

# CLARIFICACIÓN DEL GUARAPO DE CAÑA DE AZÚCAR EN LA PRODUCCIÓN DE PANELA

Carlos Gallardo Cabrera<sup>1</sup>; Holger Felipe Gallardo Cabrera<sup>2</sup>

---

## RESUMEN

*Ante la evidente falta de calidad en la producción de panela, se presenta una serie de estudios encaminados principalmente a conocer más a fondo los contaminantes presentes en el jugo de caña (guarapo), como la base lógica para plantear soluciones técnicas que permitan un mejor control del proceso. Los resultados hallados, según estudios y comparaciones estadísticas, permiten concluir que los contaminantes en su mayoría son de origen vegetal y con tamaños menores a las 100 micras. Se procede a buscar los posibles métodos de separación y se evalúan por medio de ensayos de laboratorio. Como resultados se obtiene que ni la filtración a nivel micro ni la centrifugación son económica y operativamente viables. Por otro lado, se logran excelentes resultados con el uso de polímeros como floculantes, tanto por tiempo, precio y por la calidad de los jugos obtenidos.*

**Palabras claves:** Clarificación, tamaño de partículas, panela, guarapo.

---

## ABSTRACT

### CLARIFY OF THE SUGAR CANE JUICE FOR THE MANUFACTURE OF "PANELA"

*In view of evident lack of quality for the manufacture of "panela", there is a series of studies leading mainly to a deeper knowledge of the contaminants contained in the sugar cane juice ("guarapo"), as a logic base to give technical solutions that allow a better control of the process. The found results, according to studies and statistical comparisons, let include that most of the contaminants are of vegetable origen, and their sizes are smaller than 100 microns. The following procedure is to look for the possible methods of separation and its later evaluation through laboratory experiments. As a result, was found that nor the micro-filtration neither the centrifugation are nor economic neither operatively viables.*

*On the other hand, excellent results are got with the use of polymers as floculants, for reasons*

---

<sup>1</sup> Ingeniero Mecánico. Egresado Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. e-mail: gallardo74@latinmail.com

<sup>2</sup> Ingeniero Mecánico. Egresado Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. e-mail: gallardo74@latinmail.com

*such as time, price and for the quality of the extracted juices.*

**Key words:** *Clarification, particle size, panela, guarapo.*

## INTRODUCCIÓN

Mediante diagnósticos participativos efectuados con grupos de productores y técnicos en distintas zonas del país se ha podido identificar a las deficientes prácticas de limpieza y clarificación de los jugos como una de las problemáticas de la producción panelera. La única mejora al proceso tradicional es la inclusión de separadores inerciales, más conocidos como prelimpiadores, son excelentes retenedores de los sólidos gruesos que flotan o decantan, pero completamente pasivos con respecto a los sólidos en suspensión. El estudio aquí planteado busca detectar más a fondo las causas de la deficiencia en la limpieza y crear las bases, que permitan a cualquier productor panelero el implementar los medios más adecuados para combatir el problema.

## SECCIÓN EXPERIMENTAL PARA DISCRIMINAR EL CONTENIDO DE LOS JUGOS

En miras a buscar argumentos válidos como base para plantear soluciones que favorezcan la clarificación, la selección de equipos y/o procesos adicionales e incluso recomendaciones de manejo, se plantea la necesidad de cuantificar el tamaño de las partículas presentes en el guarapo luego de atravesar los prelimpiadores, es decir, en el tanque de almacenamiento. La razón de escoger

este punto como la población a muestrear es que todos los contaminantes presentes continuarán en el proceso y quedarán incluidos como parte del producto, excepto por los que se eliminan en la operación de descachazado.

El estudio se enfoca especialmente en conocer el tamaño de las partículas por ser el parámetro fundamental que controla su comportamiento al interior del líquido en el que están inmersas, por ejemplo las leyes que rigen el movimiento, tiempo y tendencia a la sedimentación. Simultáneamente se analizan cambios en los azúcares y grado de acidificación cuando se inducen cambios al proceso tradicional.

La metodología a emplear es el diseño de un experimento para obtener series de datos que puedan analizarse por métodos estadísticos, con la idea de producir conclusiones válidas y objetivas, de lo cual surgen dos aspectos a tener en cuenta como cualquier problema experimental: el diseño del experimento y el análisis estadístico de los datos. El presente artículo extrae la información concluyente de dicho análisis.

## DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Se tiene la sospecha que si aumenta el grado de limpieza en el beneficio de la caña, se pueden reducir a cero los

contaminantes del guarapo y reportar como nulo el diámetro de las partículas. Entonces, la hipótesis que motiva al experimento es: dado el factor (propiedad a medir) tamaño de partículas, se desea indagar si el tamaño cambia cuando se varían las condiciones de limpieza. La comparación se hace entre cuatro tratamientos en los que se van disminuyendo las impurezas externas de la caña (lodos, tierras, hojas...) para poder concluir si una buena limpieza es suficiente para obtener jugos de óptima calidad en la producción de panela. Los tratamientos mencionados en orden creciente de higiene son:

- CNPN: caña normal y prelimpiador normal, es decir las muestras se toman sin variar las condiciones del proceso actual.
- CNPL: Caña normal y prelimpiador lavado, indica que la única variación al proceso consiste en lavar previamente los prelimpiadores.
- CLPL: Caña lavada y prelimpiador lavado.
- CP: Caña pelada, como tope máximo de limpieza, libre de hojas, tierras y/o lodos.

Como hay un cambio de limpieza inducido a propósito, es necesario que las otras variables involucradas en el beneficio de la caña sean controladas (reducir al mínimo su variabilidad) evitando el problema de efectos cruzados. El muestreo se realiza en el

tanque de almacenamiento, después de homogenizar su contenido (muestreo simple) de tal forma que cada porción o muestra que se extraiga represente las características del guarapo.

Es indispensable el uso de ayudas estadísticas para encontrar la fuente de las variaciones en las respuestas ya que los cambios en los resultados se pueden originar en los efectos producidos por los diferentes tratamientos planteados (CPL, CLPL, CNPL o CNPN) o pueden hacer parte de la variación aleatoria, el nivel de significancia escogido es de  $\alpha = 0,05$ .

## **PROCEDIMIENTOS, RESULTADOS Y ANALISIS ESTADÍSTICOS**

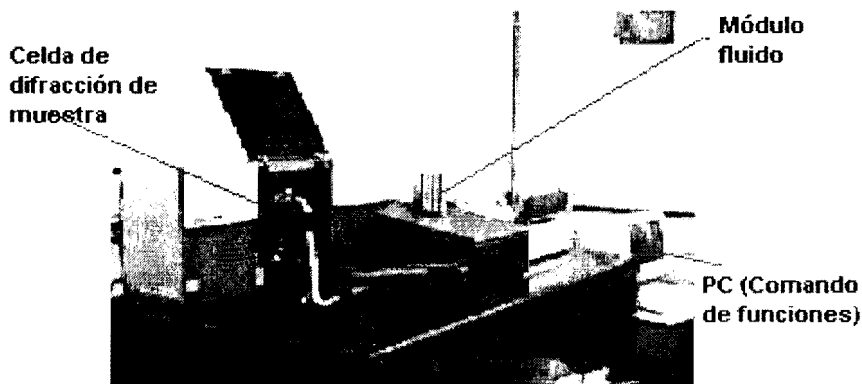
**Determinación de la distribución del tamaño de partículas.** El ensayo se realiza en el Coulter LS-130, el cual es un sistema óptico de rayos láser que permite determinar el tamaño y la distribución de partículas en un intervalo entre 0,1 y 900 micras. La Figura 1, muestra el equipo y sus componentes, junto al módulo líquido, sobre el cual se realizan las pruebas.

El principio de funcionamiento del LS-130 es óptico y utiliza una fuente de rayos láser con una longitud de onda específica (750nm).

La radiación láser atraviesa un filtro espacial y pasa a través de la **Celda de difracción de muestra** donde las partículas que están suspendidas en un líquido, siendo en este caso el guarapo,

dispersan los rayos incidentes en patrones característicos según su tamaño. La ubicación de tres lentes de Fourier colectan dicha difracción

hacia fotodetectores que analizan secuencialmente todos los aportes, generando la distribución de tamaño de toda la muestra.



