intramoleculares y permitiendo así la formación de puentes de hidrógeno con el agua, lo cuál origina una serie de modificaciones irreversibles a partir de una temperatura que es característica para cada almidón. Los gránulos absorben de 20-40 g de agua/g de almidón y la viscosidad de la disolución aumenta notablemente. A la vez, una parte de la amilosa difunde fuera del gránulo y pasa a disolución. Finalmente el gránulo explota sus cristales se funden y forman una red polimérica, esta fase es llamada gelatinización. Mediante una nueva agitación los gránulos son fácilmente desintegrados, provocando una disminución en la viscosidad (Swinkels, 1996).

1.2.1 Estructura molecular del almidón. A nivel molecular el almidón esta compuesto por amilosa y amilopectina las cuales presentan variaciones dependiendo de la fuente de almidón de la cual provengan. Las propiedades del almidón dependen de la proporción amilosa-amilopectina (Swinkels, 1996).

- *Estructura y propiedades de la amilosa.* La amilosa se compone exclusivamente de cadenas de restos de α - D-glucopiranosilo unidas por enlaces α (1-4). La hidrólisis enzimática de la amilosa es llevada a cabo por enzimas como la α -amilasa, β -amilasa y glucoamilasas. Puesto que la β -amilasa frecuentemente no llega a convertir la totalidad de la amilosa en maltosa, se ha supuesto que podría existir una pequeñísima proporción de ramificaciones gracias a enlaces α (1-6), el tamaño molecular de la amilosa es

muy variable. Tienden o forman estructuras helicoidales capaces de incluir a otras moléculas como ácidos grasos o hidrocarburos (Swinkels, 1996).

Figura 11. Estructura molecular de la amilosa.



Fuente: UAM, 2005

- *Estructura y propiedades de la amilopectina.* La amilopectina es un glucano ramificado. En las cadenas lineales está unido por enlaces α (1-4) y α (1-3), y en los puntos de ramificación está unido por enlaces α (1-6); existe un punto de ramificación cada 15-30 restos de glucosa. El peso molecular de la amilopectina es muy elevado y se encuentra en el intervalo de 10^7 a 7×10^8 . Por cada 400 unidades de glucosa aproximadamente aparece uno de fosfato (Swinkels, 1996).

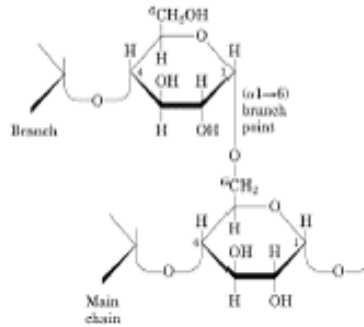
La amilopectina, por calentamiento en agua, proporciona soluciones claras y de alta viscosidad que son además filamentosas y cohesivas. Al contrario que la amilosa no tiene casi tendencia a la retrogradación, no presenta envejecimiento, ni formación de geles, aunque la concentración sea muy alta. La viscosidad decrece sin embargo fácilmente en medio ácido en tratamientos en autoclave o por fuerte agitación mecánica (Swinkels, 1996).

1.2.2 Propiedades fisicoquímicas y funcionales del almidón. El análisis de estas propiedades es fundamental para lograr un total aprovechamiento de la variabilidad genética de las diferentes variedades de yuca.

Figura 12. Estructura molecular de la amilopectina.

AMILOPECTINA

- Polímero ramificado cada 15-25 unidades de glucosa.
- enlaces α D(1,6), α D(1,4) y α D(1,3)
- PM ~ 200 millones Da



Fuente: UAM, 2005.

Las características típicas del almidón de yuca son diferentes a las obtenidas a partir de maíz o de papa, lo que crea un nicho en el que ciertos procesos industriales pueden preferir la utilización de un almidón con respecto a otro. Las principales propiedades fisicoquímicas de un almidón son: composición proximal, características del grano (tamaño y forma), naturaleza cristalina, peso molecular, poder de hinchamiento, solubilidad, contenido relativo de amilosa y características de la pasta que produce. La tabla 1 muestra algunas de las propiedades más importantes de los componentes del almidón (Ceballos y De la Cruz, 2002).

El contenido de proteína del almidón de yuca (0,1%) es muy bajo comparado con el de los almidones de arroz (0,45%) y de maíz (0,35%). La proteína residual de estos almidones puede dar un sabor harinoso y una tendencia a producir espuma (Ceballos y De la Cruz, 2002).

Los gránulos de almidón de papa y yuca contienen un pequeño porcentaje de sustancias grasas, comparado con los almidones de los cereales (maíz y arroz), los cuales contienen respectivamente 0,6%-0,8%. Esta composición favorece el almidón de yuca, ya que estos lípidos forman un complejo con la amilosa, la cual tiende a reprimir el hinchamiento y la solubilización de los

gránulos de almidón, y por esta razón se necesitan temperaturas altas (> 125 °C) para romper así la estructura amilosa-lípido y solubilizar la fracción de amilosa. La presencia de sustancias grasas puede crear problemas por la tendencia a ranciarse en el almacenamiento (Ceballos y De la Cruz, 2002).

Tabla 1. Características de la amilosa y la amilopectina.

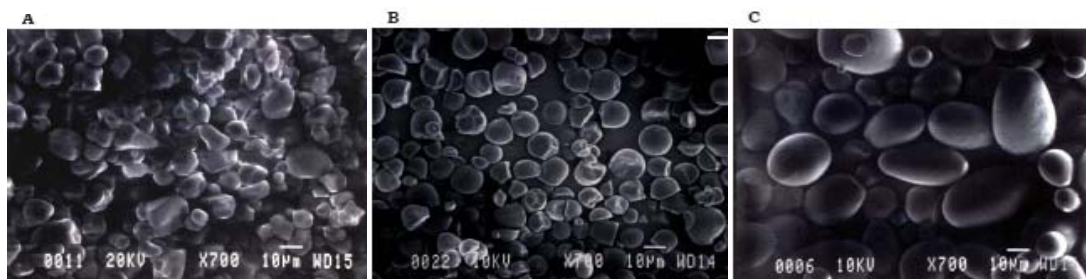
Propiedad	Amilosa	Amilopectina
Peso molecular	1-2 x 10 ⁵	> 2 x 10 ⁷
Grado de polimerización	990	7200
Ligamientos glucosídicos	α – D (1-4)	α – D (1-6)
Estructura molecular	Básicamente lineal	Muy ramificada
Susceptible a retrogradación	Alta	Baja
Afinidad con el Yodo	20,1 g/ 100 g	1,1 g / 100 g

Fuente: Adaptado de Hallauer, 1994

Los gránulos de almidón de yuca son redondos con terminales truncados y con un núcleo bien definido y su tamaño varía de 5-35 nm, con promedios de 20 nm. Los gránulos de los almidones de arroz y maíz ceroso tienen forma poliédrica, mientras que los gránulos de almidón de papa son ovoides y presentan los gránulos de mayor tamaño (5-100 nm), con promedio de 33 nm. El tamaño de los gránulos de maíz y maíz ceroso es intermedio entre 3-26 nm, con un promedio de 15 nm, similar al de los gránulos de almidón de yuca (Ceballos y De la Cruz, 2002).

Los gránulos más pequeños corresponden a los de arroz, que varían de 3-8 nm y son considerados como los más resistentes a procesos con altas temperaturas, como la esterilización; además, poseen mayor digestibilidad (ver Figura 13). El nivel de cristalización del almidón de yuca esta por el orden de 38% (Rickard *et al.*, 1991). La cristalinidad del granulo se debe esencialmente a la amilopectina.

Figura 13. Forma de los gránulos de almidón de maíz (A), yuca (B) y papa (C).



Fuente: Hurtado, 1997

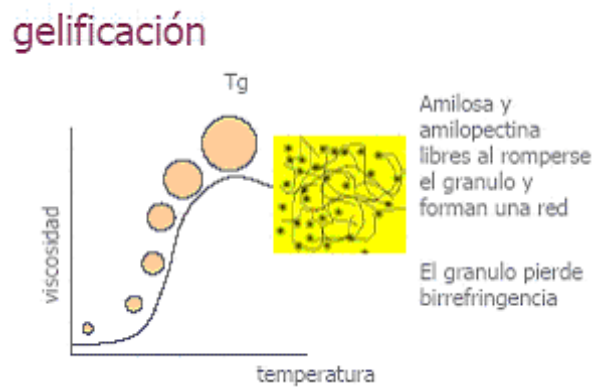
Cuando una suspensión en agua de almidón es sometida a calentamiento, los gránulos lentamente absorben agua y aumentan de tamaño. Inicialmente, los gránulos retienen sus propiedades ópticas, incluyendo la habilidad para refractar la luz polarizada (birrefringencia), lo cual se debe a la alineación de las moléculas en los gránulos de almidón. Se ha observado que los gránulos de almidón de yuca tienen baja birrefringencia a temperatura entre 58-64 °C, comparados con los gránulos de maíz a temperaturas entre 62-68 °C (Ceballos y De la Cruz, 2002).

Aunque hay diferencia varietal en las propiedades reológicas o funcionales de los almidones de yuca, las curvas del amilograma Brabender siguen un patrón similar a los almidones que poseen un alto contenido de amilopectina. El almidón de yuca gelatiniza como el almidón de arroz y maíz cerosos que gelatinizan a temperaturas relativamente bajas (60-67 °C) el punto máximo se alcanza rápidamente, lo que indica que es un almidón fácil de cocinar y requiere bajo consumo de energía durante su cocción. Además, tiene una tendencia baja a la retrogradación y produce un gel muy claro y estable (ver Figuras 14 y 15) (Ceballos y De la Cruz, 2002).

Las propiedades de claridad y baja retrogradación del almidón de yuca pueden ser utilizadas en muchos productos alimenticios; sus características reológicas se asemejan bastante a las del almidón de maíz ceroso. Las propiedades de calidad de las pastas de almidón son modificadas durante el proceso de congelación, aumentando, la exudación de agua o “sinéresis”, lo que deteriora

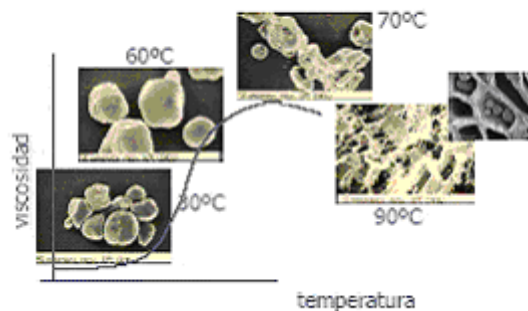
la estructura de la pasta, algunos almidones nativos, como la yuca y la oca, han sido considerados resistentes a este proceso (Ruales, 1995). También se ha encontrado que las pastas de almidón de yuca son estables a medios ácidos por debajo de pH 2,4, medio en el cual hay destrucción del gránulo y del aspecto físico de la pasta, debido a una hidrólisis parcial o total de las pastas.

Figura 14. Gelificación de gránulos de almidón.



Fuente: UAM, 2005

Figura 15. Cinética de gelificación de gránulos de almidón.



Fuente: UAM, 2005

1.2.3 Usos del almidón. El almidón es utilizado en diversos sectores, como la industria de alimentos, la industria de papel y cartón, la industria textil, la industria de adhesivos, la industria farmacéutica, entre otros.

- *Industria de alimentos.* El almidón nativo se usa solo o mezclado, en la elaboración de macarrones y de diversas harinas; con estas se preparan pudines, pasteles, galletas, obleas, bizcochos, almojábanas, cremas, helados, sopas, ensaladas, embutidos y otros productos alimenticios. Con el almidón agrio se elaboran también productos alimenticios tradicionales en Colombia, como el pandebono y el pandeyuca. El almidón pregelatinizado es usado como aditivo para espesar, estabilizar o recubrir tortas de frutas, mezclas secas, pudines, crema de leche. Los almidones modificados, por diferentes medios; se usan como espesantes de salsas blancas, y para estabilizar y emulsificar aderezos para ensaladas, gelatinas nutritivas, postres instantáneos, helados, pudines y alimentos para bebe (Balagopalan *et al.*, 1988).

- *Industria de papel y cartón.* La elaboración de papel y de cartón consta de varias etapas, en las cuales se adiciona almidón nativo y almidones modificados al producto final para darle ciertas propiedades y diferente calidad. La industria del papel exige tres características básicas en el almidón nativo de yuca: blancura, bajo contenido de fibra y pocas impurezas. Puede tener el almidón otras características físicas o químicas, las cuales afectan el proceso de elaboración del papel o la formación de la pasta que le da origen. El almidón ayuda a unir las fibras de celulosa del papel y forma una capa superficial que reduce la pelusa y aumenta la consistencia, la solidez y la durabilidad de las hojas de papel. Esta capa delgada da también mayor resistencia mecánica al cartón. Además como adhesivo en el laminado de ciertos papeles, de cajas corrugadas, de papel de colgadura (para empapelar), de tubos de cartón y de otros artículos. También se emplea en el reciclaje del papel y del cartón (Alarcón y Dufour, 1998).

- *Industria textil.* El almidón es usado en esta industria, para engomar los hilos de la urdimbre y de la trama en la elaboración de telas, y también es usado como engomante para almidonar tejidos blancos en la industria de lavandería (Alarcón y Dufour, 1998).

- *Industria de adhesivos.* El almidón se usa para la elaboración de adhesivos o colas baratas. Estos pegantes se utilizan para fabricar materiales de embalaje, etiquetas, papel de envoltura y cinta pegante de humedecer, productos cuyo uso los hace desechables. Los pegantes son muy útiles para las empacadoras y etiquetadoras de alta velocidad, por dos razones: costo relativamente bajo y gran velocidad de adhesión (Alarcón y Dufour, 1998).

- *Industria farmacéutica.* El almidón pregelatinizado se emplea en farmacia para diluir, aglutinar, lubricar o desintegrar diversos productos sólidos. Este almidón actúa también como absorbente, da viscosidad y sirve de vehículo a sustancias pastosas, líquidas o semisólidas en la elaboración de cremas y lociones de uso dermatológico. Se emplea además para fabricar polvos faciales finos, polvos compactos y polvos nutritivos y como soporte en la fabricación de obleas (Balagopalan *et al.*,1988).

- *Otros usos.* El almidón nativo de yuca se usa en la industria química para obtener alcoholes, glucosa y acetona; para fabricar explosivos, colorantes, pilas secas e impresiones dentales; y en la coagulación del caucho, en minería como floculante y como componente de las soluciones empleadas en la perforación de pozos de petróleo (Alarcón y Dufour, 1998).

1.2.4 Almidones modificados. El almidón muestra propiedades especiales que pueden ser usadas para diferentes propósitos. Muchas de estas no son apropiadas para algunas aplicaciones específicas y existen métodos disponibles para modificarlas. Las principales modificaciones pueden ser físicas, químicas y degradativas. Los tratamientos químicos están basados en la disponibilidad de un gran número de radicales hidroxilo en las moléculas de almidón, estos radicales pueden reaccionar en diferentes vías con diferentes reactivos. La modificación degradativa incluye dextrinización, oxidación hidrolizada e hidrólisis en compuestos de bajo peso molecular. Existe una creciente demanda de los almidones modificados, los cuales son utilizados con fines muy específicos. El almidón de yuca presenta alrededor del 18 % de

amilosa, mientras que el de los cereales, alrededor del 22 %. Cerca a los carbohidratos, el almidón puede presentar, bajos contenidos de sustancias acompañantes, que pueden modificar drásticamente sus propiedades, entre esos componentes, se encuentra el nitrógeno, lípidos, y minerales como el fósforo, este último se encuentra en forma de Ester, y relacionado con mayor frecuencia a la amilopectina (Moorthy, 1994).

- *Modificaciones del almidón.* Las modificaciones del almidón pueden clasificarse en físicas, químicas, enzimáticas y combinadas. En la figura 16 se muestran las principales modificaciones que se pueden realizar al almidón.

El almidón puede ser modificado por vía ácida para reducir la viscosidad y ser usado en textiles, papel e industria de alimentos; *los almidones oxidados*, obtenidos por reacción del almidón con hipoclorito en medio alcalino, se producen simultáneamente reacciones de oxidación e hidrólisis que rompen los enlaces glucosídicos del almidón, se utilizan en la preparación de salsas y mayonesas y tienen una pequeña participación en el mercado de encolado, no retrogradan ni melifican; *el almidón entrecruzado* Se obtienen por reacción con moléculas bifuncionales como la epíclorhidrina, el oxícloruro de fósforo o anhídridos mixtos de ácidos orgánicos, por esta ruta pueden obtenerse productos con cadenas entrecruzadas, mucho más estables y de gran resistencia, con escasa tendencia al hinchamiento. Son de especial interés para alimentos congelados, sobre todo si el tratamiento se combina con esterificación; *el almidón acétilado* presenta menor tendencia a la retrogradación; *el almidón fosfatado* es recomendado para alimentos refrigerados o congelados, es obtenido por tratamientos con ácido fosfórico, para introducir un grupo iónico fosfato a la estructura del almidón, así pueden ser obtenidos almidones mono-ester-fosfato o poli-ester-fosfato, estos almidones son indicados para la elaboración de gelatinas y gomas coloidales y poseen estabilidad en el congelamiento; también hay procesos enzimáticos que dan origen a dextrina, maltosa y glucosa, azúcares con diferentes grados de endulzamiento y adherencia, la dextrina es la base para la elaboración de

pegamentos, y la maltosa y la glucosa son de usos versátiles, como en alimentos y bebidas fermentadas (Wurzburg, 1986).

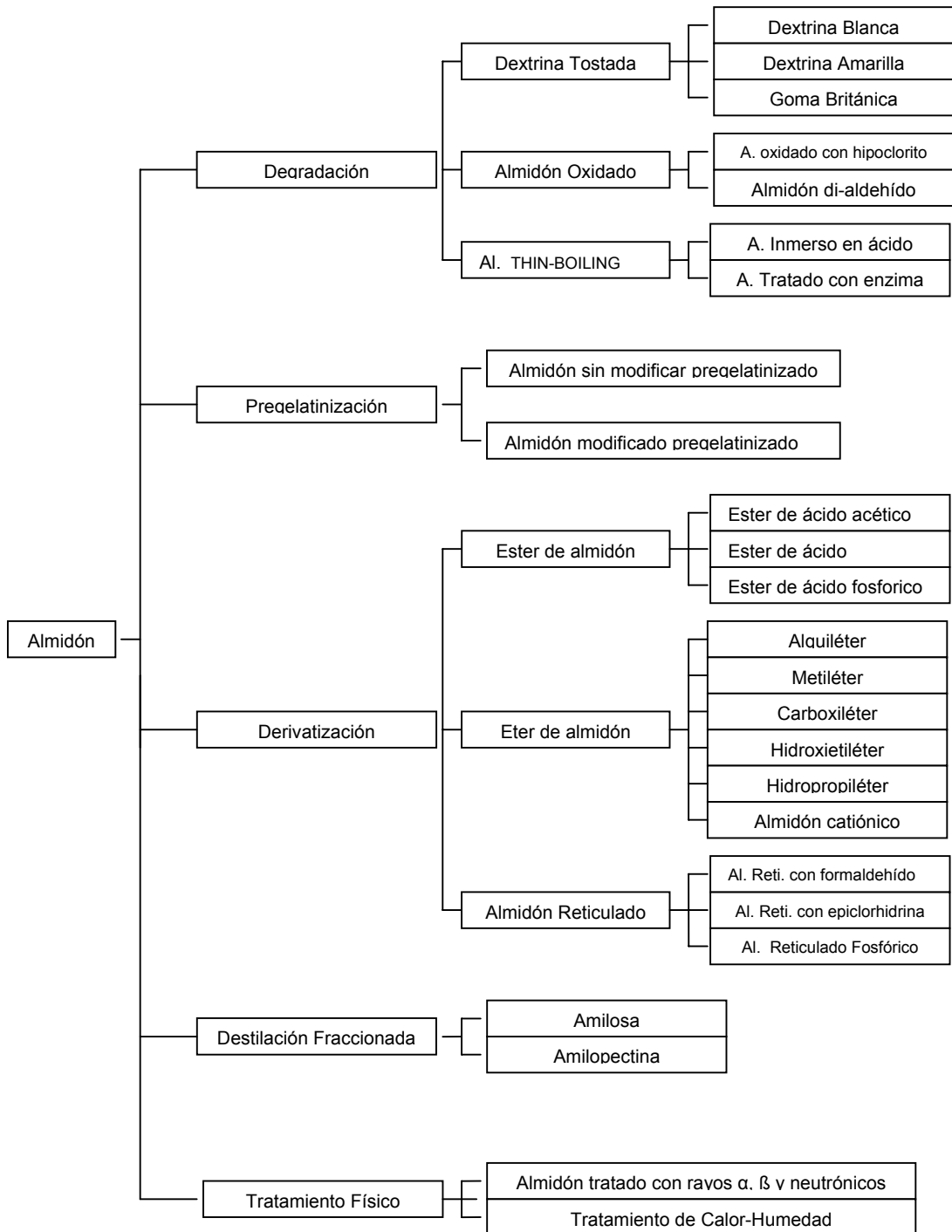
1.3 DEXTRINAS

Científicamente, las dextrinas son productos de degradación parcial del almidón obtenidos por medio de temperatura y/o catalizadores, en un mecanismo de conversión que involucra procesos de ruptura hidrolítica, reorganización de moléculas y repolimerización. La dextrina tiene la misma fórmula empírica del almidón original $(C_6H_{10}O_5)_n$, donde en el almidón el valor de n es completamente largo pero en las dextrinas decrece progresivamente con la degradación del almidón. La dextrina es considerada químicamente intermediaria entre el almidón y la dextrosa, se presenta como un sólido amorfo color crema hasta marrón, soluble en agua fría, insoluble en alcohol. Las soluciones de dextrina son ópticamente activas y dextrógiras y su rotación específica es +195. (Aristizábal, 2004)

El origen del almidón es muy importante para la manufactura de dextrinas, ya que dependiendo de este así será la calidad y propiedades de las dextrinas obtenidas. El almidón de yuca ha sido reconocido como la materia prima más adecuada para la producción de dextrinas de alta calidad (Prime Quality Dextrins). El proceso de producción de dextrinas es esencialmente el mismo para todos los almidones, pero la facilidad de conversión cambia con el tipo de almidón y su calidad. Almidones de cualquier variedad de yuca pueden ser utilizados para la producción de dextrinas; sin embargo, la conversión se favorece para variedades de alto contenido de amilopectina. Se determinó que a partir de harina no es posible obtener dextrinas de excelente calidad (Acosta y Salcedo, 2004).

