

UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

***DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE
LOS RIZOMAS DE SAGÚ (*Maranta arundinacea* L.), REQUERIDAS
PARA EL DISEÑO DE LAS MÁQUINAS EXTRACTORAS DE ALMIDÓN***

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO ACADÉMICO DE MÁSTER EN INGENIERÍA AGRÍCOLA

Autor: Ing. Alberto López Méndez.

Tutor: Dr. C. Miguel Herrera Suárez, Prof. Titular

Santa Clara

2015

PENSAMIENTO

PENSAMIENTO

**"Debiera ser capítulo de nuestro evangelio agrícola la
diversidad y abundancia de los cultivos menores"**

José Martí

AGRADECIMIENTO

AGRADECIMIENTO

Especial agradecimiento a mi tutor Dr. C. Miguel Herrera Suárez y a su familia.

A: Angel Lázaro Sánchez Iznaga.

Arnold Fernández Guanche y familia.

Hector Rafael Cabrera Díaz

Juan Carlos Morfa Ravelo

Julia María Morfa Rodríguez

José Manuel Lorenzo Rodríguez

Daisy Lee López

Carlos Manuel Martínez Goitizolo

Al claustro de profesores de la maestría de ingeniería agrícola de la UCLV.

A mi familia y a todos los que han hecho posible la realización de este trabajo.

DEDICATORIA

DEDICATORIA

A mí Padre, por todo lo que soy.

A mis hijos, como un ejemplo en su formación.

A mí esposa, por su paciencia y sacrificio.

RESUMEN

RESUMEN

El objetivo del trabajo consistió en determinar las propiedades físico-mecánicas de los rizomas de sagú, requeridas para el diseño de las máquinas extractoras de almidón que basan su principio de funcionamiento en el triturado previo, mezclado y clasificación secundaria. Para lo cual se caracterizaron los rizomas en cuanto a sus constituyentes y se determinaron las referidas propiedades físico-mecánicas. Los resultados mostraron que los rizomas de Sagú poseen un gran potencial para la producción de harina, pues del 17,86 % de materia seca que posee se puede extraer un 80,4 % de harina. Por otra parte la determinación de las propiedades físicas mostró que las mismas poseen una longitud media de 0,17 m; diámetro ecuatorial 0,025 m; diámetro distal 0,0032 m; diámetro proximal 0,017 m; masa 0,060 kg; densidad aparente 423,40 kg/m³; densidad real 1 050,6 kg/m³; y porosidad 59,9%. Finalmente la determinación de las propiedades mecánicas mostró que el coeficiente de fricción estático en madera tomó los mayores valores sobre superficie de acero no pulimentada ($\mu_{em}=0,47 < \mu_{eg}=0,49 < \mu_{ea}=0,50$), este resultado se atribuye a la mayor rugosidad de la superficie de acero ($R_a=12,5$). De igual forma para la fricción dinámica los mayores valores se observaron en la superficie de goma ($\mu_{dm}=0,42 < \mu_{dg}=0,44 < \mu_{da}=0,49$); El coeficiente de fricción a la rodadura exhibió mayor fricción para el caso de la superficie de madera ($\mu_{rm}=0,20 > \mu_{ra}=0,49 > \mu_{rg}=0,50$).

Resumen

Los resultados de la determinación de la resistencia mecánica mostraron que los rizomas poseen una resistencia máxima a la compresión de 3,51 Pa y a la flexión de 0,0081Pa.

INDICE

INDICE

CONTENIDO	Pag
INTRODUCCIÓN	6
CAPÍTULO I. SITUACIÓN ACTUAL DEL TEMA OBJETO DE INVESTIGACIÓN	15
1.1 Importancia agroalimentaria del Sagú	15
1.2 Situación cubana de la producción del Sagú	21
1.3 Máquinas empleadas para la obtención del almidón del Sagú	25
1.4 Propiedades físico-mecánicas de las raíces, rizomas y tubérculos relacionadas con el diseño de las máquinas trituradoras.	35
1.4.1 Propiedades físicas.	36
1.4.2 Propiedades mecánicas	39
1.5 Conclusiones parciales del capítulo	42
II. PROGRAMA Y METODOLOGÍA DE LAS INVESTIGACIONES EXPERIMENTALES	44
2.1 Programa de las investigaciones experimentales	44
2.2 Metodologías de las investigaciones experimentales	45
2.2.1 Características de los rizomas del Sagú	45
2.2.2 Determinación experimental de las propiedades físicas de los rizomas del Sagú	48
2.2.3 Determinación experimental de las propiedades mecánicas de los rizomas del Sagú	53
2.2.3.1 Propiedades mecánicas relacionadas con la fricción, el contacto y la rodadura	53
2.2.3.2 Propiedades mecánicas relacionadas con la resistencia a los distintos tipos de deformaciones	56
2.3 Metodología para el procesamiento estadístico de los resultados	58
III RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60
3.1 Resultados de la determinación de las propiedades físicas que caracterizan los rizomas de Sagú	60
3.2 Propiedades físicas de los rizomas de Sagú que definen el cálculo y dimensionamiento de los órganos de trabajo de las máquinas extractoras de almidón	61
3.3 Propiedades mecánicas de los rizomas de Sagú que intervienen en el diseño de los órganos de trabajo de las máquinas extractoras de almidón	65
3.4 Conclusiones parciales	69

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCION

En la actualidad alrededor de mil millones de personas sufren de hambre en todo el mundo (FAO, 2013), una cifra significativa si se tiene en cuenta que la población mundial es de siete mil millones de personas. En las Naciones Unidas se acordó desde el año 2000 seguir objetivos comunes a todos los gobiernos miembros, denominados “Objetivos de Desarrollo del Milenio”, los cuales en primer lugar, están dirigidos a erradicar el hambre y la pobreza extrema, al asumir como una de sus metas reducir a la mitad la proporción de personas que sufren de hambre para el año 2015 (alrededor de 850 millones de personas).

Cumplir con la meta será muy difícil al tenerse en cuenta la emergencia de problemáticas como las crisis económica, financiera, energética, alimentaria y climática. La seguridad alimentaria se vislumbra como uno de los ejes estructurales para fortalecer la dimensión del desarrollo humano en el mundo. En el proceso de rescate del recurso alimentario se hace tangible la sensibilización y emprendimiento hacia una cultura de lo mixto, cuando de agricultura se trata el desarrollo tecnológico y agrícola es vital. Se hace necesaria la utilización de nuevas tecnologías, así como de las innovaciones en la agricultura y la alimentación, además del empleo de fuentes y variantes de producción alternativas que permitan un cambio significativo en los cultivos de pequeños productores.

Los cereales son los alimentos básicos que proporcionan las calorías en la dieta, tanto en las áreas tropicales como las templadas. No obstante, en las zonas rurales del trópico húmedo también se obtienen de cultivos diferentes a los cereales, al ser los más importantes las raíces y tubérculos. Estos alimentos básicos por lo general se producen en sistemas de cultivos a pequeñas escalas o de agricultura de subsistencia, basadas en prácticas tradicionales muy arraigadas. Las raíces y tubérculos figuran entre los alimentos más antiguos y de gran importancia nutricional, ecológica y económica. Desde el punto de vista nutricional, estos cultivos juegan un papel muy importante como fuente principal de energía y nutrientes esenciales, al mismo tiempo pueden proveer una composición balanceada de la dieta, particularmente en zonas tanto urbanas como rurales donde la población es de bajos ingresos. La importancia de las raíces y tubérculos radica en su producción que se calcula, en las zonas tropicales del mundo, de alrededor de 140 millones de t al año (FAO, 2014), cantidad suficiente para solventar la alimentación básica de cerca de 400 millones de personas.

Existe conciencia generalizada de que los cultivos de raíces y tubérculos aportan alimentos energéticos en gran cantidad y que la escasa proteína que producen es de menor calidad a la de origen animal. Sin embargo, su papel en la dieta es el de ser fuente de energía en forma de almidón y representan, cuando menos, el 40% del peso de la dieta en la alimentación humana. Como aporte secundario, son fuente de proteína y tiamina. Estos alimentos ofrecen una mayor cantidad de nutrimentos a bajo costo (Poot-Matu *et al.*, 2002).

La agricultura latinoamericana confrontará un gran desafío en los próximos 25 años. En el contexto de la globalización económica, los recursos naturales de la región aparecen

como un activo estratégico que el mundo puede utilizar para alimentar los 2.500 millones de personas que se agregarán a la población del planeta en el año 2020. De esta cifra, unos 200 millones vivirán en esta región. Para muchos países latinoamericanos, el sector agrícola es un activo estratégico en una reactivación económica exitosa, así como en la mitigación de la pobreza. Para algunos países, el asegurar la producción de alimentos constituye todavía un problema de magnitud creciente a pesar del potencial productivo y la base de recursos naturales que poseen. Para la mayoría de los países, las exportaciones agrícolas representan un componente crítico de sus balanzas de pagos. En casi todos ellos, la agricultura, incluyendo la agroindustria, es uno de los sectores económicos de mayor tamaño (Trigo, 1995).

En la actualidad se reorientan las estrategias de desarrollo hacia el aumento de la diversificación de las producciones y el consumo de alimentos. Su objeto es de aliviar el hambre y la malnutrición. En estas tentativas, una de las fases iniciales está dada en la promoción de los alimentos autóctonos, mediante el fomento de sus producciones y de utilizaciones eficaces. La diversidad en la producción y la elaboración de alimentos es importante, porque una gran parte de la población vive en las zonas rurales y los productores utilizan sus conocimientos locales especializados para asegurar la persistencia de los alimentos destinados al consumo del hogar y para mantener una dieta bien equilibrada. En este contexto, la diversidad es importante y se aprecia como factor para mejorar la dieta y la calidad de vida.

Existen una amplia variedad de cultivos potencialmente importantes, que son la base fundamental de la dieta de los pobladores rurales del trópico donde las raíces y

tubérculos están cobrando una gran importancia local debido a que forman un componente barato y aceptable de las dietas tropicales (Tapia, 2000; FAO, 2014).

Sin embargo, en los últimos años, el desarrollo de la llamada agricultura moderna ha relegado y marginado la expansión de estas especies vegetales debido a que las prioridades en la producción de alimentos han sido orientadas a los cereales.

En relación con la fuerte herencia de las culturas originarias en los países de América ha de reconocerse que en las islas del Caribe muy poco han trascendido las culturas aborígenes. Sin embargo, tampoco hay que ignorar los aportes culturales de estos primigenios habitantes en la formación de la identidad criolla como embrión de donde proviene el sector más representativo de la población cubana, su célula económica: el campesino (Sarmiento, 2010).

Desde tiempos precolombinos en Cuba como en el resto de las Antillas las raíces y tubérculos han sido la base de la dieta popular. Entre los que más se destacan: la yuca, el aje o boniato amarillo (*Discorea trifida*), la yahubias o malanga (*Xanthosoma saggitifolium*), el ñame (*Discorea pilosa*, *Discorea bulbífera*) y el Sagú (*Maranta arundinacea* L.), este último pertenece a la familia Marantáceas (Sarmiento, 2010).

El Sagú forma parte de las 25 raíces y tubérculos de consumo regional y mundial, es una herencia de nuestros aborígenes y ha servido de alimento a muchas familias durante siglos. Estudios arqueológicos en América evidencian su cultivo desde hace ocho milenios atrás (Pagán, 2009), aunque actualmente es una especie olvidada y desde el siglo pasado se encuentra en peligro de extinción genérica (Fernández, 1999; Rodríguez *et al.*, 2011), por lo que se debe fomentar la siembra a nivel nacional y mundial, de esta forma rescatar la tradición alimentaria de nuestros antepasados y

asegurar el futuro a las nuevas generaciones, ya que tiene una importancia estratégica en la economía campesina por sus ventajas comparativas de biodiversidad, criterios de sostenibilidad, posibilidad de cultivo en áreas agrícolas marginales y asociación a la producción lechera, de ser una importante contribución a la dieta de la familia.

El Sagú es un producto orgánico, de alto valor alimenticio, que en forma de almidón proporciona calorías esenciales, además, por sus propiedades físicas, químicas y orgánicas se le atribuyen propiedades medicinales para el sistema digestivo del ser humano.

Por otra parte, este cultivo no muestra señales de daños por enfermedades o plagas en los rizomas o el resto de la planta, según los chequeos fitosanitarios periódicos realizados en áreas del INIFAT (Fernández, 1999), lo que lo hace un cultivo muy conveniente desde el punto de vista de resistencia al ataque de plagas y enfermedades.

En Cuba la forma más común de su consumo parte de extraerle a los rizomas que produce la planta una fécula o almidón, que constituye un alimento muy sano y agradable para bebés, ancianos y enfermos del estómago, pues posee una alta digestibilidad. También se puede utilizar como sustituto de aditivos alimentarios en la producción de purés de frutas y vegetales, de una parte del agar en los medios de cultivo in Vitro, en los que acelera el desarrollo de las plántulas (Fernández, 1999) como aglutinantes en la elaboración de tabletas, como harina en repostería, dulcería y cocina tradicional, en la industria textil para endurecer el hilo de algodón, en cremerías para la elaboración de helados y en fábrica de embutidos como elemento aglutinante (Igor y Molina, 2008). Se emplea, además, como medicamento analéptico y entra en la preparación de algunos cocimientos (Roig, 2012).

Según los trabajo del Dr. Asenjo (Roig, 2012), además de ser un valioso alimento, el almidón de la yuca tiene también propiedades emolientes, siendo su uso muy indicado en los trastornos intestinales, así como las enfermedades de la uretra y la vejiga.

En Cuba las zonas que más se destacan en su cultivo son las provincias Orientales en su totalidad, Camagüey y algunas zonas de la región central. El Instituto de Investigaciones de Viandas Tropicales (INIVIT) en Villa Clara mantienen una pequeña parcela como banco de germoplasma para preservar la especie, así como la Estación Experimental Álvaro Barba Machado de la UCLV (Milián *et al.*, 2010).