**Figura 1.** Componentes del analizador de tamaño de partículas, Coulter LS-130, en módulo líquido.

Los reportes de curvas y resultados que el Coulter entrega para las muestras de guarapo, según los tratamientos

establecidos, se presentan en las Tablas 1, 2 y en las Figuras 2, 3, 4 y 5.

**Tabla 1.** Estadística de volumen para distribución del tamaño de partículas en el guarapo.

| Muestra | Volumen % | Media $\mu\text{m}$ | Mediana $\mu\text{m}$ | Moda $\mu\text{m}$ | Desviación estándar $\mu\text{m}$ | Coficiente variación % | Coficiente de asimetría | Curtosis |
|---------|-----------|---------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------------------|------------------------|-------------------------|----------|
| CP      | 100       | 16,662              | 4,828                 | 17,74              | 21,7                              | 131                    | 1,46                    | 1,07     |
| CLPL    | 100       | 9,548               | 3,515                 | 1,844              | 12,8                              | 134                    | 2,00                    | 3,56     |
| CNPL    | 100       | 11,118              | 3,745                 | 1,832              | 14,9                              | 134                    | 1,83                    | 2,61     |
| CNPN    | 100       | 11,180              | 4,262                 | 2,318              | 14,5                              | 129                    | 1,79                    | 2,53     |

MODULO OPTICO: fraunhofer  
 LS 130 Módulo fluido  
 Duración de corrida: 60 segundos

Velocidad de la bomba: 92  
 Fluido: agua  
 Software: 2,05

**Tabla 2.** Porcentaje de partículas menores a determinado tamaño.

| MUESTRA | % <    | 10%   | 25%   | 50%   | 75%    | 90%   |
|---------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|
| CP      | TAMAÑO | 0,836 | 1,441 | 4,828 | 25,255 | 54,39 |
| CLPL    |        | 0,869 | 1,499 | 3,515 | 12,201 | 28,75 |
| CNPL    |        | 0,880 | 1,539 | 3,745 | 14,581 | 35,55 |
| CNPN    |        | 0,94  | 1,708 | 4,262 | 14,702 | 34,54 |

Modulo Optico: Fraunhofer

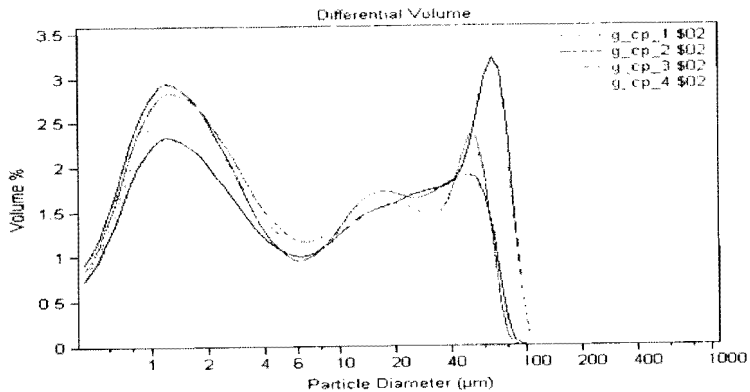
Ls 130 Modulo Fluido.

Duración De Corrida: 60 Segundos

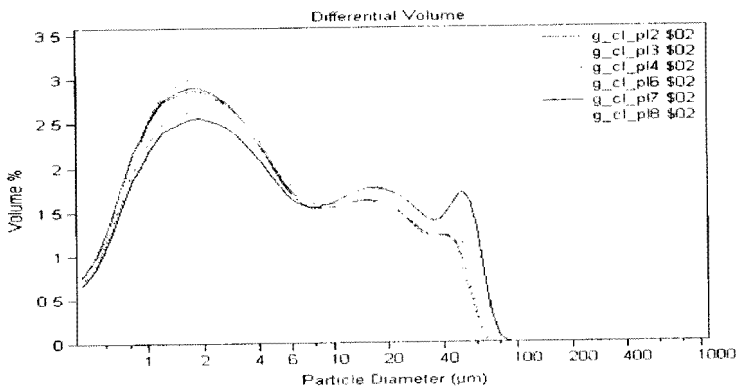
Velocidad De La Bomba: 92

Fluido: Agua

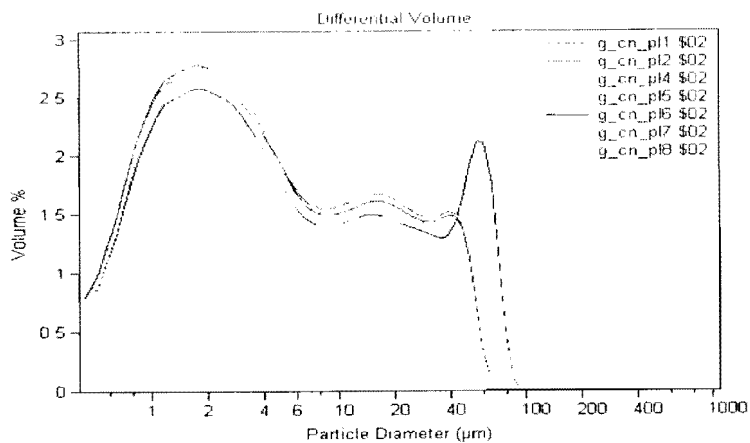
Software: 2,05



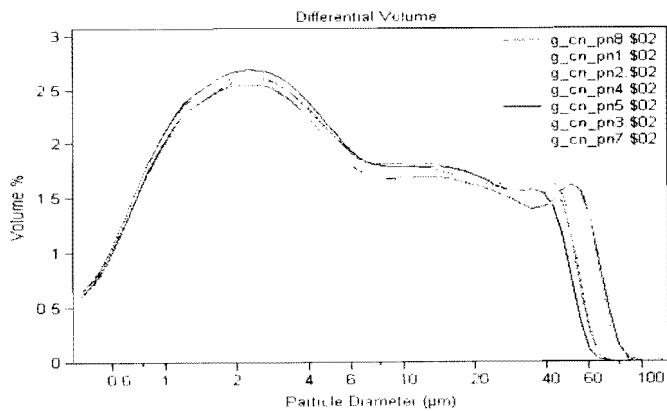
**Figura 2.** Curvas de distribución del tamaño de partículas para el tratamiento CP.



**Figura 3.** Curvas de distribución del tamaño de partículas para el tratamiento CLPL.



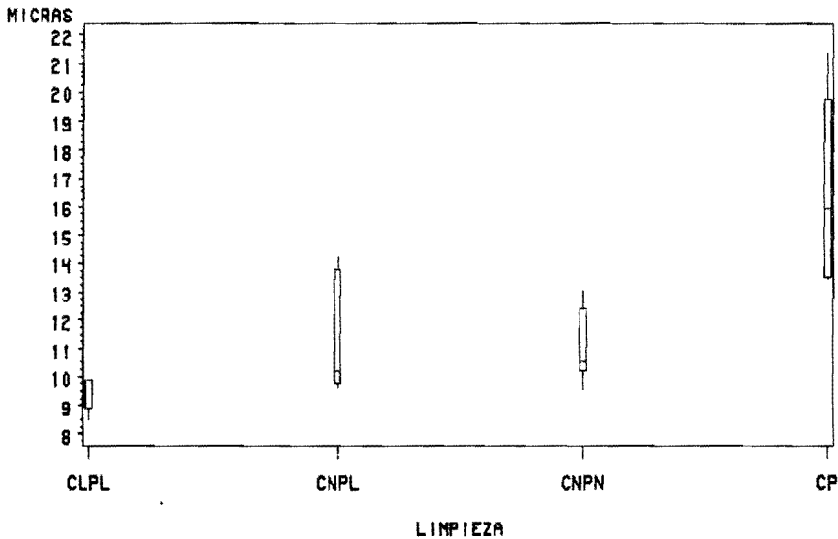
**Figura 4.** Curvas de distribución del tamaño de partículas para el tratamiento CNPL.