1.3.1 Métodos de obtención de dextrinas. La obtención de dextrinas puede llevarse a cabo por medio de dos rutas, ruta húmeda y ruta seca (Aristizábal, 2004).

Figura 16. Clasificación de almidones modificados.



Fuente: James, 1979.

- *Ruta húmeda*. El almidón se dispersa en agua y es calentado en presencia de un catalizador o tratado con enzimas y posteriormente secado (Linden y Lorient, 1994). Los tratamientos que se hacen con ácido y enzimas se describen a continuación.

- Tratamiento con ácido. Se preparan por simple calentamiento de suspensiones acuosas de almidón con ácido. Son usadas para textiles o adhesivos; sin embargo, poseen cierta cantidad de dextrosa y su presencia en cantidades excesivas causa rompimiento de la película adhesiva con la consecuente disminución de su fuerza (Linden y Lorient, 1994).

- Tratamiento con enzima. La conversión con enzimas se lleva a cabo por tratamiento de una pasta de almidón, con enzimas hidrolíticas. Según el tipo de enzima se pueden obtener *Maltodextrinas*, que se emplean en mezclas de panadería, polvos para bebidas, condimentos, alimentos deshidratados o instantáneos, mezclas de jabones secos, encapsulantes de sabor, aromas y color, espesantes y estabilizantes de emulsiones y espumas, sustitutos de grasa, endulzantes en alimentos infantiles y dietéticos. Otro de los productos obtenidos con este tratamiento son las *Ciclodextrinas*, las cuales tienen entre sus principales aplicaciones industriales la estabilización de sustancias volátiles, de emulsiones y de compuestos aromáticos, modificación de la actividad química de una molécula por protección de algunos de sus grupos funcionales, encapsulamiento de aromas y sabores, extracción de productos tóxicos de aguas residuales y tienen como potencial imitar el papel de un biocatalizador (Linden y Lorient, 1994).

- *Ruta seca*. El almidón es sometido a altas temperaturas en presencia de un catalizador, dependiendo de la temperatura que se maneje, y la presencia o ausencia de un catalizador se pueden obtener tres clases de dextrinas (Balagopalan *et al.*, 1988).

- Dextrinas blancas. Se obtienen por tratamiento del almidón con trazas de ácidos minerales, pH bajo, baja temperatura; 80-120 °C y tiempos de tostación relativamente cortos; 3-8 horas. Son de color blanco similar al almidón, poseen viscosidad variable y su solubilidad en agua fría puede ser desde 0-90%. El grado promedio de ramificación es calculado alrededor del 3%. En estas dextrinas la hidrólisis es la principal reacción, obteniéndose almidones depolimerizados por ruptura de enlaces α (1,4). Su empleo es principalmente en la industria de confitería y de adhesivos (Balagopalan *et al.*, 1988).

- Dextrinas amarillas o canarias. Son obtenidas a temperaturas mayores; 150-220 °C, pH bajo y por largo tiempo de tostación; 6-18 horas. Presentan un distintivo color que va desde crema a amarillo y tienen alta solubilidad. La mayoría son solubles 100% en agua fría. El grado promedio de ramificación es 20%. Estas dextrinas resultan de la combinación de dos mecanismos hidrólisis y repolimerización, los cuales tienen lugar en sucesión. Forman excelentes adhesivos para la industria del papel, se emplean también como aglutinantes, plastificantes y flexibilizantes (Balagopalan *et al.*, 1988).

- Gomas británicas. Se forman cuando el almidón sólo se calienta a temperaturas altas; 130-220 °C, a alto pH, y por un tiempo largo de proceso, 10-20 horas. El rompimiento hidrolítico es mínimo y las reacciones de dextrinización son lentas. Son de color marrón oscuro, tiene gran variación en solubilidad y poder viscosante. El grado de ramificación es del orden 20-25% (Balagopalan *et al.*, 1988).

1.3.2 Reacciones en el proceso de dextrinización por ruta seca. En la dextrinización ocurren principalmente tres reacciones que se describen a continuación (Aristizábal, 2004).

- *Hidrólisis.* Esta primera etapa está dada por el rompimiento de los enlaces glucosídicos α (1-4) y probablemente algunos enlaces α (1-6); esta reacción tiene lugar en la etapa de presecado por la acción del catalizador, la humedad

y el calor. El principal resultado es una reducción del tamaño de la molécula, un decrecimiento en la viscosidad y un incremento en la cantidad de azúcares reductores. El catalizador ataca principalmente las regiones amorfas y luego las de alta cristalinidad, cuando el tiempo de la reacción avanza la cristalinidad aumenta y el contenido de amilosa disminuye (Naparorn *et al.*, 2000).

- *Tran glucosidación.* Una vez ocurre el rompimiento de los enlaces glucosídicos se da una reubicación de las moléculas para la producción de estructuras altamente ramificadas. La recombinación de fragmentos se realiza entre los grupos hidroxilos más cercanos a la molécula fraccionada, este tipo de reacción es la que produce estructuras ramificadas. El proceso es completamente aleatorio y se producen ramificaciones tanto por enlaces α (1-6) como α (1-2) ó α (1-4). Esta reacción se favorece por el calor que se da cuando la humedad ha desaparecido. Esta etapa no modifica el peso ni la cantidad de azúcares reductores, le otorga estabilidad a la dextrina, ya que reduce la cantidad de moléculas lineales (Wurzberg, 1986).

- *Repolimerización.* Durante esta etapa el número de azúcares reductores disminuye, dado que la glucosa es capaz de polimerizar a altas temperaturas y en la presencia de cantidades catalíticas de ácido. Durante este proceso se lleva a cabo una repolimerización o unión de algunas moléculas en otras más largas (Aristizábal, 2004).

Debido a la naturaleza del proceso de dextrinización y la complejidad molecular del almidón, un ilimitado número de dextrinas puede ser obtenido. Todas las variaciones en la estructura producen solamente dos cambios característicos. Uno es el tamaño molecular de la partícula de dextrina y el otro es un cambio en el grado de linealidad. Cada uno de estos cambios tiene un efecto específico sobre las características físicas y químicas de la dextrina. La variación en el peso molecular promedio influye en la viscosidad de la dextrina, mientras que el cambio en la linealidad influye enormemente en las características de solubilidad (Aristizábal, 2004).

1.3.3 Usos de las dextrinas. Según un estudio de mercado realizado en Colombia, las dextrinas obtenidas por ruta seca son la principal materia prima para la elaboración de adhesivos principalmente para la elaboración de tubos en espiral, formado de sacos de papel, cierre de cajas de cartón y pegado de etiquetas sobre vidrio (Acosta y Salcedo, 2004).

Figura 17. Principales aplicaciones de los adhesivos de dextrina.



Fuente: Aristizábal, 2004

- *Cerrado de cajas de cartón.* Este adhesivo se usa para encolar las aletas superiores y/o inferiores de las cajas de cartón corrugado a mano o en máquina. El factor principal en la selección del adhesivo adecuado está en el largo de la unidad de compresión que controla el tiempo. Generalmente, se usan adhesivos con alto contenido de soda cáustica. Los adhesivos tienen un contenido de sólidos de 30-40 % y 1.000-3.000 cP (25 °C) (Aristizábal, 2004).
- *Fabricación de cores o tubos en espiral.* En la formación de un tubo en espiral, formado por varias capas de cartón enrolladas unidas entre sí, se usan dos tipos de adhesivos. Para las capas más externas se usan emulsiones de PVA y para las más internas se usan adhesivos con base de dextrina. El adhesivo constituye la base para la formación de un buen tubo en espiral, ya que este está sujeto a altas velocidades en su uso final y además del propio peso del material del cual está formado. El consumo de adhesivo en esta aplicación depende del ancho de la pared, que varía de acuerdo a la necesidad

de resistencia que se requiera. Estos adhesivos usualmente contienen 40-50% de sólidos con viscosidades entre 80.000–150.000 cP (Aristizábal, 2004).

- *Formado de sacos multipliegos y bolsas de papel.* Para la fabricación de sacos multipliegos se requieren principalmente dos clases de adhesivos, uno para pegado de los laterales, otro para la base. Se usan adhesivos solubles en agua fría, cuya principal característica es que deben ser razonablemente pegajosos y de secado rápido. Generalmente son usadas dextrinas blancas poco solubles, especialmente en máquinas de alta velocidad. Su principal sustituto son las emulsiones de PVA o mezclas de adhesivos dextrina-PVA. El adhesivo para pegar los laterales puede ser de secado lento, altamente diluido, siempre y cuando posea buen poder adhesivo. El adhesivo para la base debe poseer buena penetración ya que si se dispersa demasiado los sacos pueden pegarse unos con otros sacos al momento de ser almacenados, hecho que es indeseable. Actualmente los adhesivos para costura tienen unos márgenes normales de 20-33% de sólidos y viscosidades entre 2.000-3.000 cP (Aristizábal, 2004).

- *Etiquetado de botellas de vidrio.* Generalmente para esta aplicación se usan adhesivos a partir de dextrinas y solubles en agua fría. Son adhesivos extremadamente pegajosos. Estos adhesivos pueden ser usados en máquinas de alta velocidad, son fáciles de manejar, y fáciles de limpiar. Su principal sustituto son los adhesivos con base de caseína y los Jelly Gum (en el caso en el cual los envases deban ser refrigerados), siendo esta la principal desventaja de las dextrinas en este tipo de aplicación, su baja resistencia al frío. Se pueden usar también dextrina boratados en el caso de sustratos porosos. La característica más importante de los adhesivos para esta aplicación tenga resistencia al frío y que sea estable al cambio de temperatura (Aristizábal, 2004).

1.4 PLANTAS PROCESADORAS DE YUCA EN COLOMBIA

La extracción de almidón en Colombia a partir de las raíces, es una agroindustria que se ha desarrollado en los últimos años. Aunque la utilización de los recursos en las rallanderías es generalizado, se presentan diferencias entre unas y otras; estas diferencias dependen básicamente de las fuentes y utilización de los recursos en el proceso de extracción del almidón, la distribución, el tipo de producto obtenido y su principal destino (DANE Y MADR, 2003).

1.4.1 Características generales de las plantas procesadoras de yuca para uso industrial. Según el censo de plantas procesadoras de yuca para uso industrial del realizado por el Departamento administrativo nacional de estadística - DANE y el Ministerio de agricultura y desarrollo rural - MADR en el año 2003, se identificaron 396 plantas, de las cuales 241 registran actividad.

De 241 plantas procesadoras de yuca que se encuentran en estado activo, el 61,4% (148) son rallanderías que producen en su gran mayoría almidón agro, y el 38,6% (93) son patios de secado, dedicados a producir principalmente trozos de yuca (DANE Y MADR, 2003).

Las plantas procesadoras de yuca requieren de dos fuentes de suministro de vital importancia para su funcionamiento, como son la fuente de captación de agua y la fuente de energía. El agua requerida para el proceso es captada de cuatro tipos de fuentes diferentes: de quebradas o arroyos, nacimientos, acueductos y otras fuentes alternativas. La energía es suministrada por empresas generadoras de energía, plantas generadoras de energía propias y otra fuente alternativa como el ACPM o la gasolina (DANE Y MADR, 2003).

El procesamiento de la yuca genera efluentes los cuales requieren tratamiento para evitar la contaminación del medio ambiente, según el censo de plantas procesadoras de yuca, la mayoría de estas vierten sus aguas residuales en

ríos, quebradas o arroyos, algunas en pozos sépticos y tanques, otras en el alcantarillado. Muy pocas plantas realizan algún tipo de tratamiento del agua antes de desecharla (DANE Y MADR, 2003).

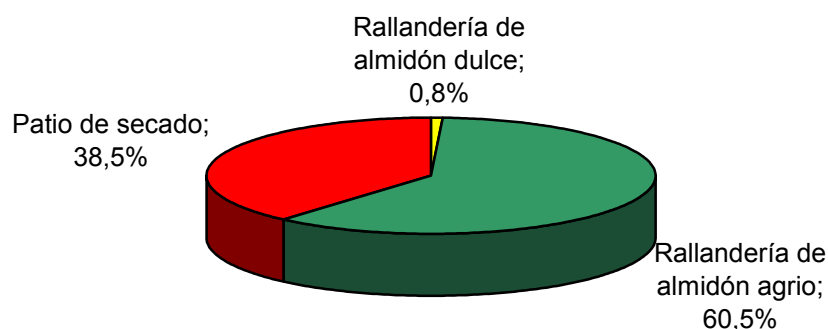
El total de personal ocupado por las plantas procesadoras de yuca en Colombia para el 2003, fue de 2.909, donde el 91% son hombres y el 9% son mujeres. De los cuales el 60,1% corresponde a trabajadores temporales, 26,9% a trabajadores permanentes y 13% a familiares sin remuneración fija (DANE Y MADR, 2003).

De acuerdo con la información obtenida en el censo, el 84,7% de las plantas procesadoras son de propiedad del productor, el 14,5% están en calidad de arrendamiento y el restante 0,8% de las plantas, registraron otra condición de tenencia (DANE Y MADR, 2003).

1.4.2 Distribución de las plantas procesadoras de yuca según su producción. De las 241 plantas procesadoras de yuca que se encuentran en estado activo, 146 (60,5%) se dedican a la producción de almidón agrio, 2 (0,8%) a la producción de almidón dulce y 93 (38,5%) son patios de secado destinados principalmente a la producción de trozos de yuca como se muestra en la Figura 18. El 83,1% de las plantas dedicadas a la producción de almidón agrio, se encuentran ubicada en el departamento del Cauca, el 8,1% y el 4,1% están ubicadas en los departamentos de Risaralda y Caldas, respectivamente; las restantes (4,7%) se encuentran distribuidas en Quindío, Tolima y Valle del Cauca. Las dos rallanderías que se dedican a la producción de almidón nativo están ubicadas en los departamentos de Cauca y Valle (ver Tabla 2) (DANE Y MADR, 2003).

Los patios de secado se ubican en su mayoría en los departamentos de la región atlántica: el 54,8% en Sucre, el 32,3% en Córdoba y el 12,9% restante están distribuidos en los departamentos de Tolima, Santander, Bolívar, Atlántico, Magdalena y Norte de Santander (DANE Y MADR, 2003).

Figura 18. Plantas procesadoras de yuca por tipo de producto.



Fuente: DANE y MADR, 2003

1.4.3 Producción de las plantas procesadoras de yuca. En el año 2003, en el país se procesaron 108.613 toneladas de yuca fresca. Del volumen total procesado, el 27,2% se realizó en Cauca, el 24% en Sucre, el 18,5% en Córdoba, el 17,1% en Atlántico y el 13,2% en los restantes departamentos. El mayor volumen de yuca fresca procesada en Sucre, se realiza en los meses de diciembre y febrero, mientras en Cauca el mayor volumen se presenta en los meses octubre y septiembre (DANE Y MADR, 2003).

1.4.4 Productos y principal destino de la producción de las plantas procesadoras de yuca. De la cantidad total de yuca producida en Colombia el 62,4% se destina a la producción de trozos secos; el 25,6% a la producción de almidón agrio, el 11% a la producción de almidón nativo y 1% a la producción de harina de yuca. Y según el destino principal de estos productos corresponden 49% a consumo animal; 23% a consumo humano; 15% a la industria; 11% otros destinos; y el 2% a cooperativas. En la tabla 4 se muestra la cantidad de productos obtenidos en el año 2003 por departamentos. En la Tabla 5 se registra la cantidad producida de los derivados de la yuca, según el destino de uso por departamentos en el año 2003 (DANE Y MADR, 2003).

Tabla 2. Cantidad de plantas procesadoras, por orientación de la producción por departamento en 2003.

Departamento	Orientación de la producción			Total
	Rallandería de almidón agrio	Rallandería de almidón dulce	Patio de Secado	
Nacional	146	2	93	241
Atlántico	1	0	1	2
Bolívar	0	0	2	2
Caldas	6	0	0	6
Casanare	0	0	0	0
Cauca	122	1	0	123
Córdoba	0	0	30	30
Magdalena	0	0	1	1
Norte de Santander	0	0	1	1
Quindío	2	0	0	2
Risaralda	12	0	0	12
Santander	0	0	3	3
Sucre	0	0	51	51
Tolima	2	0	4	6
Valle del Cauca	1	1	0	2

Fuente: DANE y MADR, 2003

Tabla 3. Cantidad de plantas procesadoras, por tipo de planta, según el rango de área de secado disponible en 2003.

Metros cuadrados	Rallanderías		Patios de secado		Total	
	Área de secado(m ²)	Cantidad de plantas	Área de secado(m ²)	Cantidad de plantas	Área de secado (m ²)	Cantidad de plantas
Total	71.673	148	132.668	93	204.341	241
De 0 a 120	3.151	44	220	4	3.371	48
De 120 a 350	10.510	46	980	4	11.490	50
De 350 a 900	19.967	36	8.124	13	28.091	49
De 900 a 1500	12.557	11	47.559	39	60.116	50
De 1500 a 2000	11.388	6	34.495	19	45.883	25
Mayor de 2000	14.100	5	41.290	14	55.390	19

Fuente: DANE y MADR, 2003

Tabla 4. Cantidad de productos de yuca obtenidos por departamento en 2003.

Departamento	Cantidad (kg)				Total
	Almidón dulce	Almidón agrio	Trozos	Harina	
Nacional	3.149.479	7.309.950	17.813.254	274.320	28.547.003
Atlántico	2.574.140	0	10.000	0	2.584.140
Bolívar	0	0	200.000	0	200.000
Caldas	0	855.257	0	0	855.257
Cauca	155.677	5.284.755	4.286	0	5.444.718
Córdoba	0	64.832	7.637.786	0	7.702.618
Magdalena	0	0	633.000	0	633.000
Norte de Santander	0	0	838.200	174.360	1.012.560
Quindío	0	32.800	0	0	32.800
Risaralda	27.062	439.834	0	0	466.896
Santander	0	0	252.510	0	252.510
Sucre	111.000	571.322	8.162.092	0	8.844.414
Tolima	0	24.600	75.380	99.960	199.940
Valle del Cauca	281.600	36.550	0	0	318.150

Fuente: DANE y MADR, 2003

Tabla 5. Cantidad de productos obtenidos del proceso industrial, por principal destino según departamento en 2003.

