

UNA MIRADA A LA AGROINDUSTRIA DE EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN DE YUCA, DESDE LA ESTANDARIZACIÓN DE PROCESOS

PATRICIA TORRES¹
ANDREA PÉREZ²,
LUIS F. MARMOLEJO³,
JOSÉ A. ORDÓÑEZ⁴,
RENIEL E. GARCÍA⁵

RESUMEN

La agroindustria de extracción de almidón de yuca hace parte importante de la economía de Colombia, concentrándose su producción en el departamento del Cauca; el proceso emplea raíces frescas de yuca, agua y energía eléctrica como principales recursos, generando residuos sólidos y líquidos cuyo inadecuado aprovechamiento o vertimiento trae impactos ambientales y económicos. En este estudio se formularon medidas para la optimización de los procesos apoyándose en herramientas como el balance de masa y el estudio de métodos, tiempos y movimientos, considerando el contexto tecnológico y socioeconómico del sector. Los resultados mostraron una eficiencia del proceso entre 51 % y 59 %; se identificó que la etapa de colado presenta el mayor consumo de agua y generación de residuos sólidos (afrecho), la etapa de sedimentación genera la mayor cantidad de residuos líquidos con elevada carga contaminante. Se evidenció la necesidad de estandarizar y optimizar las etapas de lavado-pelado y colado por requerir los mayores tiempos, incrementar la capacidad del rallado (etapa crítica que influye en la eficiencia del proceso y calidad del almidón) y registrar la información del proceso como estrategia de control.

1 Ingeniera Sanitaria, Universidad del Valle; Magíster y Doctora en Ingeniería Hidráulica y Saneamiento, Universidade de São Paulo. Profesora Asociada, Universidad del Valle. Cali, Colombia. patoloz@univalle.edu.co

2 Ingeniera Sanitaria y Magíster en Ingeniería, énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental; Doctora en Ingeniería (c), Universidad del Valle. Cali, Colombia. perezvid@univalle.edu.co

3 Ingeniero Sanitario y Magíster en Administración de Salud, Universidad del Valle. Profesor Asistente, Universidad del Valle. Cali, Colombia. lufermar@univalle.edu.co

4 Ingeniero Industrial e Ingeniero Sanitario, Universidad del Valle. Cali, Colombia. joseabdon@gmail.com

5 Ingeniero Industrial, Universidad del Valle. Cali, Colombia. evlep@hotmail.com

PALABRAS CLAVE: almidón de yuca; balance de masa; estudio de métodos, tiempos y movimientos; producción más limpia.

VIEW OF AGROINDUSTRY OF CASSAVA STARCH EXTRACTION FROM THE PROCESS STANDARDIZATION

ABSTRACT

In Colombia, the agroindustry of cassava-starch extraction is an important sector of the country's economy; production is focused in Cauca Department; this process uses fresh cassava-roots, water, and electricity as main resources, generating solid and liquid wastes whose inadequate use or disposal brings environmental and economic impacts. In this study were made measures for process optimization supported by tools such as mass balance and study methods, time and motion, considering the technological and socio-economic context of the sector. The results showed process-efficiency between 51 and 59 %; it was identified that the straining stage has the highest water consumption and solid waste generation (fiber cassava pulp); the starch slurry's sedimentation stage generates the most amount of liquid wastes with high-pollution load. It evidenced the need to standardize and optimize the washing-peeling and strain stages because they require the largest process times; to increase the grating-rasping machine capacity (this critical stage influences the process efficiency and the final starch quality) besides recording the process information as control strategy.

KEY WORDS: cassava starch; mass balance; methods, time and motion study; cleaner production.

UM OLHAR À AGROINDÚSTRIA DE EXTRAÇÃO DE AMIDO DE MANDIOCA, DESDE A PADRONIZAÇÃO DE PROCESSOS

RESUMO

A agroindústria de extração de amido de mandioca faz parte importante da economia da Colômbia, concentrando-se sua produção no departamento do Cauca; o processo emprega raízes frescas de mandioca, água e energia elétrica como principais recursos, gerando resíduos sólidos e líquidos cujo inadequado aproveitamento ou eliminação traz impactos ambientais e econômicos. Neste estudo formularam-se medidas para a otimização dos processos apoiando-se em ferramentas como o balanço de massa e o estudo de métodos, tempos e movimentos, considerando o contexto tecnológico e socioeconômico do setor. Os resultados mostraram uma eficiência do processo entre 51 % e 59 %; identificou-se que a etapa de coado apresenta o maior consumo de água e geração de resíduos sólidos (farelo); a etapa de sedimentação gera a maior quantidade de resíduos líquidos com elevada carga contaminante. Evidenciou-se a necessidade de padronizar e otimizar os períodos de lavado-descascado e coado por requerer os maiores tempos, aumentar a capacidade do ralado (etapa crítica que influi na eficiência do processo e qualidade do amido) e registrar a informação do processo como estratégia de controle.

PALAVRAS CÓDIGO: amido de mandioca; balanço de massa; estudo de métodos, tempos e movimentos; produção mais limpa.



1. INTRODUCCIÓN

Los diferentes ecosistemas naturales han sido perturbados como consecuencia de la aplicación de modelos productivos insostenibles en diferentes actividades industriales “clásicas” que han hecho parte del desarrollo industrial mundial, en los cuales la generación de residuos era vista como una consecuencia inevitable del proceso productivo (Fernández y Varsavsky, 2005).

Actualmente en el sector productivo la planificación se orienta hacia la implementación de estrategias productivas que aumenten la eficiencia de sus procesos, optimizando el desempeño del talento y de sus materias primas, aumentando los rendimientos y, por ende, reduciendo la cantidad de residuos generados.

Las estrategias productivas orientadas a prevenir la contaminación se centran en la revisión y modificación de los procesos industriales, con la finalidad de eliminar todas las salidas que no sean producto terminado o material reciclable. En Colombia se ha evolucionado en torno a la Política Nacional Ambiental (Ley 99 de 1993 que creó el Ministerio del Medio Ambiente) que busca la aplicación de modelos productivos de desarrollo empresarial orientados hacia la sostenibilidad, es decir, que busquen el crecimiento económico como fruto del desarrollo de actividades productivas socialmente aceptables, que adopte métodos de producción más limpios, ambientalmente sanos y seguros, y que permita elevar la calidad de vida y el bienestar de la sociedad mediante un aprovechamiento sostenible de los recursos en que se sustenta, de tal manera que logre satisfacer las necesidades humanas actuales y futuras (Ministerio del Medio Ambiente, 1996).