**Figura 5.** Curvas de distribución del tamaño de partículas para el tratamiento CNPN.

El análisis estadístico verifica el supuesto de normalidad por medio de la comparación del valor P ( $Pr < W$  0,1046 calculado por SAS). El diagrama de cajas en la Figura 6 muestra que la mediana del tamaño de partículas

entre los tratamientos CLPL, CNPL, y CNPN tiende a ser igual, sin embargo para el tratamiento CP se observa un aumento significativo en los diámetros de las partículas.



**Figura 6.** Diagrama de cajas que muestra la distribución de datos del tamaño de partículas en el guarapo para los cuatro tratamientos.

Para comprobar si alguno de los tratamientos está generando cambios en los resultados se ejecuta la “prueba central”. Al obtenerse un valor de P ( $Pr > F$  0,0003) menor que el nivel de significancia indicando se deducen diferencias en los tamaños de partículas como efecto de alguno de los tratamien-

tos planteados. Se usa el método de la mínima diferencia significativa (LSD), la prueba de los intervalos múltiples de Duncan y la prueba de Tukey (Tabla 3) para discriminar cuales tratamientos ocasionan partículas con tamaños diferentes a los demás.

**Tabla 3.** Resultado de la prueba de Tukey para evaluar diferencias en el tamaño de partículas entre los tratamientos plantados.

| Tukey's studentized range (HSD) test for variable: MICRAS |        |   |          |
|---|--------|---|----------|
| Tukey grouping  | Mean   | N | Limpieza |
| A   | 16.663 | 4 | CP       |
| B   | 11.180 | 7 | CNPN     |
| B   | 11.118 | 7 | CNPL     |
| B   | 9.548  | 6 | CLPL     |

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

La prueba de Tukey sugiere la formación de dos grupos, un primero integrado por los tratamientos CLPL, CNPL y CNPN lo cual indica que no es necesario lavar la caña y/o prelimpiadores, porque no generan cambios estadísticamente considerables en el tamaño de las partículas y un segundo grupo formado por el tratamiento CP con un incremento significativo en el diámetro de los sólidos. Otra conclusión muy importante se obtiene al revisar el valor de las medias, y es que aun lavando la caña y los prelimpiadores (CLPL) se encuentra una contaminación inherente al proceso (media=9.548  $\mu\text{m}$ ) que no depende de las condiciones externas de la caña. Si se comparan los tratamientos CLPL y CNPN se puede decir que el solo proceso de molienda origina una contaminación en tamaño de partículas del 85% y que los contaminantes externos de la caña (lodos, tierras, arenas...) incrementan este porcentaje en un 15%. Estos datos orientan a

considerar que el mayor aporte de contaminación por tamaño de partículas, para el guarapo en los tanques de almacenamiento, tiene su origen en los componentes de la caña de azúcar y se generan durante el proceso de la molienda. Adicionalmente los altos valores para la caña pelada conducen a pensar que la cáscara siendo junto con los nudos, la parte más dura de la planta, actúa durante el aplastamiento en los molinos como una retícula evitando que salgan las débiles fibras interiores que han sido desmenuzadas o partidas por efecto de la presión aplicada.

Como el tratamiento CP no cuenta con esta protección, el aporte negativo de bagacillo y demás componentes vegetales al proceso es mucho mayor. El diminuto tamaño promedio de las partículas pone en evidencia la eficiencia de los prelimpiadores como medios de separación inercial y su pasividad para atrapar las minúsculas partículas sobrenadantes en el guarapo.



**Determinación de cenizas carbonizadas.** Se desea comprobar si efectivamente los contaminantes procedentes de la caña durante la molienda son más significativos que los contaminantes externos, se hace un estudio estadístico de la variación de las

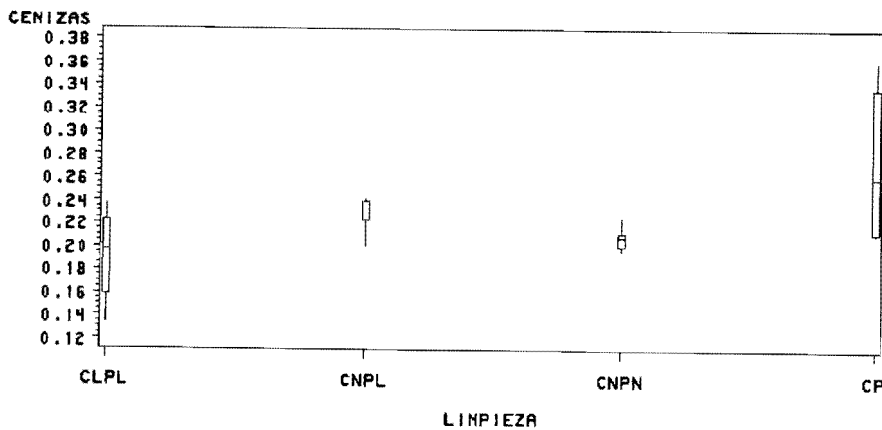
cenizas (sólidos inorgánicos) de acuerdo a los tratamientos inducidos.

El procedimiento sigue los pasos descritos en la norma ICONTEC 282, los datos obtenidos se reportan en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Determinación de cenizas carbonizadas de acuerdo a los tratamientos planteados.

| Promedio Cenizas (%) |        |        |        |
|----------------------|--------|--------|--------|
| CP                   | CLPL   | CNPL   | CNPN   |
| 0,2754               | 0,1907 | 0,2325 | 0,2058 |

Al observar el diagrama de cajas contenido de cenizas para el tratamiento CP, (Figura 7) puede notarse un mayor CP.



**Figura 7.** Diagrama de cajas que muestra la distribución de datos de cenizas para los cuatro tratamientos.

Para evaluar el tratamiento CP se utilizan las pruebas LSD y Duncan (Tabla 5.)

**Tabla 5.** Resultados de las pruebas de Duncan y LSD para evaluar diferencias en el porcentaje de cenizas entre los diferentes tratamientos.

| Prueba de intervalos múltiples de Duncan |         |   |          | Método de la mínima diferencia significativa (LSD) |         |   |          |
|--|---------|---|----------|--|---------|---|----------|
| Duncan grouping                          | Mean    | N | Limpieza | T. grouping  | Mean    | N | Limpieza |
| A  | 0.27536 | 7 | CP       | A  | 0.27536 | 7 | CP       |
| B  | 0.23250 | 8 | CNPL     | B  | 0.23250 | 8 | CNPL     |
| B  | 0.20578 | 8 | CNPN     | B  | 0.20578 | 8 | CNPN     |
| B  | 0.19069 | 8 | CLPL     | C  | 0.19069 | 8 | CLPL     |

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Ante la diferencia de grupos en las dos pruebas, se plantea un análisis de contrastes ortogonales con el fin de determinar si los tres tratamientos son iguales. Siendo ( $Pr > F 0,0973$ ) se obtiene que el contenido de cenizas para el tratamiento CNPN es estadísticamente similar al de los tratamientos CNPL y CLPL, por lo tanto se confirma que la presencia de contaminantes inorgánicos ajenos a la química de la planta (tierra, lodos, arenas...) en los tanques de alma-

cenamiento es similar. Según lo expuesto, no sería necesario realizar operaciones de lavado de caña previas a la molienda.

**Determinación del pH.** Se desea evaluar los cambios en el pH (Tabla 6) cuando se mejora el aseo con respecto a la manera actual de trabajo. Punto clave para detectar si hay ataques bacterianos acidificando al guarapo e incrementando la inversión de la sacarosa.

**Tabla 6.** Determinación de pH de acuerdo a los tratamientos planteados.

| pH en la muestra |      |      |      |
|------------------|------|------|------|
| CP               | CLPL | CNPL | CNPN |
| 5,42             | 5,32 | 5,33 | 5,01 |

Se hace uso del método LSD y los criterios de clasificación Duncan (Tabla 7) y Tukey.

