

# Desarrollo de un equipo de tambores rotatorios para la fermentación de subproductos agroindustriales en medio sólido<sup>1</sup>

I.Q. MSc. Alberto Duarte T.<sup>2</sup>  
I.Q. MSc. Gustavo Buitrago H.<sup>3</sup>

## INTRODUCCION

*Actualmente, ante la carencia de una alternativa para la utilización de los subproductos agroindustriales, uno de los mayores problemas afrontados por nuestro país es la contaminación ambiental producida por la disposición de estos residuos. Una solución es la conversión de los subproductos, mediante fermentación en medio*

*sólido, en materias primas de los procesos de elaboración de alimentos para animales.*

*La información sobre este tipo de fermentación y sobre el diseño y disponibilidad de equipos para la realización de estudios confiables y reproducibles es escasa. Por esta razón, y con el propósito adicional de estimular la línea de investigación sobre tratamiento de residuos agroindustriales, el Instituto de Biotecnología de la Universidad Nacional de Colombia, apoyado por la Organización de Estados Americanos (OEA) y Colciencias, decidió emprender el diseño, construcción, caracterización y operación de un equipo de tambores rotatorios. El presente artículo es un resumen de las diferentes etapas de la investigación, donde se describen el comportamiento del equipo y los resultados obtenidos en la fermentación de pulpa de café.*

---

<sup>1</sup> Ponencia presentada por el Ingeniero Alberto Duarte Torres en el 1º Seminario Latinoamericano de Fermentación en Estado Sólido, Recife, Brasil. Diciembre 10 - 13, 1990.

<sup>2</sup> Profesor Asociado. Departamento de Ingeniería Química, Instituto de Biotecnología, Universidad Nacional de Colombia.

<sup>3</sup> Profesor Asistente, Instituto de Biotecnología, Universidad Nacional de Colombia.

## 1. DESCRIPCION DEL EQUIPO

El equipo de tambores rotatorios, construido básicamente con el propósito de obtener datos confiables y reproducibles en la fermentación de diferentes sustratos, proporciona las condiciones óptimas para el crecimiento del microorganismo seleccionado, tales como temperatura, humedad, agitación, etc.; además, el equipo mencionado provee aire y agua en condiciones estériles.

El fermentador, desarrollado por el *Instituto de Biotecnología y el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia*, fue diseñado por Arias y Misas (1), construido por Ospina y Rengifo (10), caracterizado por Cruz y Naranjo (5), y evaluado por Buitrago (2,3), y Morales y Vivas (9).

Carrillo y Tovar (4), estudiaron el efecto del flujo de aire sobre la temperatura de fermentación. García y Rivera (8) evaluaron las operaciones unitarias involucradas en la fermentación en estado sólido de pulpa de café. Rodríguez y Sánchez (11) realizaron los ensayos preliminares de fermentación de pulpa de café con hongos, además de algunos ensayos biológicos. García (7) cuantificó los polifenoles en la pulpa y estudió la interacción de estos compuestos con las proteínas y sus posibles consecuencias sobre el metabolismo del hierro. Dueñas y Cruz (6), realizaron ensayos de eliminación de polifenoles mediante extracción con solventes, además de algunos ensayos biológicos.

El equipo está constituido fundamentalmente por las unidades de acondicionamiento de aire y de fermentación (Figura 1). El acondicionamiento de aire (Tabla 1), se realiza en una columna de burbujeo provista de dos resistencias eléctricas. La columna se alimenta con agua previamente esterilizada hasta una altura suficiente para cubrir la resistencia encargada de calentar el siste-

ma de humidificación hasta la temperatura de operación. Por el fondo de la columna se alimenta aire, previamente esterilizado en un filtro empacado con lana de vidrio. La segunda resistencia (Tabla 1) se utiliza para ajustar el porcentaje de saturación del aire mediante el calentamiento de aire a humedad relativa constante. La columna está provista de un indicador de nivel.