Para la extracción del almidón de Sagú en el ámbito internacional se han desarrollado varias máquinas que realizan de forma individual cada una de las operaciones comprendidas en este proceso. Las cuales van desde el lavado primario y la trituración hasta el secado y empaclado de la harina. Llegándose a establecer un sistema tecnológico para su procesamiento en los países donde se obtienen los mayores volúmenes es de producción, empleando por consiguiente máquinas industriales en dicho proceso (Malinis y Pacardo, 2012).

En los países con bajos volúmenes de producción donde el Sagú se cultiva a pequeña escala bajo prácticas tradicionales, los métodos empleados para la extracción de la harina se basan en técnicas artesanales, o a partir del empleo de máquinas desarrolladas empíricamente. Problemática que está presente en Cuba pues las máquinas empleadas para este fin, a saber, se han desarrollado sin un estudio previo de las características del Sagú.

Para el diseño de los órganos de trabajo de las máquinas agrícolas se requiere como paso previo el conocimiento de las propiedades físico-mecánicas de los materiales que se van a procesar, pues estas determinan tanto las características de dichos órganos como sus regímenes de trabajo (Iglesias, 1992).

Hasta el momento tanto en Cuba como en el ámbito internacional, no se han reportado estudios para la determinación de las propiedades físico-mecánicas del Sagú, a pesar de la importancia que tiene su determinación para el cálculo y diseño de las máquinas empleadas en su procesamiento.

Tomando en cuenta este aspecto y la importancia de elevar las producciones de almidón de Sagú como fuente de alimento y sustitución de importaciones, se define como **objeto de estudio**: Las propiedades físico-mecánicas de los rizomas de Sagú (*Maranta arundinacea* L.).

El problema **científico** consiste en determinar: ¿Cuáles son las magnitudes de las propiedades físico-mecánicas de los rizomas de Sagú (*Maranta arundinacea* L.) requeridas para el diseño de máquinas extractoras de almidón?

Para la solución del problema planteado se define la siguiente **hipótesis**:

La determinación de las propiedades físico-mecánicas de los rizomas de Sagú (*Maranta arundinacea* L.) permitirá definir los parámetros de diseño óptimos de una máquina para la extracción del almidón del Sagú.

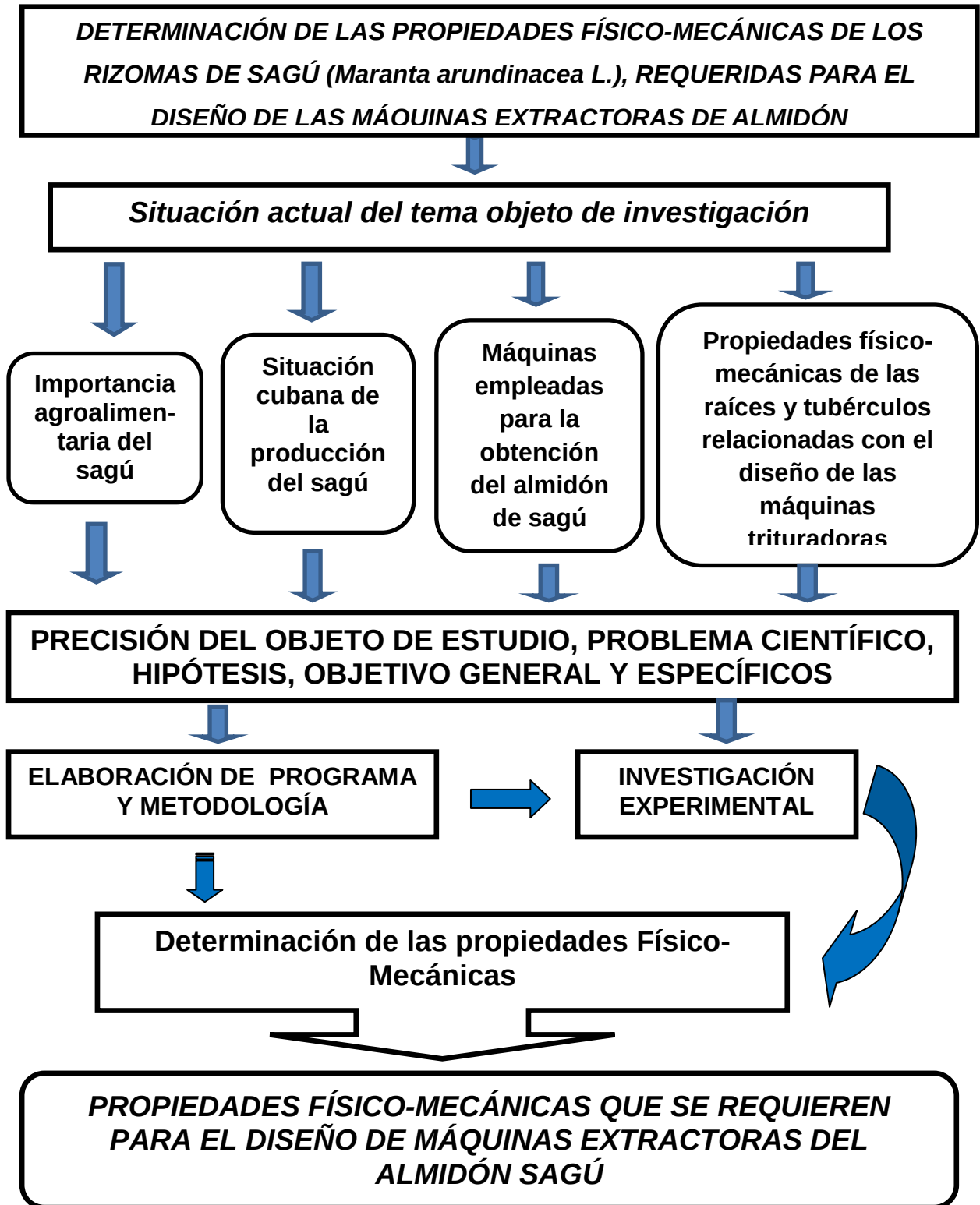
Al tomarse en cuenta la definición del objeto de investigación y el problema científico a investigar, **el objetivo general** del presente trabajo consiste, en: Determinar las propiedades físico-mecánicas de los rizomas de Sagú (*Maranta arundinacea* L.)

requeridas para el diseño de las máquinas extractoras de almidón que basan su principio de funcionamiento en el triturado previo, mezclado y clasificación secundaria.

Para cumplimentar el objetivo propuesto y alcanzar los resultados esperados se definen los siguientes **objetivos específicos**:

1. Caracterizar los rizomas del Sagú;
2. Determinar experimentalmente las propiedades físicas de los rizomas de Sagú que definen el cálculo y dimensionamiento de los órganos de trabajo de las máquinas extractoras de almidón;
3. Determinar experimentalmente las propiedades mecánicas de los rizomas de Sagú que intervienen en el diseño de los órganos de trabajo de las máquinas extractoras de almidón.

Esquema lógico de la Investigación.



CAPÍTULO I

SITUACIÓN ACTUAL DEL TEMA OBJETO DE INVESTIGACIÓN

I. Situación actual del tema objeto de investigación

1.1 Importancia agroalimentaria del Sagú

Sagú (*Maranta arundinacea* L.) es una planta (Figura. 1.1), de la familia Marantaceae reconocida como manifestación de la biodiversidad silvestre y cultivada en el trópico (Valdés *et al.*, 2010b).



Figura. 1.1. Plantación de Sagú.

También se le conoce como Platanillo de ciénaga o río; Sagú cimarrón, Aru-Aru (comida de comida), Arrowroot (raíz de flecha), Araruta, Envers Blanc; Dictame; y Pfeilwurz, según el país o región de cultivo (Montaldo, 1991). Incluso en un mismo país puede adoptar varios nombres, en Venezuela se conoce como Guate, Guapo, Sulú, Bordoncillo, Caramaco, Yuquilla; en Puerto Rico adopta los nombres de Amaranta, Maranta, Pitilén, Yuquilla; en Costa Rica se conoce como Sagú o Bribri; y en Colombia Jua-Juá y Chocó. Siendo una planta nativa de Sudamérica, aunque se cultiva también en Puerto Rico, Colombia, la Florida, las Antillas, en América tropical y en los trópicos del viejo Mundo (Roig, 2012).

Según Patiño (Patiño, 1964), esta especie se propagó desde las riberas del río Orinoco, tanto de las planicies como de la parte alta, además, no descarta algunos sectores de serranía venezolana, de ahí el nombre de Guapo que está asociado a un afluente de este río. Actualmente se distribuye en las zonas tropicales y subtropicales de todo el mundo con una clara concentración Neotropical (Figura.1.2).

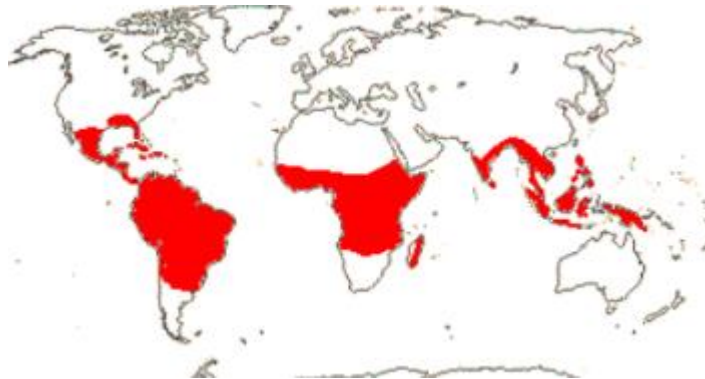


Figura.1.2. Zonas de cultivo del Sagú (León, 1987b).

La producción mundial del Sagú realmente es pequeña, es por ello se encuentran pocas estadísticas de la misma. Tradicionalmente se reconoce a la isla: de San Vicente y Las Granadinas (Antillas menores) como el mayor productor de almidón, alcanzando cifras record de 7 500 t en el año 1964. Posteriormente, con un cambio en la política por parte del Reino Unido respecto a la caña de azúcar, el Sagú ya no pudo ser competitivo con esta, por lo que su producción disminuyó considerablemente (Montaldo, 1991).

Sobrepasada esta etapa la producción promedio alcanzó las 230,2 t, aunque enfrentó periodos de decrecimiento, producto del surgimiento de sustitutos para el almidón y debido al crecimiento de la producción bananera, enfrentando dos etapas

críticas a finales de los años 80 y principios de los 90 del pasado siglo, donde se experimentó una reducción en la producción (65 a 128 t), según datos del IICA (1995). Actualmente el Ministerio de la Agricultura de ese país está incentivando a los productores a elevar los volúmenes de producción del Sagú debido a un notable incremento de la demanda de almidón en el ámbito mundial proveniente de la industria farmacéutica y la electrónica (API, 20).

Se reconoce, además, a la Isla de Barbados y a Brasil como otros de los mayores productores en el ámbito mundial.

El almidón de Sagú se consume prácticamente en todas las latitudes del ámbito mundial, no obstante, se ha identificado a los Estados Unidos como uno de los mayores consumidores del mismo, pues según datos del Ministerio de la Agricultura de San Vicente y las Granadinas, este país le ha demandado 80 t de almidón para el año 2014, las cuales estarán destinadas a la industria farmacéutica (API, 20).

Los precios de venta del almidón de Sagú han experimentado un alza con respecto al año 2013, pues se han elevado de 2 300 a 2 500 USD por cada t de Sagú, según cifras del Ministerio de la Agricultura de San Vicente y Las Granadinas (API, 20).

Este cultivo forma parte de las especies menores de raíces y tubérculo de consumo regional y mundial, es una herencia de los aborígenes pues ha servido de alimento a muchas familias durante siglos por su alto valor alimenticio. Al ser un almidón proporciona calorías esenciales (1 567 calorías/kg consumido) y es rico en carbohidratos lo que constituye su elemento nutritivo fundamental, pues aporta

grasa, calcio hierro, fósforo, potasio, sodio y en menor grado proteínas, así como vitaminas (Valdés *et al.*, 2010c; Roig, 2012) ;. Sus componentes se muestran en la tabla 1.

El Sagú se propaga por rizomas (tallos subterráneos) cilíndricos, tuberosos y carnosos tradicionalmente utilizados como fuente para alimentación de humanos y animales (Valdés *et al.*, 2010b), fundamentalmente para la fabricación de harina, almidón, y afrecho.

Tabla 1.1. Componentes del Sagú (Roig, 2012).

Composición	Porcentaje %
Almidón	27,07
Fibra	2,81
Grasa	0,20
Albúmina	1,56
azucares, gomas ,etc.	4,10
Cenizas	1,23
Agua	62,96

Los rizomas de esta planta contienen una gran cantidad de féculas, al constituir un alimento muy sano, nutritivo y agradable, propio para la alimentación de niños pequeños después de la etapa de lactancia, de enfermos convalecientes, ancianos y personas con problemas gástricos.

Según indicaciones de la (FAO, 2014), el almidón extraído de la planta tiene características especiales de funcionalidad y se usa en la preparación de alimentos. El almidón extraído de los rizomas del Sagú constituye un excelente sustituto de aditivos alimentarios en la producción de purés de frutas y vegetales, pues se

disuelven sin formar grumos y proporcionan una viscosidad superior a la del almidón de arroz u otros sucedáneos; como sustituto de una parte del Agar en los medios de cultivo in Vitro, en los que acelera el desarrollo de las plántulas (Fernández, 1999); en la repostería para elaborar dulces finos, galletas, panes, y harina para empanizar; así como, en la producción de embutidos como jamón y salchichas. También se puede incorporar a la mayonesa en lugar del carboxilme tilcelulosa, en la pasta de guayaba como sustituto de la pectina, y en el helado sustituyendo almidón (Milián *et al.*, 2013).

De igual forma para la alimentación animal el Sagú tiene gran importancia pues investigaciones realizadas (Montaldo, 1991), evidencian que sus rizomas son una rica fuente de proteínas y energía cuando se añade a la dieta de los mismos (Tabla 1.2), esto ha propiciado que los residuos sólidos que se obtienen en el proceso de molido se utilicen como componente en las formulaciones de pienso animal.

