



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Estudio del comportamiento de propiedades fisicoquímicas, reológicas y térmicas de jugos y mieles de caña panelera

Angela Liliana Alarcón Rodríguez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental
Bogotá, Colombia

2017

Estudio del comportamiento de propiedades fisicoquímicas, reológicas y térmicas de jugos y mieles de caña panelera

Angela Liliana Alarcón Rodríguez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería - Ingeniería Química

Director:

Paulo César Narváez Rincón

Codirector:

Alvaro Orjuela Londoño

Línea de Investigación:

Biorefinerías y Biorefinación

Grupo de Investigación:

Procesos químicos y bioquímicos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental

Bogotá, Colombia

2017

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia por su apoyo incondicional, a Edwin Torres por acompañarme durante esta etapa de mi vida y mi proceso académico. Igualmente, agradezco al profesor Paulo César Narváez Rincón por su dirección, por su paciencia, por escucharme y aconsejarme. Al profesor Alvaro Orjuela, por ofrecerme esta tesis y apoyarme durante esta etapa de formación académica. A mis compañeros del salón de posgrados por alegrar los momentos en el laboratorio. A mis amigas Luz, Andrea, Brenda y Johana por brindarme un tinto y un par de risas a la hora de las onces. A los laboratoristas del LIQ, especialmente a Ricardo Cortes por compartir su conocimiento y hacer espacio en el laboratorio para mis experimentos. Al profesor Fleming por tomarse el tiempo de discutir sobre mi tesis mostrándome posibles mejoras y permitirme usar el laboratorio de farmacia y los equipos. A la profesora Coralia por su colaboración. Así mismo, a las estudiantes de pregrado Natalia Olivera y Paola Nava por su gran apoyo y puntos de vista críticos alrededor de los ensayos en el laboratorio.

Resumen

En este proyecto se determinaron las propiedades fisicoquímicas, reológicas y térmicas de jugos y mieles de caña panelera, provenientes de dos trapiches operados con tecnología de calentamiento por evaporadores abiertos, con medio de calentamiento vapor de agua y por hornilla, con medio de calentamiento humos de combustión. En los trapiches tradicionales de hornilla, se requiere mayor tiempo de procesamiento que en los trapiches con evaporadores abiertos. Lo anterior podría tener efecto sobre las propiedades fisicoquímicas de las mieles de caña y de la panela obtenida, que aún no han sido bien establecidas. Sumado a lo anterior, el entendimiento del cambio en las propiedades durante el procesamiento de las mieles de caña es fundamental para el mejoramiento y el desarrollo de tecnologías en el sector panelero. Los trapiches seleccionados para la obtención de muestras fueron el SENA, que opera con evaporadores abiertos, y Dulce ventorrillo, que opera con hornilla. Ambos localizados en Cundinamarca, Colombia. Para el estudio se recolectaron jugos y mieles de caña obtenidos en diferentes etapas del proceso, y se realizó la caracterización fisicoquímica a través de medición del contenido de sólidos, y la determinación de pH, acidez, densidad, humedad y cenizas. Adicionalmente, se realizó el análisis proximal de mieles de 70°Brix, que incluyó la cuantificación de proteína, grasa, contenido calórico, carbohidratos y minerales. Así mismo, se midió el perfil de azúcares, específicamente sacarosa, glucosa y fructosa, a través de las etapas de concentración. Las propiedades reológicas y térmicas medidas fueron viscosidad, capacidad calorífica, conductividad térmica y difusividad térmica. En todas las propiedades se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las tecnologías de procesamiento en los trapiches a excepción de la viscosidad.

Finalmente, se realizó la caracterización de muestras de panela en bloque y granulada obtenidas por métodos tradicionales en trapiche, y de panela pulverizada obtenida a partir de secado por aspersión. Se determinó el perfil de azúcares, fenoles totales y flavonoides totales, perfil fenólico de los ácidos protocatequico, vainílico, clorogénico, siríngico, p-cumárico y ferúlico, y color. Se encontraron diferencias en estas propiedades, principalmente debido a los tratamientos térmicos que fueron sometidos.

Palabras clave: mieles de caña panelera, panela, perfil de azúcares, etapa de concentración, hornilla, evaporadores abiertos.

Abstract

In this project, physicochemical, rheological and thermal properties of juices and syrups of non-centrifugated sugar cane (panela) were determined. Samples were obtained from manufacturing facilities using the traditional heating and the open evaporation technology. The traditional heating technology requires longer processing times than evaporators, which have a not well understood differentiating effect on the physicochemical properties of the syrups and the produced panela. Furthermore, understanding the change of physicochemical properties of sugar cane juices and syrups during their processing is fundamental for technology enhancement and development in the panela sector. The studied samples were obtained from two processing facilities SENA and Dulce Ventorrillo Farm, both located in Cundinamarca, Colombia. The juices and syrups were collected at different stages of the concentration process, and they were characterized by measuring solids content, pH, acidity, density, moisture, and ashes content. A proximal analysis was also carried out in 70°Brix syrups to measure protein, fat, calories, carbohydrates and mineral contents in samples. In addition, the sugar profile during the concentration process was evaluated by measuring sucrose, glucose and fructose concentrations. Rheological and thermal properties such as viscosity, specific heat capacity, thermal conductivity and thermal diffusivity were also studied.

Finally, panela samples of different commercial form solid brick, granulated, and spray dried powder and its corresponding syrups feedstock, were characterized by measuring sugar profile, total phenols, total flavonoids, colour and phenolic profile of protocatehuic, vanillic, chlorogenic, syringic, p-coumaric and ferulic acids. Block, granulated forms and the syrups were processed with the traditional process from the SENA facility, and the powder solid was obtained by spray drying of the collected syrups. Properties differences in the products were identified and they are mainly due to thermal processing differences.

Keywords: non-centrifugated sugar cane syrups, non-centrifugated sugar cane, sugar profile, concentration step, burner, open evaporator.

Contenido

	Pág.
Resumen	VII
Lista de figuras	XI
Lista de tablas	XIV
Lista de Símbolos y abreviaturas	XVI
Introducción	1
1. Generalidades	9
1.1. La panela	9
1.2. Mercado y producción	10
1.2.1. Producción mundial de panela.....	10
1.2.2. Comercio internacional de panela.....	13
1.2.3. Comercio de panela en Colombia.....	16
1.3. Proceso de producción.....	20
1.4. Estado del arte	23
1.4.1. Estado del arte en jugos y mieles de caña panela	23
1.4.2. Estado del arte en soluciones de azúcar	30
2. Formulación del problema	33
2.1. Objetivos	36
2.2. Metodología general.....	36
3. Caracterización fisicoquímica y perfil de azúcares	39
3.1. Materiales y métodos	39
3.1.1. Sólidos solubles totales	41
3.1.2. Contenido de humedad	42
3.1.3. pH.....	42
3.1.4. Acidez.....	42
3.1.5. Contenido de cenizas	43
3.1.6. Densidad	43
3.1.7. Perfil de azúcares.....	44
3.1.8. Análisis proximal.....	44
3.1.9. Contenido de minerales	45
3.1.10. Análisis estadístico	45
3.2. Resultados y discusión.....	46

3.2.1.	Propiedades fisicoquímicas	46
3.2.2.	Propiedades en función de la temperatura	52
3.2.3.	Perfil de azúcares en jugos y mieles de caña panelera	56
3.2.4.	Análisis proximal	62
4.	Caracterización reométrica y térmica de jugos y mieles de caña	67
4.1.	Materiales y métodos	68
4.1.1.	Viscosidad	68
4.1.2.	Capacidad calorífica	68
4.1.3.	Conductividad térmica	68
4.1.4.	Difusividad térmica	71
4.2.	Resultados y discusión	72
4.2.1.	Viscosidad	72
4.2.2.	Capacidad calorífica	75
4.2.3.	Conductividad térmica	79
4.2.4.	Difusividad térmica	82
5.	Perfil fenólico y color de panela obtenida por diferentes procesos	84
5.1.	Materiales y métodos	84
5.1.1.	Perfil de azúcares	85
5.1.2.	Fenoles totales	86
5.1.3.	Flavonoides totales	86
5.1.4.	Perfil de compuestos fenólicos	87
5.1.5.	Color	88
5.1.6.	Análisis estadístico	88
5.2.	Resultados y discusión	88
5.2.1.	Perfil de azúcares	88
5.2.2.	Fenoles totales	92
5.2.3.	Flavonoides totales	93
5.2.4.	Perfil de compuestos fenólicos	95
5.2.5.	Color	99
6.	Conclusiones y recomendaciones	103

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1 Producción mundial de panela entre el 2005 – 2013. Tomado de: (FAOSTAT, 2017), Cálculos propios.....	12
Figura 1-2 Producción de panela en los países con mayor representación mundial, entre el periodo 2009 a 2013. Tomado de: (FAOSTAT, 2017). Cálculos propios.....	13
Figura 1-3 Distribución de las importaciones mundiales de panela entre 2012 y 2015. Tomado de: (International Trade Centre, 2016). Cálculos propios.....	15
Figura 1-4 Porcentaje de participación mundial de los países exportadores de panela durante el 2012 y 2015. Tomado de: (International Trade Centre, 2016). Cálculos propios.	16
Figura 1-5 Producción de panela en Colombia 2005 a 2014. Tomado de: (MinAgricultura, 2017). Cálculos propios.....	17
Figura 1-6 Producción promedio de panela en Colombia entre 2010 y 2014. Tomado de: (MinAgricultura, 2017). Cálculos propios.	18
Figura 1-7 Exportaciones colombianas en toneladas y millones de dólares durante 2012 y 2015. Tomado de: (Procolombia, 2017)	19
Figura 1-8 Proceso de producción de panela en bloque y granulada.	22
Figura 3-1 Ubicación de los trapiches en los municipios de Nimaina (SENA) y Nocaima (Dulce ventorrillo)	40
Figura 3-2 Trapiches donde se realizó el muestreo. A la izquierda, el trapiche del SENA (tecnología de evaporadores abiertos) y a la derecha el trapiche DV (tecnología de hornilla).	40
Figura 3-3 Proceso de producción de panela granulada y puntos de muestreo de ambos trapiches.....	41
Figura 3-4 Valores de la humedad durante la etapa de evaporación del proceso de producción de panela - trapiche del SENA	47
Figura 3-5 Valores de a) pH y b) acidez durante la etapa de evaporación del proceso de producción de panela - trapiche del SENA	49
Figura 3-6 Valores de las cenizas durante la etapa de evaporación en el proceso de producción de panela - trapiche del SENA.	49
Figura 3-7 Porcentaje de humedad de cada punto de muestreos en ambos trapiches ...	50
Figura 3-8 Comportamiento del pH en los trapiches SENA y DV, en función de la etapa de proceso	51
Figura 3-9 Acidez en base seca, expresada como ácido aconítico, en los trapiches SENA y DV, en función de la etapa de proceso	51