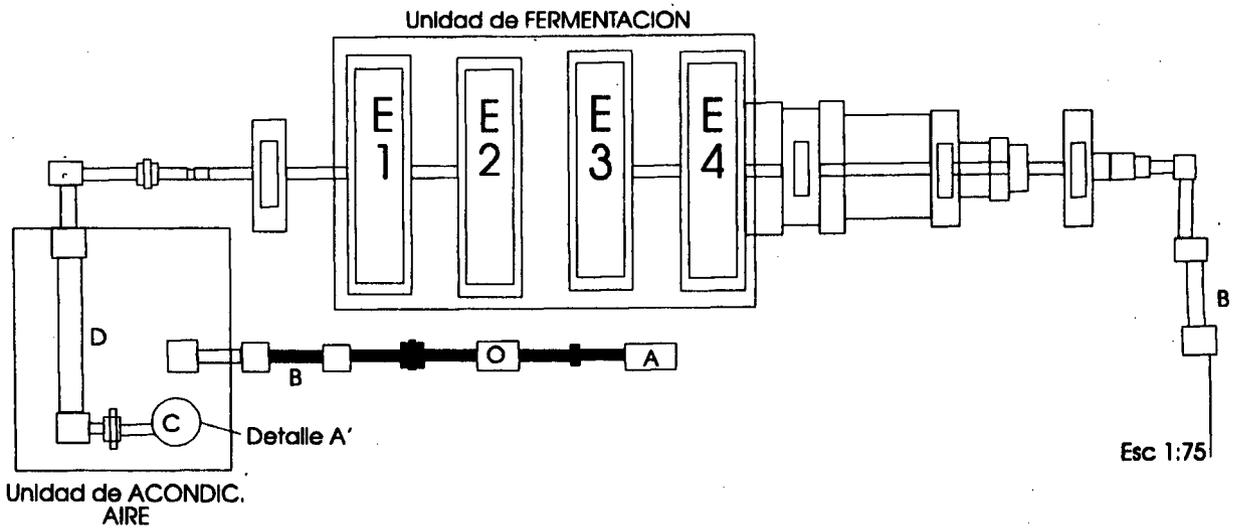
La unidad de fermentación está compuesta por cuatro tambores (Figura 2) acoplados a un eje común. Los tambores están seccionados en mitades, unidas por tornillos para facilitar su desmonte y limpieza; el sello se logra mediante empaques de caucho siliconado. Cada tambor posee dos mirillas con su correspondiente tapa roscada para observar la fermentación y tomar muestras.

El eje que soporta los tambores está formado por dos tubos excéntricos; por el ducto exterior fluye aire acondicionado y por el interior se remueve el aire agotado. El eje se acopla a la estructura mediante chumaceras y cuenta con un sello dinámico que lo conecta con la tubería fija de conducción de aire. En la Tabla 1 se presentan otras características de los tambores y el eje. Un motor de 0,6 hp, y un sistema de piñones y cadena acoplado al eje, permiten regular la velocidad de agitación de los tambores entre 6 y 40 rpm.

El sistema de suministro de aire consta de un compresor, dos filtros de aire y un rotámetro. Uno de los filtros está ubicado antes de la columna de humidificación y el otro a la salida del fermentador. Los filtros, construidos con tubería de acero inoxidable de 1 pulgada de diámetro nominal y 10 cm de longitud, están empacados con lana de vidrio.