En el marco de los modelos productivos sostenibles, la producción más limpia (PML) se convierte en una estrategia integral preventiva con énfasis en cómo los bienes y servicios pueden ser producidos con el menor impacto ambiental, teniendo en cuenta limitantes económicas y tecnológicas. La PML no

corresponde a directrices legales o científicas, sino que obedece a una serie de herramientas como ecoeficiencia, minimización de residuos y prevención de la contaminación (CNPML, 2006; PNUMA, 2006).

Existen herramientas como los estudios de métodos, tiempos y movimientos que favorecen la optimización de los procesos productivos y hacen parte del desarrollo de un modelo sostenible. Este tipo de estudios son técnicas que sirven para calcular el tiempo que necesita un operario calificado para realizar una tarea determinada siguiendo un método preestablecido. El conocimiento de los tiempos permite controlar el funcionamiento de las máquinas (número de paradas y sus causas, programación de cargas, selección de nueva maquinaria, estudiar la distribución en planta, etc.) y determinar el número de operarios necesarios estableciendo planes de trabajo y control de costos de mano de obra. En relación con el producto, el conocimiento de los tiempos sirve para comparar diseños, establecer presupuestos, programar procesos productivos, comparar métodos de trabajo y evitar paradas por falta de material (Argote, Velasco y Paz, 2007).

Respecto al sector agroindustrial del almidón, anualmente en el mundo se extraen unos 60 millones de toneladas de una gran variedad de cultivos (cereales, raíces y tubérculos) para uso en una amplia gama de productos. Un 10 % de ese almidón se produce con las raíces de la yuca, la cual es muy competitiva por contener más almidón por peso seco que cualquier otro cultivo alimentario y porque su almidón es fácil de obtener con tecnologías simples. En América Latina y el Caribe la producción de almidón de yuca se concentra en Brasil y Colombia, casi la totalidad elaborado en fábricas pequeñas y medianas, con mano de obra intensiva y técnicas tradicionales (FAO, 2006).

En Colombia, el almidón de yuca debe competir con el procedente de países como Venezuela, Brasil y Tailandia, cuyos costos de producción hacen que sus precios de venta sean menores (Ospina y Cevallos, 2002). La principal región de Colombia dedicada al

beneficio de la yuca para producción de almidón es el norte del departamento del Cauca, que concentra el 80 % de la producción nacional; su extracción se realiza en pequeñas agroindustrias llamadas “rallan-

derías” (CRC, 2005), la tecnología empleada en ellas no varía mucho entre un sitio y otro y conserva un estilo tradicional. Según su nivel tecnológico, pueden subdividirse como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de rallanderías en el departamento del Cauca según el nivel tecnológico

Nivel tecnológico	Raíces procesadas (toneladas/semana)	Características	
		Equipos	Proceso
Bajo	< 5	Manual	Uso de tanques de sedimentación de almidón
Medio	5,0-12,5	Semimecanizado	Uso de tanques de sedimentación de almidón
Alto	> 12,5	Semimecanizado o mecanizado	Sedimentación de almidón mejorada con el uso de canales. Flujo de materias primas y productos por gravedad

Fuente: Adaptado de CRC (2005)

Por la relación hombre-máquina se puede decir que en la región se encuentran dos modalidades, la *manual* donde todo el esfuerzo es realizado por el operario y la *semimecanizada* o *mecanizada* donde el esfuerzo productivo se comparte entre el hombre y la máquina. La modalidad automatizada, en la cual todo el esfuerzo lo realiza la maquinaria y la función del operario se limita a la puesta en marcha y supervisión de las operaciones, no es común en la zona.

Los tres recursos básicos (raíces frescas de yuca, agua y energía eléctrica) en la producción del almidón agrario de yuca son escasos en la región y su suministro y calidad no son constantes, lo que influye en el desempeño del proceso productivo; adicionalmente, se generan residuos sólidos y líquidos cuyo inadecuado aprovechamiento o vertimiento trae impactos tanto ambientales como económicos. Aunque no hay reportadas experiencias de implementación de políticas de PML en este sector agroindustrial, es importante resaltar que existen estudios orientados a la evaluación y optimización de algunas etapas del proceso y del tratamiento de los residuos líquidos a escala de laboratorio y piloto (Ayala, 2005; Colin *et al.*, 2007; Pérez, 2007; Cajigas, 2008).

En este artículo se muestra el estudio realizado en el proceso productivo de una rallandería de nivel

tecnológico alto ubicada en la vereda La Agustina del municipio de Mondomo, en el norte del departamento del Cauca, orientado a la formulación de medidas para la optimización en el uso de los recursos y la reducción en la generación o el aprovechamiento de los residuos, apoyándose en herramientas como el balance de masa y el estudio de métodos, tiempos y movimientos.

2. METODOLOGÍA

Se realizó la evaluación del análisis del proceso productivo construyendo el diagrama de flujo y el balance de masa, se hizo un estudio de métodos, tiempos y movimientos considerando las operaciones del proceso que tenían una constante relación hombre-máquina y finalmente se formularon propuestas de mejoramiento para optimizar el proceso.

2.1 Evaluación del proceso productivo

Las unidades operativas del proceso productivo fueron subdivididas en fases y etapas, identificando las actividades asociadas y los residuos sólidos y líquidos generados. Para describir las transformaciones de la materia prima e insumos



(entradas y salidas) se construyó el *diagrama de flujo* y se realizó el *balance de masa*, herramientas que facilitaron la caracterización del flujo de materiales, identificando los puntos de origen y el volumen de los residuos. El balance de masa se realizó con yuca procedente del Eje Cafetero por ser la condición de operación más crítica en términos de generación de residuos (Cajigas, 2008). No se cuantificaron los residuos de las actividades de mantenimiento de equipos por generarse esporádicamente y en cantidades bajas.

La unidad de medida en las entradas (materias primas yuca MP1 y agua MP2) y en los productos y residuos sólidos y líquidos fue el kilogramo por tonelada de yuca procesada (kg/1.000 kg MP1). La composición de MP1, el producto final (almidón) y los residuos sólidos fue expresada en términos de materia seca, y su respectivo contenido de humedad fue medido según APHA, AWWA y WPCF (2005). El agua afluyente (MP2) y las aguas residuales fueron aforadas en forma volumétrica. Para la medición de las sustancias de cada muestreo se definieron tres condiciones de cuantificación: directa, indirecta por volumen e indirecta por caudal.