Figura 3-10 Cenizas en los trapiches SENA y DV, en función de la etapa de proceso....	52
Figura 3-11 Densidad a diferentes concentraciones en función de la temperatura del trapiche del SENA.....	54
Figura 3-12 Superficies de respuesta de los modelos de densidad en función de la concentración y la temperatura a) trapiche del SENA b) trapiche DV.....	56
Figura 3-13 Ajuste de los modelos de densidad en función de la temperatura y la concentración a) trapiche del SENA b) trapiche DV.	56
Figura 3-14 Perfil de la sacarosa en el trapiche del SENA	57
Figura 3-15 Perfil de la glucosa en el trapiche del SENA	58
Figura 3-16 Perfil de la fructosa en el trapiche del SENA	59
Figura 3-17 Perfil de sacarosa de los puntos de muestreo de cada trapiche estudiado ..	60
Figura 3-18 Perfil de glucosa de los puntos de muestreo de cada trapiche estudiado.....	61
Figura 3-19 Perfil de fructosa de los puntos de muestreo de cada trapiche estudiado	61
Figura 3-20 Minerales en mieles de 70°Brix de ambos trapiches	65
Figura 4-1 Esquema del equipo construido para medir conductividad térmica de líquidos	69
Figura 4-2 Equipo diseñado y construido en esta tesis para la medición de conductividad térmica de líquidos.....	70
Figura 4-3 Medio líquido como volumen de control para el análisis de la transferencia de calor.....	70
Figura 4-4 Esfuerzo cortante en función de la velocidad de corte para la muestra J1 del trapiche del SENA.....	73
Figura 4-5 Viscosidad en función de la temperatura para los jugos y mieles del trapiche del SENA	74
Figura 4-6 Viscosidad en función de la etapa de concentración y la temperatura	75
Figura 4-7 Comparación entre los valores experimentales y calculados a partir del modelo de predicción de viscosidad	75
Figura 4-8 Capacidad calorífica de jugos y mieles del trapiche del SENA en función de la temperatura	77
Figura 4-9 Superficies de respuesta de los modelos de capacidad calorífica en función de la concentración y la temperatura a) trapiche del SENA b) trapiche DV.....	78
Figura 4-10 Comparación entre los valores experimentales y calculados a partir del modelo de predicción de capacidad calorífica en a) trapiche del SENA b) trapiche DV...	79
Figura 4-11 Conductividad térmica de jugos y mieles del trapiche del SENA, en función de la temperatura.....	80
Figura 4-12 Superficies de respuesta de los modelos de conductividad térmica en función de la concentración y la temperatura a) trapiche del SENA b) trapiche DV.....	82
Figura 4-13 Comparación entre los valores experimentales y calculados a partir del modelo de predicción de capacidad calorífica a) trapiche del SENA b) trapiche DV.	82
Figura 4-14 Difusividad térmica de jugos y mieles del trapiche del SENA, en función de la temperatura	83
Figura 5-1 Perfil de azúcares de panela obtenida por diferentes procesos y mieles de caña panelera, a) sacarosa, b) glucosa, c) fructosa.	91

Figura 5-2 Fenoles totales de panela obtenida por diferentes tipos de proceso y mieles de caña panelera.	93
Figura 5-3 Flavonoides totales de panela obtenida por diferentes tipos de proceso y mieles de caña panelera.	95
Figura 5-4 Compuestos fenólicos identificados en panela obtenida por diferentes procesos y mieles de caña panelera	98
Figura 5-5 Coordenadas L, a, b del espacio CIELAB (<i>Konica Minolta, 2014</i>)	100
Figura 5-6 Ubicación de los parámetros de color de panela obtenida por diferentes procesos y diferentes tamaños de partícula en el diagrama (a, b).	101
Figura A-1 Valores de la humedad durante la etapa de evaporación del proceso de producción de panela - trapiche DV.....	106
Figura A-2 Valores de a) pH y b) acidez durante la etapa de evaporación del proceso de producción de panela - trapiche DV.....	106
Figura A-3 Valores de las cenizas durante la etapa de evaporación en el proceso de producción de panela - trapiche DV.....	107
Figura A-4 Densidad a diferentes concentraciones en función de la temperatura del trapiche DV	108
Figura A-5 Perfil de la sacarosa en el trapiche DV	109
Figura A-6 Perfil de la glucosa en el trapiche DV.....	110
Figura A-7 Perfil de la fructosa en el trapiche DV	110
Figura A-8 Viscosidad de jugos y mieles del trapiche DV, en función de la temperatura	112
Figura A-9 Capacidad calorífica de jugos y mieles del trapiche DV, en función de la temperatura.....	113
Figura A-10 Conductividad térmica de jugos y mieles del trapiche DV, en función de la temperatura.....	114
Figura A-11 Difusividad térmica de jugos y mieles del trapiche DV, en función de la temperatura.....	115
Figura B-1 Curva de calibración de sacarosa - HPLC.....	117
Figura B-4 Cromatograma de la solución patrón de 60, 4,3 y 10 mg/ml de sacarosa, glucosa y fructosa, respectivamente.....	118
Figura B-5 Cromatograma de una muestra de 70°Brix del trapiche DV	119

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1-1 Nombres de panela alrededor del mundo. Tomado de: (<i>Jaffé, 2012a</i>).....	11
Tabla 1-2 Cantidad de panela y valor de las importaciones y exportaciones mundiales entre 2012 y 2015. Tomado de: (<i>International Trade Centre, 2016</i>).....	14
Tabla 1-3 Requisitos fisicoquímicos de panela en bloque y granulada. Tomado de: (<i>ICONTEC, 2009</i>)	24
Tabla 1-4 Propiedades fisicoquímicas, reológicas y térmicas de mieles de caña panelera hechas a nivel laboratorio. Tomado de: (<i>Alvarado & Naranjo, 2008</i>).....	26
Tabla 1-5 Propiedades de jugos de caña panelera durante el proceso en laboratorio. Tomado de: (<i>Clavijo, 2010</i>).....	27
Tabla 1-6 Modelos matemáticos reportados de mieles de caña panelera. Tomado de: (<i>Alvarado & Naranjo, 2008; Peña, 2009</i>).....	29
Tabla 3-1 Descripción de los puntos de muestreo en donde se tomaron las muestras de cada trapiche	41
Tabla 3-2 Concentración en SST de las muestras tomadas en cada trapiche.....	46
Tabla 3-3 Propiedades fisicoquímicas de las muestras del trapiche del SENA	47
Tabla 3-4 Densidad de jugos y mieles de caña panelera en función de temperatura y la concentración para las muestras del trapiche del SENA	53
Tabla 3-5 Perfil de azúcares en jugos y mieles de caña panelera del trapiche del SENA	57
Tabla 3-6 Análisis proximal de mieles de 70°Brix provenientes de los trapiches SENA y DV.....	64
Tabla 3-7 Minerales en las mieles de 70°Brix de los dos trapiches	65
Tabla 4-1 Viscosidad de jugos y mieles de caña panelera en función de temperatura y la concentración para las muestras del trapiche del SENA, muestreo 1	72
Tabla 4-2 Parámetros de viscosidad en función de la temperatura del modelo de Arrhenius	73
Tabla 4-3 Capacidad calorífica de jugos y mieles de caña panelera del trapiche del SENA, en función de la temperatura	76
Tabla 4-4 Conductividad térmica en función de la temperatura y concentración del trapiche del SENA.....	79

Tabla 4-5 Difusividad térmica de jugos y mieles del trapiche del SENA, en función de la temperatura.....	83
Tabla 5-1 Nomenclatura y tamaño de partícula de las muestras de panela granulada y pulverizada.....	85
Tabla 5-2 Perfil de azúcares, fenoles y flavonoides totales en panela obtenida por diferentes procesos, en base seca.	90
Tabla 5-3 Perfil fenólico en base seca de panela obtenida por diferentes procesos y mieles de caña panelera	97
Tabla 5-4 Parámetros de color de panela obtenida por diferentes procesos y mieles de caña panelera en dilución.....	100
Tabla A-1 Propiedades fisicoquímicas de las muestras del trapiche DV.....	105
Tabla A-2 Densidad de jugos y mieles de caña panelera en función de temperatura y la concentración para las muestras del trapiche DV.....	107
Tabla A-3 Perfil de azúcares del trapiche Dulce Ventorrillo	109
Tabla A-4 Viscosidad de jugos y mieles del trapiche DV	111
Tabla A-5 Parámetros de viscosidad en función de la temperatura del modelo de Arrhenius.....	112
Tabla A-6 Capacidad calorífica de las muestras del trapiche DV.....	113
Tabla A-7 Conductividad térmica de jugos y mieles del trapiche DV	114
Tabla A-8 Difusividad térmica de jugos y mieles del trapiche DV	115

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
c_p	Capacidad calorífica	$\frac{J}{gK}$	75
S	Área transversal	m^2	68

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
α	Difusividad térmica	$\frac{m^2}{s}$	$\alpha = \frac{\lambda}{c_p \rho}$ (4.6) 4.2.4
λ	Conductividad térmica	$\frac{W}{mK}$	$\lambda = Q \text{Log} \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \div 2\pi L T_1 - T_2$
μ	Viscosidad	mPa*s	72
ρ	Densidad	$\frac{g}{ml}$	52

Subíndices

Subíndice	Término
bs	Base seca

Introducción

La panela es un producto obtenido por la deshidratación de jugos de caña de azúcar. Es un producto artesanal comúnmente clasificado como azúcar de caña no-centrifugado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación – FAO (*Jaffé, 2012a*). El origen de esta clasificación se fundamenta en el hecho de que, a diferencia del azúcar refinado, la panela no incluye la etapa de centrifugación en donde se retiran compuestos fenólicos, minerales, vitaminas y micronutrientes, los cuales permanecen en ella confiriéndole ventajas nutricionales (*Jaffé, 2012a*).