**Tabla 7.** Resultado de la prueba de los intervalos múltiples de Duncan para evaluar diferencias en pH entre los tratamientos plantados.

| Duncan's multiple range test for variable: pH |         |   |          |
|---|---------|---|----------|
| Duncan grouping                               | Mean    | N | Limpieza |
| A   | 5,42125 | 8 | CP       |
| B   | 5,32625 | 8 | CNPL     |
| B   | 5,32375 | 8 | CLPL     |
| C   | 5,00625 | 8 | CNPN     |

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Se distinguen tres grupos empezando por el tratamiento de máxima limpieza CP, con el valor promedio de pH más alto, un segundo grupo (CNPL y CLPL) que muestra la importancia de lavar los prelimpiadores para evitar la acidificación del jugo sin importar que se muelan cañas limpias o sucias, y un último grupo (CNPN) con el pH más bajo. El valor de acidez se intensifica conforme decrece la limpieza, razón por la cual es un buen indicador indirecto del deterioro del guarapo. La conclusión evidente es que cualquier mejora en la

asepsia del proceso contribuye a mantener un pH alto, necesario para evitar la reducción de la sacarosa y la fermentación de los jugos.

**Determinación de azúcares reductores.** Se evalúa la susceptibilidad de los azúcares reductores frente a variaciones en la limpieza del proceso. Para la cuantificación (Tabla 8) se emplea el método del ácido dinitrosalicílico (Gallardo, 2000, p.140) cuya fundamentación y desarrollo hace parte de una de las nuevas implementaciones en estudios para panela.

**Tabla 8.** Determinación del contenido de azúcares reductores en el guarapo de caña de acuerdo a los tratamientos plantados.

| Promedio % azúcares reductores |       |       |       |
|--------------------------------|-------|-------|-------|
| CP                             | CLPL  | CNPL  | CNPN  |
| 0,079                          | 0,863 | 1,183 | 1,582 |

A continuación se presentan los resultados del método LSD (Tabla 9).

**Tabla 9.** Resultado de método de la mínima diferencia significativa (LSD) para evaluar diferencias en la concentración de azúcares reductores entre los tratamientos planteados.

T tests (LSD) for variable: AZURED

| T Grouping | Mean   | N | Limpieza |
|------------|--------|---|----------|
| A          | 1,5818 | 7 | CNPN     |
| B          | 1,1833 | 8 | CNPL     |
| C          | 0,8629 | 8 | CLPL     |
| D          | 0,0789 | 8 | CP       |

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

La asignación de letras distintas indica que cada tratamiento es un grupo significativamente diferente a los demás, mostrando que conforme se mejore la limpieza es posible disminuir el porcentaje de azúcares reductores, tal como lo muestra el tratamiento CP, y resulta muy conocido entre los productores que la producción de panelas oscuras y blandas son efecto de elevadas concentraciones en azúcares reductores.

**Determinación de sacarosa.** Se desea conocer si también suceden cambios significativos en la concentración de sacarosa como consecuencia de las variaciones en el grado de limpieza. Para determinar el contenido de sacarosa en el guarapo de caña, se emplea convenientemente el fenómeno de la inversión por medios ácidos de este polisacárido. (Gallardo, 2000, p. 46). Los datos obtenidos se presentan en la Tabla 10.

**Tabla 10.** Contenido de sacarosa en el guarapo de caña de acuerdo a los tratamientos planteados.

| Promedio % sacarosa |        |        |        |
|---------------------|--------|--------|--------|
| CP                  | CLPL   | CNPL   | CNPN   |
| 12,221              | 13,312 | 11,812 | 11,965 |

El valor P que se extrae del análisis de varianza ( $Pr > F$  0,925) permite concluir que la concentración de sacarosa permanece invariable ante los cambios propuestos, es decir, desde este

punto de vista no se crea la necesidad de mejorar la limpieza del proceso.

**Determinación de los grados brix refractométricos.** Se realiza la medida

de los grados Brix, para mirar su posible variación con los tratamientos. El procedimiento empleado hace uso del

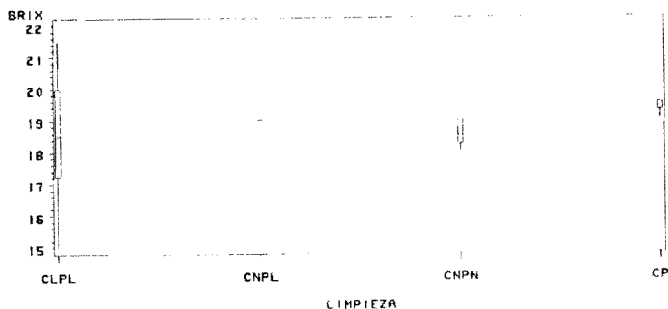
método refractométrico, contemplado en la norma ICONTEC 440, numeral 6.6.1. Los datos se presentan en la Tabla 11.

**Tabla 11.** Determinación de grados Brix refractométricos en el guarapo de caña de acuerdo a los tratamientos planteados.

| Grados Brix de la muestra... (%) |      |      |      |
|----------------------------------|------|------|------|
| CP                               | CLPL | CNPL | CNPN |
| 19,3                             | 18,5 | 19   | 18,4 |

El diagrama de cajas (Figura 8) muestra una tendencia de agrupamiento hacia un valor común (19%) incluso para el tra-

tamiento CLPL que presenta la mayor dispersión de datos.



**Figura 8.** Diagrama de cajas que muestra la distribución de datos de grados Brix en el guarapo para los cuatro tratamientos.

Situación verificada a través de la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis donde el valor P (Prob > CHISQ = 0.0690) permite concluir que en efecto no existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores medidos.

**Determinación de sólidos totales por secado.** Consiste simplemente en evaporar toda el agua contenida en el

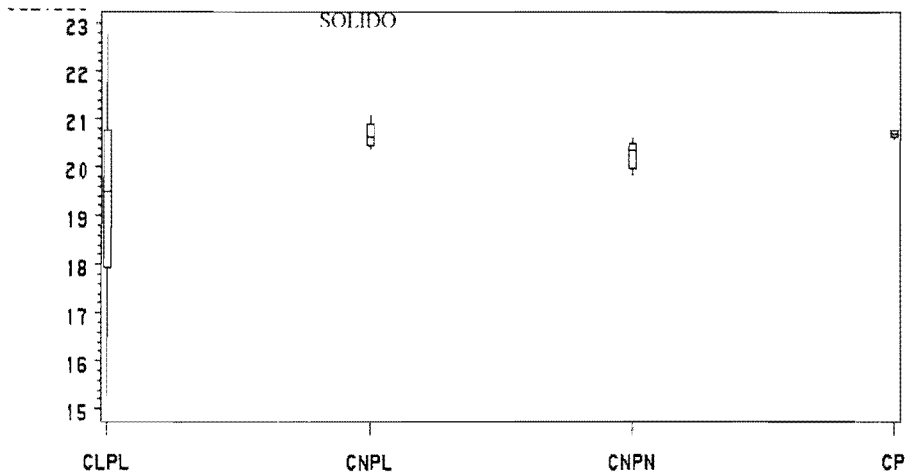
jugo sin clarificar, por lo tanto, se obtiene una capa de "panceta" acompañada por cachaza, diminutas partículas de bagazo y todos los sólidos propios de la caña de azúcar, procedimiento descrito por Carlos y Felipe Gallardo (Gallardo 2000, p.35). Los resultados obtenidos se reportan en la Tabla 12.

**Tabla 12.** Determinación de sólidos totales por secado en guarapo de caña de acuerdo a los tratamientos planteados.

| Promedio Sólidos Totales (%) |         |         |         |
|------------------------------|---------|---------|---------|
| CP                           | CLPL    | CNPL    | CNPN    |
| 20,7149                      | 19,3060 | 20,6786 | 20,0890 |

La distribución en el diagrama de cajas de la Figura 9 muestra que excepto por el tratamiento CLPL, los datos pre-

sentan una baja dispersión y la tendencia hacia un valor central de 20,5.



**Figura 9.** Diagrama de cajas que muestran la distribución de datos de sólidos totales por secado para los cuatro tratamientos.

Al utilizar la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis se obtiene que los tratamientos son estadísticamente similares, excepto por la pareja CP y CNPN. La igualdad en los datos expresa que después del agua, la sacarosa es el constituyente en peso más representativo para el guarapo, por

encima de los otros productos vegetales que se generan en la molienda.

La diferencia entre CP y CNPN muestra que el modelo de comparación fue susceptible al incremento de la materia vegetal para el tratamiento con caña pelada.