La *cuantificación directa* correspondió a la masa cuyo peso se determinó directamente por pesaje en una balanza; la *cuantificación indirecta* por volumen fue la masa determinada mediante la cuantificación del volumen y la densidad, usando la ecuación 1.

$$m = \rho * V \quad (1)$$

Donde:

m: masa (kg)
 ρ : densidad (kg/m³)
V: volumen (m³)

En la cuantificación indirecta por caudal se determinó el peso de agua a partir de la medición volumétrica de caudales y la determinación del tiempo de operación de la unidad, aplicando la ecuación 2.

$$m = Q * t * \rho \quad (2)$$

Donde:

m: masa (kg)
Q: caudal (m³/h)
t: tiempo de operación de la unidad (h)
 ρ : densidad del agua (se supuso 1.000 kg/m³)

2.2 Estudio de métodos, tiempos y movimientos

Para establecer los tiempos estándares de cada etapa del proceso se realizó un estudio de métodos, tiempos y movimientos que se concentró en las etapas u operaciones que tenían una constante relación hombre-máquina y un tiempo de ciclo relativamente corto comparado con todas las operaciones que conforman el proceso productivo. Las etapas de selección-despunte y rallado fueron estudiadas en conjunto por los cortos espacios de tiempo en que se realizan y su interdependencia. El procedimiento sistemático usado para el estudio incluyó las siguientes actividades:

- *Selección del trabajo.* Se consideraron las etapas que forman la línea de extracción de almidón desde el alistamiento de la materia prima (preparación de bultos de yuca para el lavado) hasta el comienzo de la separación física del almidón en los canales de sedimentación.
- *Selección del operario.* En las visitas realizadas se observaron dos operarios, con similar capacidad y experiencia, encargados de las operaciones.
- *Registro de información.* Incluyó máquinas, herramientas, manuales, materiales, condiciones de trabajo, operaciones, etc. Se entrevistó al propietario de la rallandería para obtener la información acerca del funcionamiento y los métodos utilizados en cada operación; esta información fue confrontada con la revisión de otros estudios (Ospina y Cevallos, 2002; Torres *et al.*, 2006).

- *Número de observaciones o ciclos de estudio (n).* Para definir el número de observaciones por realizar se registraron los tiempos observados (TO), con los cuales se obtuvo una media y una desviación estándar muestral. Luego se definió un error de muestreo “k” para cada elemento y un grado de libertad según el número de registros. Esta información fue utilizada en la ecuación 3 (distribución t para $n < 30$) como base para calcular un “n” muestral, es decir, un tamaño de muestra de tiempos observados que fuera representativa estadísticamente.

$$n = \left\{ \frac{s \times t}{k \times \bar{x}} \right\}^2 \quad (3)$$

Donde:

- n: número de observaciones
- s: desviación estándar de la muestra
- t: distribución t ($n < 30$)
- k: error de muestreo
- \bar{x} : media aritmética muestral

- *Valoración del desempeño.* Se ajustó el tiempo normal del operario, teniendo en cuenta aspectos como el nivel de experiencia, formación y velocidad promedio de trabajo; la calificación del desempeño se expresó como un porcentaje del tiempo promedio observado y el tiempo normal y se calculó según la ecuación 4 (CPTS, 2003).

$$TN = TO \times \frac{C}{100} \quad (4)$$

Donde:

- TN: tiempo normal calculado a partir del observado
- TO: tiempo promedio observado por cada actividad
- C: valoración ritmo de trabajo del empleado observado. Escala 75 %-100 %

De acuerdo con la observación del proceso y los operarios en cada ciclo de operación, se determinó que el operario objeto del estudio podía catalogarse como trabajador calificado,

con una dedicación y esfuerzo normales. Finalmente y de acuerdo con una calificación de velocidad, se asignó una valoración (C) del 80 % o 90 % a los tiempos observados.

- *Aseguramiento de la medición.* Se verificó la información recolectada mediante la comparación con visitas posteriores a la rallandería en estudio, procurando validarla mediante la comparación con diferentes horas del día y con el otro operario, haciendo énfasis en cualquier posible variación de los métodos de trabajo.
- *Asignación de suplementos.* Corresponde a los periodos de inactividad o interrupciones necesarias del trabajador, para que descanse de la fatiga producida por el propio trabajo, pueda atender sus necesidades personales, etc. (Argote, Velasco y Paz, 2007). Por lo general, se maneja como un porcentaje del tiempo normal y se utiliza para calcular el tiempo estándar (TS) de la operación según la ecuación 5.

$$TS = TN \times (1 + \%S) \quad (5)$$

Donde:

- TS: tiempo estándar calculado a partir del normal
- S: suplementos determinados para el tipo y condiciones de trabajo

La tabla 2 muestra los suplementos constantes y variables asignados en cada una de las operaciones del proceso productivo de la rallandería, teniendo en cuenta el tiempo para las necesidades personales, fatiga generada por la operación, las condiciones del puesto de trabajo y lo expuesto por Niebel y Freivalds (2001).

2.3 Formulación de propuestas de mejoramiento

Teniendo como base la evaluación del proceso productivo y el estudio de métodos, tiempos y movimientos, se identificaron las principales causas de ineficiencias productivas y de generación de residuos que permitieran formular estrategias de mejoramiento.



Tabla 2. Suplementos determinados para las etapas del proceso de extracción de almidón de yuca

Actividades	Suplementos (%)												
	Constantes		Variables										Σ%
	NP	F	TP	PA	IP	IL	CA	TV	TA	TM	MM	MF	
Etapa: Lavado y pelado													
Alistamiento materia prima	5	4	2	2	58	0	0	0	0	0	0	0	71
Alimentación máquina	5	4	2	2	58	0	0	0	0	0	0	0	71
Operación máquina*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Descargue máquina	5	4	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	13
Etapa: Selección y despunte													
Inspección y despunte de yuca	5	4	0	0	0	0	0	2	0	0	1	2	14
Etapa: Rallado													
Alimentación máquina													
Operación máquina*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Descargue máquina													
Etapa: Colado													
Alimentación de máquina	5	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
Operación de máquina*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Descargue de máquina	5	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
Etapa: Tamizado													
Inspección	5	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
Actividades complementarias													
Limpieza del desagüe de la máquina de lavado													
Limpieza del tanque de cascarilla y afrecho	5	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
Inspecciones varias													

* Una máquina no necesita suplementos en su tiempo de operación

NP = Necesidades personales

F = Fatiga personal

TP = Trabajo de pie

PA = Postura anormal

IP = Levantamiento peso

IL = Intensidad luminosa

CA = Calidad del aire

TV = Tensión visual

TA = Tensión auditiva

TM = Tensión mental

MM = Monotonía mental

MF = Monotonía física

3. RESULTADOS

3.1 Evaluación del proceso productivo

Teniendo en cuenta que el principio del proceso de extracción del almidón de yuca se fun-

damenta en el aislamiento de sus componentes, se clasificó el proceso productivo en las fases mostradas en la figura 1; la tabla 3 detalla las etapas asociadas a cada fase del proceso y las actividades y residuos generados en ellas.