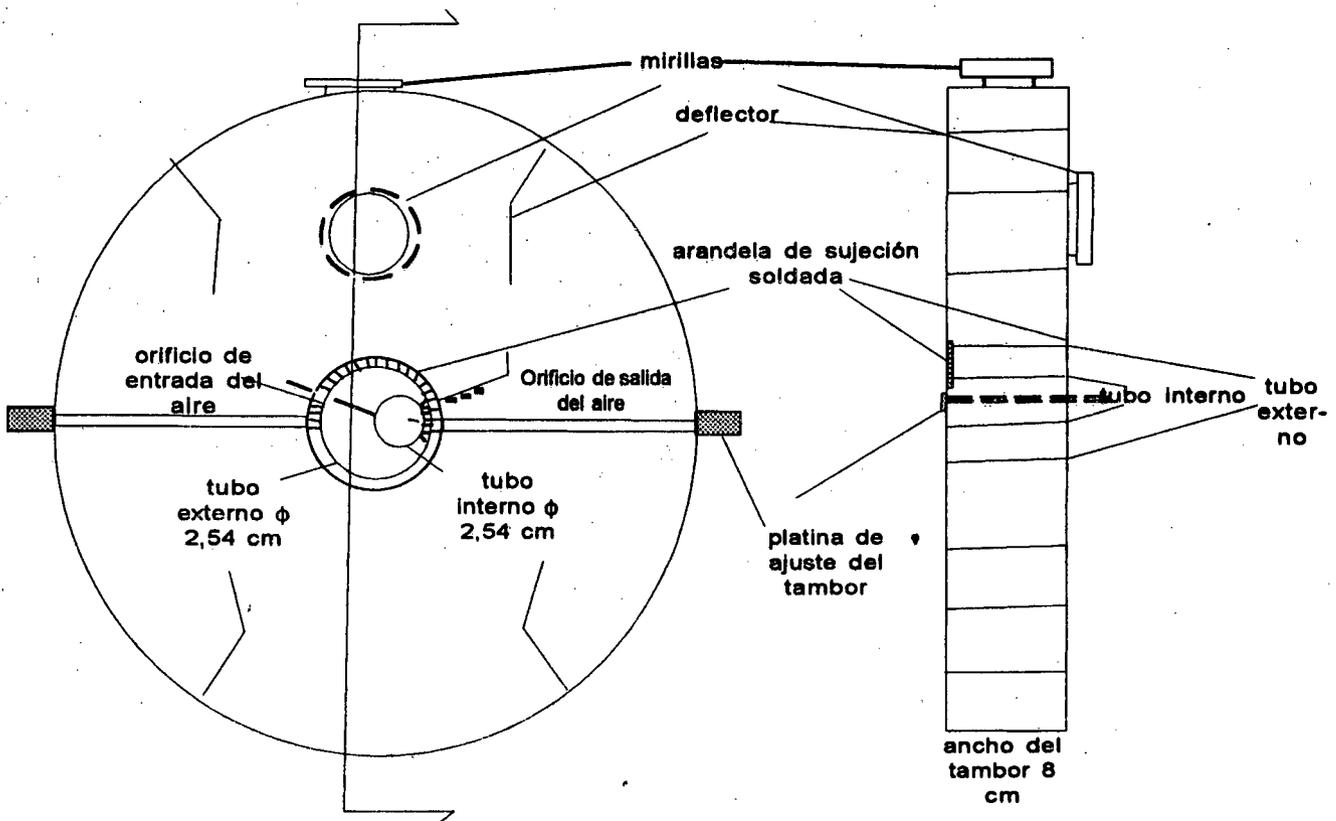
El fermentador está equipado con dos controladores de tipo análogo. El controlador

**Figura 1. Diagrama de flujo del fermentador en medio sólido, (9)**



- A. Sistema de regulación de aire
- B. Filtros de aire
- C. Columna de humidificación
- D. Resistencia de ajuste de la temperatura del aire.
- E. Tambores de fermentación