## ALTERNATIVAS DE CLARIFICACIÓN

Centrando la selección de un método de clarificación sobre el tratamiento CNPN (situación mas critica de contaminación) y en base a los datos de tamaño de partículas obtenidos en el Coulter , los posibles procesos a utilizar

son: microfiltración, ultrafiltración, centrifugación y floculación. Como algunos de estos involucran viscosidad se hace necesario obtener dicho valor para el jugo de caña, proceso hecho con un viscosímetro rotacional modelo LVT Brookfield Synerco-Lectric usando el eje uno a 60 rpm. Los resultados se presentan en la Tabla 13.

**Tabla 13.** Resultados de viscosidad dinámica para el guarapo de caña tomado del tanque de almacenamiento.

|                     |      |     |     |     |     |
|---------------------|------|-----|-----|-----|-----|
| Temperatura (°C)    | 24   |     |     |     |     |
| Viscosidad dinámica | 4,8  | 4,9 | 4,9 | 4,9 | 4,8 |
| Promedio (cP)       | 4,86 |     |     |     |     |

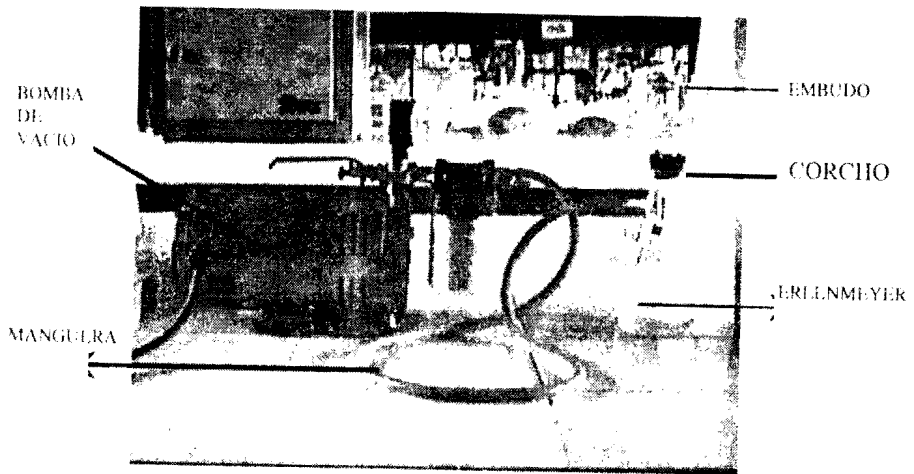
**Microfiltración y Ultrafiltración.** El problema inherente a este proceso es la formación de una biocapa y la acumulación de partículas cerca, sobre y en el interior de la membrana, que bloquean o constriñen los poros formando una capa de resistencia adicional al flujo, reduciendo el flujo de permeado a través del tiempo, cuya solución -retrolavado- tiende a ser costosos y a consumir más energía. Para el ensayo se plantea filtrar 140 ml de guarapo tomado del tanque de almacenamiento cuantificando el tiempo que

demora en pasar. Cuando el guarapo ha pasado completamente se adicionan otros 140 ml de guarapo y se toman las mismas medidas.

Este tipo de corridas da una idea comparativa de cuanto demora la filtración, cuanto resiste la tela sin obstruirse y que presiones son necesarias implementar. Se emplean las telas mencionadas en la Tabla 14, según el montaje de la Figura 10 y cuyos datos se reportan en la Tabla 15.

**Tabla 14.** Características de las telas empleadas para los ensayos de filtración de guarapo.

| Tela             | Composición            | Diámetro de poro ( $\mu\text{m}$ ) | Resistencia mecánica |
|------------------|------------------------|------------------------------------|----------------------|
| Filtro poliester | 100% poliester         | 35                                 | Alta                 |
| Paño industrial  | 100% poliester         | 40                                 | Alta                 |
| Filtro diagonal  | 100% poliester         | 20                                 | Alta                 |
| Entretela        | 100% poliester         | ?                                  | Alta                 |
| Filtro cel       | 100% algodón           | 20                                 | Media                |
| Liencillo        | 100% algodón           | 60                                 | Baja                 |
| Paño             | 70% poliester 30% lana | 45                                 | Alta                 |
| Lona             | 100% algodón           | 35                                 | Media                |



**Figura 10.** Montaje para las pruebas de embudo como mecanismo para evaluar la viabilidad de la filtración en el proceso de clarificación del guarapo.



**Tabla 15.** Corridas de filtración de 140 ml de guarapo para apreciar los cambios de presión y tiempo por taponamiento cuando se usan diferentes telas como membrana.

| Tela            | Primera corrida |                            | Segunda corrida |                            | Tercera corrida |                            | Cuarta corrida |                            |
|-----------------|-----------------|----------------------------|-----------------|----------------------------|-----------------|----------------------------|----------------|----------------------------|
|                 | Tiempo          | Presión (pulg Hg de vacío) | Tiempo          | Presión (pulg Hg de vacío) | Tiempo          | Presión (pulg Hg de vacío) | Tiempo         | Presión (pulg Hg de vacío) |
| Filtro poliest. | 4*01            | 17                         | 17*54           | 23                         | 45*99           | 21,5                       | 53*42          | 22                         |
| Paño industrial | 2*70            | 0                          | 25*42           | 0                          | 24*22           | 4                          | 9*16           | 22                         |
| Filtro diagonal | 1*01*53         | 15                         | 1*40*15         | 21,5                       | 1*12*53         | 22                         |                |                            |
| Entretela       | 8*36            | 0                          | 10*38           | 0                          | 37*05           | 0                          | 2*09           | 10                         |
| Filtro cel      | 4*70            | 4,5                        | 1*33*81         | 22                         |                 |                            |                |                            |
| Liencillo       | 1*47*22         | 11,5                       | 8*16*15         | 16                         |                 |                            |                |                            |
| Paño            | 56*35           | 20                         |                 |                            |                 |                            |                |                            |
| Lona            | 34*55           | 20                         |                 |                            |                 |                            |                |                            |



Tiempo y presión de taponamiento



No hay retención aparente



Goteo

Los datos obtenidos muestran que las telas delgadas y flexibles (filtro poliéster) tienden a atascarse con menor facilidad que las gruesas y rígidas (lonas). Solo el filtro poliéster presenta viabilidad de uso con un cambio leve de presión entre la primera y cuarta corrida, pero a costa de un incremento en más de 13 veces el tiempo de operación.

**Centrifugación.** El efecto de la fuerza centrífuga puede ser convenientemente usado como mecanismo para separar las partículas sólidas contenidas en un líquido. El primer ensayo consiste en centrifugar 10 ml de guarapo (8 replicas simultáneas) durante 5 minutos a 1500 rpm (bajo esta condición y por el

diámetro de giro de la máquina, se genera una fuerza centrífuga relativa de 377 veces la gravedad), sin embargo las muestras no presentan diferencias notables con respecto al jugo normal. Se opta por incrementar el tiempo a 10 minutos, dando como resultado un jugo más claro (color amarillo) y un sedimento en la base de los recipientes de vidrio. Bajo las mismas condiciones de revolución y tiempo se decide averiguar qué sucede al incrementar el volumen de jugo a 50 ml. Los resultados no son los mejores, porque el color no fue tan claro como en el caso anterior a pesar de existir un volumen apreciable de sólidos sedimentados (0.3225 ml en promedio).

Como consecuencia de lo observado se puede deducir que la centrifugación no tiene una alta eficiencia en la eliminación de las partículas suspendidas en el guarapo debido a que la masa de estas no se ciñe a las fuerzas gravitatorias sino más bien a los conceptos de estabilidad de suspensiones (fuerzas de repulsión debida a la doble capa eléctrica, potencial zeta, fuerzas atractivas).