Departamento	Cantidad (kg)					Total
	Consumo humano	Consumo animal	Industria	Cooperativa	Otro intermediarios	
Nacional	6.703.531	13.708.290	4.301.130	643.971	3.189.361	28.546.283
Atlántico	2.574.140	10.000	0	0	0	2.584.140
Bolívar	0	200.000	0	0	0	200.000
Caldas	307.230	0	0	0	548.027	855.257
Cauca	3.422.977	30.597	360.716	627.271	1.002.437	5.443.998
Córdoba	0	4.798.105	2.887.813	16.700	0	7.702.618
Magdalena	0	633.000	0	0	0	633.000
Norte de Santander	0	1.012.560	0	0	0	1.012.560
Quindío	32.800	0	0	0	0	32.800
Risaralda	231.834	0	2.333	0	232.729	466.896
Santander	0	252.510	0	0	0	252.510
Sucre	98.000	6.587.178	753.068	0	1.406.168	8.844.414
Tolima	0	184.340	15.600	0	0	199.940
Valle del Cauca	36.550	0	281.600	0	0	318.150

Fuente: DANE y MADR, 2003

1.4.5 Rallanderías en Colombia. Las rallanderías en Colombia presentan una capacidad de rallado de 500 o más kg de yuca por hora. Del total de las 148 rallanderías, el 67,6% realiza el proceso de sedimentación en tanques, y el

30,4% en canales de sedimentación. En el proceso de fermentación, el 45,3% de las plantas procesadoras de yuca, utilizan entre 30-35 días de fermentación, y el 29,1% emplean de 40-60 días en este proceso. La Tabla 6 presenta la cantidad de rallanderías y el tipo de infraestructura que poseen para el proceso de sedimentación (DANE Y MADR, 2003).

El almidón desmenuzado se extiende en patios de concreto sobre plásticos de polietileno negro para ser secado al sol. De acuerdo con el estudio citado, en cada metro cuadrado de piso, se deben esparcir de 8-10 kg de trozos de yuca fresca. Los métodos de secado de los trozos de yuca dependen de la tecnología disponible y de los costos. De los 93 patios de secado activos, el 94,6% (88), utilizan el sistema de secado natural y apenas el 4,3% (4), emplean secado mixto (combinan natural y artificial). El proceso de producción de yuca seca, al cual se dedican los patios de secado, consta de las etapas de cosecha, pesaje y trozado de las raíces, secamiento, empaque y almacenamiento del producto seco (DANE Y MADR, 2003).

Tabla 6. Cantidad de rallanderías por tipo de infraestructura utilizada en el proceso de sedimentación, según departamento en 2003.

Departamento	Tanques	Canales	Otro	No tiene	Total
Nacional	100	45	1	2	148
Atlántico	0	1	0	0	1
Caldas	5	1	0	0	6
Cauca	82	39	1	1	123
Quindío	1	1	0	0	2
Risaralda	12	0	0	0	12
Tolima	0	2	0	0	2
Valle del Cauca	0	1	0	1	2

Fuente: DANE y MADR, 2003

1.5 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Actualmente, el gobierno está apoyando el desarrollo del cultivo de la yuca dentro de la cadena productiva de maíz y soya, incrementando la superficie sembrada y aumentando la productividad, con lo cual existe la oportunidad de explorar nuevos mercados que generen una mayor demanda de raíces de yuca. El almidón de yuca y los almidones modificados constituyen mercados que pueden generar una gran demanda de yuca por sus altos volúmenes de consumo y su alto valor agregado principalmente en los sectores alimenticio, de papel y cartón. Dentro de los almidones modificados las dextrinas ocupan un lugar importante.

Recientes estudios realizados sobre la modificación de almidón de yuca por vía seca permitieron comprobar que es posible la producción de pirodextrinas, utilizando secado con aire a través de un lecho de pellets siendo una tecnología que permite agrega valor al método tradicional de extracción de almidón de yuca empleado por pequeños agricultores y procesadores en Colombia y presenta ventajas frente a las tecnologías actuales de producción de dextrinas en forma de polvo (Aristizábal, 2004).

La tecnología propuesta fue determinada como la más aplicable en términos técnicos, económicos, sociales y ambientales a una agroindustria rural. El incremento del área superficial del producto aumenta la transferencia de calor y, en consecuencia, disminuye los tiempos de proceso. La tecnología reduce los costos de inversión y permite la producción de la dextrina enseguida del proceso de extracción de almidón de yuca utilizado en pequeñas agroindustrias o rallanderías, eliminando una etapa de proceso (secado del almidón), no partiendo de almidón seco del que parten las tecnologías actuales de modificación por vía seca, sino de los bloques de almidón que sedimentan en los canales. La dextrina así obtenida es de fácil manejo, empaque y elimina la contaminación por polvos.

De esta manera el almidón que se utiliza como materia prima para la producción de dextrinas por vía seca es mezclado con el catalizador una vez sale de la etapa de sedimentación, se trata en húmedo sin necesidad del secado del almidón. El almidón húmedo mezclado con el catalizador es tratado en forma de pelets que son secados a altas temperaturas; los pelets facilitan el manejo y empaque, eliminan la contaminación ambiental por polvos y es una nueva opción de mercado; factores que resultan en un aumento de la rentabilidad para las rallanderías, al mismo tiempo que se determinan las bases para el desarrollo de esta industria, implementando tecnología con oportunidades de incorporación por las rallanderías, y generando una progresiva demanda de estos productos por las industrias que los incluyen en sus procesos; permitiendo la incorporación de una tecnología que promueva el desarrollo del sector almidonero a nivel rural, concentrado en su mayoría en la región de Santander de Quilichao, en el departamento del Cauca en alrededor de 120 rallanderías, las cuales producen aproximadamente 11.000 toneladas anuales destinados casi en su totalidad a la producción de almidón agro para el sector alimenticio (Alarcón y Dufour, 1998).

No solo la tecnología es aplicable a la modificación de almidón por vía seca, sino que puede ser aplicada a la operación de secado en la producción de almidón nativo de yuca. En este caso se reducirían los tiempos de secado, ya que es esta la operación más limitante del proceso, dado que se requieren extensos patios de secados, los cuales constituyen alrededor del 20% del costo de inversión de una rallandería; además el secado está determinado por las condiciones climáticas. Aunque existen rallanderías tecnificadas, la mayoría son de pequeña y mediana escala, y los almidones obtenidos de estas tienen limitaciones en cuanto al cumplimiento de las especificaciones de calidad, exigidas para el almidón industrial; debido a que el secado solar promueve su contaminación (Alarcón y Dufour, 1998).

Consecuentemente, este proyecto busca la aplicación del estudio técnico y económico de la producción de dextrinas utilizando tecnología de vía seca (Aristizábal, 2004), en una rallandería ubicada en el municipio de Pescador

(Cauca), contribuyendo con las acciones tendientes a la promoción del desarrollo tecnológico de la agroindustria de almidón y almidones modificados en el país, ampliando el portafolio de productos de las típicas rallanderías y haciendo uso de la infraestructura que actualmente ellos poseen. Así mismo, se busca que los resultados obtenidos puedan servir de base para el diseño de equipos y la formulación de un plan de negocios para inversionistas que vean en este mercado una oportunidad.

1.6 OBJETIVOS DEL PROYECTO

De acuerdo a la situación planteada, el presente estudio definió como objetivo general:

Validar el proceso de producción de dextrinas a partir de almidón de yuca dulce en la rallandería TODOYUCA ubicada en el corregimiento de Pescador, municipio de Caldonó (Cauca).

Y como objetivos específicos:

- *Definir las condiciones de proceso para la producción de almidón nativo en la rallandería.*
- *Definir las condiciones de operación, las unidades y la línea de proceso para la producción de dextrinas en la rallandería.*
- *Determinar los requerimientos tecnológicos y las oportunidades de incorporación de tecnología para la producción de dextrinas en la rallandería.*
- *Determinar la oportunidad de incorporación de la tecnología de secado, utilizada en el proceso de dextrinización, utilizada para la producción de almidón nativo, almidón agrio y harina de yuca.*

2. ASPECTOS TECNOLÓGICOS

En este capítulo se presenta una descripción del proceso de extracción de almidón de yuca, que comprende básicamente las operaciones de lavado, rallado, colado, sedimentación y secado. Dependiendo del tipo de tecnología utilizada en la agroindustria así la eficiencia del proceso y la calidad del almidón obtenido en las diferentes tecnologías varía (Alarcón y Dufour, 1998).

Además se presenta el proceso tradicional de obtención de dextrinas, y el proceso de obtención de dextrinas adaptado a una rallandería de mediana escala.

2.1 PROCESO DE OBTENCIÓN DE ALMIDÓN DE YUCA EN LA RALLANDERÍA TODOYUCA

La rallandería donde se llevó a cabo la fase experimental del estudio fue la rallandería TODOYUCA, que pertenece al grupo de rallanderías de mediana escala, esta ubicada en un terreno con pendiente para aprovechar la gravedad y movilizar el flujo de producto que sale de cada equipo a través del proceso (Alarcón y Dufour, 1998).

2.1.1 Recepción. En la rallandería TODOYUCA existe una zona destinada para la recepción de las raíces de yuca, el piso de esta zona es de cemento, y esta incluida dentro de la estructura principal de la rallandería, por lo cual esta cubierta. Además esta ubicada al comienzo del proceso de producción, de esta manera el operario manipula con mayor facilidad los sacos que contienen las raíces de yuca que siguen a la siguiente etapa como lo muestra la Figura 19.

2.1.2 Lavado y pelado. El lavado y pelado mecánico se hace en un tambor cilíndrico, donde las raíces de yuca reciben chorros de agua mientras se friccionan unas con otras y contra la lámina del tambor (ver Figura 20).

Figura 19. Área de recepción de raíces de yuca.



La lámina tiene agujeros rectangulares que permiten la salida de desechos del interior del tambor. El flujo de agua ayuda a desprender las impurezas y la cascarilla de las raíces, en este equipo no se desprende la corteza interior, así que las raíces continúan el proceso de esta manera (Alarcón y Dufour, 1998).

Figura 20. Lavado mecánico de raíces de yuca.



Las pérdidas ocurridas en la operación de lavado y pelado de las raíces de yuca dependen de tres factores: la variedad de yuca, el estado en que se encuentren las raíces y las características de la máquina lavadora. Las pérdidas de materia prima y, por ende, de almidón de la lavadora se deben principalmente a la duración del lavado y al diseño de los agujeros del cilindro; si éstos tienen un borde interno muy grande, pueden romper todo el tejido de la raíz, desintegrándola en trozos muy pequeños. Normalmente, estas pérdidas por lavado están entre el 2%-3% del peso de las raíces frescas (Alarcón y Dufour, 1998).

2.1.3 Rallado o desintegración. El equipo que se utiliza en este tipo de rallandería tiene las mismas bases del utilizado a escala artesanal; en este caso la rotación del tambor rallador no es manual, el movimiento lo proporciona un motor que va conectado al equipo por un sistema transmisor de potencia (ver Figura 21) (Alarcón y Dufour, 1998).

Figura 21. Rallado mecánico de raíces de yuca.



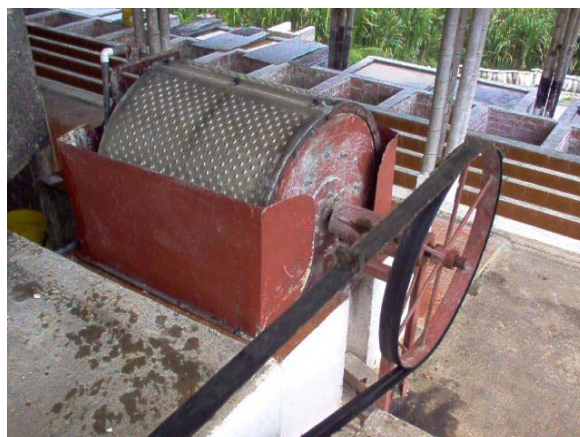
La velocidad de rotación del cilindro varía de 1200-1300 rpm. El rendimiento promedio del equipo es de 1500 kg de raíces por hora. En este tipo de equipos se utiliza agua en la operación de rallado si el proceso esta instalado en pendiente, para aprovechar la gravedad y crear un flujo hacia la siguiente operación. La superficie áspera y cortante del tambor, constituida por los

bordes filudos de múltiples agujeros, establece una línea de corte (un rallo) con la cara interior de una tabla colocada frente al tambor. Ese rallo produce una masa de ralladura de yuca, que será fina o gruesa según el espacio (o "luz") dejado entre el tambor y el borde de madera (Alarcón y Dufour, 1998).

Si el rallado no es eficiente, no se logran separar totalmente los gránulos de almidón de las fibras, el rendimiento del proceso es bajo y se pierde mucho almidón en el afrecho desechado. Por otra parte, si el rallado es demasiado fino, los gránulos muy pequeños de almidón sufren daño físico y, mas tarde, deterioro enzimático, además la sedimentación sería más lenta ya que el gránulo fino pierde densidad (CIAT, 1995).

2.1.4 Colado o extracción. En esta operación la masa rallada es lavada para arrastrar con el agua los gránulos de almidón, para el proceso de extracción del almidón se utiliza una coladora discontinua, cilíndrica (ver Figura 22). Dentro del cilindro hay espas que mezclan la masa rallada de yuca con agua. La lamina interior del cilindro esta cubierta por una malla de tela o nylon, cuya trama es de 80 mesh (180 micras), en la que se tamiza la mezcla de masa rallada y agua. Esta malla permite el paso de la lechada de almidón y retiene la fibra o afrecho. La capacidad normal de esta coladora mecánica es de 250-300 kg de masa rallada por hora (Alarcón y Dufour, 1998).

Figura 22. Colado de masa rallada.



Debe evitarse en lo posible que pequeñas partículas de fibra pasen a la lechada de almidón; por ello posterior al colado se realiza un recolado de la lechada de almidón con el objeto de retener las fibras finas que pudieron filtrarse. En esta etapa se consumen grandes cantidades de agua; entre esta etapa y la de lavado se consumen alrededor de 7 litros por kilogramo de yuca. La eficiencia de esta operación determina, en gran parte, el rendimiento total del almidón en el proceso de extracción. El rendimiento del proceso en este tipo de rallanderías varía entre 17 y 25 %, dependiendo de la eficiencia de extracción (Alarcón y Dufour, 1998).

Figura 23. Recolado de la lechada de almidón.



2.1.5 Sedimentación. La sedimentación se realiza en canales. Otras rallanderías pueden usar tanques pero generalmente estos son usados preferiblemente para la etapa de fermentación. Los canales (ver Figura 24) están recubiertos de baldosín u otro material que permita un flujo laminar, de esta manera se crea un flujo constante que no permite que la mancha y otras impurezas (fibra) se sedimenten, cuando la separación entre los baldosines es demasiado grande, propicia la sedimentación de estos contaminantes. La longitud total varía de 100-200 m, y no debe tener pendiente o inclinación, al sedimentarse el almidón crea una ligera pendiente que permite el flujo de la lechada restante. La entrada de los canales tiene una pequeña caja, que actúa como un desarenador, para retener la arena y otros sólidos (Alarcón y Dufour, 1998).

Un grano de almidón debe recorrer 0,8 m en un tanque de sedimentación y sólo 0,1 m en los canales antes de sedimentarse. Esta diferencia explica, en gran parte, la ventaja antes mencionada, o sea, la rapidez de la sedimentación con el uso de canales. Al final de la sedimentación quedan tres capas en los canales de sedimentación: La superior es el agua residual que se elimina retirando unas compuertas que están situadas al final de los canales de sedimentación; la intermedia que es almidón con material proteico, lo que se denomina “mancha”, que se retira con la misma herramienta que se utiliza para retirar esta capa en los tanques y la inferior es el almidón sedimentado que se retira en forma de bloques. La sedimentación puede durar 3 h en los canales y de 6-8h en los tanques de sedimentación (Alarcón y Dufour, 1998).

Figura 24. Canales de sedimentación de lechada de almidón.



2.1.6 Secado. El almidón se seca al sol, generalmente, sobre un plástico de polietileno de color negro calibre 6 que capta mayor radiación solar y facilita el secado rápido y uniforme. El almidón se extiende en capas de aproximadamente 1-2 kg/m². Para secar una tonelada de almidón se necesitan, aproximadamente, 1000 m² de superficie de secado. Por ello, el área de secado es otra de las limitantes que afecta sensiblemente a este tipo de rallanderías (ver Figura 25) (Alarcón y Dufour, 1998).

2.1.7 Tamizado. Una vez el almidón ha llegado a la humedad entre 12-13% es retirada de los patios de secado. Posteriormente es tamizado en una

zaranda provista de una malla de nylon unida a un marco de madera para retirar impurezas que pudieron caer sobre el almidón durante el secado. Terminada la clasificación, se realiza el empaque, que se hace en sacos de polipropileno de 25 y 50 kg (Alarcón y Dufour, 1998).

Figura 25. Secado de almidón.



2.2 PROCESO DE OBTENCIÓN DE DEXTRINAS POR RUTA SECA

Existen diferentes tecnologías para la producción de dextrinas, las cuales varían según el tipo de equipo utilizado para la etapa de tostación o conversión, los equipos de dextrinización son usualmente construidos en acero inoxidable, cobre o varias aleaciones resistentes a la corrosión; entre los equipos más conocidos están el Tostador convencional, el Equipo Blattman, Lecho Fluidizado, Horno rotatorio, Turbo-Dryer y Extrusor, siendo los más utilizados el Lecho Fluidizado y el Tostador convencional. El proceso de dextrinización tradicional por ruta seca comprende las etapas de mezcla del catalizador, presecado, tostación y enfriamiento (Aristizábal, 2004).

2.2.1 Proceso de producción tradicional de dextrinas. El proceso de producción de dextrinas tradicional por ruta seca comprende las siguientes operaciones:

- *Mezcla del catalizador.* Esta etapa es de particular importancia porque el catalizador debe ser distribuido completamente sobre los gránulos de almidón, logrando una buena penetración, de lo contrario se presentarán problemas de carbonización de las partículas de almidón. El ácido debe estar suficientemente diluido, puesto que la capacidad y la resistencia a la penetración decrece con la disminución en el contenido de agua del almidón (Radley, 1954).

- *Maduración.* Esta etapa es opcional. Se refiere al almacenamiento del almidón una vez adicionado el catalizador para permitir que se difunda completamente por toda la masa. Sin embargo, con una eficiente mezcla se puede garantizar una buena difusión del catalizador (Aristizábal, 2004).

- *Presecado.* La reducción de la humedad antes de la etapa de conversión es necesaria, dado que un alto contenido de humedad en el almidón es indeseable, particularmente a bajos niveles de pH, porque promueve escisión hidrolítica y la consecuente formación de azúcares durante el primer periodo de calentamiento y suprime las reacciones de condensación, las cuales usualmente se dan sólo si el contenido de humedad del almidón es inferior a 3% (Kennedy y Fischer, 1984). El presecado se lleva a cabo a temperatura entre 50-60 °C.

- *Tostación o Conversión.* Una de las principales condiciones de esta operación es garantizar un cuidadoso control de la temperatura hasta el final del ciclo de calentamiento, dado que uno de los aspectos esenciales del proceso de conversión es evitar gradientes de temperatura a través de la masa. Adicionalmente, una buena ventilación es necesaria para lograr una rápida emoción de la humedad y de los vapores formados en la dextrinización. Según estudios realizados, las temperaturas de tostación varían entre 120-150 °C. Encontrándose esta última como la mejor, dado que la velocidad de reacción es más rápida (Aristizábal y Robles, 2001).