La panela se considera como un endulzante natural, y era la forma predominante de consumo de caña de azúcar a nivel mundial, antes del desarrollo del proceso de refinación y la comercialización a gran escala del azúcar refinado. Actualmente, India, Colombia, Pakistán y China, son países líderes en su producción. Sin embargo, el consumo per cápita de la panela ha disminuido, debido principalmente a la sustitución por azúcar refinada y otros endulzantes naturales y artificiales (*Jaffé, 2012a; Lara, Poaquiza, & Oswaldo, 2008*).

Recientemente, el consumo de endulzantes está sufriendo un cambio de tendencia a nivel mundial. Se ha observado un fenómeno de retorno a lo natural debido principalmente a los efectos negativos asociados al consumo de azúcar refinado y de las dietas altas en calorías. El consumo excesivo de azúcar refinado se relaciona con graves problemas de salud pública como obesidad, sobrepeso, diabetes y caries dental (*Euromonitor International, 2014*). Este hecho ha incrementado la demanda por endulzantes de origen natural, en particular aquellos elaborados con prácticas de producción “orgánicas”. Con estos cambios se busca mejorar los hábitos alimenticios, con dietas más saludables, y por medio del consumo de endulzantes con valor nutracéutico, que permitan tener una buena vejez, evitando el desarrollo de posibles enfermedades.

En esa dirección, la preferencia por endulzantes con valor nutracéutico no solo es mayor frente al azúcar refinado, sino también, frente a los endulzantes artificiales. Lo anterior debido a que el consumo de estos últimos también se ha asociado con efectos negativos en la salud. Un ejemplo de esto es el ciclamato, que puede ser metabolizado por la flora intestinal produciendo ciclohexilamida. Esta sustancia es carcinogénica en animales, y en humanos puede generar alergias, alteración de la síntesis de hormonas tiroideas e incluso dañar funciones testiculares (*Alonso, 2010*).

Lo anterior, ha dado paso a que los endulzantes naturales se vuelvan a utilizar para consumo doméstico y como ingrediente en la industria de alimentos. Es así que entidades como la Organización Mundial de la Salud (OMS), ha recomendado a los fabricantes de alimentos reducir el contenido de azúcar agregado y preferir endulzantes naturales (*Langley, 2014*). Esto ha tenido como efecto un fuerte aumento en su mercado, el cual se estimó en US\$10,500 millones en 2012, y se espera que su demanda aumente a US\$13,700 millones en 2018 (*Fischer, 2014*). Entre estos se destacan la estevia, la miel de abejas, el azúcar crudo de remolacha, la miel del árbol de arce y la panela (*Guerrero Useda & Escobar Guzmán, 2015*). En particular, la panela es de gran importancia para la economía colombiana, y puede representar un potencial para el crecimiento en el sector rural.

Colombia es el segundo productor de panela después de India. En el país, la panela se ubica en el segundo lugar de importancia en cuanto a producción y área cultivada, después del café (*Fedepanela, 2015*). Además, tiene un impacto económico positivo, pues el sector generó para 2014 cerca de 293,022 empleos directos y 879,065 empleos indirectos (*Fonseca, 2015*). Por otro lado, su producción es una tradición que se considera de gran valor social, ya que involucra mano de obra familiar y vecinal, pues los cultivadores de caña panelera suelen asociarse y reunirse en trapiches o unidades productoras (*Fedepanela, 2015; MinAgricultura, 2013*).

En el país existen cerca de 70.000 unidades cultivadoras y 22.000 productoras, que generan 1'500.000 toneladas de panela por año (*Fedepanela, 2015*). De estas unidades, el 5% son productoras a gran escala, (>300kg/h de panela), y su mercado es principalmente internacional. Las unidades restantes, son empresas de escala mediana (100 - 300kg/h de panela), pequeña (100 – 150 kg/h de panela) y microfundios (< 50kg/h

de panela). Los de pequeña escala son los más representativos en el sector, mientras que los microfundios se caracterizan por tener aún molinos con tracción animal y por tener dificultades para modernizarse y mejorar la competitividad (*Fedepanela, 2015*). Los trapiches de mediana, pequeña escala y microfundios implementan el proceso tradicional, con fuente de calor humos de combustión del bagazo en hornillas. Los de gran escala y algunos de mediana escala han implementado el proceso con medio de calentamiento de vapor de agua en evaporadores.

Independientemente de la escala de producción, la panela se produce y distribuye en diferentes presentaciones comerciales: bloque, pastilla, granulada, y aglomerada (p. ej. en cubos con o sin aroma). Sin embargo, el portafolio se podría ampliar y su valor agregado aumentar, si se logran desarrollar procesos para la producción y comercialización de productos innovadores como, por ejemplo, jarabes de caña, mezcla con hierbas aromáticas o té, barras de cereal y bebidas. Si bien, existe una gran oportunidad para consolidar el mercado de derivados paneleros, se requiere aumentar y tecnificar la producción, estandarizar el producto y mejorar los índices de calidad (*Castellanos, Torres, & Florez, 2009*).

En cuanto a la reglamentación en Colombia, se encuentra la norma técnica NTC 1311 (*ICONTEC, 2009*) que establece los requisitos mínimos de calidad y algunos ensayos de caracterización de panela, la resolución 676 de 2010 que establece los requisitos sanitarios para la producción y comercialización (*Ministerio de la Protección Social, 2006*). A nivel internacional el CODEX alimentario de la FAO es la norma que regula los requisitos de panela (*Comite Nacional del Codex Alimentarius de Colombia, 2010*). Dentro de estos documentos se denominan las mieles de panela como mieles vírgenes y se describen como el resultado de la concentración del jugo clarificado de la caña de azúcar (*Ministerio de la Protección Social, 2006*).

De acuerdo con lo anterior, las mieles de panela son el producto intermedio durante las etapas de evaporación y concentración de jugos de caña en la producción de panela. El contenido de azúcares, de dichas mieles, se mide en grados Brix, el cual es una medida indirecta de la cantidad de sacarosa por peso de muestra. En la industria panelera no se ha estandarizado la definición de “mieles de caña” respecto a la concentración (°Brix). Sin embargo, cuando los jugos de caña evaporado están cerca de los 90 - 92°Brix, dejan

de llamarse mieles y se les denomina empíricamente como “punto” de la panela. En este momento, el producto líquido caliente está listo para batir, servir, moldear y enfriar para transformarse en panela sólida (CNPMLTA, 2009).

Si bien, ha habido intentos de estandarización y de mejoramiento de calidad a través de la exigencia de buenas prácticas de manufactura. La tecnología de producción de panela en Colombia se ha mantenido prácticamente inalterada desde su inicio en la época colonial. En buena medida, esto es consecuencia del escaso entendimiento de los procesos fisicoquímicos que ocurren durante la concentración de los jugos de caña, la producción de mieles, la obtención del punto de panela y su transformación en el producto comercial. La falta de este conocimiento limita los intentos de estandarización respecto al manejo de las variables de proceso y de su impacto en el producto final. Esta dificultad tecnológica se ve reflejada en la heterogeneidad en la calidad de la panela comercial, lo que limita su uso como materia prima industrial, que daría lugar al aumento de su consumo y una sostenibilidad del sector en el largo plazo. En este sentido, el entendimiento de los procesos fisicoquímicos que ocurren durante el procesamiento de la panela son una herramienta fundamental para construir los tan requeridos estándares de procesos (Castellanos, Torres, & Flórez, 2010).

En Colombia, la investigación en el sector panelero se ha enfocado principalmente en las áreas agronómicas, de buenas prácticas de manufactura, generación de nuevos productos, y desarrollos tecnológicos puntuales como las hornillas mejoradas, los trenes de evaporadores, etc. (Castellanos et al., 2009). Sin embargo, el desarrollo de muchas de estas tecnologías y productos se basa más en el conocimiento tradicional y empírico del proceso, que, en el entendimiento de los procesos de transformación fisicoquímica, las variables que lo afectan y su impacto en las características del producto. En este sentido, la determinación de las propiedades fisicoquímicas de las mieles de caña panelera, y su dependencia con la temperatura y la concentración durante su procesamiento, permitirá generar herramientas de control para estandarizar los procesos en el sector panelero, para hacer diferenciación del producto y para la constitución de una designación de origen de los productos comerciales. En particular, se espera que en los próximos años, el 40% de la producción nacional pueda ser identificada y corresponda a un producto diferenciado (orgánico y/o regional) (SIOC, 2010).

Existen pocos estudios de caracterización de jugos y mieles de caña. Recientemente se ha estudiado el comportamiento fisicoquímico de jugos de diferentes variedades de caña (*Alvarado & Naranjo, 2008; Clavijo, 2010*). Además, se han establecido algunas correlaciones de las propiedades reológicas y térmicas con la temperatura y el contenido de sólidos (*Peña, 2009*). Sin embargo, el alcance de estas correlaciones es limitado en el intervalo de medición, y además no se miden todas las propiedades requeridas en el entendimiento del proceso de transformación.

Por otro lado, propiedades organolépticas como el color, suele ser una de las características de calidad más importantes, que está asociada con el precio del producto, y es un criterio de compra entre los consumidores. El color de la panela es una variable fundamental y depende en gran medida de aspectos agronómicos y de las condiciones de procesamiento (*Guerra & Mujica, 2010*). Sin un claro entendimiento de los efectos sobre el producto, en algunas unidades de producción, el color oscuro generado durante el procesamiento se atenúa con agentes de blanqueamiento, como hidrosulfito, hiposulfito o metabisulfito de sodio. Sin embargo, el efecto de blanqueamiento es momentáneo, pues estos agentes se degradan a productos aún más oscuros. Sumado a esto, muchos de estos agentes han sido prohibidas por ser nocivas para la salud, debido a efectos cancerígenos (*Industria Panelera, 2010*).