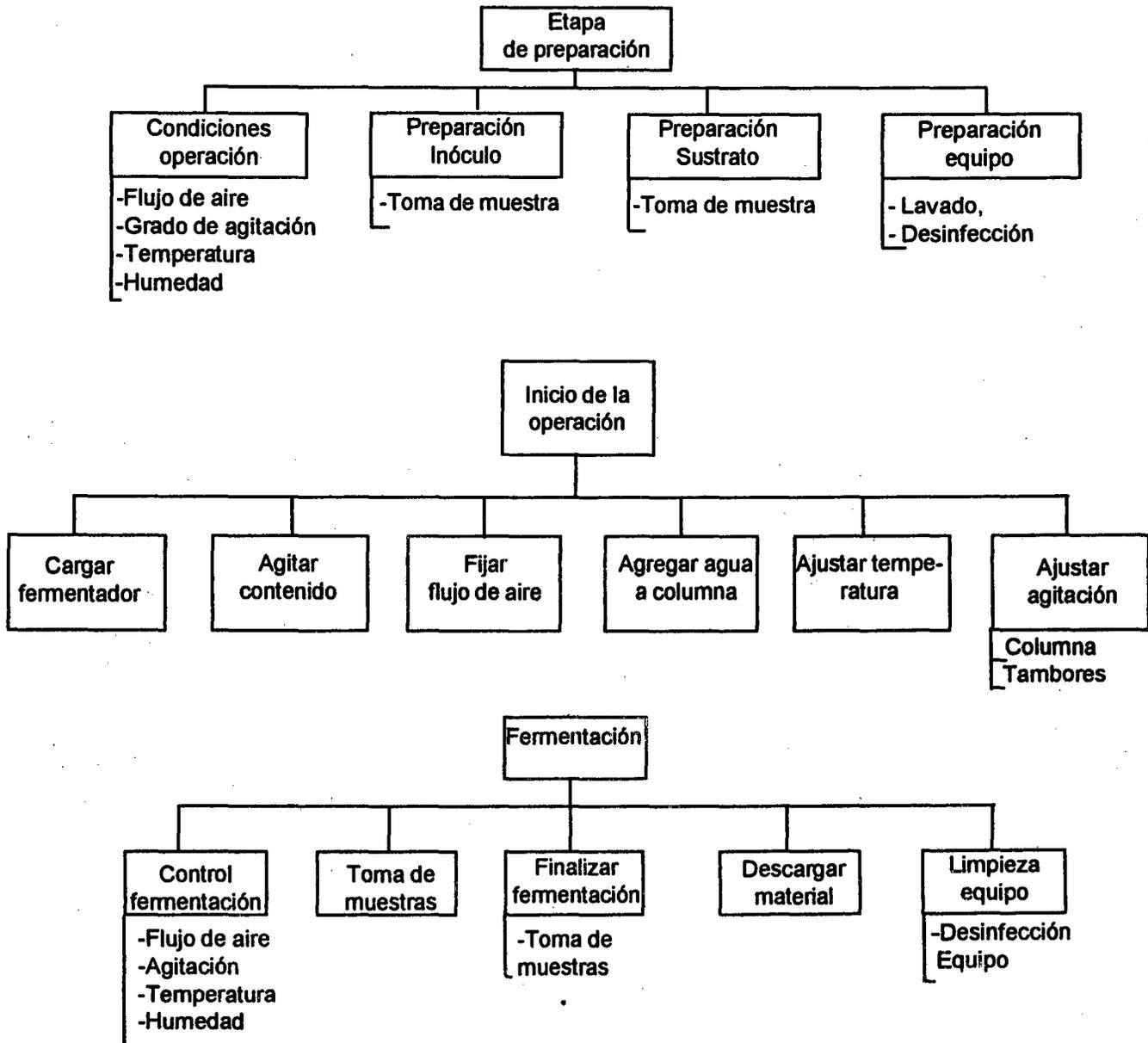
**Figura 2. Corte transversal del tambor y el eje, (4)**



**Tabla 1.** Características de los sistemas de humidificación del aire y ajuste final de temperatura.

| <b>Elemento</b>  | <b>Características</b>  |
|--|---|
| Controladores  | Tipo: proporcional de ganancia variable<br>Voltaje: 110 V.<br>Intervalo de operación (°C): 20 - 100.<br>Potencia máxima manipulada 1440 W.  |
| Resistencia para calentamiento del agua (Sistema de humidificación del aire) | Voltaje: 110 V.<br>Potencia: 800 W.<br>Longitud: 0,50 m.<br>Material: cobre   |
| Resistencia para calentamiento del aire.                                     | Tipo: encapsulada<br>Longitud: 0,5 m.<br>Voltaje: 110 V.<br>Potencia: 200 W.<br>Material : cobre  |
| Columna de burbujeo  | Difusor de aire:<br>Diámetro: 0,0889 m.<br>Altura: 0,42 m.<br>- diámetro de los orificios: 0,001 m.<br>- número de orificios: 22<br>Material: acero inoxidable.   |
| Elementos primarios de medida  | Sensor LM35<br>Ganancia: 10 (mV)/(°C).<br>Longitud: 0.076 m.<br>Diámetro: 0.28 m.   |
| Tambores   | Soporte de los tambores:<br>- Eje de tubos excéntricos<br>Diámetro exterior: 0.038 m, calibre 40<br>Diámetro interior: 0,013 m, calibre 40<br>Orificios de entrada y salida del aire:<br>Diámetro: 0,0027 m.<br>Material: acero inoxidable 340. |

Figura 3. Diagrama de operación (9)



CT<sub>1</sub> actúa sobre el sistema de humidificación del aire y el controlador CT<sub>2</sub> sobre el sistema de ajuste final de temperatura (Figura 1). En la Tabla 1 se presentan algunas características de estos controladores.

## **2. OPERACION DEL EQUIPO**

En la Figura 3 se muestra el diagrama de operación.