- *Enfriamiento.* Finalizada la conversión al nivel deseado, la acción del catalizador es detenida por medio de un rápido y completo enfriamiento, evitando así la formación de azúcares solubles (Aristizábal y Robles, 2001).
- *Rehumedecimiento.* La dextrina puede ser humidificada hasta un nivel entre 5-12% por exposición a aire humidificado o por atomización de agua sobre ella. Generalmente, este proceso se lleva a cabo a temperatura ambiente. Se realiza para evitar la formación de espuma cuando la dextrina es cocinada con agua, y además la formación de grumos, hecho que se debe a los gases adsorbidos en la etapa de tostación (Acton, 1976).
- *Empaque.* Si es necesario la dextrina es molida o tamizada y finalmente empacada en sacos de papel (Aristizábal y Robles, 2001).

2.2.2 Proceso de producción de dextrinas adaptado a una rallandería. El proceso de producción de dextrinas por vía seca adaptado a una rallandería, tiene las mismas etapas de proceso utilizadas en las rallanderías hasta la producción de la torta de almidón; la cual comprende las operaciones de lavado, rallado, colado y recolado y sedimentación. Posterior a esta última etapa, se realiza la recolección de la torta de almidón y se siguen las etapas para la producción de dextrina que comprende las operaciones de mezclado del catalizador, peletización, presecado y tostación, enfriamiento, empaque y acondicionamiento (Aristizábal, 2004), la diferencia entre el proceso de producción tradicional y el proceso adaptado a una rallandería se encuentra en las etapas de mezclado del catalizador, la peletización y la utilización de un secador con flujo de aire vertical y quemador de gas para el presecado y la tostación; diferente al secador con flujo de aire de ingreso horizontal y calentamiento eléctrico, utilizado por Aristizábal (2004).

- *Mezclado del catalizador.* La pasta o torta de almidón se solubiliza en agua a una concentración de 37,8% w/v, la cual permite que la solución sea agitada por la bomba mecánica. Luego se adicionan 0,2% de HCl (concentración 37%) con respecto al peso de almidón seco presente en la suspensión de almidón.

Adicionalmente se adiciona el aglutinante, que es la misma dextrina (ya elaborada) en una proporción de 3,0% con respecto al peso de almidón seco.

- *Neutralización del agua sobrenadante.* Esta etapa es importante en el empleo del método de mezclado en suspensión, debido a que el almidón se deja decantar y el agua sobrenadante, la cual tiene alta acidez, se neutraliza con Carbonato de Calcio, por su bajo costo y fácil manejo, utilizando 0,35% (w/v) para obtener así un pH promedio en el agua sobrenadante de 7,2.

- *Peletizado.* La pasta de almidón decantada en el tanque de acidificación, la cual tiene una humedad promedio de 45-47% es pasada por un granulador, para homogenizar su humedad, quedando esta al final de este proceso en 45%, la cual es la humedad óptima para realizar el peletizado, el cual se realiza con el objeto de aumentar el área superficial de las partículas y facilitar así su secado. El tamaño promedio de los pelets es 10 mm de longitud y diámetro 4,7 mm que es el diámetro promedio de los agujeros del disco de extrusión.

- *Presecado.* El presecado de los pelets se lleva a cabo en un secador de bandejas de circulación de aire a temperatura entre 55-60 °C, hasta alcanzar una humedad por debajo del 5% aproximadamente en 120 minutos utilizando un lecho de 1 cm de espesor y un área de 810 cm². El flujo de aire utilizado en el secador es de 0,21 m³/s y usando un sistema de homogenización de aire y temperatura, lo cual permite disminuir los gradientes y mantener la temperatura constante durante el secado.

- *Tostación.* La tostación se lleva a cabo en un secador de bandejas de circulación de aire a una temperatura de 150 °C hasta alcanzar la conversión deseada (100% solubles en agua fría) aproximadamente en 45 minutos utilizando un lecho de 1 cm de espesor y un área de 810 cm². El flujo de aire utilizado en el secador es de 0,1 m³/s y usando un sistema de homogenización de aire y temperatura, lo cual permite mantener la temperatura de 150 °C dentro del secado.

2.3.3 Producción de adhesivos de dextrinas. La elaboración de adhesivos de dextrina sigue técnicas sencillas como son la disolución en agua de la dextrina con aditivos tales como bórax, NaOH, antiespumante, biocida entre otros, con calentamiento y agitación controlados para obtener una viscosidad deseada según sea la aplicación del adhesivo. Los adhesivos de dextrina, dado que son derivados de un producto biodegradable, son susceptibles a la proliferación de hongos y bacterias, disminuyendo su vida útil. Sin embargo, son usadas en varias aplicaciones por su bajo costo, mayor adhesividad y estabilidad, unido a que su uso en sustratos de papel o cartón facilita los procesos de reciclado del mismo. El principal producto sustituto de este tipo de adhesivos es el acetato de polivinilo (PVA), particularmente para las tres primeras aplicaciones, dado su menor tiempo de secado en comparación con las dextrinas y adicionalmente por que evita el excesivo humedecimiento del sustrato. Los adhesivos de dextrina de yuca tienen excelente pegajosidad, fuerza adhesiva y estabilidad, su película es clara y brillante; características superiores comparadas con las de los adhesivos de dextrina de maíz su principal competidor; cuyas películas son opacas, con un brillo imperfecto y no son estables en el almacenamiento. Además existe una creciente tendencia de las instituciones hacia productos y procesos más sostenibles ambientalmente, lo que representa una excelente oportunidad para los adhesivos de dextrina de yuca. Aunado a las regulaciones ambientales cada vez más exigentes, sobre el uso de fibra reciclada y la prohibición de grapas y adhesivos que pueden resultar tóxicos por el empaque de productos alimenticios (Aristizábal, 2004).

Existen diferentes formulaciones para los adhesivos de dextrinas, sin embargo los aditivos básicos son los mismos para todos, la formulación de estos adhesivos se presenta en el Anexo A.

3. METODOLOGÍA

Para el logro de cada uno de los objetivos propuestos al inicio del estudio se desarrollaron actividades, en etapas consecutivas, en donde se establecieron objetivos claros que permitieron alcanzar el objetivo general del estudio, obtener dextrinas de yuca a partir de almidón dulce o nativo.

Para el acondicionamiento de los equipos, se realizaron ensayos de producción de dextrinas a nivel de rallandería evaluando cada una de las etapas; que incluyeron mezclado, peletizado, presecado, tostación y enfriamiento, tomando como parámetro las variables establecidas en el estudio realizado por Aristizábal (2004).

3.1 MATERIALES Y MÉTODOS

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

3.1.1 Localización. La fase experimental de producción de almidón se llevó a cabo en la rallandería TODOYUCA ubicada en el corregimiento de Pescador, municipio de Caldon, norte del departamento del Cauca, en beneficio de la rallandería. Ubicada a 2° 48' 22,085" de latitud Norte (N) y a 76° 33' 01,314" de longitud occidental (O) a una altura de 1585 msnm, con un clima subhúmedo tropical, al lado de la vía panamericana que comunica Cali y Popayán. La temperatura promedio de esta región es de 23 °C.

3.1.2 Materiales. Los materiales utilizados en los ensayos durante el desarrollo experimental se dividen en los utilizados en las pruebas de producción de almidón de yuca, acidulación y mezcla, peletizado, presecado, y

pruebas de tostación o conversión. Los materiales utilizados en cada una de las pruebas realizadas se describen en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Materiales utilizados en el estudio para la producción de dextrinas de yuca.

Fase del proyecto	Materiales
Pruebas de producción de almidón nativo de yuca	- Raíces de yuca - Agua - Almidón de yuca - Afrecho - Mancha de yuca - Cascarilla
Pruebas de acidulación y mezcla	- Almidón dulce de yuca - Ácido clorhídrico (37% de concentración) - Agua de rallandería
Pruebas de peletizado	- Almidón de yuca acidulado - Aglutinantes: dextrinas y pasta de almidón
Pruebas de presecado	- Pelets de almidón acidulado
Pruebas de tostación o conversión	- Pelets de almidón acidulado (3-5% de humedad) - Solución de I ₂ /KI - Agua destilada - Tubos de ensayo
Pruebas de secado de otros productos utilizando el secador de bandejas de lecho fijo	- Pelets de almidón agrio de yuca - Pelets de almidón nativo - Pelets de harina de yuca

3.1.3 Equipos. En el desarrollo de cada una de las fases del estudio se utilizaron equipos para la producción de almidón nativo de yuca, producción de dextrinas de yuca y elaboración de adhesivos. Los equipos utilizados en cada una de estas pruebas se presentan en el Cuadro 2.

En el Cuadro 3 se presentan las especificaciones de los equipos que se registrados en el Cuadro 2.

3.1.4 Métodos analíticos.

Los métodos analíticos utilizados en el estudio se presentan en la Tabla 7.

Cuadro 2. Equipo utilizados en la producción de almidón dulce, dextrinas y su caracterización.

Fase del proyecto	Equipos
Pruebas de producción de almidón nativo de yuca	<ul style="list-style-type: none"> - Lavadora de yuca - Rallador - Coladoras - Bascula de piso - Motor generador de potencia
Pruebas de producción de dextrinas de yuca	<ul style="list-style-type: none"> - Bomba mecánica - Peletizador - Secador de bandejas de lecho fijo - pHmetro - Balanza de brazo - Refractómetro - Bandejas de control - Medidor de dureza
Pruebas de caracterización de dextrinas de yuca y elaboración de adhesivos	<ul style="list-style-type: none"> - Baño termostatado. - pHmetro. - Termómetro - Balanza de brazo - Plancha de agitación - Balanza digital - Refractómetro 0-30 °Brix - Viscosímetro de capilar (Scott) - Medidor de dureza para comprimidos marca KAHAL (resorte de 2,5 mm)

Cuadro 3. Especificaciones de los equipos utilizados en la producción de almidón dulce, dextrinas y su caracterización.

Equipo	Descripción
<i>Producción de almidón</i>	
Lavadora	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad: 1.500 Kg/h - Consumo de agua: 1,3 L/Kg - Velocidad: 30 r.p.m
Rallador	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad: 1.500 Kg/h - Consumo de agua: 0.9 L/Kg - Velocidad: 1.200-1.300 r.p.m
Coladora	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad: 250-300 Kg/h de masa rallada - Consumo de agua: 5 L/Kg de masa rallada - Velocidad: 20 r.p.m - Malla de 100 mesh
Bascula de piso	Capacidad: 750 Kg
Motor de transmisión de potencia	<ul style="list-style-type: none"> - Potencia: 9 HP - Voltaje: 220/440 V - Amperaje: 25/12,5 - Hz: 60 - Velocidad: 1740 - fs: 10
<i>Producción de dextrinas</i>	
Bomba mecánica	<ul style="list-style-type: none"> - Potencia: 1 1/3 HP SIEMENS. - Velocidad: 3520 rpm
Peletizador	<ul style="list-style-type: none"> - Carcasa o cilindro horizontal: - L = 20 cm. D = 8,7 cm.

	<ul style="list-style-type: none"> - Tornillo sin fin: - L = 18 cm. D = 8 cm. L/D = 2,25 - Disco de extrusión: - D = 9,9 cm. Número de agujeros: 108. D agujero = 4,7 mm - motor-reductor: potencia 1 HP, trifásico, velocidad de entrada 1720 rpm, torque nominal 143 Nm y factor de servicio de 1,5 (50%) (CLAYUCA)
Secador	<ul style="list-style-type: none"> - Tipo de secador: secador de calentamiento con gas propano. -Dimensiones: ancho: 97 cm, largo: 97 cm, alto: 150 cm. - Temperatura: Tem. ambiente-270 °C - Ducto de aire: largo: 250 cm, área: 400 cm². - Área de entrada de aire: 400 cm² – salida de aire: 400 cm². (CETEC)
Quemador para gas natural o propano	<ul style="list-style-type: none"> - Quemador marca WAYNE, capacidad de calentamiento: de 80.000- 210.000 BTU, - Voltaje: 110 V - Controlador automático. - Termostato con rango de temperatura de 30-150 °C.
Ventilador	<ul style="list-style-type: none"> - Ventilador centrifugo marca CHICAGO BLOWER, Diseño 39 SQI, tamaño 9, clase estándar, arreglo 9. - motor monofásico, marca Siemens de 1.0 HP, 1800 rpm, 3/60/115/230 Voltios, protección IP 54 (TEFC), F.S 1,15.

Tabla 7. Tipo de análisis y métodos analíticos utilizados.

Análisis	Laboratorio–Método analítico
Fisicoquímico	Laboratorio Calidad de yuca - CIAT
Materia seca (%)	ICONTEC. 2002
HCN-Total y Libre (ppm)	ESSER, SA. (1993)
Azúcares reductores (%)	AOAC 13.28 (1955)
Almidón (%)	Mestres, C. 1993.
Amilosa (%)	ISO 6647 (1987)
Volumen específico	método VANHAMEL, L. <i>et al</i> (1991)
Contenido de sólidos solubles	Internacional Starch Institute, 2001
Proximal	Laboratorio de servicios analíticos -CIAT
Proteína (%)	AOAC 13.31 (1955)
Fibra cruda (%)	AOAC 13.20 (1955)
Extracto etéreo (%)	AOAC 13.19 (1955)
Cenizas (%)	AOAC 923.03 (1990)
Reológico	Laboratorio Calidad de yuca - CIAT
Amilograma	ISI 2000.

3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

Los métodos de análisis estadístico utilizado en el estudio, cada uno con un nivel de confianza del 95%, se presentan a continuación:

- Balances de materia: análisis de varianza univariante
- Acidificación de lechada de almidón: método de calibración y análisis de correlación de Pearson
- Acidificación de suspensión de almidón: método de calibración
- Peletizado de almidón: análisis de varianza univariante
- Secado de pelets de almidón: análisis de varianza univariante
- Dextrinización de los pelets de almidón: análisis de varianza univariante

Análisis estadístico. Con ayuda de la herramienta estadística SPSS 14.0 (nivel de confianza de 95%) fueron seleccionadas algunas de las operaciones más adecuadas en la determinación de la línea de proceso óptima para la obtención de dextrinas a partir de almidón dulce de yuca.

3.3 OBTENCION DE DEXTRINAS POR VIA SECA A PARTIR DE ALMIDON DULCE DE YUCA.

3.3.1 Determinación de balances de materia y consumo de energía del proceso actual de extracción de almidón. En la primera fase del estudio se determinaron las corrientes de entrada y salida, y los tiempos de operación en las etapas de proceso, tomando 10 mediciones de cada uno de ellos; en el caso de las corrientes que involucran la materia prima (raíces de yuca) se realizó el seguimiento a 6 baches de 300 kg, en días diferentes. Para la determinación de los contenidos de almidón y HCN se realizó a un muestreo de 3 lotes diferentes de raíces de yuca, para determinar la cantidad de almidón en las corrientes, se tomaron muestras en las corrientes durante el proceso de tres lotes diferentes. Los datos obtenidos permitieron determinar las capacidades y

uso de servicios de cada uno de los equipos y realizar el balance de materia del proceso de extracción. El consumo de energía se determinó mediante las especificaciones del motor y el tiempo de proceso para cada bache realizado.

Dentro del balance de materia hay un factor importante que es el cálculo de la eficiencia de rallado que determina la eficiencia de liberación de los gránulos de almidón. Este factor fue calculado con el método empleado por Alarcón y Dufour (1998) de la siguiente manera.

$$ER = \left[1 - \frac{A_A * F_R}{A_R * F_A} \right] * 100$$

A_A = almidón recuperado en el afrecho en porcentaje

F_R = fibra cruda en las raíces frescas en porcentaje

A_R = almidón en las raíces frescas en porcentaje

F_A = fibra cruda en el afrecho en porcentaje

ER= eficiencia de rallado

La finalidad del diseño experimental en el cálculo de los balances de materia fue comprobar que no hay diferencias entre lotes para los contenidos de materia seca y HCN total.

3.3.2 Mezcla del catalizador. En estudios previos (Aristizábal, 2004), el mezclado del catalizador se realizó a nivel piloto utilizando una mezcladora para incorporar el catalizador a la pasta de almidón; sin embargo para grandes volúmenes de material se requeriría un equipo de alta potencia ya que la pasta de almidón húmedo tiende a compactarse y forma una pasta fuerte, lo que dificulta el mezclado; esta alternativa es de alto costo y no viable para una rallandería. Por ello este estudio propuso una nueva técnica de mezclado; en donde se solubiliza la pasta de almidón hasta una densidad que permita ser agitada por una bomba mecánica (ver Figura 26); se eligió este equipo porque comparado con la mezcladora es asequible, de fácil manejo y se puede desplazar en caso de que el mezclado se realice en varios tanques.

Figura 26. Mezclado de una suspensión de almidón con bomba mecánica.



- Mezcla del catalizador utilizando lechada. Para utilizar este método se determinó el factor ácido*, ya que en estudios anteriores se determinó este factor para aplicarlo a una masa de almidón en condiciones diferentes de humedad. Para el cálculo del factor ácido se tomaron 9 muestras aleatorias de lechada de almidón durante una semana de producción, utilizando 200 ml de lechada de almidón de cada muestra para ser acidificada. La acidificación se realizó por titulación hasta obtener un pH cercano a 3,0. Los datos obtenidos de la calibración del método para obtener la cantidad de HCL que se debe adicionar, fueron tratados con una distribución normal, con un 95 % de confianza, para la calibración se realizaron un total de 39 ensayos.

- Mezcla del catalizador utilizando pasta de almidón en suspensión. El análisis para determinar la concentración de almidón se realizó con volúmenes de agua de 100 ml, variando las concentraciones de almidón hasta obtener una concentración limite en donde el almidón se mantuvo en suspensión mediante agitación. Al determinarse la concentración adecuada de almidón en la suspensión, se realizaron pruebas para determinar el factor ácido de la suspensión. Adicionando el HCL (37%) a un volumen de 320 ml de suspensión, hasta obtener un pH cercano a tres, para la calibración se recolectaron 20

* Cantidad de ácido necesaria para llevar una suspensión de almidón-agua, hasta un pH de 3,0, que es el pH óptimo para iniciar la dextrinización. Este factor es determinado potenciométricamente por titulación de almidón con ácido clorhídrico.

datos, los cuales se trataron con una distribución normal con un 95% de confianza.

Para las pruebas de mezclado utilizando la bomba mecánica se utilizó almidón nativo de yuca sin acidificar, ya que los objetivos de esta prueba eran, en primer lugar verificar si la bomba tenía la capacidad suficiente para crear un reflujo de la suspensión en el tanque de mezclado y en segundo lugar determinar si el reflujo podía mantener todo el almidón en suspensión; este punto es de vital importancia ya que al agregar el catalizador este se disocia en el agua y el almidón al estar suspendido en su totalidad en la masa de agua acidificada entra en contacto con el ácido en forma homogénea. Si el almidón se decanta es más difícil que los gránulos de almidón entren en contacto con el catalizador y produciendo un mezclado ineficiente.

- Neutralización de agua sobrenadante. Una vez finalizada la etapa de mezclado y sedimentación se obtuvo como efluente agua sobrenadante con alta acidez, la cual requiere su neutralización antes de verterla al ambiente. El tratamiento de este efluente en el estudio se realizó utilizando carbonato de calcio mediante un procedimiento de calibración, se titularon muestras de este efluente con carbonato de calcio, tomando muestras de 40 ml de agua sobrenadante acidificada.

3.3.3 Formación de pelets. Para la evaluación de esta etapa se realizaron ensayos de peletización a muestras de almidón acidulado tratadas con y sin aglutinante (ver Figura 27), utilizando dos clases de aglutinante dextrina y pasta de almidón (4% de sólidos), para cada caso se utilizaron dos concentraciones de aglutinante, que fueron 1,5% (w/w). Y 3% (w/w), de donde se obtuvieron los datos de dureza del pelet, el procedimiento se describe en el Anexo B; además se evaluó el tiempo de peletizado y las pérdidas por proceso. Dado que la humedad de la pasta de almidón no es homogénea, para lograr su uniformidad, se realizó una granulación de la pasta de almidón previo al peletizado. El

equipo utilizado para realizar la granulación de la pasta de almidón previo al peletizado se presenta en la Figura 28.

En este caso la finalidad del estudio fue probar que la variación en el tipo de aglutinante y su concentración, presenta diferencias en la dureza del pelet.