En esta dirección, además de la determinación de las propiedades fisicoquímicas, es importante realizar la caracterización química de las mieles y entender que componentes afectan las propiedades sensoriales del producto. Particularmente, en el caso de las mieles de caña de azúcar, los compuestos fenólicos como los flavonoides, ácidos fenólicos y polifenoles son agentes que aportan color y propiedades antioxidantes (*Paton, 1992*). Adicionalmente, durante el crecimiento de la caña de azúcar se observan colores intensos generados por antocianinas que se descomponen por el calor y se eliminan durante la clarificación. En la composición de la mayoría de las cañas, se encuentran compuestos como las flavonas, que aportan una tonalidad amarillo-verde que es enmascarado por clorofilas o antocianinas. Adicionalmente, el color de las mieles también se afecta por la oxidación de compuestos fenólicos, caramelización de azúcares, productos de la reacción de Maillard y degradación alcalina de la sacarosa (*Segui, Calabuig-Jimenez, Betoret, & Fito, 2015*).

Con base en todo lo anterior, este trabajo se enfocó en la evaluación de propiedades fisicoquímicas, reológicas y térmicas de jugos y mieles de caña, como base para el desarrollo de tecnologías mejoradas de procesamiento. Además, el trabajo presenta una caracterización cromática de los productos obtenidos por medios tradicionales y tecnologías mejoradas, con el propósito de determinar el impacto del tipo de procesamiento sobre las propiedades químicas y el color. En particular, los estudios desarrollados en este trabajo están asociados al proyecto: “Secado por aspersion de mieles de caña como base para la obtención de productos instantáneos de panela”. En este se busca obtener productos endulzantes naturales y de mayor valor agregado a partir de pulverización de mieles de caña panelera.

Como parte del proyecto, en este trabajo se desarrolló la caracterización fisicoquímica, térmica y reológica de jugos y mieles durante la producción de panela en sistemas tradicionales de calentamiento por humos de combustión y en sistemas de calentamiento con vapor de agua. Las muestras fueron obtenidas por muestreos de dos trapiches del departamento de Cundinamarca y posteriormente se analizaron en el laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad Nacional. Adicionalmente, el trabajo incluye la caracterización cromática, el perfil de compuestos fenólicos y azúcares de panela en bloque, granulada tradicional, panela pulverizada, obtenida por secado por aspersion, y mieles de 50 y 70 °Brix. Esto con el fin de identificar si las condiciones de operación generan cambios en el color y en el perfil fenólico de la panela.

El trabajo involucró la estandarización de todas las técnicas analíticas, el diseño y construcción de equipos de medición (cuando fue necesario), y la medición sobre cada una de las muestras. Los resultados correspondientes se presentan en el documento con la siguiente estructura:

En el capítulo 1, se presenta el contexto general de la panela tanto a nivel internacional como en Colombia; la producción, mercado y los diferentes productos innovadores a partir de este. Además, se muestra el estado del arte respecto a la caracterización y medición de propiedades de jugos y mieles de caña panelera, y propiedades de soluciones de azúcar.

En el capítulo 2, se plantea la formulación del problema, los objetivos y la metodología general del trabajo de investigación. Allí se justifica la necesidad de conocer las

propiedades fisicoquímicas, reológicas y térmicas durante el proceso de concentración de los jugos y mieles de caña en la producción de panela.

En el capítulo 3, se presentan las metodologías y resultados de las propiedades fisicoquímicas y el perfil de azúcares de los jugos y mieles en función de las etapas de concentración. Adicionalmente, se presentan los resultados del análisis proximal de mieles de 70°Brix.

En el capítulo 4, se muestran los resultados de la caracterización reológica y térmica de los jugos y mieles de caña, así como las metodologías y materiales utilizados para cada una de las propiedades medidas. Finalmente, se ajustan los modelos matemáticos para predecir viscosidad, capacidad calorífica, conductividad térmica y difusividad térmica, en función de la concentración y temperatura de las mieles.

En el capítulo 5, se muestran los resultados obtenidos en la caracterización del perfil de azúcares, fenoles totales, flavonoides totales, perfil fenólico y color de las muestras diluidas de panela en bloque, granulada tradicional, panela pulverizada obtenida por secado por aspersion y mieles de 50 y 70°Brix.

En el capítulo 6, se establecen las conclusiones de esta tesis de maestría y se presentan algunas recomendaciones para futuros trabajos.

1. Generalidades

1.1. La panela

La panela es un sólido obtenido por medio de la evaporación de los jugos de caña de azúcar *Saccharum Officinarum*. Históricamente, ha hecho parte de la canasta familiar colombiana, siendo un elemento fundamental en la economía de las zonas rurales a nivel nacional. Además de su importancia local, la panela es uno de los productos promisorios de exportación, especialmente en el segmento de productos orgánicos y de origen natural (L. M. Palacios, 2012). Su uso es principalmente como endulzante en bebidas calientes o frías y como ingrediente en algunos alimentos. Comparado con otros endulzantes como el azúcar refinado, la panela es nutricionalmente mejor, debido a que conserva carbohidratos, minerales, vitaminas, proteínas e incluso compuestos fenólicos que le aporta la caña como materia prima (Castellanos et al., 2009).

Como en cualquier producto de origen agrícola, las características de la panela dependen en gran medida de factores como la variedad de caña, el manejo agronómico, la materia prima usada, y el proceso de producción (ICONTEC, 2009). En Colombia, existen diferentes variedades de caña que se usan en los procesos de producción de endulzantes. Algunas son híbridos del país o de otros países, como por ejemplo CC 84-75 (Cenicaña, Colombia), POJ 2878 (Isla de Java), POJ 2714, PR 61-632 (Puerto Rico) y PR 11-41, RD 75-11 (República Dominicana) (ICA, 2011; Osorio, 2007).

Por otro lado, las presentaciones de panela obtenidas por moldeo corresponden a bloques, pastillas, redonda y pilones piramidales. Sin embargo, se han desarrollado nuevas presentaciones, como las granuladas y compactadas en cubos, de sabor natural y saborizadas, con miras a suplir las nuevas tendencias de mercado. Lo anterior debido a la creciente tendencia entre los consumidores por preferir bebidas y alimentos con base

en ingredientes naturales y de rápida disolución (*Langley, 2014*). Esta preferencia por los productos naturales también se suma a la preocupación por las dietas altas en calorías y a buscar sustitutos más saludables. Estas dietas están asociadas a enfermedades como la obesidad, diabetes, derrame cerebral, hiperactividad juvenil, hipoglicemia y deficiencia de nutrientes, entre otras (*Malik, Popkin, Bray, Despres, & Hu, 2010*).

En esta misma dirección, una de las mayores ventajas de la panela, comparada con otros endulzantes como azúcar refinada y morena, es que su contenido de fitonutrientes, antioxidantes, vitaminas y minerales se conservan durante el procesamiento. Los compuestos fenólicos le confieren a la panela una actividad antioxidante hasta seis veces mayor que el azúcar morena. Esta actividad antioxidante es similar en frutas como la fresa, piña, naranja, mora y frambuesa, y es aún mayor que otras como la manzana, banana, mango y albaricoque y algunos vegetales (*Segui et al., 2015*). Así pues, además del poder endulzante, la panela aporta el valor nutricional a la dieta de los consumidores. Esto ha sido confirmado en estudios recientes que dan cuenta de los efectos positivos sobre la salud asociados al consumo de panela. Por ejemplo, se ha demostrado que los componentes de la panela brindan un efecto citoprotector, que protege las células de agentes nocivos, y son benéficos en el tratamiento de garganta e infecciones en el sistema respiratorio (*Harish Nayaka, Sathisha, Manohar, Chandrashekar, & Dharmesh, 2009*). Sin embargo, a pesar de todos sus beneficios en la salud, no se ha reconocido como alimento funcional, probablemente por la escasa investigación en esta área (*W. R. Jaffé, 2012*).

1.2. Mercado y producción

1.2.1. Producción mundial de panela

La panela es un alimento artesanal que se consume principalmente como endulzante alrededor del mundo. Se conoce con diferentes nombres de acuerdo con la región de origen, siendo los más comunes jaggery o gur (Sur de Asia), panela (Latinoamérica) y muscovado (Filipinas). La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (*Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO*, por sus siglas en inglés) la denomina técnicamente como azúcar de caña no centrifugada (*Jaffé, 2015*). En la tabla 1-1 se presenta una lista de los nombres más comúnmente utilizados

en las diferentes regiones. Esto es importante, por cuánto, buena parte de las investigaciones sobre el procesamiento de la panela se reportan con base en los nombres comunes, y muy rara vez con la denominación establecida por la FAO.

Tabla 1-1 Nombres de panela alrededor del mundo. Tomado de: *(Jaffé, 2012a)*

Región	País	Nombre
Asia	India, Pakistán	Jaggery, Gur
	Tailandia	Namtan Tanode
	Japón	Kokuto, black sugar (Kuro Sato)
	Filipinas	Moscavado, Panocha, Panutsa
	Sri Lanka	Hakuru, Vellam
	Malasia	Gula Melaka
	Indonesia	Gula Java, Gula Merah
América Latina	México	Piloncillo
	Guatemala	Panela, Rapadura
	Costa Rica, Nicaragua	Tapa dulce, dulce
	Panamá	Panela, Raspadura
	Colombia, Ecuador	Panela
	Venezuela	Papelón, Panela
	Perú, Bolivia	Chancaca
	Brasil	Rapadura
	Argentina	Azúcar integral, azúcar panela
África	Nigeria, Kenya, África del sur	Jaggery
	Países de habla swahili	Sukari Njumru
Europa, América del Norte	Reino Unido	Unrefined muscovado
	Francia	Cassonade
	Alemania	Vollrohrzucker
	EEUU	Raw sugar, evaporated cane juice

Así como los nombres, la producción de panela es a nivel global. En la figura 1-1 se resume la producción mundial en los últimos 9 años *(FAOSTAT, 2017)*. Esta producción ha fluctuado entre 8 y 12 millones de toneladas anuales. Durante los periodos 2007 - 2008 y 2010 - 2011, la producción decreció debido a la reducción en países representativos en el mercado como India, Myanmar, Pakistán y China *(Jaffé, 2012a)*.