Tabla 1.2. Valores proteicos y energéticos del Sagú como alimento animal.

	Animal	Unidad	Base Seca
Proteína	Bovinos	%	0,6
	Caprinos	%	2,0
	Equinos	%	2,0
	Ovinos	%	2,0
Energía	Bovinos	Mcal / Kg	2,81
	Ovinos	Mcal / Kg	3,68
	Porcinos	Kcal / Kg	3695
	Bovinos	%	65,7
	Ovinos	%	81,3
	Porcinos	%	83,8

Por sus propiedades físicas, químicas y orgánicas se le atribuyen efectos medicinales para el sistema digestivo, reconocidos como cicatrizantes, antidiarreicos y emolientes, por lo que es considerado como ayuda durante el tratamiento de trastornos intestinales. Dicha planta se empleaba antiguamente por los aborígenes de República Dominicana en la cura de las heridas producidas por flechas envenenadas, en estos casos usaban el rizoma, el cual machacaban hasta formar una papilla que aplicaban a la herida. De este uso dado por los indios es que se deriva el nombre inglés de la planta, el arrow root (raíz de flecha). Los nativos de las Antillas también lo usaban como antídoto en el envenenamiento producido por el manzanillo, así como, para aliviar las picadas de avispas y hasta en la cura de la gangrena (Roig, 2012).

La utilidad de este cultivo se ha extendido hasta la producción de etanol, pues investigadores como (Erdman y Erdman, 1984), basados en el concepto de la biorefinería introdujeron los componentes del ensilado de la raíz y biomasa aérea del Sagú como un sustrato natural para la producción de etanol.

Estudios más recientes realizados por el autor, en la Universidad Central de Las Villas demostraron que el agua residual del proceso de obtención del almidón de Sagú presenta estimuladores del crecimiento como el azotobacter y el hongo trichoderma, recomendándose su uso en el riego de cultivos, la lombricultura y alimentación porcina.

1.2 Situación cubana de la producción del Sagú

El cultivo del Sagú se reporta en Cuba desde hace ocho milenios atrás, según estudios arqueológicos desarrollados por (Pagán, 2009), donde se reportó la presencia de restos de almidones en fragmentos de burén encontrados en la Laguna de Limones, provincia de Guantánamo. Por tal motivo se le considera una especie de larga tradición en la alimentación de los habitantes de esta Isla.

A lo largo de la historia se han encontrado múltiples evidencias de su utilización en la alimentación humana, además, como medicina. Mora (Mora, 1827), hace referencia al Marqués de San Felipe como uno de los mayores productores de dicha planta en la Cuba de esa época. También reseñó que la señora Condesa de Casa-Flores llevó desde La Habana hacia España una cantidad no precisada de almidón de Sagú para el tratamiento a enfermos. Durante el mismo, se les suministró a partir del 9 de Septiembre de 1817 el almidón a 21 niños recién nacidos.

A pesar de las bondades de esta planta, en Cuba nunca ha ocupado un lugar notable entre los cultivos más explotados, pues según relata Álvaro Reynoso (Reynoso, 1867) desde esta época este cultivo se plantaba principalmente en la región Oriental y en Camagüey, por lo general en pequeñas áreas dentro de los grandes cafetales, o en las guardarrayas de los campos de caña, pues la fécula extraída de las yuquillas se destinaba únicamente al alimento de los niños pequeños. En la actualidad tampoco es muy frecuente encontrar grandes plantaciones, solo producciones

aisladas, en distintos territorios del país, donde se incluyen las provincias centrales (Figura. 1.3).



Figura. 1.3. Zonas de cultivo del Sagú en Cuba. Elaboración propia.

Desde el triunfo de los primeros años de la Revolución los principales dirigentes de la nueva nación cubana comienzan a mostrar interés en el cultivo de esta planta, ejemplo de esto es el discurso pronunciado por el Comandante Fidel Castro Ruz, en el acto de graduación de doscientos campesinos que estudiaban inseminación artificial, en la finca el Chino, La Habana, el 12 de diciembre de 1961. En el mismo propone realizar un experimento con tres tipos de cultivos que son: Chufas, Alubia asturiana y el Sagú, destacando de forma promisoría desde aquella época la importancia de este último como alimento para los niños y ancianos, valorando la posibilidad de diseminarlo en todo el país (Castro, 1961).

No obstante por mucho que los subprogramas de la Agricultura Urbana han trabajado en el rescate de estas especies menores se ha avanzado muy poco, por lo que se debe seguir aunando esfuerzos para lograr grandes plantaciones y crear las condiciones para producir el almidón que necesita la industria alimentaria, dado el creciente costo de la harina de maíz (maicena) y la de trigo (llamada castilla), las cuales pueden sustituirse total o parcialmente en dependencia del tipo de producto, contribuyendo de esta forma al ahorro de divisas (Labañino, 2014).

Actualmente siguen siendo las provincias orientales las de mayor tradición en su producción y consumo, pues los rizomas del Sagú se comercializan en los mercados estatales y campesinos, el precio oficial de comercialización oscila entre los 3,50 CUP/kg. Este cultivo también ha tomado auge en otras provincias pues se ha incrementado su producción extensiva en varias localidades de la región central cubana, ejemplo de estas son los poblados de Cabaiguán, Cruces y Cifuentes, de las provincias Santi Spíritus, Cienfuegos y Villa Clara, respectivamente.

De igual forma se desarrollan pequeñas plantaciones en áreas de centros de investigaciones cubanos como son el caso del Instituto Nacional de Investigaciones Fundamentales de Agricultura Tropical (INIFAT) en La Habana, el Instituto Nacional de Investigaciones de Viandas Tropicales (INIVIT) en Villa Clara, y la Estación Experimental Álvaro Barba Machado de la Universidad Central de Las Villas, las mismas utilizan fundamentalmente como parcelas experimentales, o se destinan al

mantenimiento de los bancos de germoplasmas de dichos centros (Milián *et al.*, 2010; Rodríguez *et al.*, 2011).

Resultados de investigaciones realizadas en el INIFAT revelan que en condiciones de producción de bajos insumos se puede alcanzar un rendimiento promedio de rizomas por planta hasta de 0,0003 t, y los rendimientos por área de 21 t/ha. Por cada 0,046 t de rizomas que se procesen se obtienen aproximadamente 0,0069 t de harina (Fernández, 1999). Reportes de los principales productores del municipio de Cifuentes provincia de Villa Clara Cuba (Fernández y Fernández, 2013), muestran rendimientos promedios de 11,5 t/ha, inferiores a los alcanzados en las parcelas experimentales del INIFAT, de igual forma la producción de harina fue inferior, pues por cada 0,046 t de rizomas procesados se alcanzan aproximadamente 0,0055 t de harina.

La harina de almidón de Sagú va alcanzando gran aceptación dentro de la población de la región central del país, pues el mayor por ciento de la producción se emplea como espesante durante la producción de helados, o como maicena para la elaboración de natillas o alimentos para enfermos y niños pequeños.

Datos no oficiales muestran que en la región central de Cuba el precio en el mercado informal de 1 kg de esta harina es de 55 CUP, el mismo no se comercializa en los mercados oficiales donde se expenden productos provenientes del sector agropecuario.

En gran medida la producción de harina del almidón de Sagú en Cuba se ha visto frenada entre otros, por lo laborioso que resulta su obtención, pues de forma manual es un trabajo muy pesado y lento, además el proceso mecanizado depende de la existencia de un grupo de máquinas especializadas y costosas.

1.3 Máquinas empleadas para la obtención del almidón del Sagú

Las máquinas a emplear durante la obtención del almidón del Sagú en la mayoría de los países que se dedican a su producción en gran escala, dependen de las operaciones a desarrollar durante el proceso de extracción (Figura. 1.4).



Figura. 1.4. Operación mecanizada desarrollada para el procesamiento de Sagú (Malinis y Pacardo, 2012).

El proceso más elemental parte de un lavado inicial de los tubérculos, así como la eliminación de la membrana externa, posteriormente se pasa a la fragmentación o

granulación de los mismos hasta obtener el jugo y la masa que será finalmente sometida al cribado, hasta obtener un tamaño de partícula determinado. Este material finalmente será sometido al secado para la obtención del almidón. En alguno de los casos se somete a un molinado final para garantizar una determinada granulometría de la harina de almidón de Sagú.

Para el lavado mecánico de los rizomas y la eliminación del tejido exterior se han desarrollado varios prototipos de máquinas que en la mayoría de los casos tienen una disposición horizontal del tabor de lavado, el cual hace girar los rizomas ejerciendo una fuerza centrífuga producto de su rotación, además de la acción conjunta del agua. Estas lavadoras permiten el proceso de carga y descargas semi-continuas. Las mismas poseen una gran capacidad de lavado. Ejemplo de estas son los prototipos desarrollados por el Centro de Investigaciones CIAT (Figura. 1.5a) y la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuarias “Corpoica” (Figura. 1.5b) (Rodríguez *et al.*, 2003).



Figura. 1.5. Máquinas lavadoras de rizomas, tubérculos, y raíces tuberosas. a) Lavadora mecánica desarrollado por el CIAT; b) Lavadora desarrollada por Corpoica; c) Lavadora empleada en la industria del Sagú en Filipinas.

También, existen otros prototipos de lavadoras mecánicas que actúan bajo el mismo principio de centrifugado producto de la acción de un disco que rota verticalmente (Figura. 1.5c), las mismas poseen mejor capacidad de lavado, además, de presentar mayor dificultad para el desprendimiento de las partículas adheridas a los rizomas.

Las máquinas empleadas en la fragmentación o reducción de los rizomas se basan en diferentes principios de funcionamiento, en algunos de los casos se han empleado las máquinas utilizadas en la producción industrial de alimentos (Figura. 1.6a).



Figura. 1.6. Máquina industrial empleada en la fragmentación de los rizomas del Sagú (Valdés *et al.*, 2010a).

Las mismas someten a los tubérculos a un proceso de corte inicial y posterior molinado para reducir el tamaño de las partículas, lo cual facilita la posterior extracción del jugo y masa empleada en la obtención del almidón (Valdés *et al.*, 2010a). Las mismas tienen como desventaja la baja productividad del proceso, dada

poca capacidad de procesamiento de dichas máquinas, adecuándose más para cuando los volúmenes de producción son bajos.

El rayado es otro de los principios de funcionamiento muy utilizado por estas máquinas, durante el mismo, el jugo y la masa se extraen al hacer friccionar los rizomas contra una superficie rugosa que los va erosionando, sobre este principio se basan las técnicas manuales de obtención del almidón de Sagú. Se han desarrollado gran cantidad máquinas de este tipo, que van desde máquinas rusticas accionadas manualmente (Figura. 1.7a), hasta máquinas accionadas por motores eléctricos o de combustión interna (Figura. 1.7 b, c).

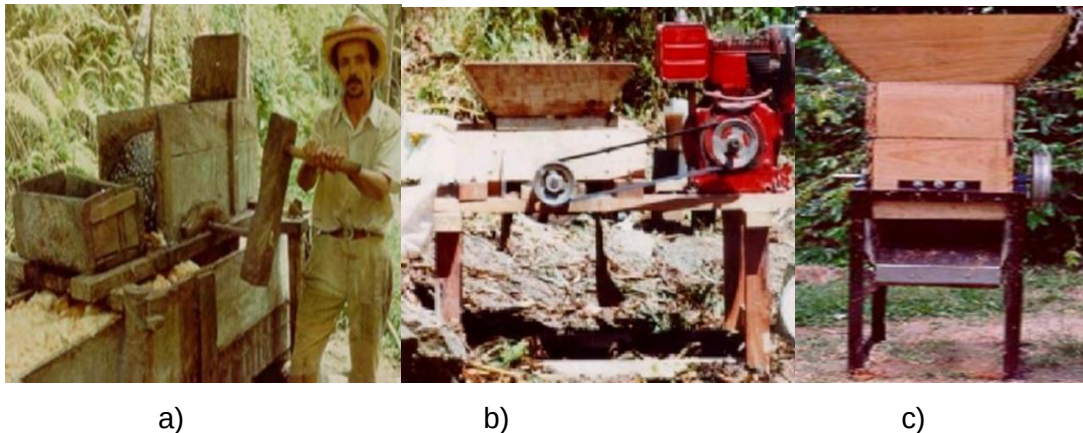


Figura. 1.7. Máquinas empleadas en la fragmentación de los rizomas del Sagú mediante el rayado. a) Rayadora manual de manivela, b) Rayadora semirustica accionada por motor de combustión interna; c) Rayadora mecánica accionada por motor eléctrico.

Las máquinas más utilizadas en la fragmentación de los rizomas son las que basan su principio de funcionamiento en la aplicación de cargas de impacto sobre los

mismos, destruyen su estructura y lo fragmentan hasta alcanzar un tamaño de partículas determinado. En este caso lo más común es utilizar órganos de trabajo de tipo martillos, dispuestos en secciones o baterías. Estas máquinas pueden estar accionadas por un motor eléctrico (Figura. 1.8a), o por motores de combustión interna (Fig. 1.8b).