### **2.1. FLUJO DE AIRE**

La presión de trabajo, correspondiente al flujo de aire requerido para la fermentación, se fija mediante una válvula de globo y un regulador de presión. En la Figura 4 se muestra la curva de calibración del caudal de aire con la presión de entrada al equipo.

### **2.2 HUMEDAD**

Una vez determinados los valores de la temperatura y la humedad relativa en la unidad de fermentación, se obtiene el valor de la humedad absoluta, en la carta psicrométrica, correspondiente al sitio de instalación del fermentador (Bogotá); con este valor, y el flujo de aire fijados previamente, se determina la temperatura a la salida de la columna de humidificación (Figura 5). La temperatura de salida se fija en el controlador CT<sub>1</sub>, de acuerdo con el correspondiente valor de la temperatura de referencia (Figura 6).

### **2.3 AGITACION**

La velocidad de agitación se gradúa mediante una llave localizada sobre el motovariador.

### **2.4. TEMPERATURA DE FERMENTACION**

La temperatura de fermentación se obtiene a partir de la curva de calibración del controlador CT<sub>2</sub> (Figura 6). Curvas similares pueden consultarse para cada tambor con diferentes caudales

de aire y diferentes alturas de agua en la columna de humidificación [Carrillo y Tovar (4)].

## **2.5 CARACTERISTICAS DEL EQUIPO EN VACIO**

En la Figura 7 se muestra la caracterización del equipo en vacío; curvas similares pueden consultarse para cada tambor con diferentes caudales de aire y diferentes alturas de agua en la columna de humidificación [Carrillo y Tovar (4)].

## **3. FERMENTACION DE PULPA DE CAFE**

### **3.1. RECOLECCION Y SECADO**

Como el beneficio del café se hace por vía húmeda, es necesario secar la pulpa al sol, o en silos, para evitar su descomposición. La pulpa fué secada al sol, hasta alcanzar una humedad constante de 12,8%.

### **3.2. MOLIENDA Y TAMIZADO**

La pulpa seca se pasa por un molino de cuchillas y luego por un sistema de tamices. Se procesa la fracción que pasa la malla 40 y es retenida sobre la 80.

### **3.3 ESTERILIZACION**

La pulpa requerida se humedece con agua destilada, una parte de pulpa y dos de agua destilada; luego se esteriliza en autoclave durante 15 minutos a 121°C y 103,393 kPa (15 psi).

### **3.4 ESTERILIZACION DEL EQUIPO**

Se agrega fenol al 3% a la columna de humidificación hasta una altura de 0,12 m. Luego se suministra aire a 68,95 kPa, durante 15 minutos, para arrastrar fenol a los tambores, mientras se agitan a 6 rpm. La solución de fenol de la columna se reemplaza por agua destilada y se

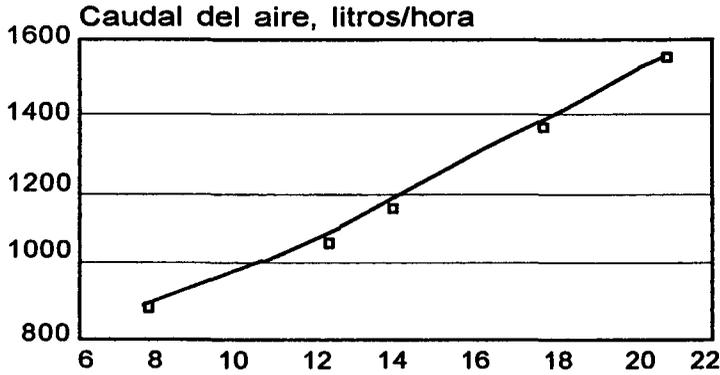


Figura 4. Caracterización del equipo en vacío. Altura del agua en la columna: 0,18 m. Temperatura de salida del aire de la columna de humidificación: 18°C, (4)