**Floculación.** La floculación es la adición de sustancias poliméricas (poliacrilamidas) que cancelan las cargas eléctricas sobre la superficie de las partículas suspendidas, permitiendo que se aglomeren formando flóculos. Los flóculos, inicialmente pequeños, crecen con la adición de otros aglomerados hasta un tamaño que hace posible la sedimentación. Este tipo de productos se dosifican en concentraciones máximas de 10 ppm (10mg/l) y manejan unos altísimos parámetros de seguridad en salud. Su uso incluye preparar la solución (diluirle en agua) y dosificar sobre el líquido a clarificar. Es importante destacar que para obtener una excelente clarificación se recomienda realizar procesos de fosfatado y encala-

do. El fosfatado es importante en la eliminación de color, eliminando los polifenoles de hierro que dan un color café-verdoso al guarapo. El encalado busca ajustar el pH a un valor de 5.8 donde se mejora la clarificación, se reduce la inversión de la sacarosa y se obtiene panela de buen grano o dureza y buen color.

La prueba se desarrolla a temperatura ambiente (22°C). La secuencia de procedimiento en orden lógico es: fosfatar, encalar y adicionar el polímero. La cantidad de guarapo a trabajar es de 200 ml extraídos del tanque de almacenamiento (CNPN).

En Colombia se midieron niveles de 177 ppm de fosfatos inorgánicos, por debajo de nivel apropiado (300 ppm) (Duran, 1992, p.36). Para la prueba se opta por asumir un valor menor (150 ppm) donde la cantidad a adicionar será de 150 ppm para alcanzar el nivel óptimo, se trabaja con pentaóxido de difósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). El encalado se hace con hidróxido de calcio (tipo alimento) disuelto en agua. Los polímeros ensayados se presentan en la Tabla 16.

**Tabla 16.** Polímeros floculantes utilizados.

| Producto        | Actividad iónica | Peso molecular |
|-----------------|------------------|----------------|
| Percol LT27     | Medio aniónico   | Muy alto       |
| Percol LT22S    | Medio catiónico  | Muy alto       |
| Praestol 2640   | Medio aniónico   | 17 millones    |
| Praestol 650 BC | Catiónico        |                |

Se pretende emplear los floculantes poliméricos en ciertas condiciones de fosfatado y encalado para obtener el mejor tratamiento e implícitamente el mejor floculante. El volumen de guarapo a manejar es de 200 ml dentro de probetas con aforo (capacidad 300 ml) y obedece a la condición de caña normal y prelimpiador normal. La Tabla 17 muestra los tratamientos realizados, que incluyen:

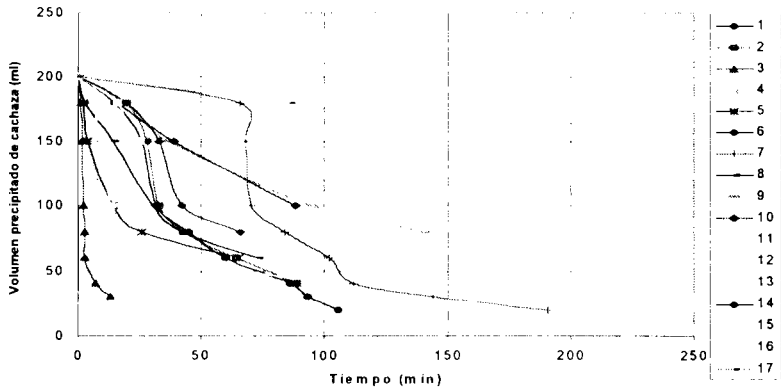
- Tratamiento 1, como punto de comparación para las posibles mejoras. Lo determina un guarapo encalado hasta 5,8 en pH, carente de otros procesos adicionales.

- Fosfatar o no fosfatar los jugos.
- Variar el encalado entre diferentes valores de pH, en algunos se supera a 5.8 con el fin de observar los comportamientos.
- Dosificar el polímero siempre a 3 ppm.

La acción del polímero forma un flóculo o "cachaza" que crece con el tiempo, el cual se precipita o flota de acuerdo al tipo de tratamiento, generando dos fases, una de guarapo limpio y otra de columna de cachaza, su evolución se muestra en la Figura 11.

**Tabla 17.** Tratamientos seguidos.

| Tratamiento | Fosfatado 150 ppm | Encalado a pH | Polímero 3ppm   |
|-------------|-------------------|---------------|-----------------|
| 1           | No                | 5,8           | No              |
| 2           | Fosfato           | 5,85          | No              |
| 3           | No                | 5,93          | Percol LT 27    |
| 4           | Fosfato           | 5,86          | Percol LT 27    |
| 5           | Fosfato           | 6,5           | Percol LT 27    |
| 6           | No                | 5,83          | Praestol 2640   |
| 7           | Fosfato           | 5,87          | Praestol 2640   |
| 8           | Fosfato           | 6,5           | Praestol 2640   |
| 9           | Fosfato           | 8,46          | Praestol 2640   |
| 10          | No                | 8,53          | Percol LT 22S   |
| 11          | Fosfato           | 6,53          | Percol LT 22S   |
| 12          | Fosfato           | 5,86          | Percol LT 22S   |
| 13          | Fosfato           | 5,04          | Percol LT 22S   |
| 14          | No                | 8,52          | Praestol 650 BC |
| 15          | Fosfato           | 5,8           | Praestol 650 BC |
| 16          | Fosfato           | 6,57          | Praestol 650 BC |
| 17          | Fosfato           | 8,5           | Praestol 650 BC |



**Figura 11.** Relación de volumen precipitado de cachaza vs. tiempo en minutos para cada tratamiento.

Se puede observar que el tratamiento 3 es el más rápido en sedimentar un volumen de 60 ml de cachaza, seguido por los tratamientos en su orden: 4, 15, 12, 6, 2, 5 y 8. Se procede a realizar medidas de absorbancia y transmitancia del jugo clarificado,

reconociendo su relación con el micro-particulado suspendido en la solución (los valores más bajos en absorbancia (o más altos en transmitancia) denotan mayor clarificación). Las lecturas se realizan en el espectrofotómetro a 560 nm. La tabla 18 muestra los resultados.

**Tabla 18.** Medidas de absorbancia y transmitancia para los tratamientos.

| Tratamiento | Absorbancia | Transmitancia % |
|-------------|-------------|-----------------|
| 1           | 2,302       | 0,5             |
| 2           | 2,280       | 0,5             |
| 3           | 1,513       | 3,1             |
| 4           | 1,141       | 7,2             |
| 5           | 0,978       | 10,5            |
| 6           | 2,118       | 0,8             |
| 7           | 2,028       | 0,9             |
| 8           | 1,055       | 9,0             |
| 9           | 0,887       | 12,9            |
| 10          | 1,03        | 9,2             |

Continuación Tabla 18...

| Tratamiento | Absorbancia | Transmitancia % |
|-------------|-------------|-----------------|
| 11          | 0,976       | 10,5            |
| 12          | 1,317       | 4,8             |
| 13          | 1,489       | 3,2             |
| 14          | 0,989       | 10,3            |
| 15          | 1,200       | 6,3             |
| 16          | 0,935       | 11,6            |
| 17          | 1,042       | 9,1             |

Se concluye que el tratamiento mejor clarificado según lecturas de absorbancia es el 9 (Fosfatado, pH 8.46, Praestol 2640) seguido en su orden por los tratamientos: 16, 11, 5, 14, 10, 17, 8, 4, 15, 12, 13, 3, 7, 6, 2 y 1. Se hace notar que en esta secuencia los tratamientos de 9 a 17 manejan valores de pH superiores a 6. Se considera que un buen tratamiento debe combinar las dos características, es decir emplear muy poco tiempo para precipitar un buen volumen de cachaza y dejar un jugo muy limpio, situaciones que se combinan muy bien en los tratamientos 4, 3, 15, 12, 6, 2, destacándose en especial el tratamiento 4 (Fosfatado, pH 5,86, Per-

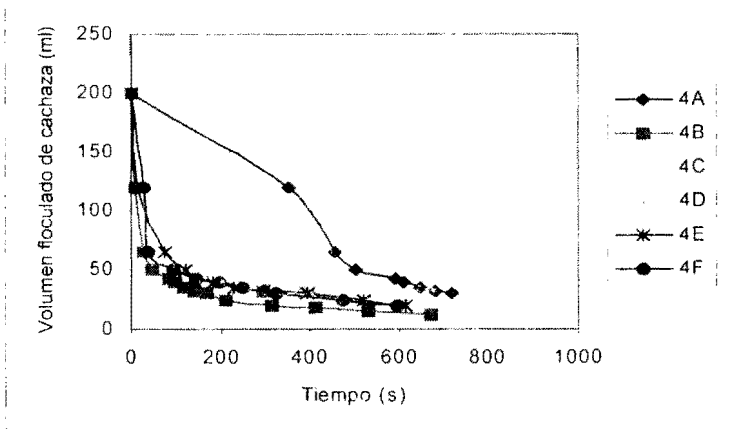
col LT 27) que se selecciona para proceder a realizar ensayos con variación en la dosificación del polímero.