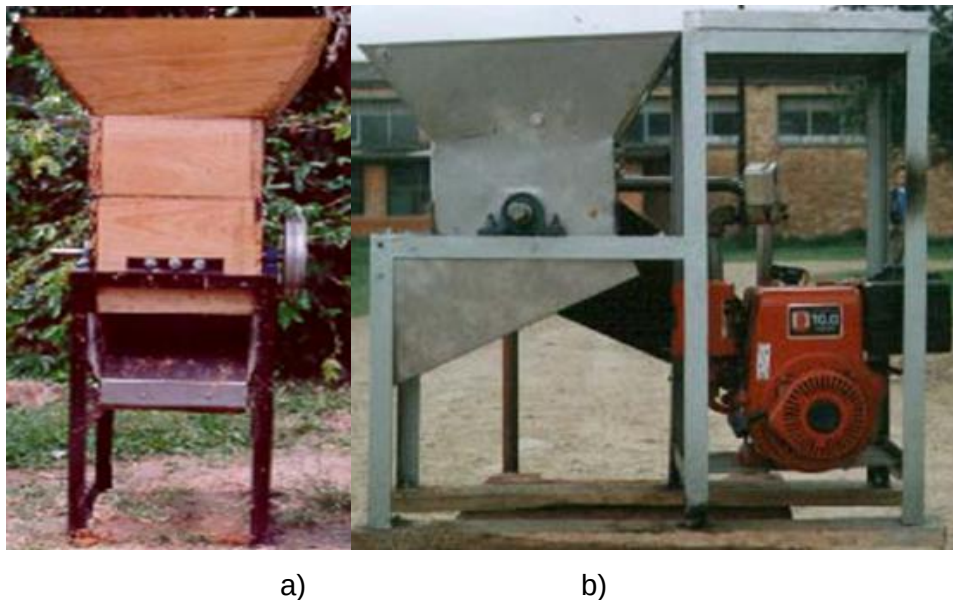


Figura. 1.8. Máquinas para el triturado de los rizomas de Sagú. a) Accionamiento eléctrico; b) Motor de combustión interna.

En Cuba el desarrollo de máquinas para la obtención del almidón del Sagú se ha visto muy limitado, lo cual ha estado condicionado al propio desarrollo que ha tenido el cultivo, pues como se ha evidenciado en los epígrafes anteriores este cultivo en mucho de los casos ha tenido el carácter de cultivo que crece marginalmente dentro de los cafetales y guardarrayas de campos de caña.

Actualmente y a saber, en Cuba el sistema mecanizado para la obtención del almidón de Sagú más completo se encuentra en la Cooperativa de Crédito y Servicios “Filiberto González Mújica” perteneciente a la comunidad “Wilfredo Pagés”, del municipio Cifuentes, provincia Villa Clara, específicamente en la Finca Integral “El Mingo”. El mismo fue desarrollado en el año 2008, y sigue un Diagrama de flujo para el proceso de extracción del almidón de Sagú (Figura. 1.9), muy similar a los empleados en el ámbito internacional. El mismo comprende un proceso inicial o primario de lavado y separación de la membrana del rizoma del Sagú, para lo cual se emplea una máquina lavadora, posteriormente estos rizomas son triturados y reducidos a pequeñas partículas (Fernández y Fernández, 2013).

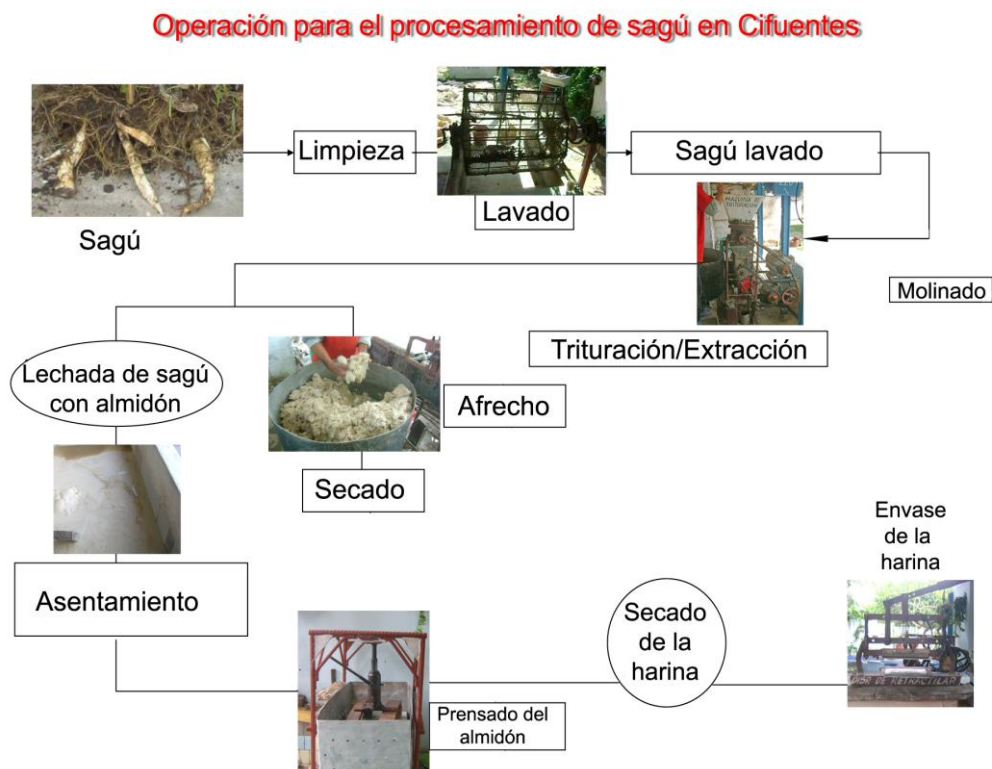


Figura. 1.9. Diagrama de flujo del proceso de extracción del almidón de Sagú. Finca “El Mingo”, Villa Clara, Cuba.

El proceso inicial de lavado y separación de la membrana externa del rizoma del Sagú se realizó con una máquina conformada por un rotor dispuesto horizontalmente (Figura. 1.10), en el cual se introducen los rizomas que son sometidos a un proceso de rotación para la extracción de la membrana externa. En la parte inferior de la máquina se coloca un recipiente con agua para el lavado.



Figura. 1.10 Máquina para el lavado y separación de la membrana externa del rizoma del Sagú.

En un proceso secundario se realiza la extracción del almidón para lo cual se emplea un máquina integral (Figura. 1.11), capaz de realizar el proceso de trituración, tamizado, filtrado, y decantación.

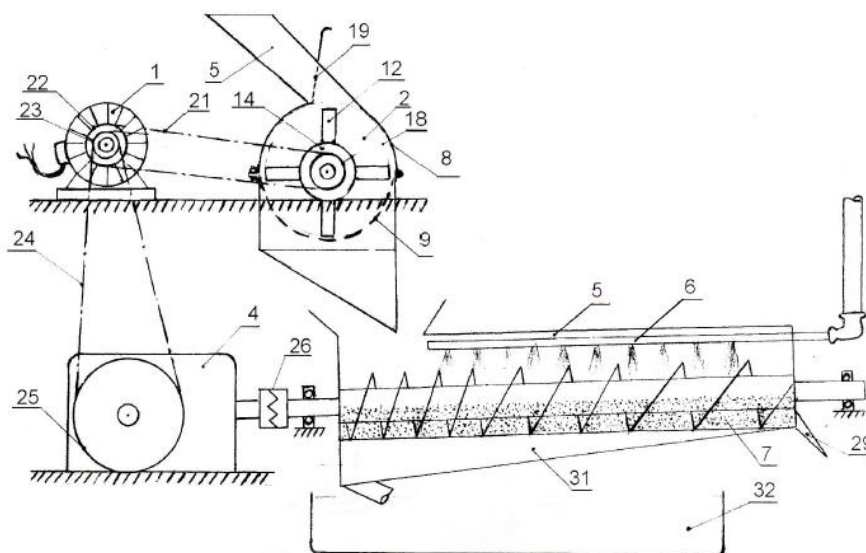


Figura. 1.11. Máquina para la obtención del almidón del Sagú.

La trituración de los rizomas se realiza con un molino de martillos (Fig. 1.12) y reducidos a un tamaño de 0,015 m. El jugo y la masa triturada mediante el conducto de salida del molino de martillo es vertida en un transportador helicoidal (Fig. 1.13), el cual las comprime contra el medio de filtrado que se encuentra en el fondo del transportador helicoidal, propiciando el proceso de colado pues la masa y el jugo se mezclan con agua que se le suministrada a presión durante todo el proceso por la tubería de agua.



Figura. 1.11. Molino de martillos para la trituración de los rizomas de Sagú.

La maicena que es extraída de la masa triturada se obtiene diluida en agua, por lo que se somete a un proceso de decantación, durante un tiempo de 2,5 a 3 h, posterior a este tiempo se extrae el agua del depósito, quedando en el fondo la maicena.

Los residuos sólidos se vierten por el conducto de salida al exterior, los cuales son recogidos para el riego de plantas, lombricultura y la alimentación animal.

El secado final se realiza mediante la exposición al Sol por un periodo de tres días. Concluido este se pasa nuevamente por el molino de trituración para proporcionar el tamaño de partícula o granulometría requerida para el consumo humano (0,0025 m). Se tiene referencia de otra máquina desarrollada en el municipio de Cabaiguán provincia de Santi Spíritus, la cual es empleada para la trituración de los rizomas mediante el principio del rayado (Figura.1.12). En este caso el resto del proceso de obtención del almidón del Sagú se hace de forma manual (Pérez, 2013).



Figura. 1.12. Máquina de rayado de Cabaiguán.

La totalidad de las máquinas que se han desarrollado en Cuba se han diseñado siguiendo conocimientos que se han adquirido empíricamente del proceso, empleando órganos de trabajo, mecanismos, partes y piezas disponible de máquinas

que un momento determinado se desarrollaron con otros fines, sin un sustento científico que permita la definición de parámetros óptimos para su explotación garantizando la máxima racionalidad energética, así como la calidad de la labor. La mayoría de los órganos de trabajo se encuentran sobredimensionados causando un sobre consumo de energía, lo cual hace evidente la necesidad de determinar los parámetros de diseño óptimos de dichos órganos.

1.4 Propiedades físico-mecánicas de las raíces, rizomas y tubérculos relacionadas con el diseño de las máquinas trituradoras

El estudio y determinación de las propiedades físico-mecánicas de los productos agrícolas tiene como objetivo caracterizar los mismos, así como, determinar las leyes que rigen su comportamiento físico-mecánico, las cuales son necesarias para aplicar los métodos y tecnologías más convenientes en su tratamiento (Iglesias, 1992).

El diseño de los órganos de trabajo de las máquinas agrícolas presupone el conocimiento previo de las características del material a manipular, ya sean: plantas, cosecha, y fertilizantes, entre otros. Dichas características se expresan a través de las propiedades físico-mecánicas, pues durante el trabajo con la maquinaria estas se van transformando o influyendo notablemente en el proceso tecnológico de trabajo de las máquinas y de sus órganos de trabajo. Como es conocido en el campo de la ingeniería agrícola, estos elementos constituyen los datos bases para la creación de nuevos órganos de trabajo o mejora de los existentes, creación de novedosa

tecnologías para la correcta conservación de los productos agrícolas y su manejo, y para el uso racional de la maquinaria.

1.4.1 Propiedades físicas

Tanto para el cálculo, la selección de los órganos de trabajo de las máquinas agrícolas, y el conocimiento de la respuesta de estos materiales una vez que son manipulados, se hace imprescindible determinar las propiedades físicas de dichos materiales, pues estas en muchos de los casos caracterizan el tamaño y la forma de los mismos, aspectos que condicionan las dimensiones y características de los órganos de trabajo (Iglesias, 1992; José, 2008).

Según (Tscheuschner, 1987), las propiedades físicas de las raíces, tubérculos y rizomas, relacionadas con el dimensionamiento de órganos de trabajo, que mayor importancia tienen son: masa, longitud, diámetros, densidad y porosidad.

Masa, es una propiedad que está relacionada con dimensionamiento de órganos de recepción y procesamiento, entre otros, pues la misma define la capacidad de dichos órganos. Según (Iglesias, 1992), la exactitud de las pesadas debe ser del 1%.

Esta propiedad está estrechamente relacionada con otras que caracterizan el material, como son la humedad, la densidad específica y aparente, y la porosidad (Buitrago *et al.*, 2004).

Según resultados de (Valdés *et al.*, 2010b), la masa de los rizomas de Sagú alcanza valores máximos de $0,14 \pm 0,0006$ kg.

Longitud, esta propiedad caracteriza las dimensiones de los materiales agrícolas,

pues está muy relacionada con el dimensionamiento de órganos de clasificación, tales como los tamices y zarandas. De igual forma definen la zona de acción de los órganos de trabajo para el procesamiento de los materiales agrícolas, como es el caso de la zona de impacto de los martillos en molinos, de rallado de las máquinas ralladoras, así como de acción de las cuchillas en el caso de máquinas picadoras.

Según (León, 1987a), los rizomas de Sagú pueden alcanzar longitudes hasta de 0,20 m. Investigaciones posteriores de (Valdés *et al.*, 2010b), reportan longitudes promedios de $0,19 \pm 0,2$ m, aunque resultados de (Ciarfella *et al.*, 2013), encontraron diámetros de $0,11 \pm 0,218$ m.

Diámetro, es otra propiedad que está muy relacionada con los órganos de clasificación y selección de estos materiales, así como, con su resistencia mecánica, definiendo el área de la sección transversal de los mimos. Para el caso de las raíces, rizomas y tubérculos, que no poseen un diámetro uniforme, se han definido para su caracterización dos variables: diámetro ecuatorial y diámetro polar. Este caso aplica para producto como la papa, malanga, boniato, donde los diámetros de sus extremos difieren el diámetro ecuatorial, sin embargo son semejantes entre ellos (Iglesias, 1992; Librán y Iglesias, 1999). Para el caso de rizomas como el Sagú, donde sus diámetros más extremos poseen diferencias significativas, se emplean las variables diámetro distal, diámetro proximal, y diámetro ecuatorial.

Resultados obtenidos por (Valdés *et al.*, 2010b), mostraron que los rizomas del Sagú alcanzan diámetros ecuatoriales de $0,0285 \pm 0,0028$ m, diámetros proximales de

0,00290 $\pm$ 0,0044 m, y diámetros distales de 0,00138 $\pm$ 0,0049 m. Por otra parte (Ciarfella *et al.*, 2013), plantean que el diámetro máximo alcanzable por los rizomas de Sagú oscilan de 0,0029 y 0,0063 m.