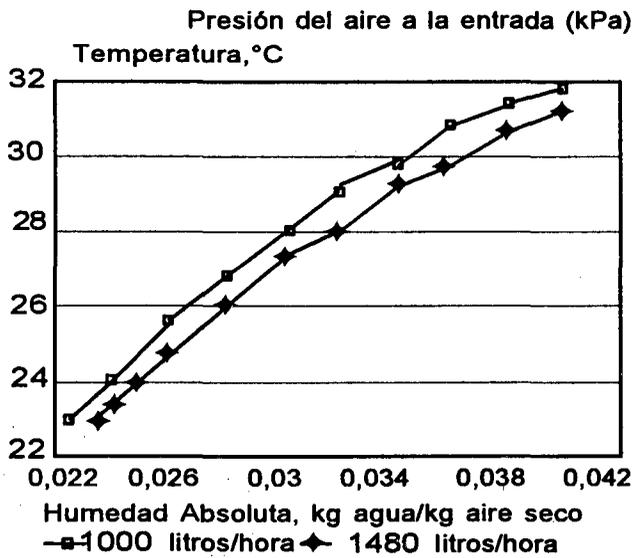


Figura 5. Relación entre temperatura y humedad absoluta del aire. Altura del agua en la columna: 0,24 m, (5)

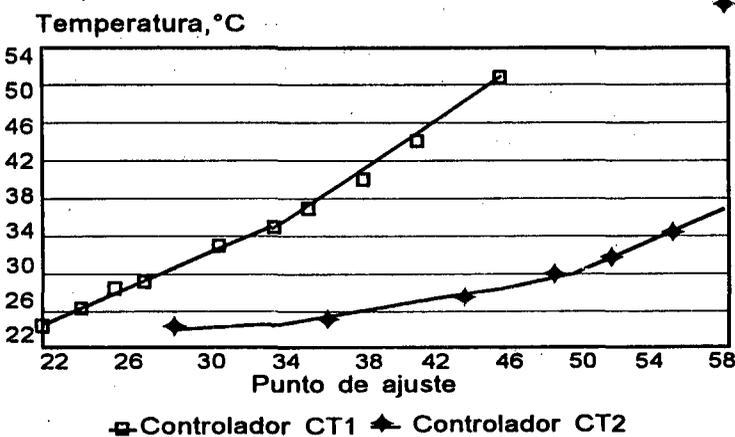


Figura 6. Curvas de calibración de los sistemas de control. Curva CT<sub>1</sub>: Temperatura de salida del aire de la columna. Curva CT<sub>2</sub>: Temperatura en el Tambor 1, para un caudal de aire de 1,48 m<sup>3</sup>/s, y altura del agua en la columna de humidificación de 0,18 m, (4)

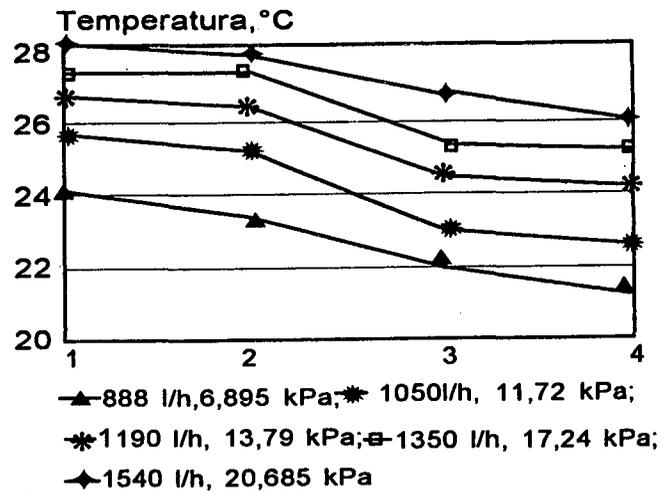


Figura 7. Caracterización del equipo en vacío para una altura del agua en la columna de humidificación: 0,18 m y aire afluyente al equipo a diferentes presiones (4)

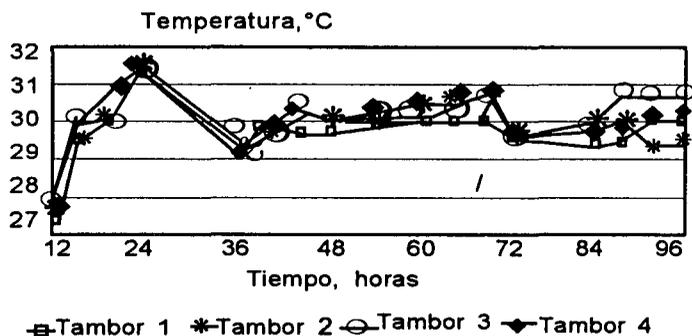


Figura 8. Caracterización del equipo durante la fermentación. Altura del agua en la columna de humidificación: 0,24 m. Caudal de aire: 1480 litros/hora, (4)