Las pruebas se realizan sobre seis probetas, cada una con procesos de fosfatado y encalado según lo descrito por el tratamiento 4 (fosfatar a 150 ppm, encalar hasta un pH de 5.86) usando como producto floculador Praestol LT 27, dosificado en 10, 7.5, 5, 4, 3, 2 y 1 ppm.

Según lo expresado por la tabla 19, la Figura 12 muestra la relación de volumen floculado-tiempo.

**Tabla 19.** Tratamientos realizados con polímero Percol LT 27 a diferentes dosificaciones.

| Tratamiento | Fosfato | Encalado pH | Dosificación Percol LT27 |
|-------------|---------|-------------|--------------------------|
| I           | No      | 5,8         | No                       |
| 4 A         | 150 ppm | 5,8         | 10                       |
| 4 B         | 150 ppm | 5,8         | 7,5                      |
| 4 C         | 150 ppm | 5,8         | 5                        |
| 4 D         | 150 ppm | 5,8         | 4                        |
| 4 E         | 150 ppm | 5,8         | 3                        |
| 4 F         | 150 ppm | 5,8         | 2                        |



**Figura 12.** Relación de volumen floculado de cachaza contra tiempo en segundos para cada tratamiento.

Se realizan medidas de absorbancia y transmittancia para las diferentes dosificaciones de polímero, reportados en la Tabla 20.

**Tabla 20.** Lecturas de absorbancia y transmittancia en los tratamientos.

| Tratamiento | Absorbancia | Transmittancia % |
|-------------|-------------|------------------|
| I           | 2,412       | 0,4              |
| 4A          | 0,937       | 11,5             |
| 4B          | 1,033       | 9,2              |
| 4C          | 0,960       | 10,2             |
| 4D          | 1,157       | 6,8              |
| 4E          | 1,023       | 9,5              |
| 4F          | 1,02        | 9,6              |

La elección se hace basándose en la menor dosificación de polímero que de un buen nivel de limpieza. El tratamiento 4A (Percol LT 27 a 10 ppm) aunque presenta la mejor clarificación, se encuentra sobre el límite de la concentración permitida de 10 ppm. El tratamiento 4C le sigue en calidad de clarificación, con valores muy parecidos en absorbancia y transmittancia, con el beneficio de usar la mitad de la dosificación del primero.

## ANÁLISIS DE LA PROPUESTA PLANTEADA

Seleccionando el tratamiento 4C (Fosfatado a 150 ppm, Encalado a Ph de 5,8) se procede a realizar los

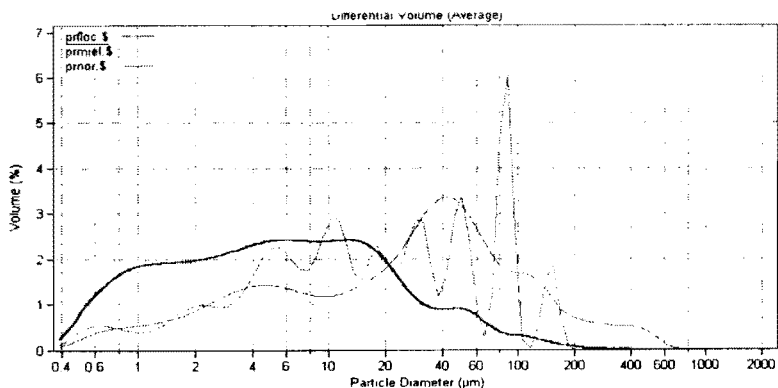
ensayos respectivos que permitan comprobar si el procedimiento no trae consecuencias adversas sobre los azúcares del guarapo. Para ello se estudia frente a los tratamientos indicados por la Tabla 21.

**Tabla 21.** Características de las muestras a estudiar.

| Muestra              | Característica  |
|----------------------|---|
| Guarapo normal       | Guarapo obtenido en el tanque de almacenamiento.<br>sin encalar<br>sin fosfatar<br>sin flocular                           |
| Guarapo floculado 4C | Guarapo floculado según el procedimiento 4C<br>fosfatado a 150 ppm<br>encalado a 5.8<br>floculado con percol It 27 a 5ppm |
| Miel                 | Guarapo obtenido en la tercera paila de la hornilla<br>Clarificado con mucilagos vegetales.                               |

**Distribución del Tamaño de Partículas.** La Figura 13 muestra los resultados de distribución del tamaño de partícula para el Guarapo normal, Gua-

rapo floculado 4C y Miel, obtenidos en el Sistema Coulter LS 230. 45 con una presentación de las estadísticas en las Tablas 22 y 23.



**Figura 13.** Estadísticas de volumen para distribución del tamaño de partícula en el guarapo normal, floculado y miel.

**Tabla 22.** Estadísticas de volumen para distribución del tamaño de partícula en el guarapo normal, floculado y miel.

| Muestra           | Estadísticas de volumen (Aritmética) cálculos de 0,375 $\mu\text{m}$ a 2.000 $\mu\text{m}$ |                       |                    |                                   |                          |
|-------------------|--|-----------------------|--------------------|-----------------------------------|--------------------------|
|                   | Media $\mu\text{m}$  | Mediana $\mu\text{m}$ | Moda $\mu\text{m}$ | Desviación estándar $\mu\text{m}$ | Coefficiente variación % |
| Guarapo normal    | 56,78  | 30,90                 | 43,53              | 80,62                             | 138                      |
| Guarapo floculado | 13,54  | 5,75                  | 7,76               | 20,66                             | 146                      |
| Miel              | 33,97  | 18,24                 | 87,90              | 36,64                             | 107                      |

Módulo óptico: Fraunhofer

Velocidad de la bomba: 50

Ls 230 módulo de pequeño volumen

Fluido: agua

Duración de corrida: 60 segundos

Software: 2,11

**Tabla 23.** Porcentaje de partículas menores a determinado tamaño.

| Tratamiento       | Tamaño micras | 10%  | 25%  | 50%   | 75%   | 90%       |
|-------------------|---------------|------|------|-------|-------|-----------|
| Guarapo normal    |               | 2,39 | 7,12 | 30,90 | 65,15 | 142       |
| Guarapo floculado |               | 0,93 | 2,0  | 5,75  | 15,61 | 35,2<br>7 |
| Miel              |               | 2,24 | 5,9  | 18,24 | 56,33 | 90,2<br>4 |

Módulo óptico: Fraunhofer

Velocidad de la bomba: 50

Ls 230 módulo de pequeño volumen

Fluido: agua

Duración de corrida: 60 segundos

Software: 2.11

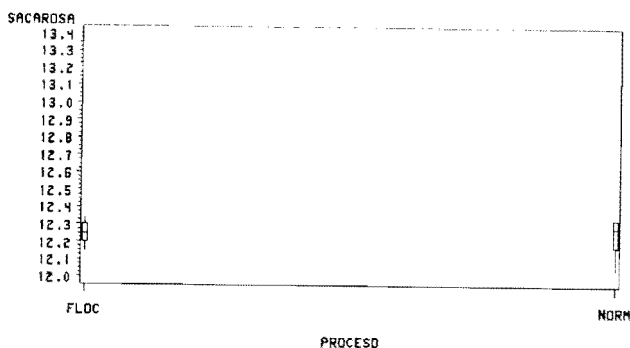
La Figura 14 muestra esquemáticamente la comparación de los valores promedio para los valores de media y moda en el tamaño de partículas para el guarapo normal, guarapo floculado y miel.