3.3.4 Presecado y tostación de pelets de almidón acidulado. El presecado de los pelets se llevó a cabo a temperatura entre 55-60 °C, hasta alcanzar una humedad por debajo del 5% con dos tratamientos (Ver Figura 29), el primero con un caudal de aire de 0,26 m³/s y flujo libre, el segundo con un caudal de aire de 0,21 m³/s, y sistema de homogenización del flujo, donde se redujo el área de salida del aire a la mitad (0,2 m²). La tostación se llevó a cabo a una temperatura de 150 °C hasta alcanzar la conversión deseada, medida como porcentaje de solubilidad, con un porcentaje entre 95–100%, el procedimiento para determinar la solubilidad se presenta en el Anexo C. Durante esta etapa se utilizó un solo tipo de caudal (ver Figura 30), y el sistema de homogenización de flujo de aire utilizado en el presecado.

Figura 27. Pruebas de peletización de almidón acidulado.

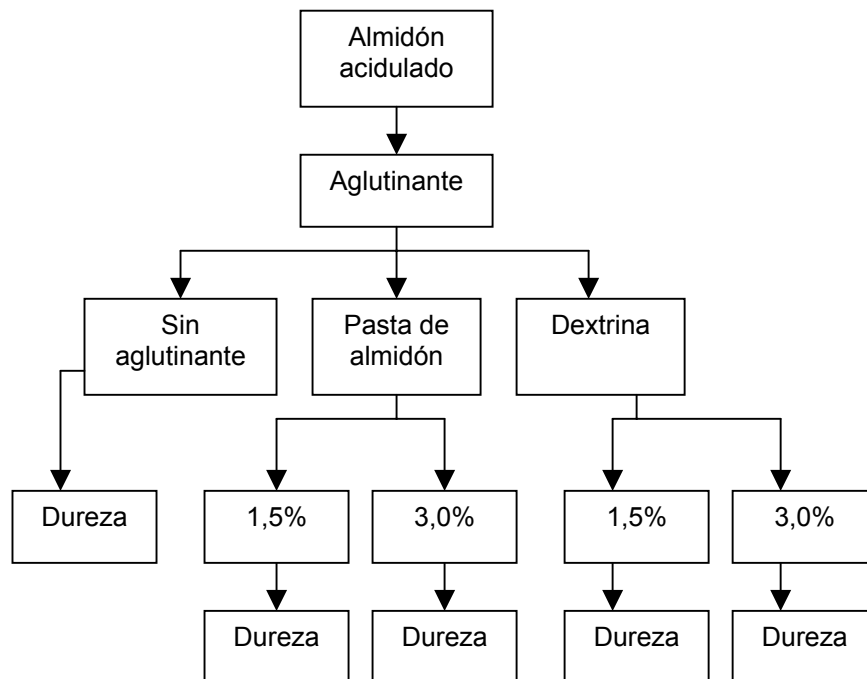


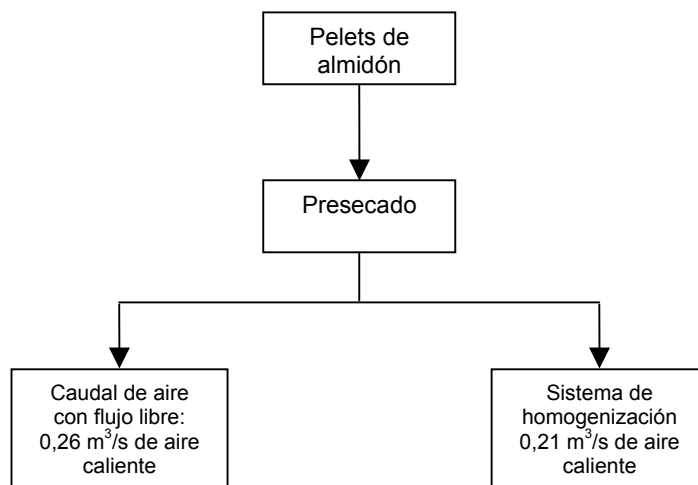
Figura 28. Granulador de bloques de almidón.



El sistema de homogenización consistió en colocar una lámina perforada con 57 orificios de área de 7 cm^2 que en total suman un área de 400 cm^2 , esta es e es el área del ducto por el cual entra el aire a la recamara de secado,

La finalidad del estudio en el secado de los pelets fue probar que la variación del caudal y la inclusión de un sistema de homogenización de aire caliente, genera uniformidad en el comportamiento del secado en cada una de las bandejas. En el caso de la dextrinización, fue probar que la inclusión de un sistema de homogenización de aire caliente, genera uniformidad en el comportamiento de la conversión de los pelets en cada una de las bandejas.

Figura 29. Pruebas de presecado de pelets de almidón.



El área de cada bandeja era de 810 cm^2 . En cada prueba se utilizó una carga de 2,5 kg por bandeja de almidón acidulado y un espesor de lecho promedio de 1 cm; dado que los pelets tenían la misma humedad de 45%, se asumió que tanto el tipo de aglutinante como su concentración no afectaba el tiempo de secado de los pelets. El equipo de utilizado para las pruebas de presecado y tostación se presenta en la Figura 31.

Figura 30. Pruebas de dextrinización de pelets de almidón.

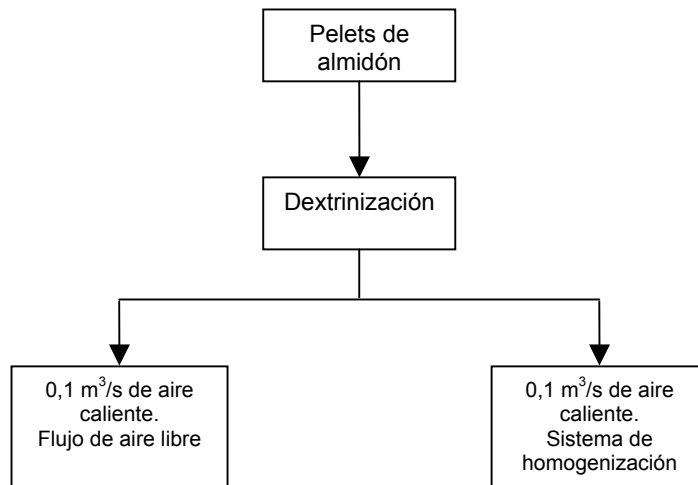


Figura 31. Secador de bandejas de lecho fijo utilizado en las etapas de presecado y tostación.



3.3.5 Caracterización de dextrinas obtenidas y comparación con patrón de dextrina de maíz. Las dextrinas de yuca obtenidas fueron caracterizadas analizando sus principales propiedades funcionales: solubilidad en agua fría y viscosidad. Adicionalmente se realizaron dos clases de adhesivo utilizando la dextrina obtenida y una dextrina comercial de maíz (dextrina 210 Quimex Coragum 08700) comparando sus propiedades: pH, color, olor en húmedo y apariencia de película. Los adhesivos elaborados fueron los utilizados para el cerrado lateral y el cerrado de fondo de bolsas multipliego, las formulaciones típicas de los adhesivos de dextrina se encuentran en el Anexo E.

3.3.6 Secado de otros productos utilizando la tecnología de peletizado-secado. Para determinar la oportunidad de incorporación de la tecnología de secado, utilizada en el proceso de dextrinización, para secar almidón nativo, almidón agrio y harina de yuca, se realizaron análisis a los productos obtenidos luego del proceso de secado artificial (peletizando los tres productos a una humedad del 45% y secándolos en el secador de bandejas de aire caliente a 40 °C) y comparando este secado con el secado tradicional para este tipo de productos (entre 30-40 °C).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos y su discusión, para cada una de los experimentos realizados en el estudio de validación del proceso de producción de dextrinas a partir de almidón nativo de yuca en la rallandería TODOYUCA.

4.1 OBTENCIÓN DE ALMIDÓN DE YUCA EN LA RALLANDERÍA TODOYUCA.

4.1.1 Contenidos de materia seca, almidón y HCN. En la Tabla 8 se presentan los resultados de los análisis de laboratorio realizados en el laboratorio de calidad de yuca de CIAT para los contenidos de materia seca, almidón y HCN total de muestras de yuca fresca y los productos derivados de su procesamiento.

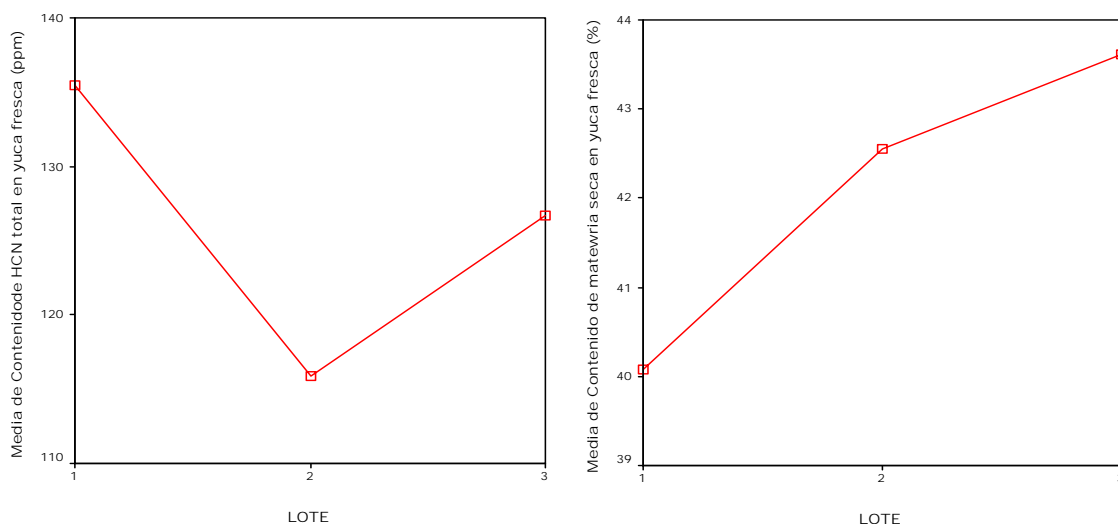
Tabla 8. Contenidos promedio de materia seca, almidón, fibra cruda y HCN total.

Identificación	Materia seca	Almidón	HCN total
	%	%	ppm
Yuca fresca	42,08	73	125,88
Cascarilla	23,42	-	19,39
Masa rallada	15,45	73,33	6,83
Afrecho	13,63	54,57	1,41
Mancha	16,61	72	2,570
Almidón	93,09	96	-

Del proceso de extracción de almidón de yuca se obtienen numerosos subproductos, por los cual, no se presentara información detallada de todos ellos, únicamente de los de mayor importancia.

Según Ospina y Ceballos (2002) el contenido de materia seca de la raíz de yuca fluctúa entre 30% y 40%, las muestras de yuca fresca analizadas presentan un contenido del 42,08% de materia seca, coincide con el expuesto en la teoría, en cuanto al contenido de almidón, en las muestras de yuca analizadas fue de 73% y la teoría (Buitrago, 2001) reporta que el contenido de almidón varía entre 75% y 80%, valor que coincide con el reportado en las muestras analizadas. Para el caso del contenido de HCN total los resultados del análisis reportan un contenido de 125,88 ppm clasificando la mezcla de variedades de yuca como dulces, tal y como lo afirma Domínguez (1979) que para variedades con contenidos de HCN menores a 180 ppm las cataloga como variedades dulces. La diferencia puede deberse a que las muestras de yuca analizadas corresponden a una mezcla de variedades de diversas regiones y distintas edades, factores que influyen en el contenido de materia seca, almidón y HCN (Alarcón y Dufour, 1998), este comportamiento se puede observar en la Figura 32.

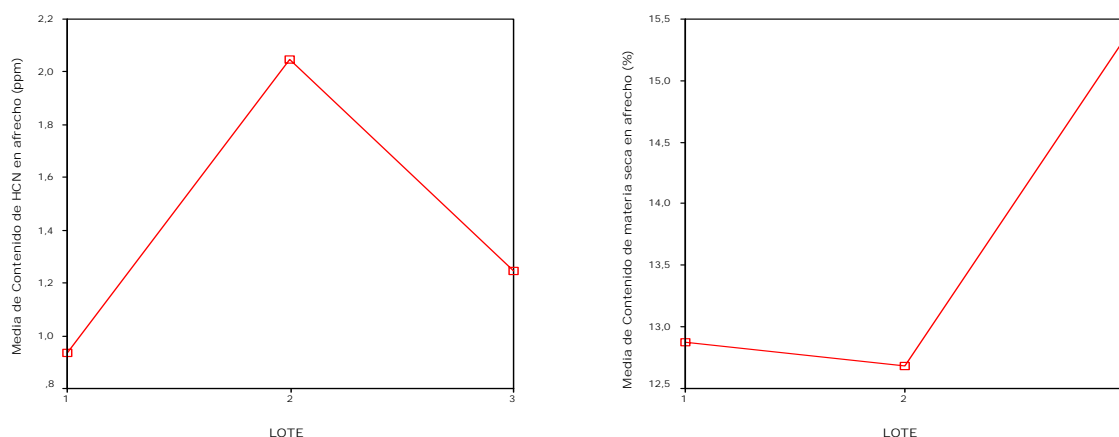
Figura 32. Análisis estadístico de materia seca y contenido de HCN en yuca fresca [Imagen tomada del Paquete Estadístico SPSS 14.0]



Los resultados del análisis de muestras de afrecho para los contenidos de materia seca, almidón y HCN reportaron 13,63%, 54,57% y 1,41 ppm respectivamente, comparados con los valores expuestos por la teoría, 14,7%

de materia seca (Ospina y Ceballos, 2002), para el contenido de almidón puede alcanzar hasta 60% (Ospina y Ceballos, 2002) y en cuanto al contenido de HCN 13,2 ppm (Ospina y Ceballos, 2002). Los contenidos de materia seca y almidón de las muestras analizadas coinciden con los valores reportados en la teoría, en el caso del contenido de HCN no coincide, esto se puede deber a un proceso eficiente en la etapa de rallado logrando una alta destrucción de los tejidos permitiendo así, un mayor contacto de la enzima linamaraza con la linamarina que permite una mayor liberación de HCN el cual es eliminado en el agua utilizada en el proceso (Domínguez, 1979). En la Figura 33 se observa el comportamiento de las diferentes muestras de afrecho.

Figura 33. Análisis estadístico de materia seca y contenido de HCN en afrecho [Imagen tomada del Paquete Estadístico SPSS 14.0].



La mancha es un producto de alto valor nutricional por su contenido de almidón casi un 90% y un contenido de materia seca de un 5% (Ospina y Ceballos, 2002), Alarcón y Dufour (1998) reportan un contenido de almidón de 55,6%, las muestras analizadas presentaron 72% de almidón valor que se encuentra entre los contenidos reportados por la teoría.

Las diferencias significativas de los tratamientos mencionados se pueden observar en el Anexo D.

- Eficiencia de rallado. La eficiencia en esta operación determina en gran parte, el rendimiento total de almidón en el proceso de extracción, según

Alarcón y Dufour (1998), una eficiencia de rallado cercana al 80% se considera como eficiente, La eficiencia de rallado para el proceso fue de 79,8% valor que coincide con el reportado, para procesos de rallado eficaces.

4.1.2 Balance de materia del proceso de obtención de almidón nativo de yuca. En las Tablas 9 y 110, se presentan los promedios de los tiempos de operación, caudales volumétricos de agua de servicio y caudales másicos en cada una de las etapas del proceso de extracción de almidón, los cuales se utilizaron para el cálculo de los balances.

Tabla 9. Tiempo de operación y caudales de agua de servicio en las etapas del proceso de extracción de almidón para un bache de 300 Kg.

Etapa de proceso	Tiempo de operación (min.)	Caudal L/min.
Lavado	16,91	37,58
Rallado	15,71	31
Colado y Recolado	31,06	81.79

Tabla 10. Caudales másicos en las etapas del proceso de extracción de almidón para un bache de 300 kg.

Etapa	Entrada		Salida	
Lavado	Yuca fresca	300 kg	Yuca lavada	287 kg
			Cascarilla	11 kg
	H ₂ O de servicio	635,48 L	H ₂ O residual	635,48 L
Rallado	Yuca lavada	287 kg	Masa rallada	773.13 kg
	H ₂ O de servicio	487,01 L		
Colado y Recolado	Masa rallada	773.13 kg	Almidón	100,2 kg
	H ₂ O de servicio	2540,39 L	Afrecho húmedo	188 kg
			Mancha	37,57 kg
			H ₂ O residual	2313 kg

Los resultados de los análisis realizados a las corrientes de entrada y salida a cada una de las etapas evaluadas en la obtención de almidón se registran en la Tabla 8.

El rendimiento de extracción de almidón de acuerdo a la relación de pesos de la materia prima y el producto fue 20,9%, se debe tener en cuenta que el rendimiento se calcula para almidón con un 12% de humedad (almidón seco) y el peso de almidón que se reporta en la tabla 26 es almidón sedimentado con un 45% de humedad. El rendimiento del proceso coincide con el reportado por Alarcón y Dufour (1998) que es de 22,6%.

4.1.3 Consumo de energía en el proceso de obtención de almidón de yuca. El cálculo de energía se hizo para el motor que proporciona la potencia para el funcionamiento de los equipos de la rallandería, teniendo en cuenta el tiempo que se emplea en el proceso y el consumo de energía reportado en las especificaciones del motor.

El cálculo de la energía eléctrica consumida por el motor para procesar un bache de 300 kg fue:

Tiempo total de proceso = 63,68 min /300 kg

Vatios consumidos por el motor = 25 A * 220V = 5500 W = 5500 J/s

Tiempo en segundos = 63,68 min * 60 s /1min = 3820 s

Energía consumida por el motor en el tiempo de proceso:

5500 J/s * 3820 s = 21010000 J

Kilovatios hora consumidos en el proceso:

21010000 J * (1Kw/h/3.6*10⁵ J) = 58,36 Kw/h consumidos

Costo de Kilovatio hora = \$ 333

Costo de la energía consumida por una hora de proceso = \$19.433

El procesamiento de 300 kg de raíces por bache de proceso demanda un tiempo total de un hora, donde se obtienen 100,2 kg de almidón sedimentado,

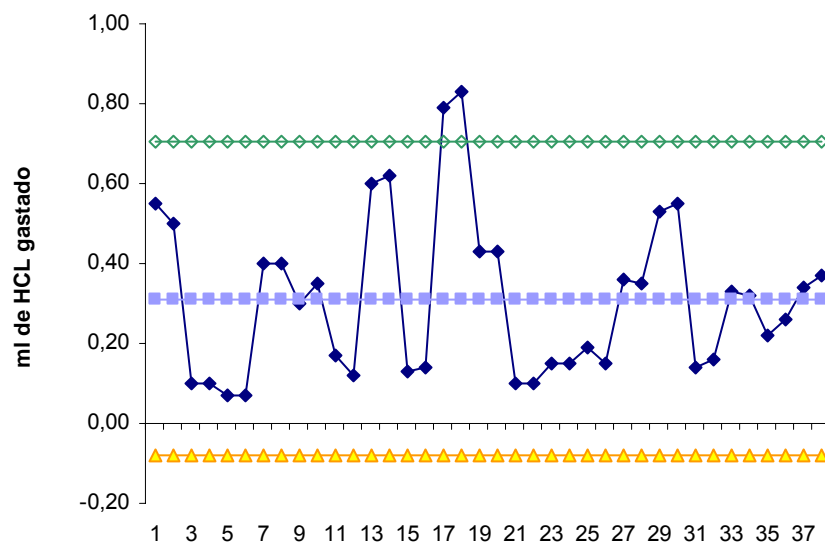
consumiendo 58,36 Kw/h con un costo de \$19.433. La etapa de sedimentación no demanda consumo de energía, así, el costo de energía consumida en el proceso para producir 1kg de almidón seco en la rallandería TODOYUCA es de \$ 310.

4.2 ACIDIFICACIÓN DE ALMIDÓN.

Para la evaluación de esta etapa se realizaron dos tipos de pruebas: la prueba de acidificación utilizando lechada y la prueba de acidificación utilizando una suspensión de almidón.

4.2.1 Acidificación utilizando lechada. El procedimiento de calibración aplicado en la acidificación de lechada de almidón, arrojó un rango de HCL adicionado entre -0,8–0,71 ml (con un 95% de confianza), con un promedio de 0,31 ml. Tanto el promedio como el rango encontrado, para la adición de HCL no son aplicables para la línea de proceso que se buscó establecer, debido a la amplitud del rango encontrado, como se observa en la Figura 34.