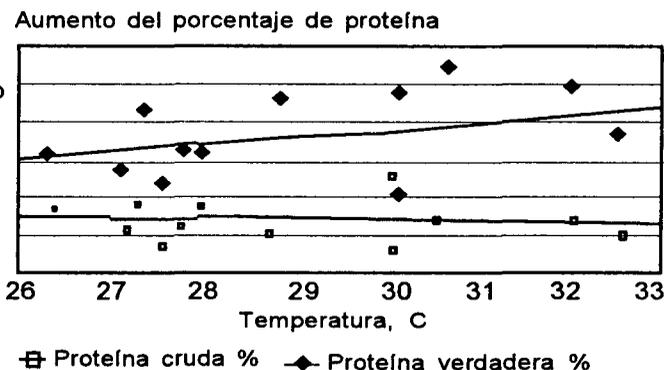


Figura 9. Representación gráfica de la curva de tendencia del aumento del porcentaje de proteína con la temperatura de fermentación, para una humedad del aire de 70± 5%, (4)

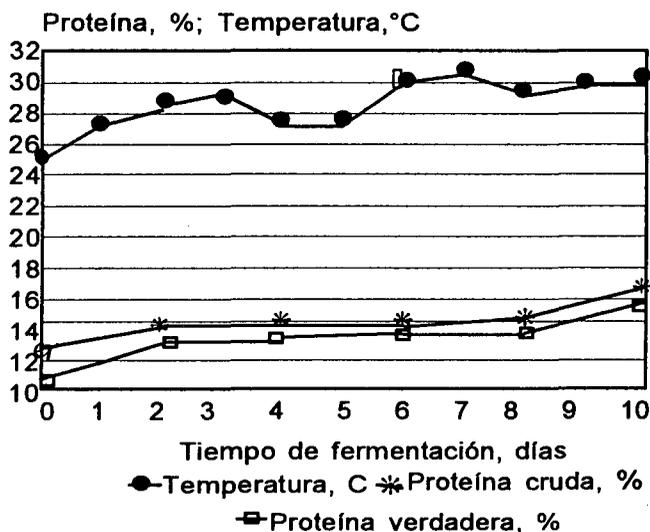


Figura 10. Variación de los porcentajes de proteína cruda y verdadera, y temperatura de la pulpa durante la fermentación, (9)

burbujea aire durante 2 horas a 68,95 kPa, se desocupa la columna y se mantiene el flujo de aire a la misma presión durante 1 hora.

### 3.5 PREPARACION DEL INOCULO

La fermentación de la pulpa se realiza con una cepa de *Aspergillus niger*. Para estandarizar el inóculo se elabora una curva de densidad óptica en función del número de esporas/ml. La concentración del preinóculo fué  $3.47 \times 10^{10}$  esporas

de *Aspergillus niger* /kg de pulpa seca.

### 3.6 CARGA DEL SUSTRATO

El sustrato, con una humedad inicial del 70%, previamente mezclado con el inóculo (0,9 kg sustrato/tambor y 0,1 kg. inóculo/tambor) se carga al fermentador a través de una mirilla, en ambiente estéril. Para lograr una distribución uniforme del inóculo, el sistema de tambores se agita durante 5 minutos a 6 rpm.

### 3.7 FERMENTACION

Se realizan ensayos de fermentación con diferentes caudales de aire (humedad relativa 85%) y diferentes alturas de agua en la columna de humidificación.

### 3.8 RESULTADOS

En la Figura 8 se muestra el comportamiento del equipo durante la fermentación, para un caudal de aire de  $1,48 \text{ m}^3/\text{s}$  y una altura de agua en la columna de humidificación de 0,24 m. En la Figura 9 se muestra la curva de tendencia del aumento del porcentaje de proteína con la temperatura de fermentación, para una humedad del

aire de  $70 \pm 5$  %. Carrillo y Tovar (4), presentan datos adicionales correspondientes a diferentes caudales y diferentes alturas de agua. Morales y Vivas (9), presentan en la Figura 10 los resultados obtenidos durante la fermentación de pulpa de café con una humedad inicial de 70 %, base húmeda; flujo de aire, con una humedad relativa de 85 %, a razón de 1000 litros/h; y una altura de agua en la columna de humidificación: 0,24 m.