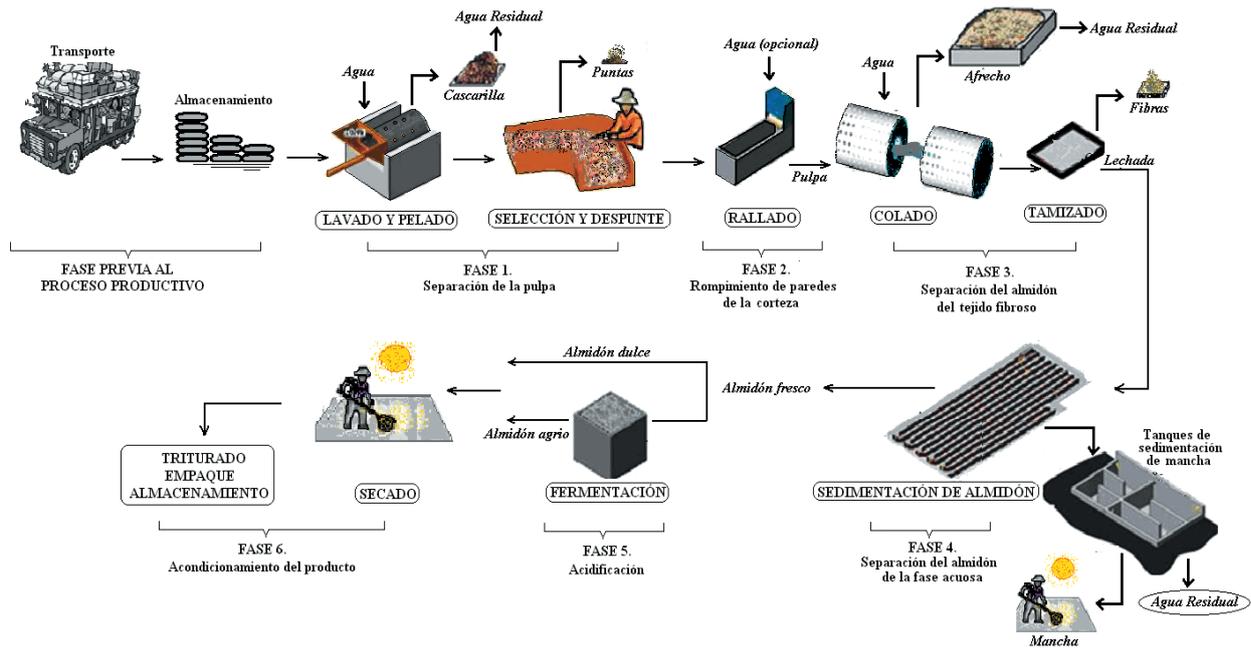


Figura 1. Esquema general del proceso de extracción de almidón de yuca

Tabla 3. Fases, etapas, actividades y residuos del proceso de extracción de almidón de yuca.

Fase	Etapa / Operación	Actividades asociadas	Residuos	
			Sólidos	Líquidos
Previa	Recepción de raíces de yuca y almacenamiento	<ul style="list-style-type: none"> Descargue bultos de yuca (materia prima) Almacenamiento bultos de yuca 	Empaque (costales)	---
1	Lavado y pelado	<ul style="list-style-type: none"> Alistamiento de materia prima Alistamiento de máquina Alimentación máquina Operación máquina Descargue de máquina 	Cascarilla e impurezas (tierra, arena, etc.)	Agua residual
	Selección y despunte	<ul style="list-style-type: none"> Inspección y despunte de yuca Separación material desechado 	Puntas de yuca, raíces en mal estado	---

→



Fase	Etapa / Operación	Actividades asociadas	Residuos	
			Sólidos	Líquidos
2	Rallado	<ul style="list-style-type: none"> Alimentación máquina Operación máquina Descargue de máquina (almacenamiento) 	Lámina del rallo ⁽¹⁾	---
3	Colado	<ul style="list-style-type: none"> Alimentación máquina Operación máquina Descargue de máquina 	Afrecho	Agua residual por escurrimiento del afrecho
	Tamizado	<ul style="list-style-type: none"> Inspección 	Afrecho, cedazo ⁽¹⁾	---
4	Sedimentación	<ul style="list-style-type: none"> Alimentación de canales Seguimiento altura nivel del agua Lavado y retiro del almidón 	Mancha	Agua residual
5	Fermentación*	<ul style="list-style-type: none"> Alimentación de tanques Seguimiento fermentación Lavado Retiro del almidón agrio 	---	Agua residual
6	Secado	<ul style="list-style-type: none"> Secado 	---	---
	Triturado, empaque y almacenamiento	<ul style="list-style-type: none"> Triturado Empaque Almacenamiento 	Residuos de almidón dispersos en el aire	---
Fase adicional/ ocasional	Actividades complementarias**	<ul style="list-style-type: none"> Limpieza desagüe máquina de lavado Limpieza tanque de cascarilla y afrecho Inspecciones varias 	Residuos en menor proporción iguales a las etapas de lavado-pelado y colado	