Figura 34. Comportamiento de la cantidad de HCL gastado en la acidificación.



Dado que el método analizado no presentó resultados aplicables para el estudio, se realizó un análisis de correlación de Pearson de las variables involucradas en el proceso de acidificación, para establecer cual de ellas presentó mayor relevancia en el proceso de acidificación con la cantidad de HCL adicionado, dado que es el factor que se desea establecer para el método de acidificación y esta relacionado directamente con el pH final. De esta manera lograr establecer un método de mezclado del catalizador con una cantidad de HCL definida, por medio de una calibración, el resultado del análisis de correlación se presenta en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Análisis de correlación en el proceso de acidificación de lechada [Cuadro tomado del Paquete Estadístico SPSS 14.0].

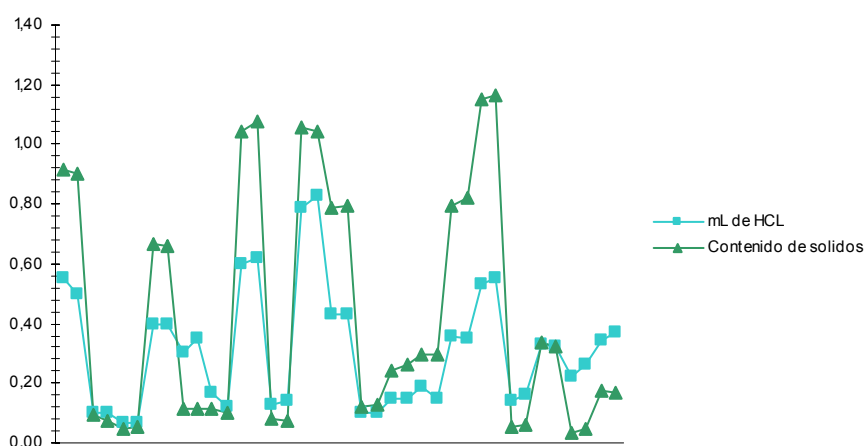
		pH inicial	HCL	pH final	Sólidos
pH inicial	Correlación de Pearson	1	,571(**)	,243	,346(*)
	Sig. (bilateral)		,000	,142	,033
	N	38	38	38	38
HCL	Correlación de Pearson	,571(**)	1	,447(**)	,879(**)
	Sig. (bilateral)	,000		,005	,000
	N	38	38	38	38
pH final	Correlación de Pearson	,243	,447(**)	1	,298
	Sig. (bilateral)	,142	,005		,069
	N	38	38	38	38
Sólidos	Correlación de Pearson	,346(*)	,879(**)	,298	1
	Sig. (bilateral)	,033	,000	,069	
	N	38	38	38	38

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

El análisis de correlación de Pearson realizado para la prueba de acidificación utilizando la lechada, demostró que la variación en la cantidad de HCL adicionado, presentó una correlación mayor con la cantidad de sólidos contenidos en la lechada, de esta manera se realizó un estudio de acidificación con una concentración de sólidos definida. El comportamiento de la cantidad de sólidos medidos en la lechada y la cantidad de HCL adicionado presentado (Ver Figura 35), confirma lo encontrado con el análisis de correlación de Pearson.

Figura 35. Comportamiento de la cantidad de HCL gastado con respecto al contenido de sólidos.



4.2.2 Acidificación utilizando una suspensión de almidón. La cantidad de almidón presente en la solución obtenida a partir de los ensayos de adición de almidón a un volumen determinado de agua, hasta obtener una solución concentrada de almidón en suspensión, dio como resultado una concentración de 37,8% (w/v), esta concentración coincide con la reportada por Moorthy (2000) para la acidificación de suspensiones de almidón que esta entre 30% y 40% (w/v).

Los datos obtenidos del procedimiento de calibración aplicado a la acidificación de almidón con un pH inicial de $5,1 \pm 0,84$ presentan un rango entre 0,18–0,23 ml de HCL adicionado (con un 95% de confianza), con una media de 0,2 ml de

HCL (ver Figura 36), que representa un porcentaje de 0,19% (w/w) con respecto al peso de almidón seco presente en la suspensión, este valor se encuentra por debajo del rango reportado por Moorthy (2000) que esta entre 0,5% y 0,3% de HCL, lo que representa una ventaja económica para el proceso de acidificación, sin embargo, la teoría no reporta el pH final obtenido. El procedimiento de calibración de los datos de pH obtenidos con la adición de HCL en el rango obtenido, permiten obtener un pH final entre 2,94–3,3 (con un 95% de confianza), con una media de 3,1 (ver Figura 37) resultado que coincide con el reportado por Aristizabal (2004) para obtención de dextrina por vía seca, además, el rango encontrado esta dentro del rango reportado por Kerr (1950) para la acidificación de almidón en la obtención de dextrinas (pH 2,8-3,4)

Figura 36. Comportamiento de la cantidad de HCL adicionado.

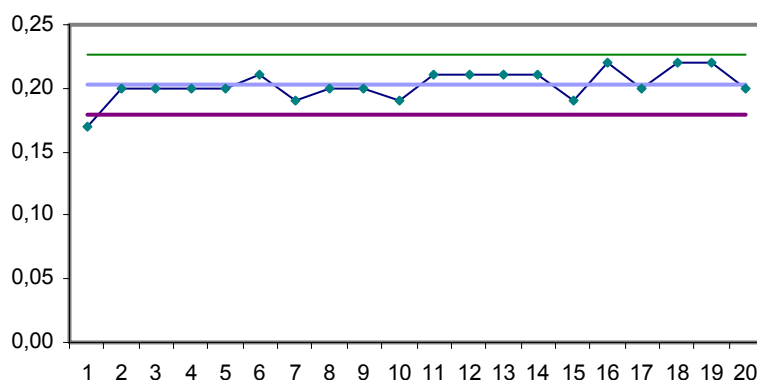
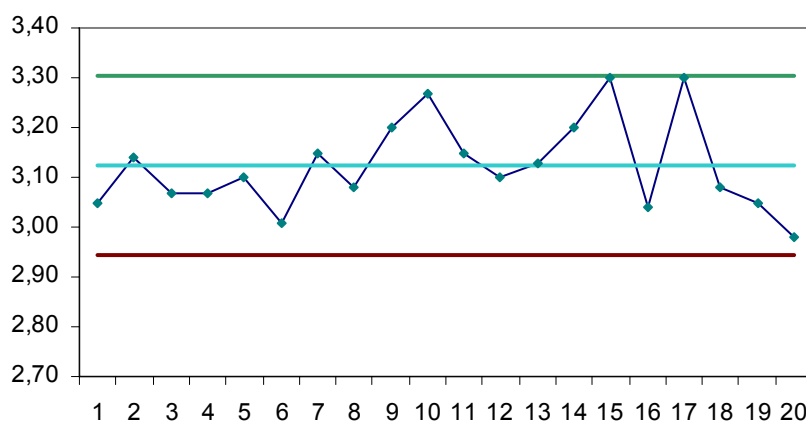
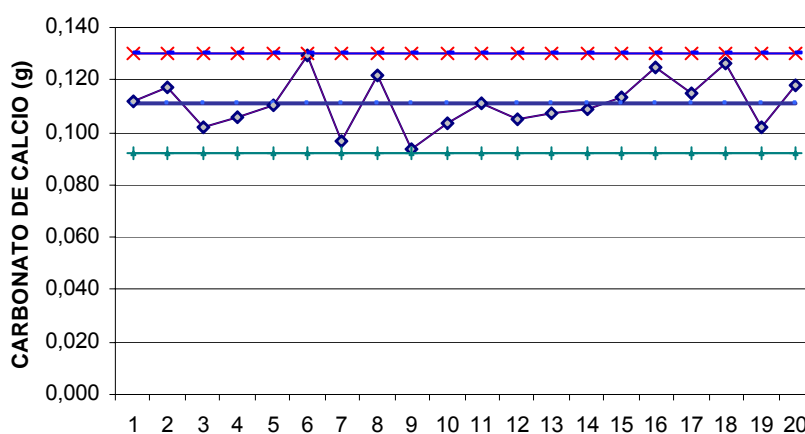


Figura 37. Comportamiento del pH final obtenido.



4.2.3 Neutralización de agua sobrenadante. El procedimiento de calibración permitió determinar la cantidad necesaria para la neutralización del agua acidificada obteniendo un rango entre 0,92-0,13 g de carbonato de calcio (con un 95% de confianza), con una media de 0,13 g que representa un porcentaje del 0,35% (w/v) para obtener un rango de pH entre 6,39-8,03 con una media de 7,21. El comportamiento de la cantidad carbonato de calcio utilizado para la neutralización se puede observar en la Figura 38

Figura 38 Comportamiento de la cantidad de carbonato de calcio adicionado.

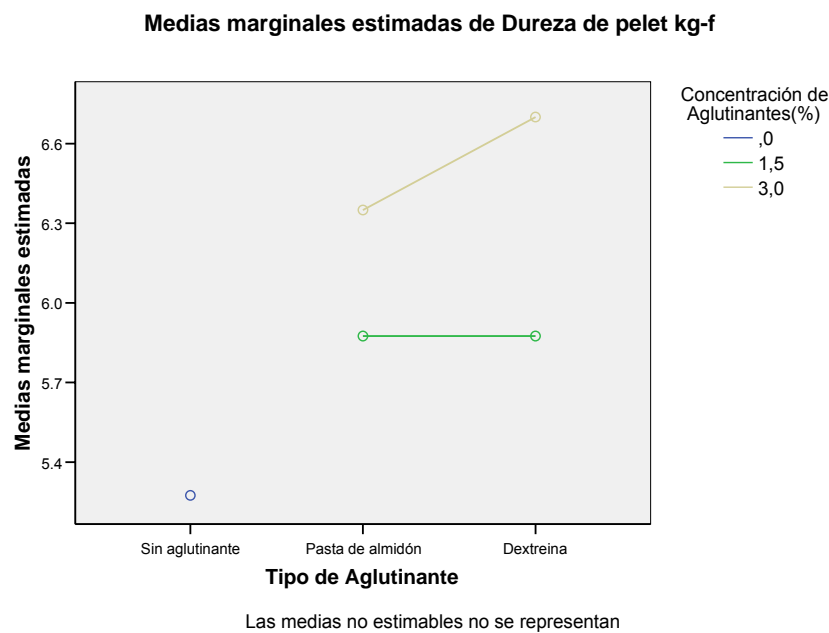


4.3 PELETIZACIÓN DE ALMIDÓN ÁCIDO.

Estudios anteriores (Aristizábal, 2004) reportan una concentración de 1,5% (w/w) de almidón pregelatinizado utilizado como aglutinante que proporciona un nivel de dureza aceptable para pelets de dextrina. Las concentraciones de los aglutinantes utilizados en el estudio reportaron valores de dureza mayores que los reportados por Aristizábal (2004) que fue de 2 kg-f. El análisis de varianza univariante no presentó diferencias significativas entre pasta de almidón y dextrina al 1,5% (w/w) de concentración, sin embargo, a una concentración de 3% (w/w), si presentaron diferencias significativas, siendo la dextrina utilizada como aglutinante la que presentó un mayor valor de dureza (ver Figura 39), y los pelets formados una mejor consistencia y no se desbarataron con facilidad,

razón por la cual se eligió la dextrina como aglutinante con una concentración de 3% (w/w).

Figura 39: Análisis estadístico de concentración y tipo de aglutinante [Imagen tomada del Paquete Estadístico SPSS 14.0]



Las diferencias significativas de los tratamientos se pueden observar en el Anexo D.

4.4 PRESECADO Y TOSTACION.

4.4.1 Presecado. El primer tratamiento con un caudal de aire de 0,26 m³/s y flujo libre, con un tiempo total de secado de 135 minutos, según los métodos de Duncan y Tukey las bandejas 2 y 3 no presentan diferencias significativas entre si, comparadas con la bandeja 1 que presentó diferencias significativas a lo largo del proceso de secado (Ver Cuadro 5). Estos resultados coinciden con la teoría de secado (Treybal, 1998) “una de las dificultades mas importantes en la utilización de secadores de este tipo es la no uniformidad del contenido en humedad, propia del producto terminado que se extrae de diferentes partes del

secador. Esa falta de uniformidad es principalmente el resultado del movimiento inadecuado y no uniforme del aire dentro del secador”.

El segundo tratamiento con un caudal de 0,21 m³/s, el sistema de homogenización y la restricción de la salida del aire, presentó un tiempo total de secado de 120 minutos, el método de Duncan reporta que no hay diferencias significativas entre las bandejas 2 y 3, pero si hay diferencias significativas entre estas dos bandejas y la bandeja 1, por el contrario Tukey muestra que las bandejas 1 y 2 no presentan diferencias significativas al igual que las bandejas 2 y 3, sin embargo se presentan diferencias significativas entre la bandeja 1 y 3 (ver Cuadro 6). Con estos resultados se puede afirmar que aunque se presentan diferencias entre bandejas la disminución del caudal y la implementación del sistema de homogenización generaron uniformidad en el secado, esto coincide con lo mencionado por Treybal (1998), que recomienda reducir la cantidad de aire y recircular su mayoría, para mejorar la uniformidad del secado en este tipo de sistemas.

El comportamiento de cada uno de los tratamientos, se observa en las Figuras 40 y 41.

Cuadro 5. Análisis estadístico del proceso de secado con caudal de 0,26 m³/s con flujo libre [Cuadro tomado del Paquete Estadístico SPSS 14.0].

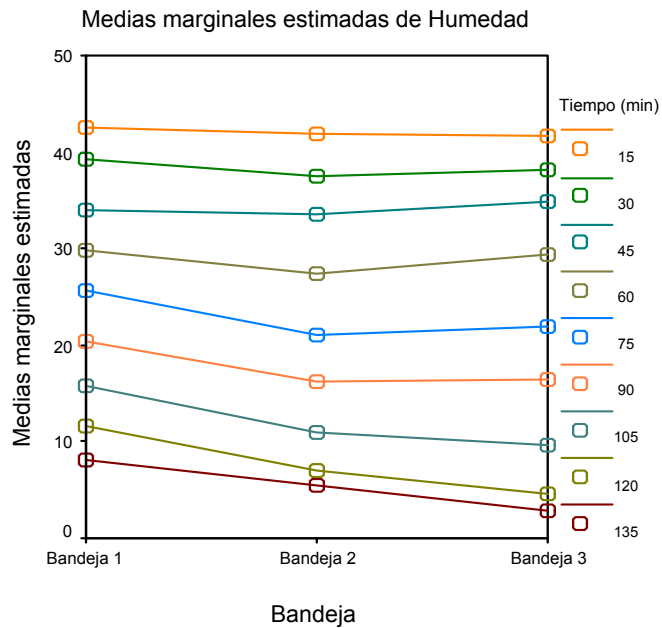
Método	Bandeja #	N	Subconjunto	
			1	2
DHS de Tukey(a,b)	Bandeja 3	19	23,3547	
	Bandeja 2	19	23,5211	
	Bandeja 1	19		26,2105
	Significación		,963	1,000
Duncan(a,b)	Bandeja 3	19	23,3547	
	Bandeja 2	19	23,5211	
	Bandeja 1	19		26,2105
	Significación		,797	1,000

Se muestran las medias para los grupos en subconjuntos homogéneos. Basado en la suma de cuadrados tipo III El término error es la Media cuadrática (Error) = 3,881.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 19,000

b Alfa = ,05.

Figura 40. Análisis estadístico de presecado con un caudal de aire de 0,26 m³/s con flujo libre [Imagen tomada del Paquete Estadístico SPSS 14.0].



4.4.2 Tostación o conversión. La dextrinización obtenida utilizando 0,1 m³/s, y flujo de aire libre, presentó un tiempo de conversión de 90 minutos, para obtener una conversión medida con una solubilidad entre 95-100%, el análisis de varianza univariante muestra una variación significativa de la solubilidad entre las bandejas; las bandejas 2 y 3, no presentan diferencias significativas hasta los 50 minutos, la bandeja 3, presenta una caída en la solubilidad, esto puede deberse a falta de uniformidad en la conversión dentro de la bandeja, debido a los inconvenientes que tienen este tipo de equipos, mencionados anteriormente en el presecado, generados por el movimiento inadecuado y no uniforme dentro del secador, lo que seguramente influye también en el comportamiento de la solubilidad de la bandeja 1 (ver Figura 42), aunque la solubilidad de las bandejas converge a los 90 minutos, la falta de uniformidad

de la conversión dentro de cada bandeja no asegura una conversión total de los pelets de almidón a dextrina.

Cuadro 6. Análisis estadístico del proceso de secado con caudal de 0,21 m³/s y sistema de homogenización [Cuadro tomado del Paquete Estadístico SPSS 14.0]

	Bandeja	N	Subconjunto	
			1	2
DHS de Tukey(a,b)	Bandeja 3	16	20,8606	
	Bandeja 2	16	22,2313	22,2313
	Bandeja 1	16		25,4500
	Significación		,650	,112
Duncan(a,b)	Bandeja 3	16	20,8606	
	Bandeja 2	16	22,2313	
	Bandeja 1	16		25,4500
	Significación		,381	1,000

Se muestran las medias para los grupos en subconjuntos homogéneos. Basado en la suma de cuadrados tipo III El término error es la Media cuadrática (Error) = 18,875.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 16,000

b Alfa = ,05.

El tratamiento con un caudal de 0,1 m³/s, y sistema de homogenización de flujo de aire, presentó un comportamiento uniforme según el análisis de varianza univariante, como se observa en la Figura 43, además el tiempo de conversión fue menor que el encontrado con el primer tratamiento, siendo de 45 minutos a 150 °C, valor que no coincide con el reportado por Kennedy y Fisher (1984), que esta entre 8-14 horas, para temperaturas entre 135-160 °C, lo que representa una ventaja económica para el proceso de producción de dextrinas por vía seca

Los resultados obtenidos con el ultimo tratamiento, confirma que la implementación del sistema de homogenización mejora la uniformidad en el comportamiento de las bandejas.

Figura 41: Análisis estadístico de presecado con un caudal de aire de 0,21 m³/s [Imagen tomada del Paquete Estadístico SPSS 14.0]

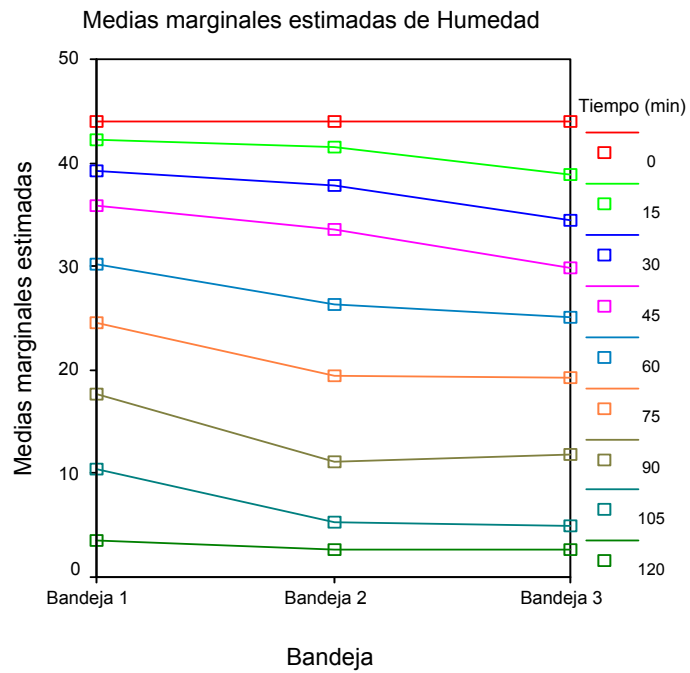


Figura 42. Comportamiento de la solubilidad en las bandejas con caudal de 0,1 m³/s, y flujo de aire libre [Imagen tomada del Paquete Estadístico SPSS 14.0].