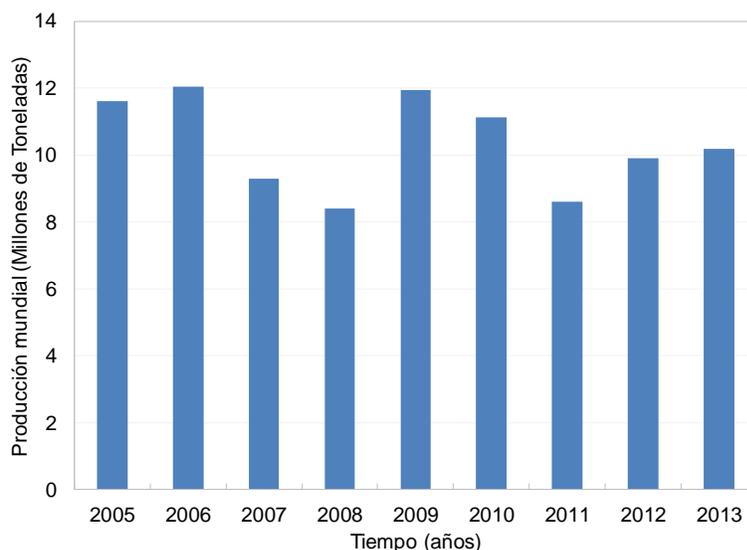


Figura 1-1 Producción mundial de panela entre el 2005 – 2013. Tomado de: (FAOSTAT, 2017), Cálculos propios.

India produce entre 5 y 8 millones de toneladas al año, lo que le confiere la participación más alta, mayor al 60%. Por su parte, Colombia es el segundo productor mundial desde 2005, con una participación mayor al 10% en el mercado mundial y con una producción entre 1,2 y 1,4 millones de toneladas (Jaffé, 2012a). A pesar de ser el segundo productor, la cantidad es aproximadamente entre 4 y 6 veces menor que la de India en el periodo analizado. Otros países con producción importante (mayor a 400 mil toneladas anuales) son Myanmar, Pakistán, Brasil y China. La dinámica de la producción de estos países se muestra en la figura 1-2, en donde se observa que la producción en India ha decrecido en los últimos años, mientras que en Colombia tiene una tendencia creciente. Myanmar, China y Brasil han tenido una producción estable, mientras Pakistán decreció notablemente en 2012, pasando a ser el menor de los seis primeros países productores.

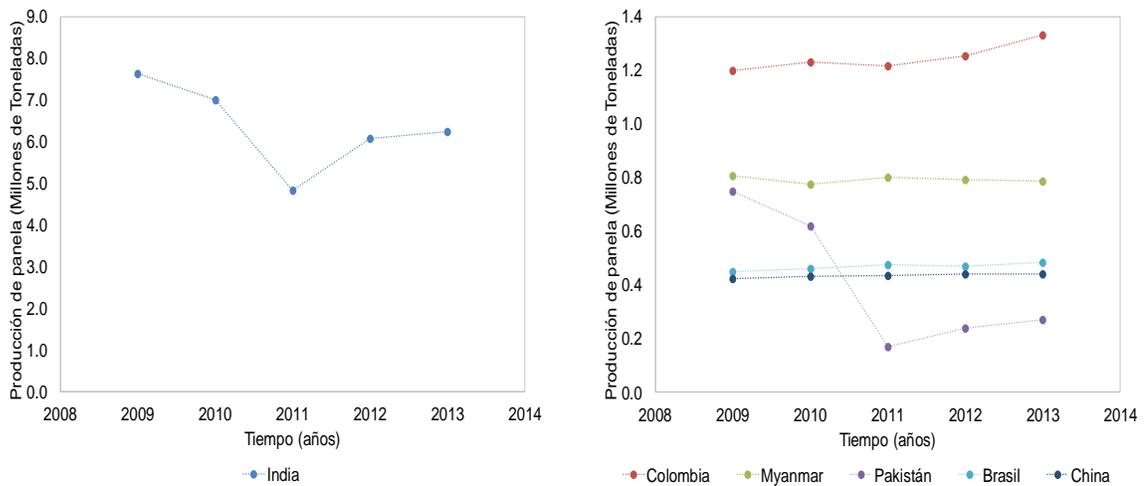


Figura 1-2 Producción de panela en los países con mayor representación mundial, entre el periodo 2009 a 2013. Tomado de: (FAOSTAT, 2017). Cálculos propios.

1.2.2. Comercio internacional de panela

El comercio internacional de panela es difícil de cuantificar puesto que algunos países no tienen códigos arancelarios para este producto (Jaffé, 2012a). Sin embargo, Colombia llevó una propuesta para crear un código para la panela ante la Organización Mundial de Aduana (OMA), en 2003. Este código fue aceptado y subtitulado en 2007, dentro del grupo de azúcares como *170113: Azúcar de caña, en estado sólido, sin adición de aromatizante ni colorante, que se obtiene sin centrifugar, con un contenido de sacarosa 69° a 93°, que sólo contiene microcristales anhedrales naturales* (Jaffé, 2012a). Por lo anterior, los reportes de importaciones y exportaciones existentes bajo este código se encuentran desde 2012 en la base de datos del centro de comercio internacional – ITC, por sus siglas en inglés (International Trade Center). Dichos datos para el periodo 2012 a 2015, incluyendo reexportaciones, se resumen en la tabla 1-2.

Tabla 1-2 Cantidad de panela y valor de las importaciones y exportaciones mundiales entre 2012 y 2015. Tomado de: (*International Trade Centre, 2016*)

Cantidad de panela mundial (Millones de Toneladas)				
Año	2012	2013	2014	2015
Importada	2,24	2,95	4,19	1,53
Exportada	3,91	2,41	0,76	1,55
Valor mundial en miles de dólares (USD)				
Importaciones	1,38	1,51	2,04	0,89
Exportaciones	2,47	1,51	0,70	0,53

Durante los años analizados, las importaciones promedio fueron de 2,74 millones de toneladas, correspondientes a 1,46 millones de dólares. Por otro lado, las exportaciones promedio fueron de 1,58 millones de toneladas, correspondientes a 1,30 millones de dólares. Emiratos Árabes Unidos fue el país que registró las mayores importaciones durante el 2012 y 2014 (entre 0,68 – 2,12 millones de toneladas). Durante el 2015, el comercio disminuyó cerca de 2 millones de toneladas lo que se refleja en una reducción del 85% de las importaciones con respecto al 2014. En menor medida, países como Indonesia, Azerbaiyán y Argelia disminuyeron sus cantidades, aportando al impacto del mercado internacional en el 2015.

En la figura 1-3 se muestra la distribución de las importaciones a nivel global durante el periodo 2012 y 2015. En este periodo 165 países importaron panela, principalmente, Emiratos Árabes Unidos y Azerbaiyán (en rojo). África y Asia son los continentes que registraron las mayores importaciones de panela (50 – 200 mil toneladas). Así mismo, llama la atención que Venezuela es el país del continente americano con mayor importación (*International Trade Centre, 2016*).

En cuanto a las exportaciones, sin incluir re-exportaciones, Pakistán, India, Panamá, Brasil y Colombia cuentan con los mayores volúmenes, representando el 98% del total (figura 1-4). Esta participación ha venido cambiando, puesto que durante los años 2007 a 2011, India, China, Tailandia, Colombia y Pakistán realizaban el 91% de las exportaciones mundiales (*Jaffé, 2012a*).

Para el periodo analizado, Pakistán es el mayor exportador, no por ser constante en el mercado, como otros países, si no debido a que sus exportaciones durante 2014 y 2015 fueron del 88,9%. India por su parte, durante 2013 y 2014 tuvo exportaciones entre el 66 y 74%, periodo en el cual fue el mayor exportador. Por otro lado, los países con las menores exportaciones son México, Costa Rica, Bolivia, Perú, El Salvador, China, España, Japón, Ecuador, Guatemala, Indonesia y Sri Lanka (*Jaffé, 2012a*).

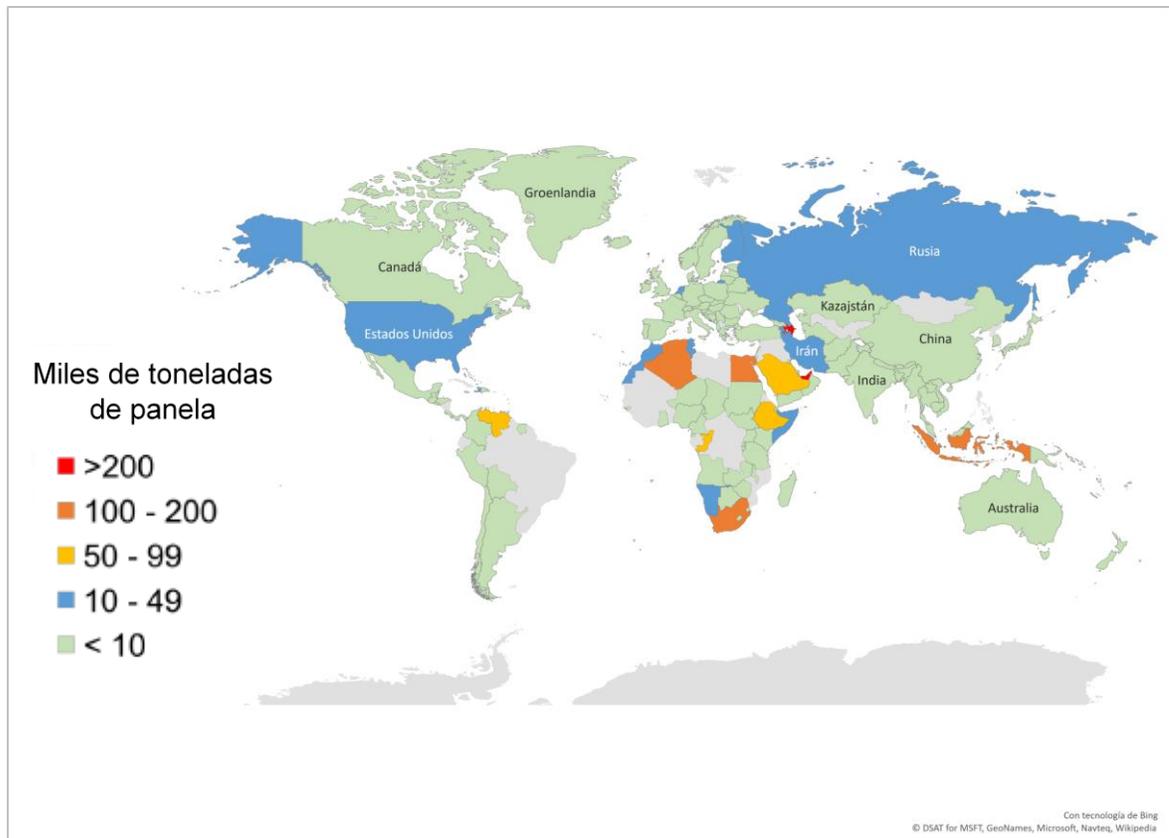


Figura 1-3 Distribución de las importaciones mundiales de panela entre 2012 y 2015.