⁽¹⁾ Ocasionalmente

* Cuando se produce almidón agrio

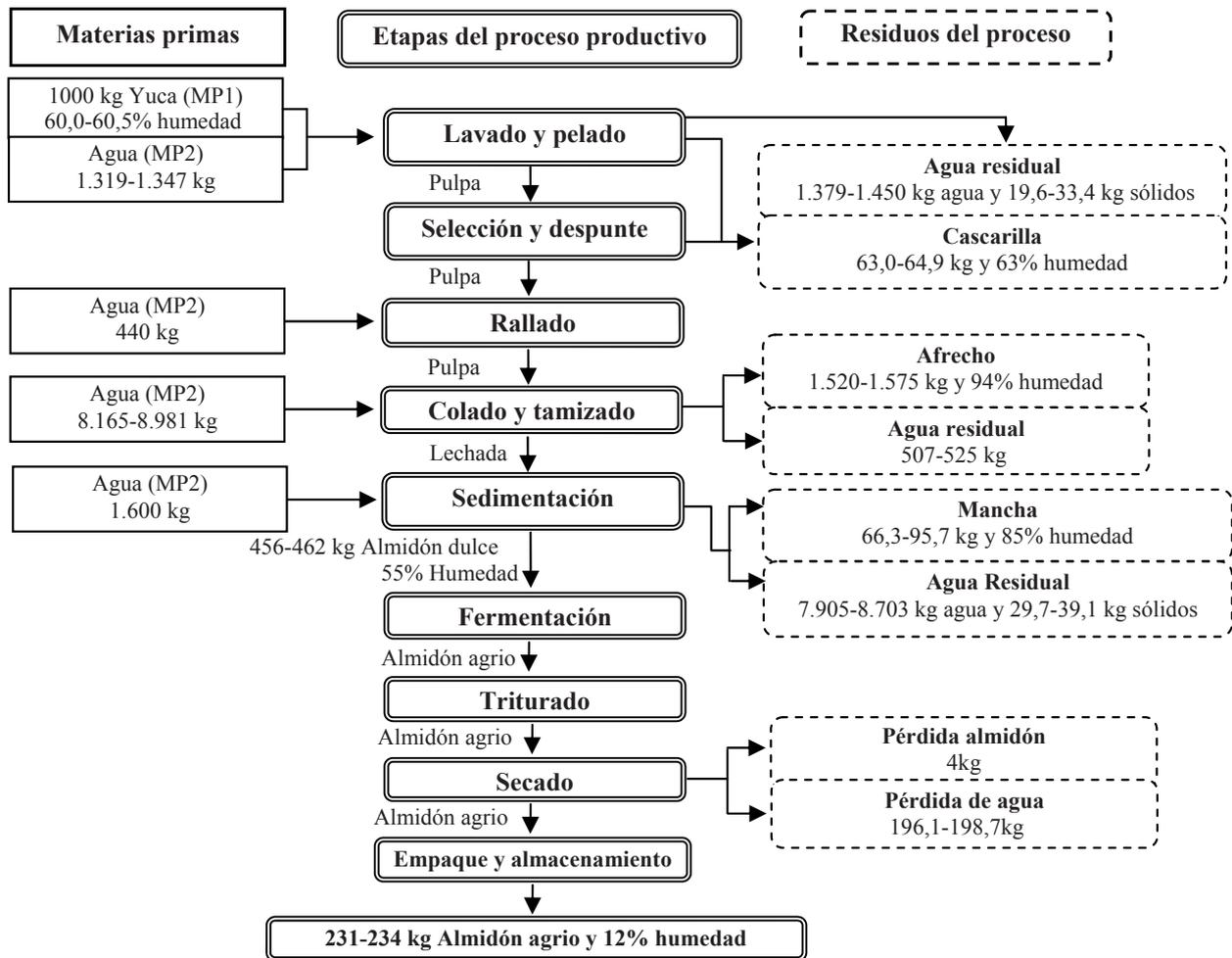
**Se realizan por jornada de trabajo y no por ciclo de producción. Son actividades asociadas al proceso.

Desde el punto de vista industrial y de acuerdo con el tipo de flujo del producto, el proceso de extracción de almidón de yuca puede considerarse como una producción “en línea” o “por producto”, debido a que las operaciones y su distribución están especializadas en la elaboración de un producto definido. Por el tipo de servicio al cliente es una producción “para el mercado”, ya que está dirigida al mantenimiento de niveles de inventario determinados por el mercado.

La producción local de yuca no es suficiente para satisfacer la demanda actual de las rallanderías; cuando escasea esta materia prima en el departamento del Cauca, hay que traerla de otras regiones del país como Quindío, Urabá Antioqueño, Llanos Orientales e incluso desde el Ecuador. Es importante resaltar que el tiempo que transcurre entre la cosecha de las raíces y su procesamiento influye considerablemente en su calidad, por lo que se recomienda que ese tiempo no exceda los tres días, ya

que puede presentarse el fenómeno DFP (deterioro fisiológico poscosecha), siendo necesario controlar el tiempo de almacenamiento de las raíces además de su calidad y procedencia.

La figura 2 muestra el diagrama de flujo del proceso y los resultados obtenidos en el balance de masa



Fuente: Adaptado de Torres *et al.*, 2006; Cajigas, 2008

Figura 2. Diagrama de flujo y balance de masa del proceso de extracción de almidón agrio de yuca por unidades operativas usando yuca procedente del Eje Cafetero en la rallandería objeto de estudio.

El balance de masa muestra que de cada 1.000 kg de yuca procesada (400-350 kg en base seca) se obtienen 231 a 234 kg de almidón agrio (203 a 206 kg en base seca) que representan una eficiencia de producción entre 51 y 59%, valor cercano a los de procesos productivos más tecnificados como los

de Brasil, 56,5 a 62,7% (Marder *et al.*, 1996) y Tailandia, 60% (Rakshit, 2002).

El agua (MP2) ingresa al proceso de dos formas, la utilizada en las operaciones de lavado, rallado, colado, tamizado y sedimentación (11.524-12.368 kg) y el agua contenida en MP1 en forma de



humedad (600-650 kg); en la etapa de colado (fase 1) se consume el 65 % del total de agua utilizada en el proceso (8.165-8.981 kg) y en la sedimentación (fase 4) otro 15 % (1.600 kg) ocurriendo en estas etapas la separación del almidón del tejido fibroso y del almidón y el agua.

Aunque los rendimientos en términos de producción de almidón fueron similares a los reportados para industrias más tecnificadas (Fernandes, 2007), en la tecnología utilizada en la rallandería en estudio se utilizan cerca de 9,5-10,3 m³ de agua en total, valores mayores que los reportados por Rakshit (2002), que usan equipos mecánicos más tecnificados como decantadores o hidrociclones en que ambas fases de separación ocurren en la misma unidad, reduciendo el consumo de agua entre 3,6 y 4,2 m³. Otro factor que también favorece un menor consumo de agua por tonelada de yuca procesada es la recirculación de agua de la etapa de lavado y pelado.

Del total de agua que ingresa al proceso, el mayor porcentaje se transforma en residuos líquidos (9.791-10.678 kg) generados en las etapas de lavado-pelado (fase 1), colado (fase 3) y sedimentación (fase 4), siendo esta última la principal etapa generadora (>80 %) cuyo efluente se caracteriza por el elevado grado de contaminación orgánica (DQO = 3.400-5.400 mg/L) y carbohidratos fácilmente hidrolizables que favorecen su rápida fermentación (acidez = 400-1.500 mg CaCO₃/L) (Pérez, Torres y Silva, 2009).