Densidad. Importante propiedad pues relaciona masa de un material con el volumen, ya sea su volumen propio o el del recipiente que lo contiene. Para el diseño de máquinas y elementos de máquinas es de vital importancia pues define las dimensiones de las tolvas, elementos transportadores, capacidad de almacenamiento y transportación.

Se emplean dos tipos de definiciones de la densidad, la aparente y la real (Buitrago *et al.*, 2004). La primera se refiere al volumen que ocupa una determinada masa de material, y la segunda al volumen unitario propio del material.

No se han reportados estudios en los cuáles se haya investigado la densidad de los rizomas de Sagú.

Porosidad. Esta propiedad está dirigida a caracterizar los espacios vacíos durante el almacenamiento y transportación de los materiales agrícolas (Iglesias, 1992). La misma está definida por la relación entre la densidad aparente y la específica (Buitrago *et al.*, 2004).

Según Tscheuschner (1987); Iglesias (1992); Barreriro y Ruiz (1996); Librán y Iglesias (1998); las propiedades mecánicas de los materiales agrícolas que mayor importancia o relación con el diseño de los órganos de trabajo de las máquinas agrícolas son las que están relacionadas con la fricción y la rodadura de los

materiales, así como las que definen su resistencia a las diferentes cargas o solicitudes.

Existe otro grupo de propiedades físicas que caracterizan el estado del material o producto a investigar, las mismas son: humedad (w); materia seca (Mw); % de cáscara, % de pulpa; relación pulpa/cáscara, % harina; % de residuo. Estas según (Tscheuschner, 1987), han sido ampliamente utilizadas para caracterizar los materiales agrícolas.

1.4.2. Propiedades mecánicas

Hay un grupo de propiedades mecánicas que definen las características friccionales de los materiales agrícolas, estas están íntimamente relacionadas con la fricción por deslizamiento o por rodadura (Tscheuschner, 1987).

Fricción. Esta es una importante propiedad que caracteriza resistencia al deslizamiento o la rodadura de los materiales sobre diferentes superficies. Según (Iglesias, 1992), esta propiedad se evalúa a partir de los siguientes indicadores: fricción estática y fricción dinámica. Los mismos son dependientes de la fuerza o presión normal que se ejerce sobre el cuerpo en deslizamiento.

En el primero de los casos la fuerza de fricción se mide en el instante que inicia el desplazamiento o deslizamiento del material sobre una determinada superficie. La segunda se determina durante el movimiento del material sobre la superficie.

Según el propio (Iglesias, 1992), la fricción en materiales agrícolas de origen vegetal no es estable y cambia por diversos factores, muchas veces no predecibles, es por

esto que se recomienda prestar especial interés a las condiciones de experimentación las cuales deben ser estables.

La humedad es un factor de gran incidencia de los resultados, pues ella condiciona la fricción de los productos agrícolas con las distintas superficies, por lo que se recomienda tenerla controlada en cada ensayo, así como el traslado de las muestras hacia el laboratorio se realice en un recipiente cerrado herméticamente.

Resistencia a la rodadura. Esta propiedad caracteriza la fricción que se opone a la rodadura de los materiales agrícolas sobre las superficies (Librán y Iglesias, 1999). Según resultados de estos autores el coeficiente de fricción por rodadura resulta menor que el coeficiente de fricción, ya sea estático o dinámico. Este mismo resultado se observó en tres superficies diferentes (acero, goma, madera). Su determinación posee gran importancia en el diseño de sistemas de limpieza, transporte, y selección de las máquinas agrícolas (Iglesias, 1992)

A saber, no se han reportado investigaciones encaminadas a determinar tanto la fricción por rodadura como la fricción por deslizamiento de los rizomas de Sagú.

Otro grupo importante de propiedades mecánicas de las plantas son las que están relacionadas con la resistencia mecánica a las distintas deformaciones, pues las mismas permiten hacer el pronóstico de cómo se van a deformar estos materiales ante la acción de los distintos órganos de trabajo.

Resistencia a la compresión. En función del grado de compresión, las muestras pueden ser destruidas total con una carga destructiva (Pd) o parcialmente con una

carga traumática (P_t), (Iglesias, 1992). A la destrucción parcial se le asocia con la destrucción leve del tejido (pequeñas abolladuras, rajaduras, arañazos). A una carga menor que (P_t) se le denomina permisible (P_p), deduciéndose entonces que la carga permisible será menor que la carga traumática, y esta a su vez será menor que la carga destructiva. Según (José, 2008), este ensayo ha sido ampliamente utilizado en hortalizas y frutas, lo cual puede estar dado por la mayor facilidad de su realización. La presencia de celdas de aire dentro de muchos de estos materiales agrícolas tiene un efecto significativo en los resultados.

Resistencia a la flexión. Esta prueba por lo general se realiza por el método de flexión sobre dos apoyos utilizando cargas estáticas (Iglesias, 1992), en función de determinar el nivel de esfuerzos que provocan la falla producto de la flexión. Según este mismo autor el largo de las muestras debe estar alrededor los 200 mm y la distancia entre centro de apoyos debe oscilar entre 5 a 10 mm. Sin embargo autores como (Ciro *et al.*, 2005) emplearon una distancia de 14 mm entre puntos, además, de utilizar los especímenes de banano en toda su dimensión, es decir no prepararon probetas a partir de los frutos cosechados.

1.5 Conclusiones parciales del capítulo

1. El Sagú tiene gran importancia Agroalimentaria debido a que ha servido de alimento durante siglos, pues tiene un alto valor nutritivo con disimiles usos en la Industria alimentaria y farmacéutica, entre otras.
2. La producción de Sagú en el ámbito mundial se concentra en las regiones tropicales, siendo las Islas de Trinidad y Tobago, San Vicente, Las Granadinas, y Filipinas las mayores productoras.
3. A pesar de que en Cuba el Sagú es un cultivo de tradición en la actualidad sus producciones se encuentran muy limitadas y se concentran solo en el sector privado.
4. Las máquinas empleadas para la obtención del almidón del Sagú en su gran mayoría se han desarrollado de forma empírica, sin tomar en cuenta las propiedades físico-mecánicas de sus rizomas.
5. Las propiedades físico-mecánicas de los rizomas de Sagú relacionadas con el diseño de los órganos de trabajo de las máquinas extractoras de almidón que basan su principio de funcionamiento en el triturado previo, mezclado y clasificación secundaria, son: longitud, diámetros; masa, densidad, porosidad, fricción durante la rodadura y el deslizamiento, y la resistencia mecánica a las distintas deformaciones.

6. Las propiedades físico-mecánicas del Sagú que están relacionadas con el diseño de las máquinas para la obtención del almidón en su mayoría no han sido investigadas, desconociéndose las mismas.

CAPÍTULO II
PROGRAMA Y METODOLOGÍA DE LAS INVESTIGACIONES
EXPERIMENTALES

II. PROGRAMA Y METODOLOGÍA DE LAS INVESTIGACIONES EXPERIMENTALES

2.1. Programa de las investigaciones experimentales

Las investigaciones experimentales comprendieron el acopio de las muestras de los rizomas de Sagú (*Maranta arundinacea* L) en las áreas productivas de la finca Integral "El Mingo" perteneciente a la Cooperativa de Crédito y Servicios "Filiberto González Mujica" ubicada en carretera a Sagua Km 16, Comunidad "Wilfredo Pagés", perteneciente al Municipio Cifuentes, Provincia Villa Clara.

Los rizomas cosechados fueron trasladados al laboratorio del grupo electrónico "FuellOil" del Municipio Cruces, Provincia Cienfuegos, donde se determinaron sus propiedades físicas. De igual forma se trasladó otro grupo de rizomas a los laboratorios del Departamento de Ingeniería Agrícola y de Mecánica de la Universidad Central de Las Villas donde se determinaron las propiedades mecánicas.

En la tabla 2.1, se muestra el programa de las investigaciones experimentales, donde se establecen el objeto de estudio, orden de ejecución, los aspectos analizados y el lugar de realización de cada tarea. Las mismas se realizaron en el período comprendido entre los años 2013 y 2014.

Tabla 2.1. Programa de las investigaciones experimentales

Tarea	Objeto de estudio	Aspectos a analizar	Lugar
1	Características de los rizomas de Sagú	• % Humedad • % Materia seca • % Cáscara • % Pulpa • Relación pulpa/cáscara • % Harina • %Residuos	Laboratorio de Suelos y Biofertilizantes del Centro de Investigaciones Agropecuarias de la Universidad Central de Las Villas.
2	Determinar experimentalmente las propiedades físicas de los rizomas de Sagú	• Longitud • Diámetro ecuatorial • Diámetro distal • Diámetro proximal • Masa • Densidad aparente • Densidad real • Porosidad	Laboratorio del grupo electrónico FuelOil, km 1 Municipio Cruces, Provincia Cienfuegos.
3	Determinar experimentalmente las propiedades mecánicas de los rizomas de Sagú	• Coeficiente de fricción estático • Coeficiente de fricción dinámico • Coeficiente de resistencia a la rodadura	Laboratorio del Departamento de Ingeniería Agrícola de la Universidad Central de Las Villas.
		• Resistencia a la compresión • Resistencia a la flexión	Laboratorio del Departamento de Mecánica de la Universidad Central de Las Villas.

2.2 Metodologías de las investigaciones experimentales

2.2.1 Características de los rizomas del Sagú

Para la determinación de la humedad; materia seca; % cáscara; % pulpa; % harina; % residuo, se siguieron los procedimientos establecidos en la norma cubana.

Humedad (w) y Materia seca (Mw). Se determinó por el método gravimétrico para lo cual inicialmente los rizomas de Sagú se limpiaron y cortaron en rebanadas pequeñas con un cuchillo. Posteriormente se pesaron en una balanza de precisión $\pm 0,1$ mg (Figura 2.1a), para conocer la masa húmeda (mh) de las muestras, las cuales finalmente se colocaron en un estufa a 60°C hasta alcanzar el peso constate en varias pesadas, registrándose este último como la masa seca de la muestra (ms).



a) b)
Figura 2.1. Medición del contenido de humedad. a) Balanza de precisión marca OHAUS (Modelo Ranger); b) Estufa.

La humedad y la materia seca se calcularon mediante las ecuaciones 2.1 y 2.2, respectivamente.

$$w = \left(\frac{mh - ms}{mh} \right) \cdot 100 \quad (2.1)$$

$$Mw = 100 - w \quad (2.2)$$

Donde: w, humedad de los rizomas, %;

mh, masa húmeda de los rizomas, g;

ms, masa seca de los rizomas, g;

Mw, materia seca, %.

Por ciento de cáscara y pulpa. Para la determinación de estas variables se registró la masa de la pulpa (*mp*), la cual se obtuvo a partir de la medición de la masa del rizoma sin cáscara o corteza. También se registró la masa de la cáscara (*mc*). Mediante las ecuaciones 2.3 y 2.4, se determinaron estas variables.

$$\% \text{ cascara} = \left(\frac{ms - mp}{ms} \right) \cdot 100 \quad (2.3)$$

$$\% \text{ pulpa} = \left(\frac{ms - mc}{ms} \right) \cdot 100 \quad (2.4)$$

Donde: *mp*, masa de la pulpa, g;

mc, masa de cáscara, g.

Conocidas estas dos variables se determinó la relación pulpa/cáscara, mediante la ecuación 2.5.

$$\text{Relación pulpa/cascara} = \frac{\% \text{ pulpa}}{\% \text{ cascara}} \quad (2.5)$$

% harina y residuo. Para la determinación de estas variables se sometió a las muestras secadas en la estufa a un proceso de molinado, a partir del cual se registró la masa de la harina (*mha*) y la masa de los residuos en los molinos (*mr*). Finalmente mediante las ecuaciones 2.6 y 2.7, se determinaron dichas variables.

$$\% \text{ Harina} = \left(\frac{ms - mc - mr}{ms} \right) \cdot 100 \quad (2.6)$$

$$\% \text{ Residuo} = \left(\frac{ms - mha}{ms} \right) \cdot 100 \quad (2.7)$$

Donde: *mr*, masa de los residuos del molino, g;

mha , masa de la harina, g.

2.2.2. Determinación experimental de las propiedades físicas de los rizomas del Sagú

En el caso particular de este estudio las propiedades físicas investigadas fueron: longitud del rizoma; diámetro ecuatorial; diámetro distal; diámetro proximal; masa del rizoma; densidad aparente, real y porosidad.

Preparación de las muestras. Como un paso previo a la determinación de las referidas propiedades se realizó un proceso de preparación de las muestras, consistente en la limpieza, marcado e identificación de las mismas (Figura 2.2).



Figura 2.2 Rizomas de Sagú

Para la determinación de la longitud; diámetro ecuatorial, distal y proximal, se siguieron los procedimientos descritos por (Iglesias, 1992).

Longitud del rizoma (L). La medición de esta variable se realizó con un pie de rey marca Mitutoyo de $250\text{ mm} \pm 0,05\text{ mm}$ de error, se midió desde el extremo distal hasta el extremo proximal del rizoma (Figura 2.3), según Iglesias (Iglesias, 1992).



Figura 2.3 Medición de la longitud del rizoma

Diámetro ecuatorial (De). Se midió con el pie de rey el diámetro de la parte central del rizoma (Figura 2.4).



Figura 2.4 Medición diámetro ecuatorial

Diámetro distal (Dd). Se midió el diámetro del extremo distal del rizoma con el pie de rey (Figura 2.5).



Figura 2.5 Medición del diámetro distal

Diámetro proximal (Dp). Se midió el extremo proximal del rizoma con el pie de rey (Figura 2.6)



Figura 2.6 Medición del diámetro proximal

Masa del rizoma (m). Se determinó en una balanza de precisión $\pm 0,1$ mg (Figura 2.7), marca OHAUS Modelo Scout Pro SPU 2001.