Tomado de: (*International Trade Centre, 2016*). Cálculos propios.

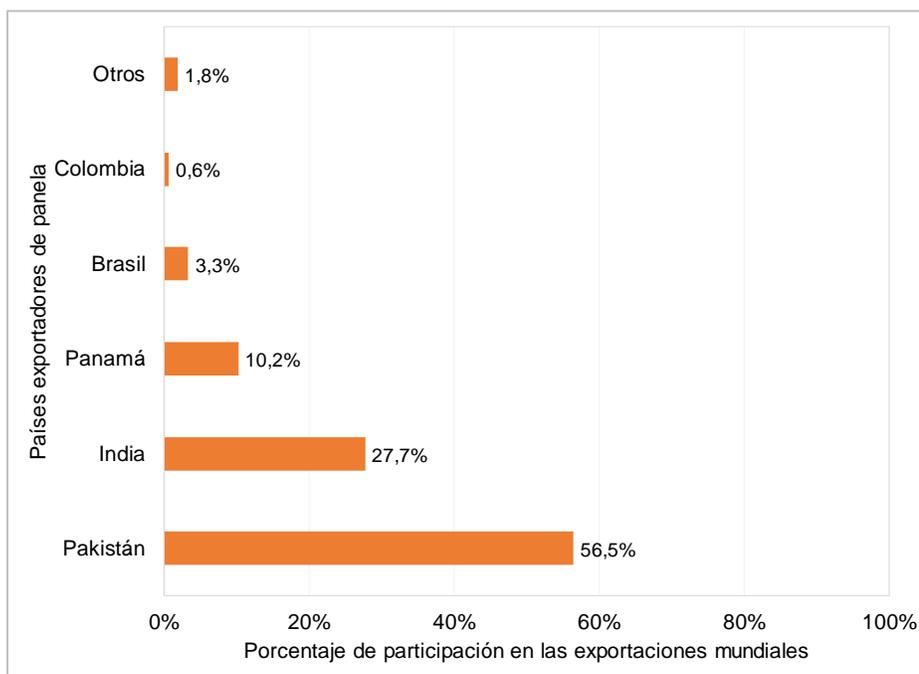


Figura 1-4 Porcentaje de participación mundial de los países exportadores de panela durante el 2012 y 2015. Tomado de: (*International Trade Centre, 2016*). Cálculos propios.

1.2.3. Comercio de panela en Colombia

- Producción de panela

La producción de panela es una de las actividades con mayor tradición en Colombia, convirtiéndose en la segunda más importante después del café. Así pues, la agroindustria panelera es base del sustento de cerca de 350,000 familias en los diferentes eslabones de la cadena. Involucra cerca del 12% de la población rural económicamente activa, es decir, 293,022 empleados directos y 879,065 empleos indirectos. Debido a su impacto en el área rural, esta actividad tiene una gran importancia socioeconómica, pues involucra mano de obra principalmente familiar o vecinal (*Fedepanela, 2015*).

La producción de panela en Colombia ha tenido momentos de auge y recesión. Por ejemplo, entre 2005 y 2009, la producción tuvo una reducción del 88% que equivale a 160,000 toneladas. Sin embargo, a partir del 2010 la producción empezó a crecer de tal manera que para 2014, la cantidad producida era mayor a la que se tenía en 2005, lo

cual se muestra en la figura 1-5. Este resurgimiento fue gracias a los programas del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural – MADR sobre el consumo y aumento de competitividad del sector panelero (*Castellanos et al., 2010*). En promedio la producción de panela fue de 1,27 millones de toneladas durante el periodo 2005 a 2014 (*MinAgricultura, 2017*) y para 2025 se espera un aumento del 15%, con una capacidad de exportación de 50,000 toneladas año (*SIOC, 2010*).

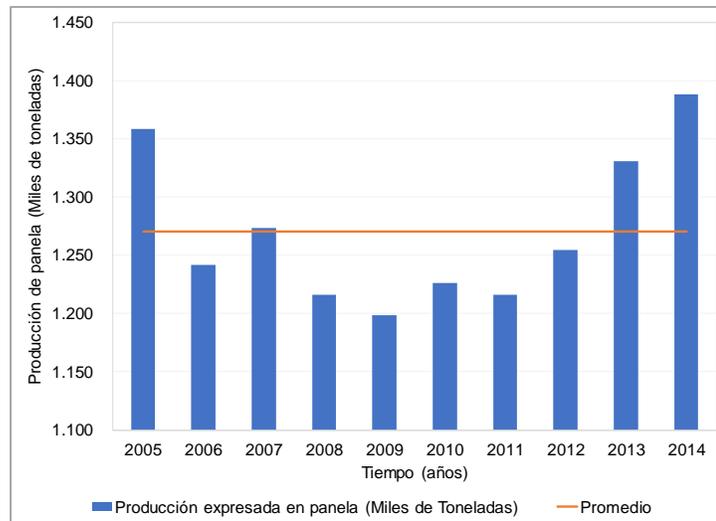


Figura 1-5 Producción de panela en Colombia 2005 a 2014. Tomado de: (*MinAgricultura, 2017*). Cálculos propios.

Por otro lado, en la figura 1-6 se observa que todos los departamentos del país participaron en la producción de panela durante el periodo 2010 a 2014. Más del 68% de la producción se hace en los departamentos de Santander, Cundinamarca, Boyacá, Antioquia y Nariño, mientras que a lo largo del oriente colombiano se encuentran las menores producciones (*MinAgricultura, 2017*). En los departamentos de mayor producción les favorecen las condiciones climáticas, la materia prima, los trapiches y razones culturales, así como el conocimiento de los procesos durante la elaboración (*Superintendencia de Industria y Comercio, 2012*).

En Colombia los centros de producción son llamados tradicionalmente trapiches. Existen registrados en el INVIMA cerca de 22,000 unidades, distribuidos en 175 municipios. De estos, el 5% son de gran escala, con producciones de 300 kg/hora y extensiones de caña mayores a 50 hectáreas. Se ubican predominantemente en el Valle del Cauca y Risaralda. Los centros de producción de escala mediana tienen capacidades entre 100 y

300 kg/hora, con extensiones entre 20 a 50 ha. Se ubican en departamentos como Boyacá, Santander y Nariño, y algunos municipios de Antioquia (*Fedepanela, 2015; MinAgricultura, 2017*).

Por otro lado, los centros de pequeña escala son los más representativos en la agroindustria panelera con capacidades de producción entre 100 y 150 kg/hora. Finalmente, las unidades tipo microfundio con producciones menores a 50 kg/hora, procesan la caña en trapiches familiares o vecinales con molinos de tracción animal o por pequeños motores, siendo los más vulnerables para afrontar la competitividad de la cadena productiva (*Fedepanela, 2015*).

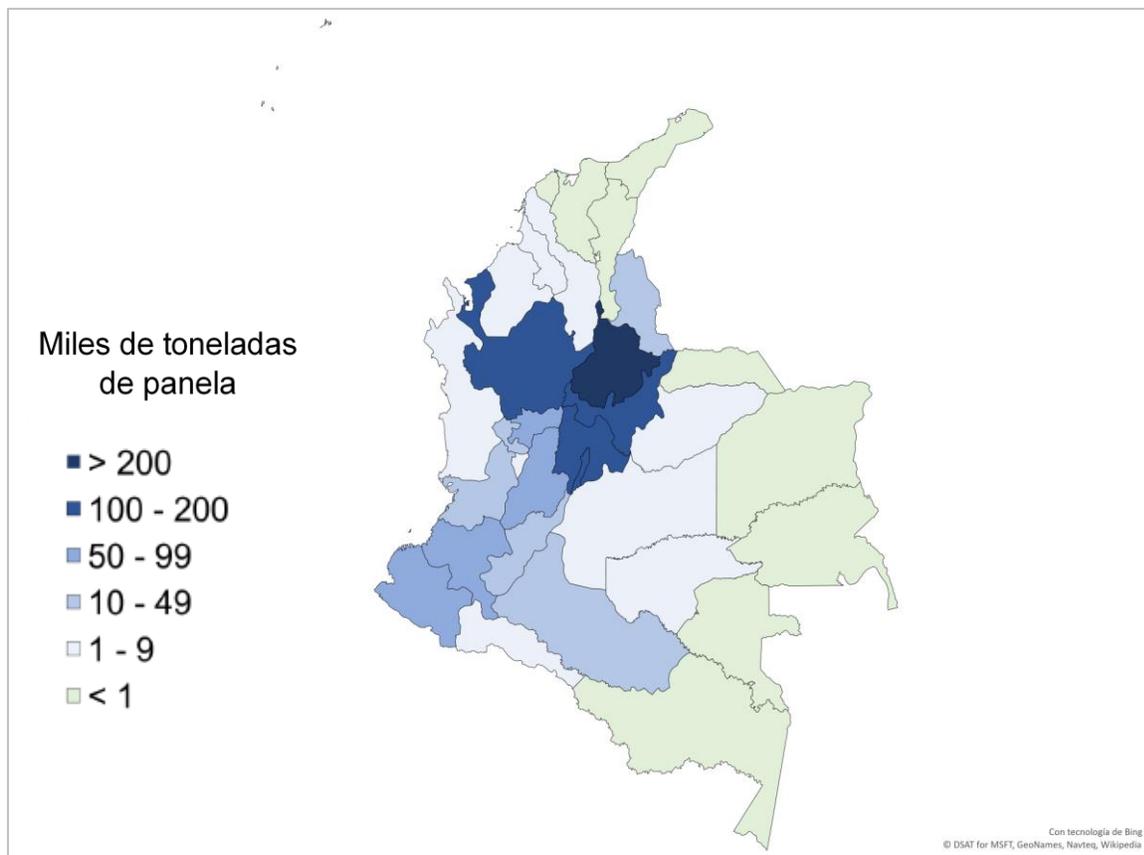


Figura 1-6 Producción promedio de panela en Colombia entre 2010 y 2014. Tomado de: (*MinAgricultura, 2017*). Cálculos propios.