Por tradición, estos residuos se han vertido a cuerpos de agua sin ser tratados o con tratamientos primarios insuficientes, generándoles un significativo deterioro e inhabilitando sus tradicionales usos (consumo humano, agroindustrial y recreación). Estudios en torno al tratamiento anaerobio (Arroyave, Rojas y Torres, 1996; Mulyanto, 2003; Colin *et al.*, 2007; Fernandes, 2007; Pérez, Torres y Silva, 2009) han permitido evidenciar el potencial de esta tecnología por su bajo costo y adaptabilidad al contexto socioeconómico del sector, permitiendo alcanzar

eficiencias de reducción de DQO adecuadas con la normativa nacional siempre y cuando se controle la capacidad *buffer* del sistema con la adición de bicarbonato de sodio y la medición de los índices de alcalinidad (Pérez y Torres, 2008).

En cuanto a los residuos sólidos (RS), el material sedimentable generado en la etapa de lavado de las raíces (fase 1) puede ser separado del agua utilizando unidades convencionales de sedimentación. Los RS de selección y despunte, comúnmente mezclados con la cascarilla, pueden aprovecharse en alimentación animal (Marmolejo *et al.*, 2008).

El afrecho obtenido de la etapa de colado y tamizado (fase 3) es el residuo semilíquido que se genera en mayor cantidad (1.520-1.575 kg) con un porcentaje de humedad elevado (94 %) que indica la necesidad de una deshidratación previa para su aprovechamiento. La sedimentación (fase 4) es la segunda etapa generadora de la mayor cantidad de RS (66,3-95,7 kg de mancha), considerados un almidón de mala calidad por sus pobres características de sedimentación, haciendo ineficiente la separación física. Las pérdidas en el secado se deben al efecto del viento, ya que esta etapa se realiza en espacios abiertos.

Marmolejo *et al.* (2008) mostraron el potencial de aprovechamiento de la cascarilla, el afrecho y la mancha en alimentación animal, por su contenido energético, y en procesos de compostaje, ajustando previamente algunas variables fisicoquímicas (humedad, pH y relación C/N), lo cual podría lograrse mezclándolos con otros residuos.

3.2 Estudio de métodos, tiempos y movimientos

La tabla 4 muestra los tiempos normales y estándares obtenidos en cada una de las actividades asociadas a las etapas evaluadas en el proceso productivo.

Tabla 4. Tiempos normales y estándar de cada actividad en el proceso productivo para una carga de yuca

Etapa	Principales actividades	T.O.	C (%)	T.N.	S (%)	T.S.
Lavado y pelado	Alistamiento materia prima	0:02:07	80	0:01:42	71	0:02:54
	Alimentación máquina	0:01:41	80	0:01:20	71	0:02:18
	Operación máquina lavado	0:14:30	100	0:14:30	0	0:14:30
	Descargue máquina lavado	0:00:52	90	0:00:47	13	0:00:53
	Subtotal	--	--	--	--	0:20:35
Selección y despunte, rallado	Inspección y despunte de yuca* Alimentación máquina Operación máquina	0:06:38	100	0:06:38	14	0:07:34
	Subtotal	--	--	--	--	0:07:34
Colado	Alimentación máquina colado 1	0:02:13	100	0:02:13	11	0:02:27
	Operación máquina colado 1	0:23:22	100	0:23:22	0	0:23:22
	Descargue máquina colado 1	0:03:01	100	0:03:01	11	0:03:21
	Subtotal máquina colado 1	--	--	--	--	0:29:10
	Alimentación máquina colado 2	0:02:49	100	0:02:49	11	0:03:07
	Operación máquina colado 2	0:24:03	100	0:24:03	0	0:24:03
	Descargue máquina colado 2	0:03:09	100	0:03:09	11	0:03:30
	Subtotal máquina colado 2	--	--	--	--	0:30:40
Tamizado	Inspección tamizado (segundo colado)	0:00:28	80	0:00:22	11	0:00:25
	Subtotal	--	--	--	--	0:0:25
Actividades complementarias**	Limpieza tanque cascarilla	0:00:23	80	0:00:19	11	0:00:21
	Remoción desagüe cascarilla	0:00:19	80	0:00:16	11	0:00:17
	Evacuación tanque de cascarilla	0:04:50	80	0:03:52	11	0:04:18
	Subtotal	--	--	--	--	0:04:56

T.O.: tiempo observado

C: valoración del operario

T.N.: tiempo normal

S: suplemento por actividad

T.S.: tiempo estándar

* Actividad previa a las que conforman la etapa del rallado

** Estas actividades complementarias se realizan en la jornada de trabajo pero no en cada ciclo de producción

Las actividades del proceso que requieren mayor atención del operario son el alistamiento de la materia prima, la alimentación y descargue de máquinas, la inspección y despunte de la yuca, también el tamizado y las actividades complementarias;

la más crítica es la inspección y despunte, que en algunas oportunidades es interrumpida u omitida para atender las máquinas de lavado-pelado y colado debido ante todo a la ausencia de un trabajo estandarizado.



La etapa de rallado se consideró como la más crítica del proceso, ya que el porcentaje de extracción de almidón depende de ella; si la masa rallada es muy gruesa, el rendimiento del proceso es bajo y se pierde mucho almidón en el afrecho desechado; si es demasiado fina, los gránulos de almidón perderán densidad, sufrirán deterioro enzimático y la sedimentación será más lenta y producirá mayor mancha. Se observó que por la falta de capacidad del rallo, a veces se acumulan hasta dos cargas de yuca mientras se da respuesta a otras máquinas del proceso, descuidando la inspección de las raíces de yuca a la entrada del rallo.

Con relación a la operación de las máquinas, en la etapa que se requiere mayor tiempo es en el colado, el cual puede llegar hasta 30 minutos dependiendo del tiempo que el operario estime adecuado y de su nivel de ocupación en la atención global del proceso. Se sugiere reducir los tiempos empleados en las etapas de lavado-pelado y colado para aumentar la capacidad productiva de la línea atendida por un solo operario y reducir el desperdicio de recursos. Para ello se recomienda instalar un sistema de control visual con temporizadores y señales luminosas (bombillos) en cada máquina (lavadora y coladora) que le indiquen al operario, con la activación del bombillo, el instante en que debe ser alimentada o descargada la máquina.