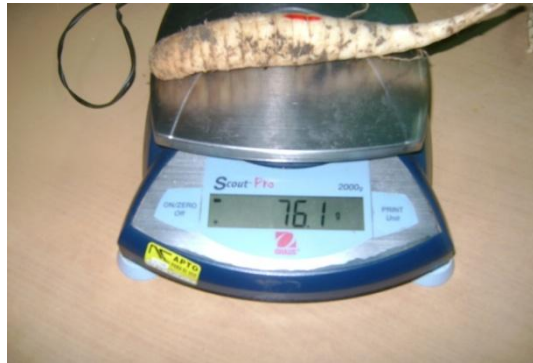


Figura 2.7 Determinación de la masa del rizoma.

Densidad aparente (γ_a). Para la determinación de esta propiedad se siguió la metodología empleada por (Buitrago *et al.*, 2004), a partir de la utilización de un recipiente metálico de 0,34 x 0,245 x 0,245 m en el cual se introdujeron al azar los rizomas, a los cuales posteriormente se les determinó su masa (Figura 2.8). La densidad aparente se determinará mediante la ecuación 2.8.



Figura 2.8 Medición de la densidad aparente.

$$\gamma_a = \frac{m_r}{V} \quad (2.8)$$

Donde: γ_a , densidad aparente, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$;

m_r , masa de los rizomas, kg;

V , volumen del recipiente, m^3 .

Densidad real (γ_r). Se determina introduciendo un rizoma de masa conocida en una probeta graduada con capacidad 500 ml ó 250 ml, acorde a las dimensiones del mismo (Figura 2.9). Una vez introducido este se registrará el volumen de agua desplazada, el cual es igual al volumen real del rizoma. Finalmente se empleará la ecuación 2.2, para su determinación. Los procedimientos empleados se correspondieron con los utilizados por (Buitrago *et al.*, 2004).



Figura 2.9 Medición de la densidad real

$$\gamma_r = \frac{m_r}{V_r} \quad (2.9)$$

Donde: γ_r , densidad real, $kg \cdot m^{-3}$;

m_r , masa de un rizoma, kg;

V_r , volumen real del rizoma, m^3 .

Porosidad. La porosidad se determinó según (Buitrago *et al.*, 2004), a partir de las relaciones entre las densidades como se muestra en la ecuación 2.3.

$$Porosidad = 1 - \left(\frac{\gamma_a}{\gamma_r} \right) \cdot 100 \quad (2.10)$$

2.2.3. Determinación experimental de las propiedades mecánicas de los rizomas del Sagú

Las propiedades mecánicas del Sagú que se determinaron están divididas en dos grandes grupos, las relacionadas con el contacto y deslizamiento relativo de los rizomas con la superficie de los órganos de trabajo empleados en su procesamiento, así como su rodadura, y las relacionadas con la resistencia a los distintos tipos de deformaciones.

2.2.3.1 Propiedades mecánicas relacionadas con la fricción, el contacto y la rodadura

Coefficiente de fricción estático: Se determinó siguiendo la metodología empleada por (Librán y Iglesias, 1999), la cual se basó en la utilización de un plano inclinado (Figura 2.10). Dicho plano permite variaciones de inclinación de la superficie de deslizamiento, y porta una escala que posibilita realizar lecturas del ángulo de inclinación.

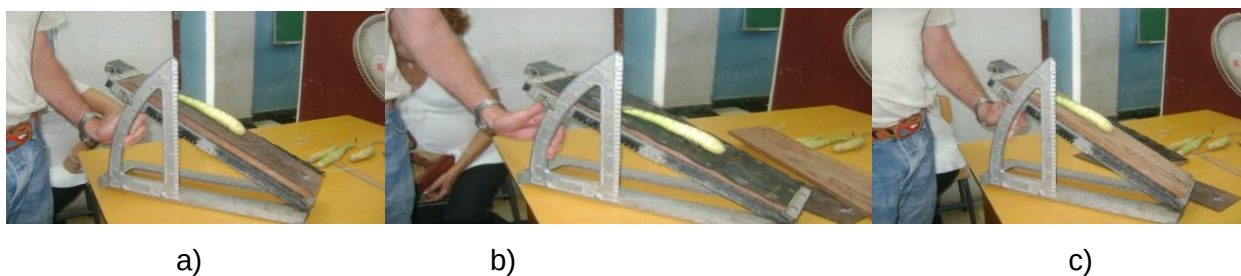


Figura 2.10. Plano inclinado. a) Superficie de acero; b) Superficie de goma; c) Superficie de madera

La fricción estática se determinó colocando longitudinalmente el rizoma sobre la superficie de deslizamiento, a la cual se le varió su inclinación hasta el punto en que cualquier aumento de la componente $m \cdot g \cdot \sin \theta$ provoque el deslizamiento del rizoma (Figura 2.10), el mismo estará en movimiento inminente, es decir:

$$f_{e\text{máx}} = \mu_e \cdot N \quad (2.11)$$

Donde: $f_{e\text{máx}}$, fuerza de rozamiento estática, N;

N , fuerza normal, N;

μ_e , coeficiente de fricción estático, adimensional.

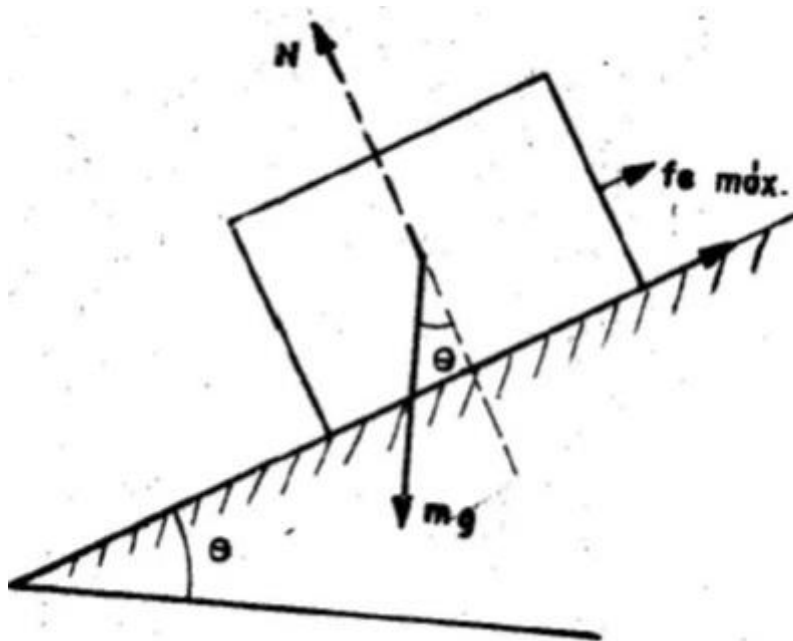


Figura 2.11. Diagrama de fuerzas que actúan sobre el plano inclinado (Moreno y Alum, 1982)

El sistema de ecuaciones emanado del diagrama de fuerzas quedaría, como:

$$\sum F_x = m \cdot g \cdot \sin(\theta) - f_e = 0 \quad (2.12)$$

$$\sum F_y = N - m \cdot g \cdot \cos(\theta) = 0 \quad (2.13)$$

En el caso del movimiento inminente de los rizomas la sumatoria de fuerzas en ambos ejes se iguala a cero, puesto que el cuerpo se encuentra en reposo, por lo que igualando las ecuaciones 2.12 y 2.13 el sistema de ecuaciones quedaría, como:

$$m \cdot g \cdot \sin(\theta) - f_s = N - m \cdot g \cdot \cos(\theta) \quad (2.14)$$

Finalmente haciendo los arreglos pertinentes, sustituyendo 2.11 en 2.14, y despejando μ_e , el mismo se determinará, cómo:

$$\mu_e = \tan(\theta) \quad (2.15)$$

Coefficiente de fricción dinámico: Se empleó el mismo método y equipamiento utilizado durante la determinación de la fricción estática, con la diferencia que en este caso se ejerció un impacto sobre la superficie de deslizamiento en función de lograr que los rizomas venzan las fuerzas de inercia que lo mantienen en equilibrio estático.

Coefficiente de resistencia a la rodadura: Se determinó colocando transversalmente el rizoma sobre el plano inclinado de forma tal que al variar la inclinación de la superficie el rizoma comience a rodar sobre la misma (Figura 2.12).



a) b) c)
Figura 2.12. Plano inclinado. a) Superficie de acero; b) Superficie de goma; c) Superficie de madera.

2.2.3.2 Propiedades mecánicas relacionadas con la resistencia a los distintos tipos de deformaciones

Resistencia a la compresión: Los ensayos a compresión se realizaron en la máquina Universal de ensayos CRITM de fabricación china de capacidad 100 kN. Para lo cual se colocaron los rizomas entre dos platos paralelos de metal (Fig. 2.13). El rizoma posteriormente fue sometido a compresión axial. La fuerza de compresión se afectó por el área de la sección transversal de los rizomas, de manera tal que se obtuvieron las tensiones de compresión. Las lecturas del anillo fueron registradas, así como el desplazamiento axial de la máquina. Posteriormente se graficó una curva esfuerzo-deformación.



Figura 2.13. Ensayo de resistencia a la compresión.

La fuerza de compresión aplicada se determinó con la ayuda de un anillo dinamométrico de capacidad máxima 4,9 KN. Los esfuerzos de compresión se determinaron, como:

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A} \quad (2.16)$$

Donde: σ_c , esfuerzos de compresión, Pa;

F_c , fuerza de compresión, N;

A , área original de la sección transversal de los tubérculos, m²;

Se asume el área de la sección transversal de los rizomas de Sagú como una circunferencia (Fig. 2.14).



Figura 2.14. Sección transversal del Sagú

Resistencia a la flexión: La misma se determinó en la máquina anteriormente descrita. En este caso se empleó un dispositivo que permite colocar el rizoma sobre dos puntos

de apoyos que están separados a una distancia de 0,12 m (Fig. 2.15). En la parte central se aplica una fuerza axial que provoca la flexión del rizoma hasta la falla.

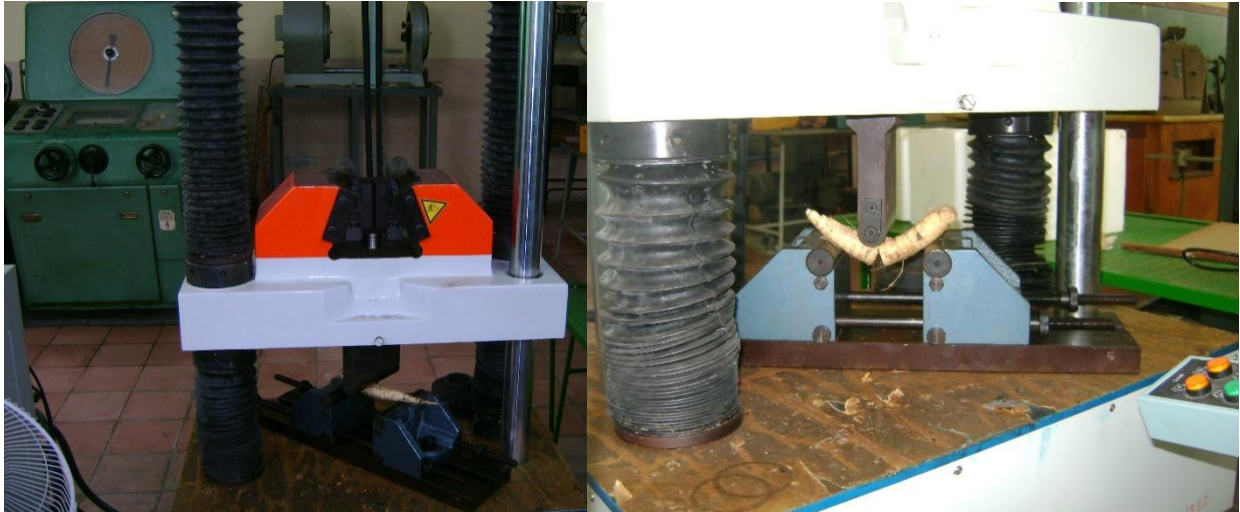


Figura 2.15. Ensayo de resistencia a la flexión

Los esfuerzos de flexión se determinaron, como:

$$\sigma_f = \frac{F_f}{A} \quad (2.17)$$

Donde: σ_f , esfuerzos de flexión, Pa;

F_f , fuerza que origina la flexión, N;

A , área original de la sección transversal de los tubérculos, m^2 ;

2.3 Metodología para el procesamiento estadístico de los resultados

Tamaño de la muestra: Fue calculado para cada propiedad objeto de estudio a partir de la ecuación (2.18), partiendo de la realizaron pre experimentos que permitieron establecer los criterios estadísticos en cada caso.

$$n = \frac{t^2 \cdot \sigma^2}{\Delta^2} \quad (2.18)$$

Donde: n, tamaño de la muestra;

t, criterio de Student;

σ ; desviación media cuadrática;

Δ , error permisible.

En todos los casos el cálculo se efectuó con un nivel de significación de 0,05 para un error de la media del 5%.

Procesamiento estadístico de los resultados: Los resultados experimentales fueron analizados con el software Stargraphics V. Para la caracterización de las variables objeto de estudio se determinaron los estadígrafos descriptivos, se realizaron además cálculos de probabilidad, y se graficaron los histogramas de frecuencia. Para la comparación entre las variables se recurrió a las comparaciones de medias. Finalmente para la búsqueda de relaciones entre variables se recurrió al análisis de regresión.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados de la determinación de las propiedades físicas que caracterizan los rizomas de Sagú

En la tabla 3.1, se muestran los resultados de las propiedades físicas que caracterizan los rizomas de Sagú, las mismas muestran que los rizomas investigados poseían un contenido de humedad del 82,14% de la masa total, con un 17,86% de materia seca, de la cual se puede alcanzar hasta un 80,4% de harina.

Tabla 3.1. Propiedades físicas que caracterizan los rizomas de Sagú.