### 4. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos, indican que en el equipo desarrollado se obtienen resultados confiables y reproducibles lográndose un control aceptable de la temperatura y humedad y un control preciso del grado de agitación y mezcla del sustrato.

- Los gradientes de temperatura que se presentan entre tambores, en todos los ensayos, indican la necesidad de estudiar los sistemas de control de temperatura y de alimentación de aire caliente a cada tambor.

- El problema de arrastre de agua desde la columna de burbujeo para caudales de aire mayores que  $1,48 \text{ m}^3/\text{h}$ , y alturas de agua en la columna mayores que 0,24 m indica la necesidad de rediseñar la columna con una mayor área transversal para disminuir la velocidad ascendente del aire y el tamaño de las gotas de agua arrastradas, o estudiar una alternativa diferente para la humidificación.

- En todos los ensayos de fermentación de pulpa de café, en el equipo de tambores rotatorios, se observaron incrementos en los porcentajes de proteína cruda y proteína verdadera, y disminución del contenido de polifenoles. Estos resultados fueron obtenidos sin necesidad de suplementar la pulpa con una fuente de nitrógeno.

- Los resultados obtenidos en la fermentación de

pulpa de café, indican la necesidad de realizar ensayos adicionales para determinar los valores óptimos de temperatura, humedad, flujo de aire, nivel de agitación, concentración del inóculo, tamaño de partícula, pH y necesidad de nutrientes. Ensayos similares pueden realizarse con otros sustratos. Simultáneamente con este proceso de optimización, se requieren estudios de factibilidad técnico-económica con el propósito de identificar los sustratos y niveles de operación más adecuados para este tipo de proceso de fermentación y proceder al escalado del equipo.

### 5. BIBLIOGRAFIA

- (1) ARIAS, J., MISAS, O., "Diseño de un fermentador en estado sólido para el tratamiento de la pulpa de café". Proyecto de grado. Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1984.
- (2) BUITRAGO, G., "Construcción de un fermentador para operación en estado sólido y diseño de los sistemas de control. Utilización integral de los subproductos del café". Tercer Simposio Internacional, Guatemala, 1987.
- (3) \_\_\_\_\_, "Evaluación del Tratamiento de la Pulpa del Café por fermentación en estado sólido". Proyecto de Grado. Postgrado en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1988.
- (4) CARRILLO, L.P. y TOVAR, O., "Estudio del efecto del flujo de aire sobre la temperatura de la fermentación en medio sólido de pulpa de café en un fermentador de tambores". Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1989.
- (5) CRUZ, V. y NARANJO, F., "Caracterización de un fermentador para operación en estado sólido". Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1983.
- (6) DUEÑAS, J. y CRUZ, J., "Ensayos para eliminar polifenoles de la pulpa de café mediante extracción con solventes y ensayo biológico". Proyecto de Grado, Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1979.
- (7) GARCIA, L., "Cuantificación de los polifenoles presentes en la pulpa de café y su interacción con proteínas y sus posibles efectos en el metabolismo del hierro". Proyecto de

- Grado, Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1983.
- (8) **GARCIA, P. y RIVERA, E.**, "Evaluación de las operaciones unitarias involucradas en la fermentación en estado sólido de pulpa de café". Proyecto de Grado. Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1986.
- (9) **MORALES, A. VIVAS, M.** "Estudio de algunas variables de la fermentación en estado sólido de la pulpa de café. Proyecto de Grado. Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1989.
- (10) **OSPINA, P. y RENGIFO, R.**, "Construcción de un fermentador para operación en estado sólido y diseño de los sistemas de control. Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1986.
- (11) **RODRIGUEZ, J. y SANCHEZ, E.**, "Ensayos preliminares para la fermentación de pulpa de café con hongos y ensayos biológicos". Proyecto de Grado, Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, 1983.

# **INGENIERIA E INVESTIGACION**

Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Santafé de Bogotá, D.C.

Publicación especializada al servicio de la comunidad científica y técnica del país.

**SOLICITE TARIFAS  
PUBLICITARIAS**

**PARA:**

Contraportada exterior  
Contraportadas interiores  
Página interior  
Media página

Publicación trimestral

**¡ ANUNCIE EN ELLA!**