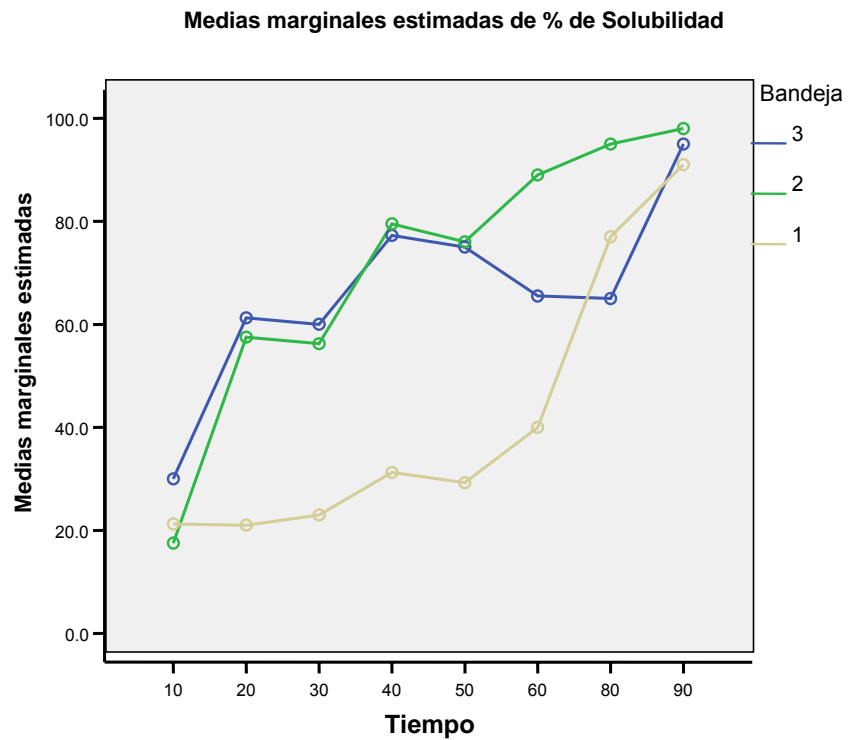
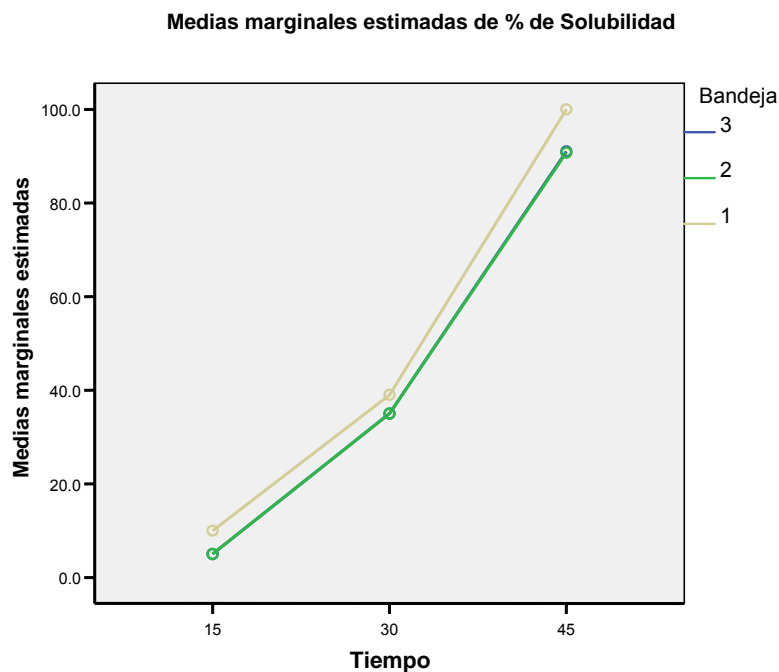


Figura 43. Comportamiento de la solubilidad en las bandejas con caudal de 0,1 m³/s, y sistema de homogenización de aire [Imagen tomada del Paquete Estadístico SPSS 14.0].



Las diferencias significativas de los tratamientos se pueden observar en el Anexo D.

4.5 CARACTERIZACIÓN DE LAS DEXTRINAS OBTENIDAS.

Las dextrinas obtenidas en el estudio presentarán una solubilidad del 95%, y una viscosidad de 32,56 cP, según Aristizábal (2004) las dextrinas presentan una solubilidad en agua fría entre 80-100% rango que coincide con lo encontrado en el estudio, además, reporta que la viscosidad de las dextrinas esta entre 2,5-3,8 cP valores que no coinciden con los resultados encontrados en el estudio, esta diferencia puede deberse a diferencias en el calentamiento y la agitación que se utilizaron en el método de determinación de viscosidad como lo afirman Kennedy y Fisher (1984) que estos factores influyen en la obtención de niveles específicos de viscosidad.

- Caracterización de adhesivos de dextrina. Los adhesivos elaborados a partir de dextrinas de yuca presentaron mejores características que los elaborados con dextrina comercial de maíz (ver Tablas 10 y 11), resultados que coinciden con lo reportado por Aristizábal (2004), quien afirma que las dextrinas de yuca poseen características superiores comparadas con las dextrinas de maíz, su principal competidor; cuyas películas son opacas, con un brillo imperfecto y no son estables. El almidón de yuca, comparado con el almidón de maíz, proporciona dextrinas de excelente dispersión y estabilidad, en tanto que las dextrinas de maíz tienden a volverse espesas durante el almacenamiento, factores que hacen a la dextrina de yuca una materia prima adecuada para la producción de este tipo de adhesivos. Las diferencias de color entre los adhesivos de dextrina se deben principalmente a la presencia de grupos fosfato unidos a la molécula de almidón de yuca, el olor en húmedo y la opacidad de la película de maíz, se deben principalmente a que los cereales comparados con las raíces, presentan mayor contenido de lípidos y proteínas, los lípidos son los responsables del olor, mientras que la presencia de proteínas puede generar reacciones de Maillard, durante la dextrinización lo cual hace que las películas sean opacas (Swinkels, 1996).

Tabla 11. Caracterización de adhesivos para costura lateral.

Análisis	Adhesivo para costura lateral (dextrina de maíz)	Adhesivo para costura lateral (dextrina de yuca)
pH	9,3	8,89
Color	Amarillo oscuro	Marrón oscuro
Olor en húmedo	Característico	No perceptible
Apariencia de película	Brillante-Opaca	Brillante-semitransparente

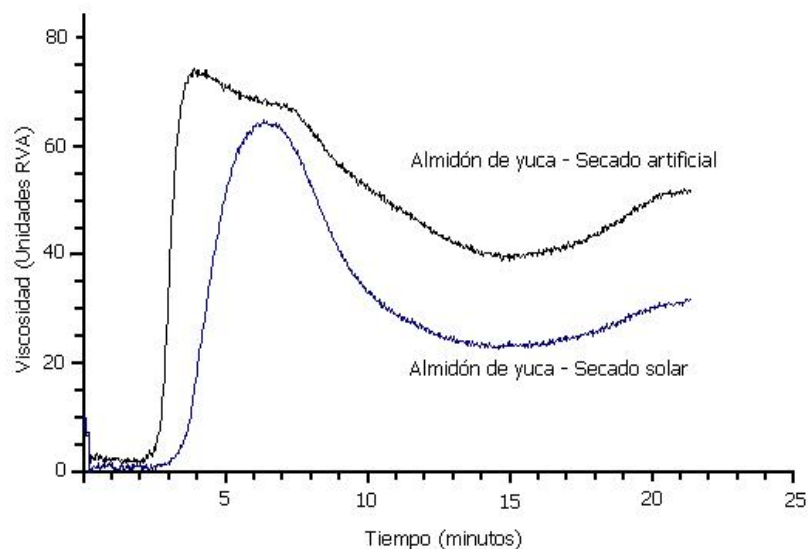
Tabla 12. Caracterización de adhesivos para cerrado de fondo.

Análisis	Adhesivo para cerrado de fondo (dextrina de maíz)	Adhesivo para cerrado de fondo (dextrina de yuca)
pH	8,62	8,40
Color	Amarillo oscuro	Marrón oscuro
Olor en húmedo	Característico	No perceptible
Apariencia de película	Brillante-Opaca	Brillante-semitransparente

4.6 ENSAYOS DE SECADO PARA ALMIDÓN NATIVO, ALMIDÓN AGRIO Y HARINA DE YUCA UTILIZANDO LA TECNOLOGÍA DE PELETIZADO-SECADO

- Ensayos de secado de almidón nativo. En la Figura 44 se presenta el comportamiento reológico del almidón nativo utilizando el secado artificial (40 °C) y el secado solar (30-40 °C).

Figura 44. Amilograma de almidón nativo secado solar y artificial.



Como se observa en la Figura 44, se presentó diferencia en el comportamiento reológico en el almidón nativo, dependiendo del secado utilizado. Así, el almidón nativo con secado solar presenta una menor viscosidad máxima (63,48 unidades RVA) comparada con el almidón nativo con secado artificial, cuya viscosidad máxima fue 73 unidades RVA. La temperatura de gelatinización del almidón con secado solar fue mayor (60,5 °C) comparada con la temperatura de gelatinización del almidón nativo con secado artificial (56,1 °C). En general durante el periodo de enfriamiento la viscosidad de los almidones se mantuvo constante con una tendencia a aumentar al final del tratamiento.

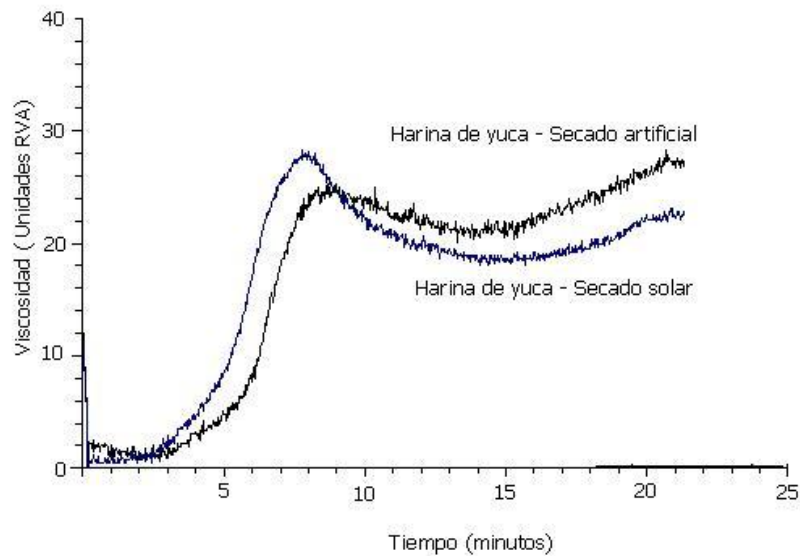
- Ensayos de secado de almidón agrio. El volumen específico del almidón agrio con secado solar y artificial, se realizó evaluando su poder de expansión con la elaboración de un pan utilizando estos almidones. Según los resultados de los análisis realizados el volumen específico promedio del almidón agrio con secado solar fue 12,1 g/ml y el volumen específico promedio del almidón agrio con secado artificial fue 5,6 g/ml. Con base en estos resultados se demostró, como lo menciona la literatura y como siempre se ha sabido, que el almidón agrio necesita de un secado solar, para adquirir sus propiedades de expansión; aunque siga todo el proceso de fermentación. Esto es ambos almidones agrios analizados en esta prueba tuvieron un tiempo de fermentación de 35 días en tanques de fermentación, pero lo que varió fue el tipo de secado solar o artificial. Por ello la utilización de la técnica de secado artificial no es apta para realizar el secado de almidón agrio si se desea obtener en este, altos niveles de expansión.

- Ensayos de secado de harina de yuca. En la Figura 45 se presenta el comportamiento reológico de la harina de yuca utilizando el secado artificial (40 °C) y el secado solar (30-40 °C).

Como se observa en la Figura 45, no hubo una diferencia significativa en el comportamiento reológico de las harinas de yuca, secadas utilizando el secado solar y artificial. La harina de yuca con secado solar presenta una mayor

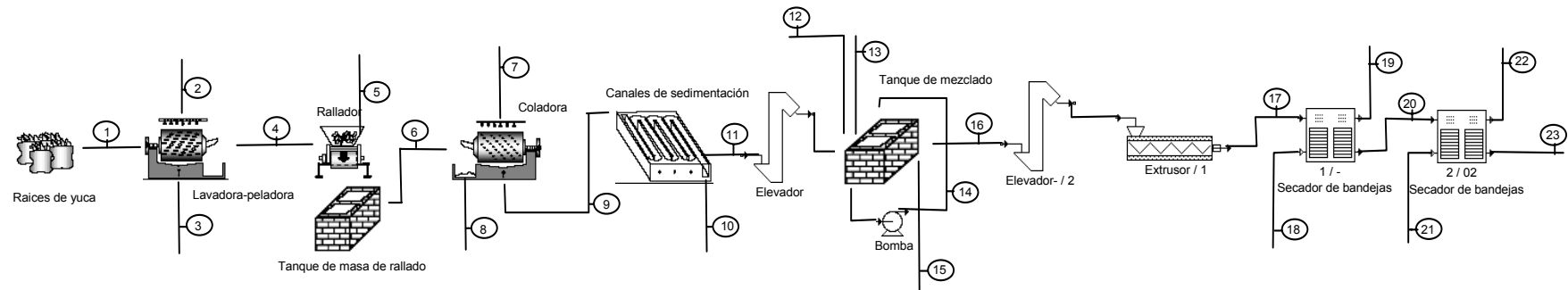
viscosidad máxima (28,35 unidades RVA) comparada con la harina de yuca con secado artificial, cuya viscosidad máxima fue 25,3 unidades RVA. La temperatura de gelatinización la harina de yuca con secado solar fue menor (57,5 °C) comparada con la temperatura de gelatinización de la harina de yuca con secado artificial (60,2 °C).

Figura 45. Amilograma de harina de yuca secado solar y artificial.



Durante el periodo de enfriamiento la viscosidad de las harinas de yuca se mantuvo estable con una tendencia a aumentar al final del tratamiento. Se observa que el valor de las viscosidades de las harinas de yuca, elaboradas con las mismas raíces de yuca de las que se extrajo el almidón nativo para estos ensayos, disminuyó casi la mitad de las unidades RVA, esto debido a la presencia de fibra y proteína en las harinas obtenidas.

4.7 DIAGRAMA DEL PROCESO DE PRODUCCION DE DEXTRINAS POR VIA SECA A PARTIR DE ALMIDON DULCE DE YUCA



Cuadro 7. Descripción de las corrientes de cada una de las etapas del proceso de producción de dextrinas a nivel de rallandería.

Línea #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Flujo	Alimentación	Alimentación	Salida	Alimentación	Alimentación	Alimentación	Alimentación	Salida	Alimentación	Salida
Componente	Yuca fresca	H ₂ O de servicio	Lavadora	Rallador	H ₂ O de servicio	Coladora	H ₂ O de servicio	Coladora	Canales de sedimentación	Canales de sedimentación
H ₂ O de servicio		2118,27	2118,27		1623,37	1623,37	8467,99	7710,00	7710,00	
Yuca fresca	1000									
Cascarilla			36,67							
Yuca lavada			1045,30	1045,30		1045,30				
Yuca rallada										
Afrecho húmedo								626,67	626,67	626,67
Almidón (45% H)								334,00	334,00	
Mancha (65,35% H)								125,23	125,23	125,23
Total	1000	2118,27	3200,23	1045,30	1623,37	2668,66	8467,99	8795,90	8795,90	751,9

Cuadro 7. Descripción de las corrientes de cada una de las etapas del proceso de producción de dextrinas a nivel de rallandería.

Línea #	11	12	13	14	15	16	17	20	23
Flujo	Alimentación	Alimentación [*]	Alimentación [♦]	Flujo	Alimentación	Alimentación	Salida	Alimentación	Salida
Componente	Tanque mezclado	H ₂ O de servicio	HCL [37%] L	Almidón acidificado	Aglutinante ^{°*} (3% w/w)	Extrusor	Extrusor	Secador	Secador
H ₂ O de servicio		485,98	0,35	486,33					
Yuca fresca									
Cascarilla									
Yuca lavada									
Yuca rallada									
Afrecho húmedo									
Almidón (45% H)	334			334	5,51	339,51	339,51	196,56	196,56
Mancha(65,35% H)									
Total	334	485,98	0,35	820,33	5,51	339,51	339,51	196,56	196,56

^{*} La cantidad de agua de servicio para el mezclado se calcula con respecto a la cantidad de almidón sin humedad, para obtener una suspensión con 37,8% (w/w).

[♦] La cantidad de HCL se calcula con respeto a la cantidad de almidón sin humedad, en un porcentaje de 0,19% (w/w).

^{°*} La cantidad de aglutinante se calcula con respecto a la cantidad de almidón sin humedad, en un porcentaje de 3% (w/w) de dextrina

5. CONCLUSIONES

- La tasa de recuperación del proceso de extracción de almidón en la rallandería TODOYUCA es cercana al 70%, con un rendimiento del 20,9% de almidón con respecto a la materia prima, lo que indica que el proceso de extracción de almidón esta entre los estándares para este tipo de rallandería.
- La acidificación de lechada de almidón, para obtención de dextrinas, no es posible principalmente a que la cantidad de acido que se debe adicionar para obtener un pH adecuado en la dextrinización, se correlaciona en primer lugar con la cantidad de sólidos presentes en la lechada, factor que no se puede fijar en esta etapa, por las condiciones propias de la operación.
- La adición de 0,19% de HCL, a una suspensión de almidón con una concentración de 37,8% (w/v), permite obtener un pH promedio de 3,1, necesario para la producción de dextrinas.
- Para la neutralización de agua acida, efluente resultante de la etapa de acidificación de la suspensión de almidón, se debe adicionar 0,35% (w/v) de carbonato de calcio, para obtener un pH promedio de 7,2.
- El aglutinante más adecuado para el formado de pelets de almidón, es dextrina con una concentración de 3% (w/w), que permite obtener pelets de buena consistencia.
- La implementación de un sistema de homogenización de flujo de aire, con un caudal de 0,21 m³/s, permite mejorar la uniformidad de la humedad del producto secado y disminuye el tiempo de secado, para secadores por lotes de lecho fijo.

- La etapa de tostación con flujo de aire de $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$, e implementación de sistema de homogenización de flujo de aire, permiten obtener tiempos de conversión mas cortos, que representa una ventaja económica para el proceso de obtención de dextrinas.
- Las dextrinas obtenidas en el proceso, presentaron características similares a las reportadas en la teoría, lo que las hace aptas para las mismas aplicaciones industriales.
- La validación de las dextrinas de yuca obtenidas, para la producción de adhesivos para el cerrado lateral y fondo de bolsas multipliego de papel, permitió comprobar que los adhesivos de dextrina de yuca comparados con los adhesivos de dextrina de maíz, tienen mejores propiedades lo que les permite competir en el mercado frente estos productos sustitutos.

6. RECOMENDACIONES

- Realizar estudios comparativos de producción de dextrinas por vía seca con las condiciones establecidas en el presente estudio, pero utilizando como materia prima variedades específicas de yuca y una mezcla de variedades, que permitan determinar si hay diferencias significativas en las dextrinas obtenidas con cada una de ellas.
- Evaluar el efecto del peso molecular de las moléculas de almidón con respecto a la cantidad de ácido que se debe adicionar para lograr la acidez requerida en la producción de dextrinas.
- Realizar estudios sobre el efecto que tiene el pelletizado en las propiedades reológicas del almidón acidulado.
- Utilizando las bases determinadas en el presente estudio para la etapa de presecado y tostación, se recomienda realizar estudios técnicos que permitan determinar las características más adecuadas para un equipo de secado de lecho fijo por lotes.
- Realizar estudios sobre el cambio en las propiedades reológicas del almidón acidulado a lo largo de las etapas de presecado y tostación que permitan establecer el punto final y grado de dextrinización del almidón.
- Para la implementación de la etapa de pelletizado del almidón en la industria, es necesario realizar estudios que permitan establecer variables específicas en esta etapa, obteniendo flujos altos de producto procesado, sin afectar las propiedades reológicas del almidón, todo esto con el fin de que esta etapa no genere cuellos de botella en los procesos para los cuales se desee implementar.