La Figura 15 muestra esquemáticamente la comparación de los valores promedio para los porcentajes de presencia de acuerdo al tamaño de partículas en el guarapo normal, guarapo floculado y miel.



**Tabla 25.** Contenido de sacarosa para guarapo normal y guarapo floculado.

| Promedio % sacarosa |                   |
|---------------------|-------------------|
| Guarapo normal      | Guarapo Floculado |
| 12440               | 12248             |



**Figura 17.** Diagrama de cajas que muestra la distribución de los datos de sacarosa para guarapo normal y guarapo floculado.

Los valores P para azúcares reductores ( $Pr > F$  0.6067) y para sacarosa ( $Pr > F$  0.8977) permiten concluir que estadísticamente no existe diferencia significativa en la concentración de azúcares reductores y sacarosa entre el guarapo floculado y el

guarapo normal.

**Análisis Estadístico de Sólidos Totales por Secado.** Los resultados se presentan en la Tabla 26 y la Figura 18 muestra la distribución para los datos de sólidos totales.

**Tabla 26.** Sólidos totales para guarapo normal y guarapo floculado.

| Promedio Sólidos Totales (%) |                   |
|------------------------------|-------------------|
| Guarapo normal               | Guarapo floculado |
| 224387                       | 210390            |

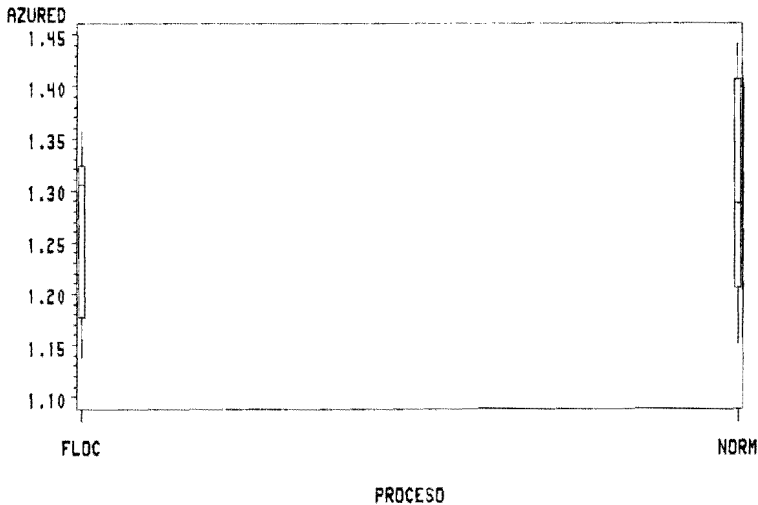
Es evidente que los valores más pequeños los presenta el guarapo floculado, indicio de haber logrado reducir el tamaño de partículas en cuanto a su valor medio, desde 56,78 micras en el guarapo normal hasta 13,54 micras en el guarapo floculado, superando a la situación actual de clarificación por más de la mitad en reducción de tamaños (33,97 micras). En general el guarapo floculado reduce los tamaños de partículas en un tercio frente a la situación actual de clarificación (miel) y en un cuarto frente a la situación del

guarapo de entrada.

**Análisis Estadístico de la Variación en la Concentración de Azúcares.** Uno de los principales requisitos fijos que debe cumplir cualquier método de clarificación es que no altere la concentración de azúcares, por ser la materia prima en la producción de panela; razón del estudio estadístico. Los resultados para azúcares reductores se reportan en la Tabla 24 y Figura 16 y para sacarosa en la Tabla 25 y Figura 17.

**Tabla 24.** Contenido de azúcares reductores para guarapo normal y guarapo floculado.

| Promedio % azúcares reductores |                   |
|--------------------------------|-------------------|
| Guarapo normal                 | Guarapo Floculado |
| 1,298                          | 1,260             |



**Figura 16.** Diagrama de cajas para los datos de azúcares reductores en guarapo normal y guarapo floculado.

tanque de almacenamiento, son inferiores a las 100 micras sugiriendo un comportamiento típico de coloides y turbidez.

Los análisis de cenizas dan a conocer que la mayoría de las partículas dispersas en el guarapo son de origen vegetal y que se desprenden de los tallos durante el proceso de molienda, razón por la cual no serían justificables operaciones de lavado de la caña. En contraste se encontró que entre más limpio sea el proceso de beneficio, el jugo es menos ácido y por lo tanto, la tendencia a la formación de azúcares reductores es menor, lo cual obliga al productor a mantener la asepsia en el manejo de los jugos hasta donde económicamente le sea posible.

La evaluación a nivel de laboratorio tanto de la filtración como de la centrifugación dio como resultado que ambos procesos son ineficientes en la remoción de la turbidez y los coloides disueltos en el guarapo, el primero por un caudal decreciente respecto al tiempo y rápida saturación de las membranas de separación y el segundo porque las partículas disueltas no obedecen completamente a la fuerza centrífuga, especialmente cuando se incrementa el volumen. La clarificación del guarapo de caña debe hacerse por la vía de des-

tabilización de suspensiones, siendo muy adecuado el empleo de polímeros floculantes porque producen jugos excelentemente clarificados con la adición de pequeñas dosificaciones, no precipitan las moléculas de sacarosa ni de azúcares reductores porque son eléctricamente estables. La floculación con polímeros está influenciada y ligada a tratamientos previos de adición de fosfato (fosfatado) y de cal (encalado) en el guarapo a clarificar.

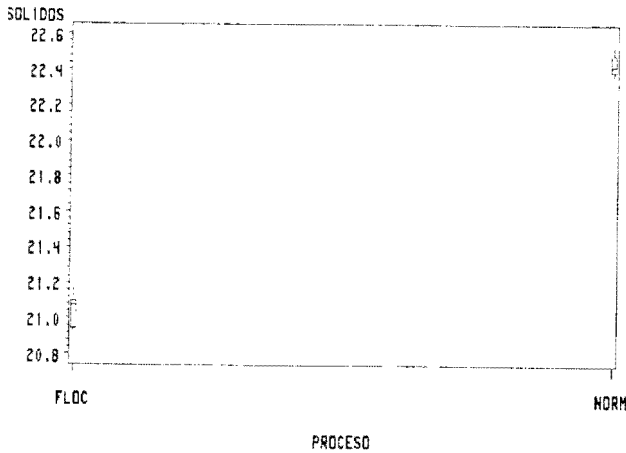
Pruebas de distribución en el tamaño de partículas, absorbancia, transmitancia, turbidez, sólidos totales por secado demuestran una mayor limpieza del guarapo clarificado con el método de polímeros floculantes como mecanismos de separación con respecto al guarapo normal de entrada y a la miel (guarapo clarificado por el sistema de mucilagos vegetales).

## BIBLIOGRAFÍA

DURÁN, Néstor. Proceso de elaboración de panela, controles y recomendaciones. Medellín : s.n., 1992. 65 p.

GALLARDO, Carlos y GALLARDO, Felipe. Clarificación del guarapo de caña de azúcar en la producción de panela. Medellín, 2000, 1140 p. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas.

Aprobado para su publicación:  
Febrero 15 de 2001



**Figura 18.** Diagrama de cajas que muestra la distribución para los datos de sólidos totales por secado para guarapo normal y guarapo floculado.

En efecto, el guarapo sometido a floculación contiene un menor porcentaje de sólidos totales debido a que cierta parte se retira en forma de cachazas.

**Análisis de Turbiedad y Color.** Los análisis turbiedad y color se presentan en la Tabla 27.

**Tabla 27.** Resultados del análisis de turbiedad y color en el guarapo normal, guarapo floculado y miel.

| Muestra           | Color | Turbiedad |
|-------------------|-------|-----------|
| Guarapo normal    | 21.46 | 11.87     |
| Guarapo floculado | 21.46 | 11.23     |
| Miel              | 17.66 | 15.66     |

Se concluye que presenta menor turbiedad el guarapo floculado, seguido por el guarapo normal y luego la miel. Bajo el parámetro de color las muestra de guarapo normal y floculado no presentan diferencia, pero sí con respecto a la miel, la cual se encuentra

mucho más oscura

### CONCLUSIONES

Un sondeo por métodos ópticos permitió determinar que los tamaños de las partículas presentes en el guarapo del