▪ Exportaciones colombianas de panela

El consumo anual per cápita de panela en Colombia es de 31 kg, hasta tres veces más que en otros países, convirtiéndose en el principal consumidor mundial de panela (Velásquez, Hector; Chejne, Janna; Agudelo, 2011). Por lo anterior, la producción nacional responde a la demanda local con baja participación en el contexto internacional. Sin embargo, en los últimos años las exportaciones han aumentado, principalmente en dos presentaciones: panela sólida (barras, bloques, redonda) y panela granulada (polvo, cubos) (DANE, 2017).

En la figura 1-7 se muestran las exportaciones de panela hechas por Colombia tanto en cantidad (toneladas) como en millones de dólares USD en el periodo 2012 a 2015. Los datos mostrados fueron entregados directamente por Fedepanela (Procolombia, 2017). Las exportaciones colombianas registraron un crecimiento del 81,25%, desde el 2012 al 2015, lo cual indica un buen panorama de este producto en el exterior ya que en años anteriores las exportaciones tenían tendencia estable (Jaffé, 2012a). Colombia ha exportado a 26 países desde 2007, siendo los principales Estados Unidos (60%), España (11%), Corea del Sur (8%), Reino Unido (5%), Canadá (5%), Australia (4%), Argentina (4%), Alemania (2%), entre otros (Jaffé, 2012a; Procolombia, 2017).

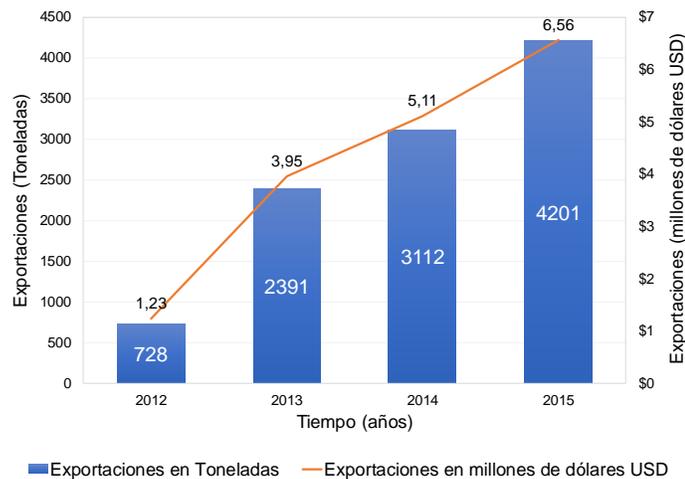


Figura 1-7 Exportaciones colombianas en toneladas y millones de dólares durante 2012 y 2015. Tomado de: (Procolombia, 2017)

La venta de panela en el exterior se realiza como sustituto y versión integral del azúcar refinado. Se caracteriza por ser un producto orgánico, sin adición de edulcorantes y con

sellos como FairTrade y USDA Organic (Sin GMO, ni productos químicos nocivos). Fedepanela y entidades del estado colombiano han promovido la ampliación de las exportaciones y medidas para la entrada de panela con cero aranceles en países como Estados Unidos, Canadá y la Unión Europea (*Guerrero Useda & Escobar Guzmán, 2015*). Es de aclarar que hay 32 mipymes exportadoras (19 microempresas y 13 pequeñas y medianas empresas), que empacan la panela en presentaciones de bolsas o cajas de 500g y 1kg. De estas empresas el 94% se ubican en Bogotá, Valle del Cauca, Risaralda y Santander (*Procolombia, 2017*).

Además de usar la panela como endulzante, existen otros usos en otros campos industriales. La industria cosmética usa como ingrediente, extractos derivados de caña de azúcar, para elaborar biocosméticos, tales como cremas exfoliantes o tratamientos para la piel y el cabello. Otra tendencia de uso, son los jarabes de miel de caña como insumo alimenticio o aditivo culinario ya sea natural o con saborizantes. Este es un mercado competitivo ya que existen jarbes de varias plantas como el agave, maple y arce. Los principales comercializadores de jarabe de miel de caña son Italia, India, China y Brasil (*Castellanos et al., 2010*).

Por otro lado, el bagazo se ha usado para la fabricación de aglomerados, pellets, empaques funcionales, papel y compostaje, principalmente en China y Tailandia. Adicionalmente, China y Estados Unidos obtienen alcoholes alifáticos como policosanol y octocosanol de la cachaza que se extrae en la etapa de clarificación, para fines farmacéuticos. Colombia no extrae este tipo de subproductos, pues estos residuos industriales los usa como combustible o alimento para animales (*Castellanos et al., 2010*).

1.3. Proceso de producción

Tradicionalmente, el proceso de producción de panela se realiza en trapiches, en donde los humos calientes producto de la combustión del bagazo en hornillas subterráneas, calienta las pailas favoreciendo el proceso (*Osorio, 2007*). Sin embargo, en los últimos años, el sector ha tenido transiciones a nivel tecnológico y, actualmente, algunos trapiches usan la combustión del bagazo en calderas para obtener vapor de agua, favoreciendo la eficiencia energética del proceso (*Castellanos et al., 2009; SENA, 2014*).

Así, se encuentran la tecnología tradicional de hornilla (aire caliente) y la tecnología de evaporadores con medio de calentamiento vapor.

El proceso de producción de panela se muestra en la figura 1-8, donde la etapa de combustión hace referencia a los procesos explicados anteriormente. El proceso inicia con una operación de apronte, es decir, la recolección y transporte de la caña hacia el trapiche. Una vez allí, se extraen los jugos de caña por medio de molinos de tres mazas. Los jugos se llevan a una pre-limpieza que se basa en hacer decantar o flotar impurezas como tierra, lodo, arena, hojas y bagacillo. Esta etapa, se realiza en un pre-limpiador diseñado por el Centro de Investigación para el Mejoramiento de Panela - CIMPA (Osorio, 2007).

En las etapas de clarificación y encalado se retiran impurezas remanentes o cachaza a temperatura mayor a 50°C. La corteza de guásimo, balso o cadillo (según la región colombiana) se macera y se mezcla con agua dejando formar un mucílago, que actúa como coagulante y separa la cachaza de los jugos. Enseguida, se agrega lechada de cal para regular la acidez, consiguiendo un pH cercano a 5,8, para evitar el incremento en la concentración de azúcares reductores y que el producto final sea un sólido blando, denominado panela melcochuda (Osorio, 2007). Una buena limpieza de los jugos permite mejorar la calidad de la miel y la panela, debido a que se reduce el contenido de sólidos, mejorando el color y la presentación (Prada, 2002).

Los jugos extraídos tienen una concentración de sólidos solubles totales (SST) entre 18 y 20°Brix. Por medio de la evaporación y concentración se consigue una concentración entre 92 y 96°Brix (Prada & Chaves, 2015) en el producto final. Durante la evaporación, se obtienen mieles como producto intermedio. Su concentración depende de la experiencia del personal; sin embargo, se estima entre 50 a 70°Brix (García, Peña, López, Duran, & Olvera, 2010). Enseguida, la etapa de concentración se realiza a temperaturas mayores a 100°C, en presencia de grasas y aceites vegetales grado alimenticio, que actúan como agentes antiespumantes (Ministerio de la Protección Social, 2006) y para evitar que las mieles se adhieran a las paredes y se quemen (García, Albarracín, Toscano, Santana, & Insuasty, 2007).

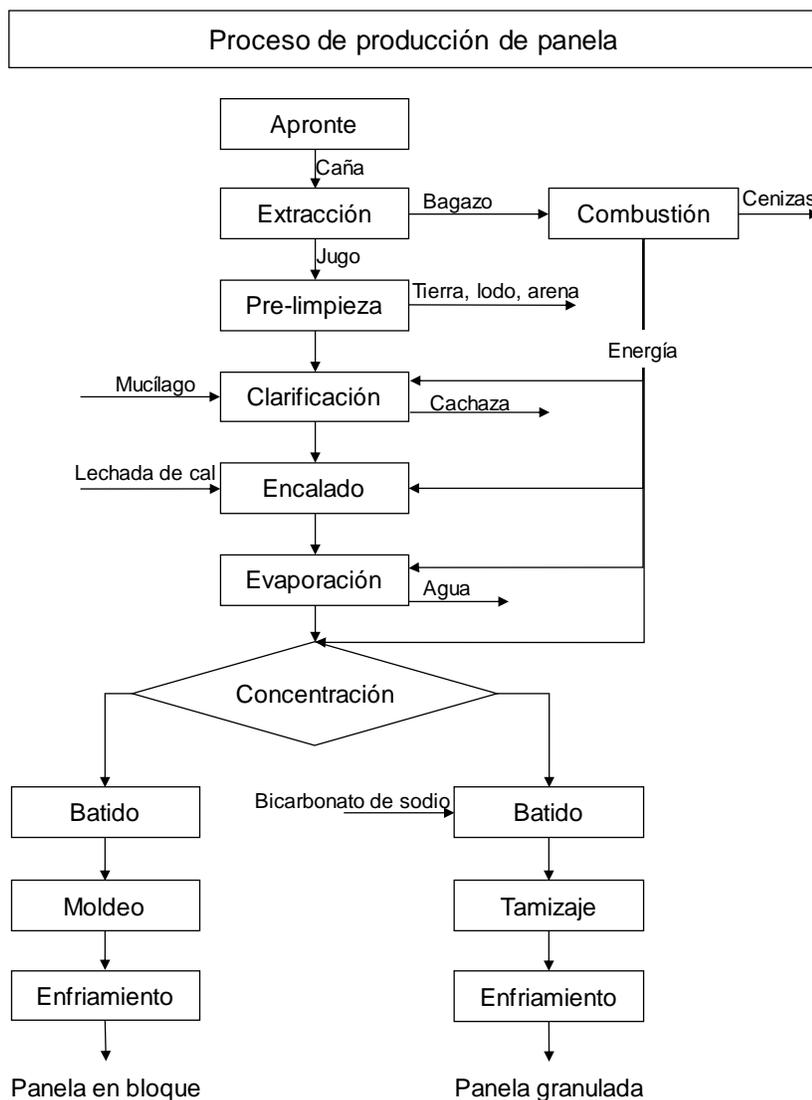


Figura 1-8 Proceso de producción de panela en bloque y granulada.