Variable	UM	Valor
Humedad (w)	%	82,14
Materia seca (Mw)	%	17,86
Cáscara	%	5,4
Pulpa	%	94,6
Relación pulpa/ cáscara		17,51
Harina	%	80,4
Residuo	%	19,6

Los resultados demuestran (Tabla 3.1), que del 17,86% de materia seca que poseen los rizomas de Sagú, el 94,6% de este pertenece a la pulpa y el resto a la cáscara. De igual forma se corroboró que se puede aprovechar un 80,4% de la materia seca en harina. Estos resultados se corresponden con los obtenidos por Fernández (1999) y Fernández y Fernández (2013), donde se afirma que por cada 100 kg de rizomas de Sagú se pueden obtener entre 15 y 12 kg de almidón de Sagú.

Hay un 19,6% de residuos que se puede emplear en la alimentación animal, así como en la preparación de biofertilizantes.

3.2 Propiedades físicas de los rizomas de Sagú que definen el cálculo y dimensionamiento de los órganos de trabajo de las máquinas extractoras de almidón

Los resultados mostraron (Tabla 3.2), los principales estadígrafos de cada una de las propiedades físicas de los rizomas de Sagú investigadas. Los mismos reflejan los valores medios de las características dimensionales y de masa, así como los rangos y desviaciones de sus magnitudes.

Tabla 3.2. Estadígrafos de las propiedades físicas de los rizomas de Sagú empleadas en el diseño de órgano de trabajo de las máquinas extractoras de almidón.

Estadígrafo	L, m	De, m	Dd, m	Dp, m	m, kg	γ_r , Kg/m ³	γ_w , Kg/m ³	P, %
Cantidad	35	35	35	35	35	35	13	13
Media	0,17	0,025	0,0032	0,017	0,060	1 050,6	423,40	59,90
Moda	0,16		0,0035			1 040,0	414,14	
Varianza	0,00073	0,0000057	2,35E-7	0,00000742	0,000093	193,8	528,17	6,01
Desviación Estándar	0,027	0,00240	0,00048	0,00272528	0,00965	13,9	22,98	2,45
CV	15,764%	9,52827%	14,8217%	16,3%	16,04%	1,3%	5,4%	4,1%
e	0,0045	0,0004646	0,000082	0,00046	0,0016	2,3	6,37	0,68
Mínimo	0,137	0,0169	0,0025	0,0075	0,045	1 030,0	394,63	56,14
Máximo	0,255	0,031	0,0041	0,021	0,083	1 090,0	456,08	63,45
Rango	0,118	0,0141	0,0016	0,0135	0,038	60,0	61,44	7,31
Suma de Cuadrados	1,06	0,022	0,00038	0,0099	0,130	3,8E7	2,3E6	46663,30

La determinación de longitud de los rizomas mostró que los mismos alcanzan valores en el rango de 0,137 a 0,255 m, con valores medios de $0,17 \pm 0,0045$ m. En el histograma de frecuencias (Figura. 3.1) se observa que el 48% de los valores observados de variable se ubican entre 0,155 a 0,185 m, por lo que las longitud más probables de los rizomas de Sagú se encuentran en este rango. Además la distribución se ajusta a una distribución normal. Los errores mostraron valores por debajo del 5%.

Estos resultados que se asemejan a los obtenidos por (León, 1987b) y (Valdés *et al.*, 2010b), los cuales observaron longitudes medias de los rizomas de $0,19 \pm 0,02$ m. Longitudes superiores a las medias (0,11 m) reportadas por (Ciarfella *et al.*, 2013).

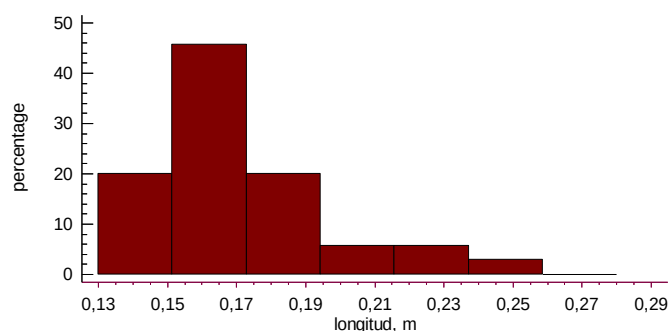


Figura. 3.1. Histograma de frecuencias observada de la longitud de los rizomas.

De igual forma el diámetro ecuatorial mostró valores semejantes (Tabla 3.1), a los reportados por Valdés (2010) $De=0,0285 \pm 0,0028$ m, de igual forma el diámetro ecuatorial máximo se asemeja al observado por (Ciarfella *et al.*, 2013), ($Demax=0,029$ m). Sin embargo tanto los diámetros distal como proximal medios difieren de los reportados por (Valdés *et al.*, 2010b) $Dd=0,0138$ m y $Dp=0,00290$ m, siendo superiores los observados experimentalmente. En los tres casos los errores están por debajo del 5%.

Los histogramas de frecuencias observadas de los diámetros del Sagú (Figura 3.2), evidencian que el diámetro ecuatorial de los rizomas toma valores en un rango $De=0,0169$ a $0,031$, dentro de los cuales el 67% se encuentra entre $0,024$ a $0,028$ m.

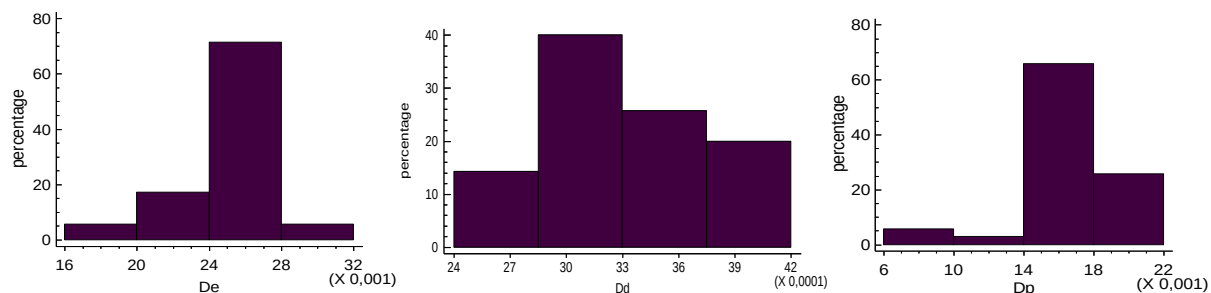


Figura 3.2. Histograma de Frecuencias observadas de los diámetros del Sagú.

Para el caso del diámetro distal se observaron valores en el rango de $D_d=0,0025$ a $0,0041$ m. El 40% de los diámetros observados perteneció al rango de $0,00285$ a $0,0033$ m. Finalmente la determinación del diámetro proximal mostró que el mismo se encuentra en el rango de $D_p= 0,0075$ a $0,021$ m, de los cuáles el 65% se encuentra en el intervalo de $0,014$ a $0,016$ m. Se encontró una distribución normal en las tres variables analizadas.

La masa promedio de los rizomas ($m=0,060$ kg) fue inferior la determinada por Valdés (Valdés *et al.*, 2010b), $m=0,14$ kg. Los errores fueron menores que el 5%. Un análisis de la frecuencia observada mostró (Figura 3.3), que la masa osciló en un rango $m=0,0454$ a $0,0839$ kg, del cual la máxima frecuencia observada 46% pertenece al rango de $0,053$ a $0,063$ kg. De igual forma que los casos anteriores esta variable mostró una distribución normal.

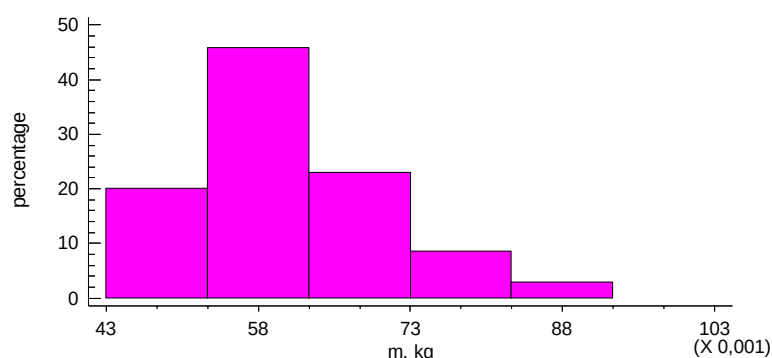


Figura 3.3. Histograma de Frecuencias observadas de la masa del Sagú.

Para el caso de las densidades real y aparente (Figura 3.4), se observaron rangos de $\gamma_r=1\ 050,6$ a $1\ 090$ Kg/m³ y $\gamma_a= 394,639$ a $456,084$ Kg/m³.

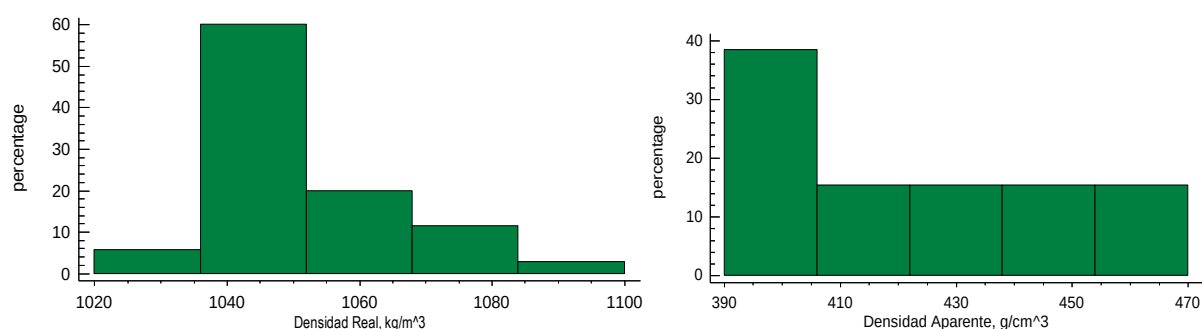


Figura 3.4. Histograma de Frecuencias observadas de la densidad real y aparente de los rizomas de Sagú.

La densidad real mostró (Figura 3.4), que el 60% de las frecuencias observadas se enmarcó dentro de los 1 035 a 1 053 kg/m³, con una tendencia a la distribución normal y errores menores del 5%. El 39% de los valores observados de la densidad aparente se encontró dentro del rango de los 390 a 407 Kg/m³, y los errores fueron superiores al 5%. En este caso no se apreció una distribución normal.

Por último la determinación de la porosidad mostró (3.5), que la misma tomó valores en el rango P= 56,14 a 63,45% valores correspondientes a los espacios vacíos del volumen total ocupado por los rizomas durante almacenamiento o envase, es decir en un depósito de 100 kg de volumen solo se podrá tener una masa de rizomas que oscila entre 43,86 a 38,55 kg. Los errores fueron menores al 5%. Un análisis de la frecuencias observada mostró que el mayor porcentaje (30%) se encontró para porosidades del 61 a 63%, exhibiendo una distribución normal.

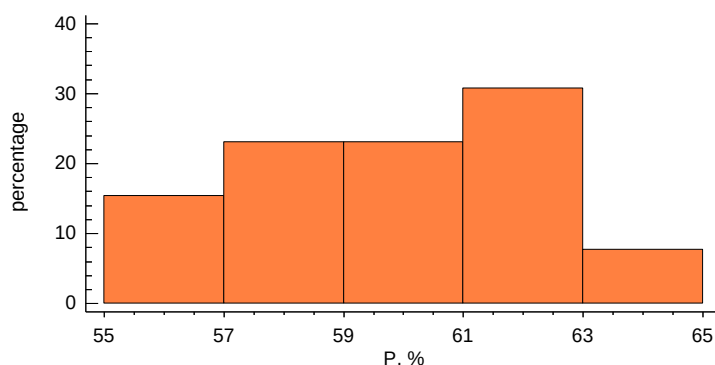


Figura 3.5. Histograma de Frecuencias observadas de la porosidad.

3.3 Propiedades mecánicas de los rizomas de Sagú que intervienen en el diseño de los órganos de trabajo de las máquinas extractoras de almidón

Los resultados de la determinación de los coeficiente de fricción al deslizamiento y a la rodadura mostraron (Figura 3.6), que para el caso de la fricción por deslizamiento (estática), los mayores valores del coeficiente de fricción se observaron para el caso del deslizamiento los rizomas de Sagú sobre la superficie de acero, alcanzando valores 7,55% superiores a la variante donde se empleó como superficie de deslizamiento la goma y un 11,33% mayor que en el caso de la madera. De igual forma, se observó que para el caso de la fricción dinámica por deslizamiento, el coeficiente alcanzó los mayores valores para el caso de la superficie metálica, siendo estos superiores en un 10,21% y 14,29%, cuando se les compara con los valores obtenidos en las superficies de goma y madera respectivamente. Este resultado se atribuye a la mayor rugosidad de la superficie de acero ($R_a=12,5$).

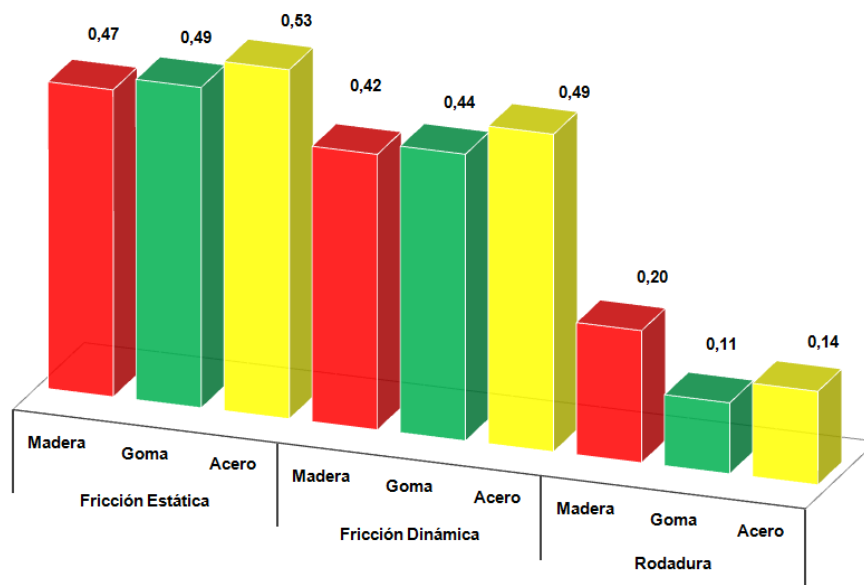


Figura 3.6. Resultados de la determinación del coeficiente de fricción por deslizamiento y rodadura.