- Aunque el desarrollo de las rallanderías de mediana escala, tiene un fuerte impacto a nivel social, no se puede dejar de lado, el impacto ambiental que genera esta agroindustria; ya que sus aguas de proceso son tomadas de fuentes naturales limpias y devueltas a los mismos con altas cargas contaminantes. Por ello, se recomienda realizar estudios para la recirculación de las aguas efluentes de algunas etapas de proceso que sirvan en otras etapas, y a la vez identificar la carga contaminante que contienen las aguas efluentes de cada etapa de proceso para su tratamiento con productos que permitan realizar una efectiva sedimentación de los contaminantes, y así poder realizar una reutilización de estas aguas.

BIBLIOGRAFÍA

ACOSTA, M. y SALCEDO, M. Estudio de las aplicaciones industriales, potencial de mercado en Colombia y diseño de un producto a partir de pirodextrinas de yuca. Cali, 2004. Trabajo de grado (Ingeniero Industrial). Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Industrial.

ACTON, W. The Manufacture of Dextrins and British Gums. En : Radley, J. A. Starch Production Technology. England: Applied Science Publisher, 1976. p. 276-284.

ALARCÓN, F. y DUFOUR, D. Almidón agrio de yuca en Colombia. Producción y recomendaciones. Tomo I. Cali : CIAT-CIRAD, 1998. p. 3, 10-16.

AOAC. *Nitrogen (total) of flour*. Association of Analytical Chemists International (AOAC 13.31). 7 ed. MD, USA, Gaithersburg. 1955.

AOAC. *Fibre crude of flour*. Association of Analytical Chemists International (AOAC 13.20). MD, USA, Gaithersburg.

AOAC. *Ethereal extract of flour*. Association of Analytical Chemists International (AOAC 13.19). MD, USA, Gaithersburg. 1955.

AOAC. *Ash of flour*. Association of Analytical Chemists International (AOAC 923.03). MD, USA, Gaithersburg. 1990.

ARISTIZÁBAL, Johanna. Estudio de la viabilidad técnica y económica de la producción de dextrinas a partir de yuca utilizando tecnologías de vía seca. Cali : CLAYUCA-CIAT, 2004.

ARISTIZÁBAL, J. y ROBLES, S. Estudio de la dextrinización del almidón de yuca por vía seca. Bogotá, 2001. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química.

BALAGOPALAN, C., PADMAJA, G., NANDA, S.K. & MOORTHY, S.N. Cassava in Food, Feed and Industry. Bocarátón, Florida, CRC Press. 1988. p.138.

BUITRAGO, J.A. La yuca en la alimentación animal. Cali : CIAT, 1990. 450 p.

BUITRAGO A JA ; GIL JL, Ospina B. 2001. La yuca en la alimentación avícola. Cuadernos avícolas no 14. Federación Nacional de Avicultores-Fondo Nacional Avícola (FENAVI-FONAV), Bogota DC. p 47.

CARRIZALES, V. El casabe: un legado aborígen. 1984. San Felipe: CIEPE, 1984.

CARTAY, Rafael. Difusión y comercio de la yuca (manihot esculenta) en Venezuela y en el mundo (on line). no 18. Enero- Junio 2004 [citado 15 Noviembre 2005]. Disponible http://www.saber.ula.ve/db/ssaber/Edocs/centros_investigacion/ciaal/agroalimentaria/anum18/articulo18_1.pdf.

CEBALLOS. La yuca en el tercer milenio : La yuca en Colombia y el mundo: Nuevas perspectivas para un cultivo milenario. Cali : CLAYUCA -CIAT, 2002. p. 3-5.

CEBALLOS, Hernan, DE LA CRUZ, Gabriel. La yuca en el tercer milenio : Taxonomía y morfología de la yuca. Cali : CLAYUCA -CIAT, 2002. p. 16, 28-30.

CIAT-CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL. La industria del almidón en el departamento del Cauca, Colombia. Cali : CORPOTUNIA, CIRAD, CETEC, UNIVALLE, Fundacion Carvajal y CIAT, 1995. p. 16.

COLOMBIA. DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (DANE). Censo de plantas procesadoras de yuca para uso industrial. Bogota : MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL (MADR), 2003.

COCK, JH. La yuca, nuevo potencial para un cultivo tradicional. Cali : CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL-CIAT. 1989. p. 240.

CRONIN, D.A. & Smith, S. A Simple and rapid procedure for the analysis of reducing, total and individual sugars in potatoes. *Potato Res.*, 22: 99-105, 1979.

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

ESSER, S.A. *Et al.* studies of the quantification of specific cyanogens in cassava product and introduction of the new chromogen. *J. Sci. Food. Agric.* 63. 1993. p. 287-296.

FAO. Producción. Cultivos primarios [on line][citado 25 noviembre 2005]. Disponible <http://faostat.fao.org/faostat/form?collection=Production.Crops.Primary&Domain=Production&servlet=1&hasbulk=0&version=ext&language=ES>. 2005.

HALLAUER, AR. Specially corns., Boca Raton, Florida. CRC Press 1994. 410 p.

HURTADO, JJ. Valoración de las amiláceas “no-cereales” cultivadas en los países andinos : estudio de las propiedades fisicoquímicas y funcionales de sus almidones y de la resistencia a diferentes tratamientos estresantes. Tesis. Facultad de Ingeniería de Alimentos, Fundación Universidad Jorge Tadeo Lozano, Bogota, Colombia. 1997. 164 p.

ICONTEC. Alimentos para animales: Yuca integral seca para consumo animal. NTC 3528. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), Bogotá, Colombia. 2002.

Internacional Starch Institute, Determination soluble solids. ISH. Denmark 2001.

ISO. Determination de la teneur en amylose. ISO 6647. International Organization for Standardization (ISO), Switzerland. 1987.

ISI 2000. Determination of viscosity of starch by Brabender. ISI 19-6e. In Laboratory methods. Science Park, Aarhus, Denmark, International Starch Institute (ISI). (available at <http://www.starch.dk/isi/methods/index.htm>).

JAMES, Ronald W. Industrial Starch Technology: Recent Developments. New Jersey, 1979.

KENNEDY, H. M. and FISCHER, A.C Jr. Starch and Dextrins in prepared Adhesives. En: Whistler, Roy L., Bemiller, James N. and Paschall, Eugene F. Starch: Chemistry and Technology. 2 ed. Orlando (Florida): Academic Press, 1984. p. 593-610.

KERR, R. W. Chem. Adstr. U.S. Patent 2.131.724, 1950.

Kruger, Leo; Lacourse, Norman. Starch based adhesives. En: SKEIST, Irving. Handbook of adhesivos. 3 ed. Van Nostrand Reinhold Company: New York, 1990. p.153-166.

Lange, Norbert Adolph and DEAN, John A. Lange's Handbook of Chemistry. 12 ed. New York : Mc GrawHill Book, 1979. p.10-97.

LINDEN, G. and LORIENT, D. Bioquímica agroindustrial. Zaragoza: Acribia, 1994. p. 283-307.

MESTRES, C. Comparison of various processes for making maize pasta. *J. Cereal Sci.*, 1993. p.17, 277-290.

MOORTHY, S.N. Tuber crop starches. Thiruvananthapuram: Central tuber crops research institute, 1994. v.18, p. 40. 1994.

MOORTHY, S.N. Large scale industries. In. Balagopalan, C. integrated technologies for value addition and post harvest management and tropical tuber crops. Thiruvananthapuram: Central tuber crops research institute, Cap 6 p. 106, 2000.

Naparorn A., Sujin, S. and Saiyauit, V. Morphological properties of acid-modified Tapioca starch. En: *Starch/Starke*. Germany. v. 52, (2000). p.376-384.

OSPINA, B.; CEBALLOS, H. La yuca en el tercer milenio: La yuca en la alimentacion animal. Cali : CLAYUCA-CIAT, 2002. p. 528-535.

PITTIER, H. *Manual de las plantas comunes de Venezuela*. Barcelona,Venezuela: Editorial Ariel. 1926.

RADLEY, J. A. *Starch and Its Derivatives*. New York: John Wiley & Sons, 1954. p. 107-125.

RENVOIZE, B.S. The area of origin of the evidence : economic botany. s/.. 1973. p. 352-360.

RICKARD, JE; Asoka M; Blanshard JMV. The physico-chemical properties of cassava starch. *Tropical Science*, 1991. P. 189-207.

RUALES, J. Caracterización de las propiedades reologicas y nutricionales del almidón nativo y gelatinizado de archiva (*Canna edulis*). En : CONFERENCIA

INTERNACIONAL EN BIOSEGURIDAD DE NUTRIENTES (marzo, 1995).
Escuela Politécnica Nacional. Quito: (EPN), 1995. p. 179-188.

SCHNEE, L. *Plantas comunes de Venezuela*. Caracas : Universidad Central de Venezuela. 1973.

SIMMONDS, NE. *Evolution of crop plants*. 3a ed. Londres : Longman, 1976.
399 p.

SWINKELS. J. J. M. *Industrial starch chemistry. Properties, modifications and applications of starches*. AVEBE, Veendam, 1996. p. 48.

TREYBAL, R. *Operaciones de transferencia de masa*. McGRAW-HILL, Madrid.
1998. p. 730-734.

UAM. 2005. Almidón y celulosa. [on line][citado 15 Diciembre 2005]. Disponible
http://docencia.izt.uam.mx/epa/quim_alim/material_adicional/almidón_celulosa.pdf.

VANHAMEL, L. et al. A volumeter for breads prepared from 10 grams of flour.
Cereal chemistry. 1991. 68(2). p.170-172.

WURZBURG, O.B. *Modified Starches: Properties and Uses*. Boca Raton: CRC
Press, 1986. p. 29-40, 254-256.

ANEXOS

Anexo A. Formulaciones típicas de los adhesivos de dextrina.

Existen diferentes formulaciones para los adhesivos de dextrinas, sin embargo los aditivos básicos son los mismos para todos.

- **Formulación de cerrado de cajas de cartón.** Una de las formulaciones típicas para esta aplicación se presenta en la Tabla 11.

Tabla 13. Formulación típica de un adhesivo para cerrado de cajas de cartón.

Componente	Porcentaje en peso (%)
Dextrina blanca	37,5
Metaborato de sodio	5,0
Bórax	1,3
Agua	56,2

Fuente: Kennedy, 1989

- **Fabricación de cores o tubos en espiral.** Una de las formulaciones típicas para esta aplicación se presenta en la Tabla 12.

Tabla 14. Formulación típica de un adhesivo para cores o tubos en espiral.

Componente	Porcentaje en peso (%)
Dextrina amarilla	40
Nitrato de sodio	3,0
Urea	3,0
Agua	54

Fuente: Kennedy, 1989

- **Formado de sacos multipliegos y bolsas de papel.** Para la fabricación de sacos multipliegos se requieren principalmente dos clases de adhesivos uno para el cerrado latera, cuya formulación típica se presenta en la Tabla 13 y para el cerrado de fondo o base se presenta en la Tabla 14.

- **Adhesivo para cerrado lateral.**

Tabla 15. Formulación típica de un adhesivo para costura lateral de bolsas de papel.

Componente	Porcentaje en peso (%)
Dextrina amarilla	28
Bórax	3,2
Biocida	0,3
Agua	68,5

Fuente: Kruger y Lacourse, 1990

- **Adhesivo para el cerrado de fondo.**

Tabla 16. Formulación típica de un adhesivo para cerrado de fondo de bolsas de papel.

Componente	Porcentaje en peso (%)
Dextrina amarilla	22,4
Bórax	3,0
Jabón	0,2
Biocida	0,3
Agua	74,1

Fuente: Kruger y Lacourse, 1990

- **Etiquetado de botellas de vidrio.** Una de las formulaciones típicas para esta aplicación se presenta en la Tabla 15.

Tabla 17. Formulación típica de un adhesivo para etiquetado de botellas de vidrio.

Componente	Porcentaje en peso (%)
Dextrina amarilla	38
Nitrato de sodio	3,0
Urea	3,0
Agua	56

Fuente: Kennedy, 1989

Anexo B. Determinación de la dureza de los pelets de dextrina.

Aparato. Medidor de dureza para comprimidos marca KAHL, resorte de 2,5 mm.

Procedimiento.

- Antes de comenzar el ensayo es necesario verificar con cuál de los resortes se realizará la determinación, para efectuar la lectura en la escala correspondiente. Así el resorte de 2,5 mm mide entre 0-25 Kg-f y el resorte de 3,5 mm mide entre 0-100 Kg-f.

- El aparato deberá tomarse con la mano izquierda y aflojar la tuerca hasta que pueda desplazarse el pistón, que se encuentra debajo del cilindro, hacia arriba con el dedo índice de la mano derecha hasta que el indicador, sin que se presione el resorte, se encuentre sobre la masa de la escala graduada en 0.

- Seguidamente se coloca el pelet sobre la superficie del soporte y debajo del pistón, y se sujeta por medio de la tuerca de fijación hasta que el pelet no pueda desplazarse.

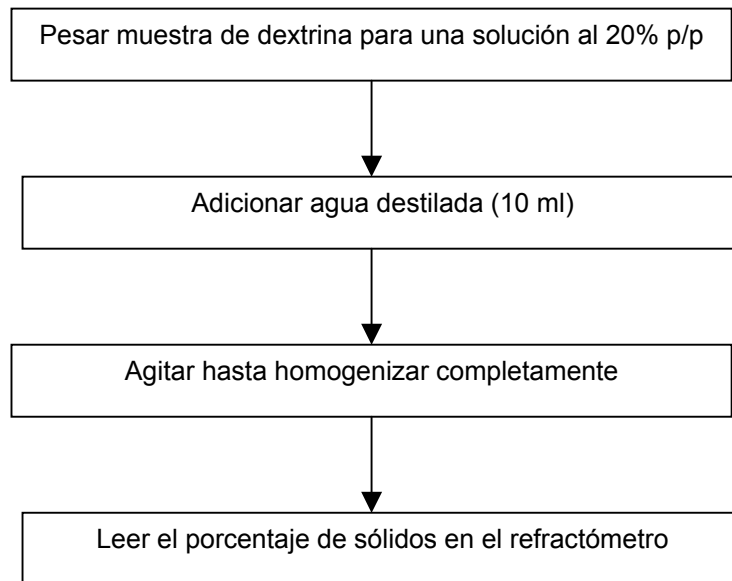
- Inmediatamente se comienza a apretar lentamente la tuerca de presión hasta que el pelet se deshaga. El indicador de lectura permitirá establecer en la escala graduada, según el resorte que se haya utilizado, cuál ha sido la presión efectuada en Kg-f.

- Para efectuar ensayos es necesario comprobar previamente la limpieza del aparato en especial que no existan cuerpos extraños entre el pistón y el cilindro lo cual daría lugar a lecturas incorrectas. Una vez terminados los ensayos es necesario aflojar la tuerca de presión hasta que el resorte quede completamente libre.

Anexo C. Procedimiento para la determinación de la solubilidad en agua fría de las dextrinas.

Aparatos. Balanza analítica, tubos de ensayo, espátula y Refractómetro.

Procedimiento.



Anexo D. Análisis estadísticos utilizando la herramienta SPSS 14.0.

- Análisis de varianza univariante para las pruebas de peletizado.

Dureza de pelet kg-f

Tipo de Aglutinante		N	Subconjunto	
			1	2
Tukey B(a,b,c)	Sin aglutinante	4	5,275	
	Pasta de almidón	8		6,113
	Dextreina	8		6,288
Duncan(a,b ,c)	Sin aglutinante	4	5,275	
	Pasta de almidón	8		6,113
	Dextreina	8		6,288
Significación			1,000	,404

Se muestran las medias para los grupos en subconjuntos homogéneos.

Basado en la suma de cuadrados tipo III

El término error es la Media cuadrática (Error) = ,125.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 6,000

b Los tamaños de los grupos son distintos. Se empleará la media armónica de los tamaños de los grupos. No se garantizan los niveles de error tipo I.

c Alfa = ,05.

Dureza de pelet kg-f

Concentración de Aglutinantes(%)		N	Subconjunto		
			1	2	3
Tukey B(a,b,c)	,0	4	5,275		
	1,5	8		5,875	
	3,0	8			6,525
Duncan(a,b ,c)	,0	4	5,275		
	1,5	8		5,875	
	3,0	8			6,525
Significación			1,000	1,000	1,000

Se muestran las medias para los grupos en subconjuntos homogéneos.

Basado en la suma de cuadrados tipo III

El término error es la Media cuadrática (Error) = ,125.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 6,000

b Los tamaños de los grupos son distintos. Se empleará la media armónica de los tamaños de los grupos. No se garantizan los niveles de error tipo I.

c Alfa = ,05.

- Análisis de varianza univariante para pruebas de HCN y materia seca en yuca freca.

Contenido de HCN total en yuca fresca (ppm)

	LOTE	N	Subconjunto para alfa = .05		
			1	2	3
HSD de Tukey(a)	2	3	115,8400		
	3	3		126,6667	
	1	3			135,4567
Duncan(a)	Sig.		1,000	1,000	1,000
	2	3	115,8400		
	3	3		126,6667	
	1	3			135,4567
	Sig.		1,000	1,000	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.
 a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3,000.

Contenido de materia seca en yuca fresca (%)

	LOTE	N	Subconjunto para alfa = .05	
			1	2
HSD de Tukey(a)	1	3	40,0733	
	2	3		42,5600
	3	3		43,6167
Duncan(a)	Sig.		1,000	,259
	1	3	40,0733	
	2	3		42,5600
	3	3		43,6167
	Sig.		1,000	,128

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.
 a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3,000.

- Análisis de varianza univariante para pruebas de HCN y materia seca en afrecho.

Contenido de HCN en afrecho (ppm)

	LOTE	N	Subconjunto para alfa = .05		
			1	2	3
HSD de Tukey(a)	1	3	,9333		
	3	3		1,2467	
	2	3			2,0467
	Sig.		1,000	1,000	1,000
Duncan(a)	1	3	,9333		
	3	3		1,2467	
	2	3			2,0467
	Sig.		1,000	1,000	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.
 a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3,000.

Contenido de materia seca en afrecho (%)

	LOTE	N	Subconjunto para alfa = .05	
			1	2
HSD de Tukey(a)	2	3	12,6833	
	1	3	12,8767	
	3	3		15,3367
	Sig.		,691	1,000
Duncan(a)	2	3	12,6833	
	1	3	12,8767	
	3	3		15,3367
	Sig.		,430	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.
 a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3,000.

- Análisis de varianza univariante para pruebas de tostación o conversión.

Con flujo libre.

% de Solubilidad

Bandeja		N	Subconjunto	
			1	2
Tukey B(a,b)	1	16	41,719	
	2	16		66,125
	3	16		71,094
Duncan(a ,b)	1	16	41,719	
	2	16		66,125
	3	16		71,094
Significación			1,000	,409

Se muestran las medias para los grupos en subconjuntos homogéneos.

Basado en la suma de cuadrados tipo III

El término error es la Media cuadrática (Error) = 280,094.

A Usa el tamaño muestral de la media armónica = 16,000

b Alfa = ,05.

% de Solubilidad

Tiempo		N	Subconjunto		
			1	2	3
Tukey B(a,b)	15	6	6,667		
	30	6		36,333	
	45	6			93,917
Duncan(a ,b)	15	6	6,667		
	30	6		36,333	
	45	6			93,917
Significación			1,000	1,000	1,000

Se muestran las medias para los grupos en subconjuntos homogéneos.

Basado en la suma de cuadrados tipo III

El término error es la Media cuadrática (Error) = 11,347.

A Usa el tamaño muestral de la media armónica = 6,000

b Alfa = ,05.

Con sistema de homogenización de aire.

% de Solubilidad

Fuente	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Significación
Modelo corregido	32975,729(a)	23	1433,727	5,119	,000
Intersección	170766,021	1	170766,021	609,675	,000
Tiempo	19991,646	7	2855,949	10,196	,000
Bandeja	7910,635	2	3955,318	14,121	,000
Tiempo * Bandeja	5073,448	14	362,389	1,294	,280
Error	6722,250	24	280,094		
Total	210464,000	48			
Total corregida	39697,979	47			

a R cuadrado = ,831 (R cuadrado corregida = ,668)

% de Solubilidad

	Bandeja	N	Subconjunto	
			1	2
Tukey B(a,b)	3	6	43,583	
	2	6	43,667	
	1	6		49,667
	3	6	43,583	
	2	6	43,667	
Duncan(a ,b)	1	6		49,667
	Significación		,967	1,000