Las variaciones en las etapas y los elevados tiempos ratifican la necesidad de estandarización y optimización del proceso productivo en aspectos como la reorganización y sincronización de las actividades. Adicionalmente, el desempeño de cada etapa está asociado a variables como variedad de yuca, tiempo de cosecha, condiciones de corte y limpieza, estado de desgaste del rallo, tiempo de uso de la seda de las coladoras, etc., lo que hace necesaria la construcción de una historia del proceso mediante registros escritos que permitan asociar dichas variables al desempeño de la línea productiva. Por otro lado, se recomienda el uso de controles en los sistemas de distribución del agua (válvulas, registros, grifos) para reducir su consumo y la producción de residuos líquidos, principalmente en la etapa de colado en la cual, de acuerdo con el balance de masa, se consume la mayor parte.

3.3 Formulación de propuestas de mejoramiento

La tabla 5 muestra las propuestas de mejoramiento recogidas a partir de la evaluación del proceso productivo y el estudio de métodos, tiempos y movimientos.

Tabla 5. Propuestas de mejoramiento por etapa del proceso

Etapa	Propuestas de mejoramiento del proceso productivo
Recepción de raíces y almacenamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución del tiempo de almacenamiento de los bultos de yuca para evitar alteración por DFP¹. • Registro y control de la cantidad y calidad de las raíces recibidas; permite llevar un control del rendimiento del proceso y una trazabilidad que relaciona el producto final con las características de la materia prima. • Uso de cinturones de seguridad para el descargue manual de los bultos de yuca; reduce el riesgo ergonómico y hace más eficiente la actividad. • Reutilización de los empaques.
Lavado y pelado	<ul style="list-style-type: none"> • Estandarización del tiempo de operación en máquina de lavado. Evita desperdicio de agua y tiempo. • Uso de correas en V o dentadas para transmisión de potencia del motor eléctrico; permiten mayor aprovechamiento de la energía consumida por el motor y mejor rendimiento de la máquina.

→

Etapa	Propuestas de mejoramiento del proceso productivo
Lavado y pelado	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de cinturones de seguridad para el levantamiento manual de los bultos de yuca. • Estandarización de actividades complementarias: limpieza de la zona de trabajo y evacuación de cascarilla. • Aprovechamiento de residuos sólidos y líquidos: cascarilla (suplemento alimenticio de animales) y agua residual (reutilizada en la misma etapa de lavado).
Selección y despunte	<ul style="list-style-type: none"> • Mejoramiento de la actividad de inspección de yuca lavada para evitar el paso ocasional de yuca en mal estado, que puede afectar la operación del rallo, acortar la vida útil y reducir la calidad del almidón. • Registro de la información y realimentación con otras etapas para correlacionar variables.
Rallado	<ul style="list-style-type: none"> • Estandarización y control en el consumo de agua de la máquina mediante un dispositivo de regulación. • Definición de política de mantenimiento preventivo del rallo. • Aumento de la capacidad del rallo. • Estandarización y control del bombeo de masa rallada a cada coladora. • Uso de correas en V o dentadas para transmisión de potencia del motor eléctrico.
Colado	<ul style="list-style-type: none"> • Automatizar la homogeneización de la masa rallada para reducir el consumo de agua y mejorar el rendimiento del operario. • Estandarización del tiempo de operación de máquinas de colado. Comúnmente depende de la disponibilidad del operario para atender la alimentación, y el descargue se define por observación visual del color de la lechada. • Definir política de mantenimiento asociada al cedazo de las coladoras, de tal manera que el proceso productivo pueda ser planeado sin ser afectado por este procedimiento. • Aprovechamiento del afrecho (compostaje y suplemento en dietas animales).
Tamizado	<ul style="list-style-type: none"> • Estandarización en la frecuencia de inspección. Se realiza de manera aleatoria, según el nivel de ocupación del operario existiendo pérdidas de lechada por exceso de afrecho sobre el tamiz.
Sedimentación	<ul style="list-style-type: none"> • Estandarización de la alimentación de los canales de sedimentación en términos de caudal, altura de lámina de lechada y punto de aplicación según la calidad y procedencia de la yuca. • Aprovechamiento de la mancha en alimentación animal o compostaje (Marmolejo <i>et al.</i>, 2008).
Fermentación	<ul style="list-style-type: none"> • Registro y control del tiempo de fermentación. • Evaluar técnicas de fermentación que optimicen el proceso.
Secado, triturado, empaque y almacenamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluar técnicas de secado naturales o mecanizadas (de bajo consumo energético) que eviten pérdidas de almidón por viento o lluvia. • Reducir el riesgo ocupacional por inhalación de material particulado y el riesgo ergonómico durante las actividades de empaque y almacenamiento mediante el uso de mascarilla facial con filtro.
Actividades complementarias	<ul style="list-style-type: none"> • Estandarización de actividades como limpieza del desagüe de la máquina de lavado, limpieza y evacuación del tanque de cascarilla, limpieza del tamiz del segundo colado. Inspecciones varias (desempeño de la operación de máquinas de lavado y colado, limpieza del área de trabajo, etc.).

¹ DFP: Deterioro fisiológico poscosecha. Aparición de manchas azules y estrías vasculares marrón en la periferia de la raíz que afectan la calidad y cantidad de almidón contenido en las raíces de yuca.



Además de las propuestas de mejoramiento planteadas en cada una de las etapas del proceso, se proponen las siguientes estrategias: (i) formulación de un plan de mantenimiento preventivo en máquinas e instalaciones; (ii) definición de un programa de capacitación y sensibilización al personal de la planta relacionado con el uso racional del agua y energía y con aspectos de salud ocupacional; (iii) reutilización del agua residual de algunas áreas del proceso; (iv) aprovechamiento del agua lluvia; (v) instalación de equipos y dispositivos ahorradores de agua.

4. CONCLUSIONES

El balance de masa del proceso productivo mostró una eficiencia entre el 51 y 59 %, siendo la etapa de colado la de mayor consumo de agua y generación de residuos sólidos, representados en el afrecho. La etapa de sedimentación es la que genera la mayor cantidad de residuos líquidos con elevada carga orgánica, que requieren un tratamiento previo para su disposición final en un cuerpo hídrico.

Se evidenció la necesidad de optimizar los tiempos y estandarizar las etapas de lavado-pelado y colado, además de incrementar la capacidad del rallado y llevar el registro de la información como una herramienta económica que puede permitir en el futuro un mejor control de las variables en cada etapa del proceso. Las estrategias de aprovechamiento de la cascarilla, el afrecho y la mancha en la alimentación animal y el compostaje se constituyen en una alternativa viable para dar valor agregado a estos residuos.