Estos resultados difieren de los obtenidos por (Martínez, 2012) durante la medición de la fricción en plátanos y los encontrados por (Librán y Iglesias, 1999) en papas, en los cuáles se observaron valores de la fricción superiores en superficies de goma que en superficies de acero.

Sin embargo, la fricción por rodadura mostró los mayores valores del coeficiente para la superficie de madera, los cuales fueron superiores en un 30% con respecto a la superficie de acero y un 45% cuando el rizoma rodó sobre una banda de goma. Este resultado se corresponde a los obtenidos por (Librán y Iglesias, 1999) durante la determinación del coeficiente de fricción por rodadura de la papa en tres superficies de acero, goma y madera.

Una comparación entre las medias de los resultados a partir de las pruebas de los múltiples rangos mostró (Tabla 3.3), que existen diferencias estadísticamente

significativas para un 95% de confianza, entre los coeficientes fricción por rodadura de los rizomas de Sagú observados en las tres superficies investigadas, con los valores más bajos para la superficie de goma.

Tabla 3.3. Resultados de la prueba de Rangos Múltiples. Método: 95,0 percent LSD.

	<i>Superficies</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Coefficientes</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
μ_{rod}	goma	52	0,107883	X
μ_{rod}	acero	52	0,1424	X
μ_{rod}	madera	52	0,201075	X
μ_d	madera	52	0,422438	X
μ_d	goma	52	0,441679	X
μ_e	madera	52	0,470831	X
μ_d	acero	52	0,488444	XX
μ_e	goma	52	0,493498	X
μ_e	acero	52	0,536869	X

La fricción dinámica que surge del deslizamiento de los rizomas sobre las distintas superficies, no mostró (Tabla 3.3), diferencias estadísticamente significativas al comparar los resultados obtenidos en las superficies de madera y goma, sin embargo se encontraron diferencias entre estas y la superficie de acero, mostrando este último los mayores valores del coeficiente de fricción.

De manera semejante al coeficiente de rodadura se encontraron diferencias estadísticamente significativas para el coeficiente de fricción estático en las tres superficies (Tabla 3.3).

Finalmente la comparación entre estas tres variables evidenció que existen diferencias estadísticamente significativas entre el coeficiente de fricción al deslizamiento estático, el dinámico y el que surge debido a la rodadura (Tabla 3.3), excepto para el caso del

coeficiente de fricción dinámico y estático por deslizamiento para las superficies de madera y goma, donde no se encontraron diferencias estadísticamente significativas.

Los resultados de la determinación de la resistencia mecánica de los rizomas de Sagú mostraron que los mismos poseen una resistencia máxima a la compresión de 3,51 Pa y a la flexión de 0,0081 Pa (Tabla 3.4). Como ocurre típicamente en otros materiales la resistencia a la flexión fue mucho menor que la resistencia a la compresión.

Tabla 3.4. Resistencia mecánica de los rizomas de Sagú.

	$[\sigma_c], \text{Pa}$	$[\sigma_f], \text{Pa}$
Cantidad	25	25
Media	3,5172	0,008132
Mediana	3,53	0,0077
Varianza	0,046896	0,00000115727
Desviación estándar	0,216555	0,00107576
C.V	6,15702%	13,2288%
e	0,043311	0,000215153
Mínimo	2,98	0,0068
Máximo	3,89	0,011
Rango	0,91	0,0042
Simetría. estándar	-0,919584	2,60594
Concentración estándar	0,598485	0,788958
Suma de cuadrado	310,393	0,00168101

3.4 Conclusiones parciales

- La propiedades físicas que caracterizan los rizomas de Sagú determinadas mostraron que los mismos poseen gran contenido de agua (82,14%) con una conversión en harina del 14,35%;
- La determinación de las propiedades físicas de los rizomas de Sagú que intervienen en el cálculo y diseño de los órganos de trabajo de las máquinas extractoras de almidón, permitirán establecer los parámetros de diseño de las mismas;
- Las propiedades que definen la resistencia mecánica de los rizomas mostraron que los mismos poseen una mayor resistencia a la compresión (3,51 Pa) que a la flexión (0,0081 Pa).

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

1. La caracterización de los rizomas de Sagú mostró la potencialidad de los mismos para la producción de almidón, alimento animal, y los biofertilizantes, pues del total de materia seca que poseen (17,86%) tienen un rendimiento en harina de 14,35% y un 19,6% de residuos aprovechables, entre otros.
2. Se determinaron las principales propiedades físicas de los rizomas de Sagú relacionadas con el cálculo y diseño de máquinas agrícolas, corroborándose que en la mayoría de los casos coinciden con las reportadas por otros investigadores;
3. Las propiedades mecánicas relacionadas con la fricción por deslizamiento y rodamiento de los rizomas sobre distintas superficies fueron determinadas mostrando que los mayores valores para el caso de la fricción estática por deslizamiento sobre superficie de acero $\mu_e=0,536$;
4. La determinación de las propiedades mecánicas de los rizomas de Sagú mostraron que los mismos poseen una baja resistencia tanto a la compresión como a la flexión alcanzado valores de 3,51 Pa y 0,0081 Pa, respectivamente, valores que están dados por el alto contenido de humedad presente en los mismos (82,14%).

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

1. Extender el estudio de las propiedades físico-mecánicas a otras variedades de Sagú.
2. Ampliar los estudios de fricción a otras superficies de deslizamiento y rodadura como son el acero inoxidable, aluminio, y plástico.
3. Pasar a la etapa de la búsqueda de los parámetros de diseño óptimos de las máquinas extractoras de Sagú.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- API: API. *Situación de la Producción del Sagú en San Vicente y Las Granadinas [en línea] septiembre 2014. [Consulta: octubre 2014 2014].*
- BUITRAGO, G. V.; A. P. LÓPEZ; A. P. CORONADO y F. L. OSORNO: "Determinación de las características físicas y propiedades mecánicas de papa cultivada en Colombia", *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 8(1): 102-110, 2004.
- CASTRO, F.: Discurso en acto de graduación de campesinos estudiantes de inseminación artificial. En, pp. 1961.
- CIARFELLA, A. T.; M. A. MUNDARAÍN y E. PÉREZ: "Evaluación física y química de los rizomas de guapo (*Maranta arundinacea*) y de galletas dulces preparadas con su harina", *Saber*, 25: 210-217, 2013.
- CIRO, H. J.; M. L. MONTOYA y L. J. MILÁN: "Caracterización de propiedades mecánicas del banano (Cavendish Valery)", *Revista de la Facultad Nacional de Agronomía*, 58(2): 2975-2988, 2005.
- ERDMAN, D. y A. ERDMAN: "Arrowroot (*Maranta arundinacea*), food, feed, fuel and fiber resource", *Economic botany*, 30(3): 400, 1984.
- FAO: *Desciende el hambre en el mundo* Oficina regional para América Latina y el Caribe, Santiago de Chile, 2pp. 2013.
- FAO: Repercusiones de la introducción de la flora del Viejo Mundo en América, y causas de la marginación de los cultivos. En: FAO (ed.) *Cultivos andinos*. 1ra ed. Roma, Italia: FAO, pp. 10. 2014.
- FERNÁNDEZ, A. y D. FERNÁNDEZ. 2013. *RE: Forma de producción de sagú*.
- FERNÁNDEZ, L.: "Potencialidades del sagú como planta medicinal y alimenticia", *Agricultura orgánica*, 5: 21, 1999.
- IGLESIAS, C. E.: *Propiedades físico mecánicas de los productos agrícolas*, Ed. Universidad Autónoma de Chapingo, Edición electrónica ed, Chapingo, México, 1992.
- IGOR, J. y A. MOLINA: *Proceso de elaboración de salchichas a partir de tilapia roja con adición de almidón de sagú*, 79pp., Ingeniería química, Química, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2008.
- JOSÉ, A.: *Determinación de la energía de corte por impacto sobre el Agave Augustifolia Haw*, 102pp., Tesis en opción (al grado de Maestro en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales), CIIDIR, IPN, 2008.
- LABAÑINO, F.: *Factibilidad económica financiera de la sustitución de importaciones con el uso de la maranta Arundinacea Linnaea en la producción de puré de frutas en la Fábrica Caney de la UEB Santiago de la Empresa de conservas de vegetales de Santiago de Cuba*, 85pp., Master en opción al título de Máster en Contabilidad, Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, 2014.
- LEÓN, J.: *Botánica de los cultivos tropicales*, Ed. IICA, 2da ed, San José, Costa Rica, 1987a.
- LEÓN, J.: *Botánica de los cultivos tropicales*, Ed. IICA, 2da ed, San José, Costa Rica, 1987b.
- LIBRÁN, L. y C. E. IGLESIAS: "Propiedades físico-mecánicas de la papa variedad Kondor como objeto de la mecanización de su cosecha (2da Parte)", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 8(1): 11-15, 1999.
- MALINIS, A. y C. PACARDO: "Adaptation of arrowroot processing technologies in typhoon prone marginal areas in Bicol", *Sustainable development*, 4(3): 10, 2012.

- MARTÍNEZ, C. M. *Estudio de algunas propiedades físico-mecánicas y químicas del plátano burro (Musa ABB), bajo las condiciones productivas cubanas [en línea] enero 2012. Disponible en:* www.infoagro.com [Consulta: febrero 2014].
- MILIÁN, M.; H. CASANOVA y D. GUERRA: Conozca del sagú. En: INIVIT (ed.). Santo Domingo, pp. 2. 2013.
- MILIÁN, M.; Y. GIRADO; D. GUERRA; Y. BEOVIDES; M. LAGO; E. RUIZ y J. GARCÍA: "Estrategia de conservación de germoplasma de especies de raíces, rizomas y tubérculos en Cuba", *Centro Agrícola*: 2010.
- MONTALDO, A.: 1991. *Cultivo de raíces y tubérculos tropicales*, Segunda ed, San José.
- MORA, P.: "Reflexiones y observaciones", *El hombre en la primera época de su vida*, pp 239, Ed. Madrid, Madrid, 1827.
- MORENO, B. y J. ALUM: *Experimentos de mecánica*, Ed. ISJAE, La Habana, 1982.
- PAGÁN, J.: "Nuevas perspectivas sobre las culturas botánicas precolombinas de Puerto Rico: implicaciones del estudio de almidones en herramientas líticas, cerámicas y de concha", *Cuba Arquelógiz*, 2(7): 15, 2009.
- PATÍÑO, V. (ed.) 1964. *Plantas cultivadas y animales domésticos de América Equinocial*, Cali: Imprenta departamental.
- PÉREZ, E. 2013. *RE: Procucción de sagú*.
- POOT-MATU, J.; D. CENTURIÓN y J. ESPINOSA: "Rescate e identificación de raíces y tubérculos tropicales subexplotados del estado de Tabasco, México", *Etnobiología*, 2: 10, 2002.
- REYNOSO, A.: 1867. *Apuntes acerca de varios cultivos cubanos*, Madrid, *Disponible en:* www.books.google.com.cu.
- RODRÍGUEZ, A.; A. RODRÍGUEZ y S. QUINTERO: "Caracterización de germoplasma y mejoramiento participativo en especies de raíces y tubérculos alimenticios tropicales y en musáceas", *INIFAT*: 13, 2011.
- RODRIGUEZ, A. M.; A. N. RODRÍGUEZ y S. V. QUINTERO: Caracterización de germoplasma y mejoramiento participativo en especies de raíces y tubérculos alimenticios tropicales y en musaceas. Ciudad Habana, Cuba: INIFAT, pp. 2011.
- RODRÍGUEZ, G.; H. GARCÍA; J. CAMACHO y F. ARIAS, *Manual técnico para la elaboración del amidón de achira o sagú*, agropecuaria, C. C. d. I., Tibaitatá, pp. 33, 2003.
- ROIG, J. T.: *Plantas medicinales, aromáticas o venenosas de Cuba*, 2, 2da ed, La Habana, 2012.
- SARMIENTO, I. *Raíces de la cultura alimentaria cubana [en línea] marzo 2012. Disponible en:* <http://historiacocina.com/stats/> [Consulta: 14 enero 2014].
- TAPIA, M.: *Cultivos andinos subexplotados y su aporte a la alimentacion*, 2da ed, Roma, Italia, 2000.
- TRIGO, E.: "Agricultura, cambio tecnológico y medio ambiente en América Latina: una perspectiva para el año 2020", *Instituto internacional de investigaciones sobre políticas alimentarias*: 1995.
- TSCHEUSCHNER, H. D.: "N. N. Mohsenin: Physical Properties of Plant and Animal Materials. Structure, Physical Characteristics and Mechanical Properties. 2. Aufl. 891 Seiten, zahlr. Abb. und Tab. Gordon and Breach Science Publishers, New York u. a. 1986. Preis: 140.—£", *Food / Nahrung*, 31(7): 702-702, 1987.
- VALDÉS, M.; S. ORTIZ y T. SÁNCHEZ: "Nueva alternativa de utilización del amidón de sagú", *Carta universitaria*: 7, 2010a.
- VALDÉS, M. P.; S. ORTIZ y T. SÁNCHEZ: "Morfología de la planta y características de rendimiento y calidad de almidón de sagú", *ACTA AGRONÓMICA*, 59 (3): 372-380, 2010b.

Bibliografía

VALDÉS, M. P.; S. ORTIZ y T. SÁNCHEZ: "Morfología de la planta y características de rendimiento y calidad de almidón sagú", *ACTA AGRONÓMICA*, 19(3): 9, 2010c.