Se recomienda implementar estrategias de PML que mejoren el proceso productivo y favorezcan el incremento de la productividad, logrando la disminución de la contaminación ambiental por contar con opciones de reutilización, minimización y tratamiento de los residuos. En el proceso de extracción de almidón de yuca se pueden lograr beneficios económicos con la optimización de los procesos y el aprovechamiento de materias primas y residuos, además de lograrse impactos positivos

sobre la comunidad y el ambiente por el adecuado manejo, el tratamiento y disposición de los residuos sólidos y líquidos.

REFERENCIAS

- APHA, AWWA and WPCF. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. U.S.A, 20th ed., 2005.
- Argote, Francisco; Velasco, Reinaldo y Paz, Paulo (2007). "Estudio de métodos y tiempos para obtención de carne de cuy (*Cavia porcellus*) empacada a vacío". *Revista Facultad de Ciencias Agropecuarias*, vol. 5, No. 2 (agosto), pp. 103-111.
- Arroyave, Gustavo; Rojas, Olga y Torres, Patricia. *Depuración anaerobia de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en sistemas de fases separadas*. São Carlos, Brasil: Universidade Federal, XI SINAFERM Simpósio Nacional de Fermentações, 1996.
- Ayala, David. *Evaluación de la separación física del almidón y de la mancha en el proceso de extracción de almidón agro de yuca*. Tesis pregrado (Ingeniería Sanitaria). Cali: Universidad del Valle, CD-ROM, 2005.
- Cajigas, Alvaro. *Evaluación del potencial de reducción de partículas del proceso de extracción de almidón de yuca con énfasis en la etapa de sedimentación*. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería. Cali: Universidad del Valle, 2008. 102 p.
- CNPML Centro Nacional de Producción Más Limpia. *Qué es PML*. Colombia, 2006. [consultado el 15 de marzo de 2010] Disponible en: <http://www.cnpml.org/html/que_es_pml.asp>
- Colin, X.; Farinet, Jean-Luc; Rojas, Olga and Alazard, Didier (2007). "Anaerobic treatment of cassava starch extraction wastewater using a horizontal flow filter with bamboo as support". *Bioresource Technology*, vol. 98, No. 8, pp. 1602-1607.
- Colombia. Ministerio del Medio Ambiente. *Memorias Primer Seminario Internacional de Producción Limpia*. Cartagena, 1996. 11 p. (9-10 de mayo).
- CPTS Centro de Promoción de Tecnologías Sostenibles (Bolivia). *Guía técnica de producción más limpia para curtiembres*. 2003. 249 p. [consultado el 7 de diciembre de 2009] Disponible en: <<http://www.cpts.org.>>
- CRC Corporación Regional del Cauca. *Ralladero limpio*. Cartilla educativa. Popayán: CRC, 2005. pp. 6-8.
- FAO Food and Agriculture Organization. *El mercado de almidón añade valor a la yuca*. Departamento de

- Agricultura, Bioseguridad, Nutrición y Protección del Consumidor. Estados Unidos, 2006. [consultado el 7 de diciembre de 2009] Disponible en: <<http://fao.org/AG/default.html>>
- Fernandes, Junior Ary. *Tratamentos físicos e biológicos da manipueira*. En: Cereda, M. P. (coord.). São Paulo: Fundação Cargill. Vol. 4, cap. 10, pp. 138-150. Manejo, uso e tratamento de subprodutos da industrialização da mandioca. Brasil 2007. [consultado el 16 de marzo de 2007] Disponible en: <http://www.abam.com.br/livros_cargill/volume4.htm>
- Fernández D., Daniel y Varsavsky, Alicia L. *Prevención de la contaminación, producción más limpia y ecoeficiencia: Desde la remediación hacia la prevención*. Argentina: AIDIS, Fundación Nexus, 2005. 7 p.
- Marder, R. C.; De Araújo, R.; Moreno, M. A.; Curran, A. and Trim, D. S. "Investigating sour starch production on Brazil". In: *Cassava flour and starch, progress in research and development*. ISBN 958-9439-88-8. CIAT, 1996. pp. 247-258.
- Marmolejo, Luis; Pérez, Andrea; Torres, Patricia; Cajigas, Álvaro y Cruz, Camilo (2008). "Aprovechamiento de los residuos sólidos generados en pequeñas industrias de almidón agrio de yuca". *Livestock Research for Rural Development*, vol. 20, No. 7 (julio). 17 p.
- Mulyanto Adi dan Titiresmi. *Implementation of anaerobic process on wastewater from tapioca starch industries*. Institute for Environmental Technology, Agency for the Assessment and Application of Technology. Indonesia, 2003. [consultado el 18 agosto de 2009] Disponible en: <http://sdsap.org/data/Tiresmi & Mulyanto_W13.pdf>
- Niebel, Benjamin y Freivalds, Andris. *Ingeniería industrial. Métodos, estándares y diseño del trabajo*. 10ª ed. México: Alfa-Omega, 2001. 386 p.
- Ospina, Bernardo y Cevallos, Hernán. *La yuca en el tercer milenio*. Colombia: CIAT, Clayuca, Fenavi y Minagricultura. ISBN 958-694-043-8, 2002. 585 p.
- Pérez, Andrea. *Tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca, mejoramiento de variables ambientales y operacionales en escala real*. Tesis de Maestría (Posgrado en Ingeniería Sanitaria y Ambiental). Cali: Universidad del Valle, 2007. 104 p.
- Pérez, Andrea y Torres, Patricia. (2008). "Evaluación del comportamiento hidrodinámico como herramienta para optimización de reactores anaerobios de crecimiento en medio fijo". *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, No. 45 (septiembre), pp. 27-40.
- Pérez, Andrea; Torres, Patricia y Silva, Jorge. (2009). "Tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. Optimización de variables ambientales y operacionales". *DYNA*, Año 76, No. 160 (diciembre), pp. 139-148.
- PNUMA Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. *Producción más limpia, 2006* [consultado el 15 de marzo de 2010] Disponible en: <http://www.pnuma.org/industria/produccion_limpiar.php>
- Rakshit, S. *Recent trends in cassava starch production and application*. Tailandia, 2002 [consultado el 7 de diciembre de 2009] Disponible en: <<http://www.dgfdt/loads/st00/rakshint.pdf>>
- Torres, Patricia; Cruz, Camilo; Marmolejo, Luis F.; Cajigas, Álvaro y Pérez, Andrea. *Producción más limpia aplicada al proceso de extracción de almidón de yuca*. Proyecto de investigación. Colciencias-Universidad del Valle, Colombia, 2006. 120 p.