Después de la etapa de concentración, el proceso se divide en obtención de panela en bloque o granulada. Para obtener panela en bloque, se realiza un leve batido para enfriar y permitir que pierda la capacidad adherente, obteniendo la textura para el moldeo (García et al., 2007). Luego, se dispone en gaveras, que son moldes en madera con la forma final, permitiendo el enfriamiento hasta temperatura ambiente. Esta es una etapa importante para evitar problemas posteriores de humedad y microbiológicos (Osorio, 2007).

Por otro lado, para obtener panela granulada, se bate hasta granular (*García et al., 2007*), algunas veces agregando bicarbonato de sodio, luego se deja reposar, se tamiza y se permite el enfriamiento y finalmente se empaca. Estas últimas etapas se realizan en una zona aislada de abejas, insectos e impurezas para mantener las propiedades higiénicas del producto.

1.4. Estado del arte

1.4.1. Estado del arte en jugos y mieles de caña panela

Dentro de las tendencias de consumo actuales, se destacan los productos menos procesados y más saludables. La panela se encuentra dentro de estas nuevas tendencias como un producto promisorio (*Jaffé, 2012a*). Aprovechando este auge de la panela, el interés de investigar en la eficiencia técnica de las unidades industriales ha incrementado, incluso en países en donde no hace parte de la canasta familiar (*Guerrero Useda & Escobar Guzmán, 2015*).

Las unidades industriales se caracterizan por tener bajo nivel de mecanización e ineficiencia en la producción, lo cual impone retos para la sostenibilidad y competitividad. En los últimos años, el estado colombiano ha financiado un gran número de investigaciones para evaluar alternativas de mejora en etapas unitarias clave y modelar matemáticamente procesos energéticos y exergéticos de la producción de panela. Universidades de Santander, Bogotá, Boyacá y el Valle, apoyados por CORPOICA y COLCIENCIAS, y Centros de investigación y desarrollo independientes como CIMPA y CIDEA han aportado a la eficiencia de los procesos y la diversificación de la oferta panelera con nuevos productos o presentaciones (*Castellanos et al., 2010; Guerrero Useda & Escobar Guzmán, 2015*).

Dentro de las investigaciones, se ha encontrado falta de automatización y control de procesos, lo cual genera inadecuada dosificación de insumos durante el procesamiento, como el bagazo para la combustión, el mucílago en la clarificación, la cal, entre otros. Adicionalmente, se estima un 41% de pérdidas de calor debido a la baja integración de procesos unitarios, la no captura de calor residual y gases calientes en la chimenea. Todo lo anterior conforma un problema tecnológico, de contaminación atmosférica, de

salud y seguridad de los operarios, ya que permanecen largas horas en ambientes ruidosos y a elevadas temperaturas (*Guerrero Useda & Escobar Guzmán, 2015*).

En general, la panela enfrenta retos de estandarización de procesos productivos y caracterización del producto final. En Colombia, la resolución 779 de 2006 y la Norma Técnica Colombiana NTC 1311, definen normas técnicas y requisitos sanitarios durante la producción y comercialización. Dentro de ellas, establece los requisitos fisicoquímicos de panela en bloque y granulada, mostrados en la tabla 1-3. La panela granulada tiene permitido un contenido mayor de sacarosa, azúcares reductores y cenizas, y un contenido menor de humedad con respecto al bloque (*ICONTEC, 2009; Ministerio de la Protección Social, 2006*)

Tabla 1-3 Requisitos fisicoquímicos de panela en bloque y granulada. Tomado de: (*ICONTEC, 2009*)

Requisitos	Panela en bloque		Panela granulada	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Azúcares reductores, expresados en glucosa, en %	5,5	-	5,74	-
Azúcares no reductores expresados en sacarosa, en %	-	83	-	90
Proteínas, en % (N x 6,25)	0,2	-	0,2	-
Cenizas, en %	0,8	-	1,0	-
Humedad, en %	-	9,0	-	5,0
Potasio en mg/100g	100,0	-	100,0	-
Calcio en mg/100g	10,0	-	10,0	-
Fósforo en mg/100g	5,0	-	5,0	-
Hierro en mg/100g	1,5	-	1,5	-
Colorantes	Ausencia		Ausencia	

En estos mismos documentos, se definen las mieles de caña panelera como mieles vírgenes, y se describen como un producto natural que se obtiene de la concentración del jugo clarificado (*Ministerio de la Protección Social, 2006*). Recientemente, se ha explorado el uso de estas mieles naturales o saborizadas, tanto por su facilidad de dosificación y manejo, como por sus propiedades fisicoquímicas, que dependen de las condiciones de operación (*Alarcón et al., 2016*).

Debido a la variabilidad en las propiedades de las mieles en diferentes trapiches y tipos de procesos, ha sido necesario caracterizar jugos y mieles durante su procesamiento, con el fin de permitir la estandarización y mejoramiento de los procesos, y a la vez, contribuir a la diferenciación según su origen (*Castellanos et al., 2010*). Tradicionalmente, la concentración de las mieles depende de la experiencia del personal, sin hacerse control al contenido de sólidos solubles, °Brix u otra propiedad medible. No obstante, estudios en Santander y Ecuador sobre estas mieles, las han caracterizado entre 50 y 70°Brix (*Alvarado & Naranjo, 2008; Peña, 2009*). Otros estudios se han enfocado en jugos extraídos en la molienda (*Clavijo, 2010*).

En el primer caso, el estudio de “*Caracterización reológica y térmica de miel de dos variedades de caña*” (*Alvarado & Naranjo, 2008*), se realizó el proceso de elaboración de panela a nivel laboratorio, con dos variedades de caña de azúcar *Saccharum Officinarum*. POJ 2878 y POJ 2714. Durante las etapas de evaporación y concentración se tomaron mieles de 50, 60 y 70°Brix para la caracterización de propiedades como el pH, humedad, azúcares, densidad (ρ) entre 35 y 55°C, y análisis proximal (a 70°Brix). Dentro de las propiedades reológicas se midió la viscosidad entre 45°C y 55°C. Además, se analizaron propiedades térmicas como la capacidad calorífica (cp) en un calorímetro entre 35°C y 55°C, y la conductividad térmica (k) y difusividad térmica (α) en un equipo construido con cilindros coaxiales sumergidos en un baño a 70°C (*Alvarado & Naranjo, 2008*). En la tabla 1-4 se resumen los intervalos de los valores reportados para cada parámetro medido.

En este trabajo no se encontraron diferencias significativas entre las variedades de caña para los resultados del análisis fisicoquímico, térmicos y reológicos. En cuanto a la reometría, la miel de caña panelera tiene un comportamiento newtoniano a las concentraciones y temperaturas evaluadas. Un modelo matemático fue reportado y se muestra en la tabla 1-6. Por otro lado, las propiedades de ρ , cp , k , α son influenciadas por la concentración de las mieles (*W. Naranjo, 2009*).

Tabla 1-4 Propiedades fisicoquímicas, reológicas y térmicas de mieles de caña panelera hechas a nivel laboratorio. Tomado de: (Alvarado & Naranjo, 2008)

Parámetro	Intervalo	Metodología / Equipo
pH	5,38 – 5,64	Potenciométrico
Humedad (% agua)	29 - 50	Secado en estufa 105°C
Azúcares Sacarosa (%) Fructosa (%) Glucosa (%)	62 – 64 2,2 – 2,4 2,2 - 2,4	HPLC
Densidad (kg m ⁻³)	1213 - 1357	Juego de densímetros
Análisis proximal (base seca) Elementos libres de nitrógeno (%) Ceniza (%) Extracto etéreo (%) Proteína (%) Fibra (%) Minerales	99,20 – 99,28 0,30 – 0,41 0,03 – 0,07 0,28 – 0,29 0,06 – 0,08% Ca, P, Mg, K, Na son los minerales mayoritarios. Cu, Fe, Mn menor proporción.	Laboratorio externo, no presenta información.
Viscosidad (mPa*s)	1,83 - 105	Viscosímetro Digital Brookfiel LVTD
Capacidad calorífica (kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹)	2,66 – 2,89	Calorímetro
Conductividad térmica (w m ⁻¹ °C ⁻¹)	0,387 – 0,526	Cálculo
Difusividad térmica (m ² s ⁻¹)	1,07x10 ⁻⁷ –1,48 x10 ⁻⁷	Sistema cilindros de cobre – baño maría a 70°C

Por otro lado, en el trabajo titulado “Estudio del efecto del uso de jugo de dos genotipos de caña de azúcar previamente descortezada y de la temperatura de la fuente de

calentamiento sobre el proceso en la elaboración de panela granulada” (Clavijo, 2010), se caracterizó jugo de caña, tomado en procesos de producción artesanal y producida en el laboratorio a partir de variedades de caña POJ 28-78 y POJ 27-14. Los parámetros medidos, las metodologías y resultados se muestran en la tabla 1-5.

Tabla 1-5 Propiedades de jugos de caña panelera durante el proceso en laboratorio.

Tomado de: (Clavijo, 2010).

Parámetro	Rango	Metodología / Equipo
pH	5,6 – 5,8	Potenciométrico AOAC 981.12
Sólidos solubles totales (°Brix)	18 – 20	Refractómetro digital
Color o densidad óptica (Abs)	0,776 -0,997	Método Turkmen, Espectrofotómetro (420nm)
Azúcares invertidos (mg/100ml)	162,89 - 244,51	Lane y Eynon
Minerales		
Macroelementos (mg/100ml)		
Calcio	3,08 - 8,09	Espectrofotometría de absorción atómica. *El fósforo se cuantifico por espectrofotometría.
Fósforo*	13,75 – 18,70	
Magnesio	2,61 – 3,05	
Potasio	58,74 – 103,70	
Sodio	0,08 – 0,12	
Microelementos (µg/100ml)		
Cobre	15 – 69	
Hierro	287 – 456	
Manganeso	36 – 112	
Zinc	29 - 154	

En este trabajo se reporta que el pH de los jugos depende de la variedad de caña y el área de cultivo. La actividad enzimática y microbiológica son factores de deterioro que afectan la acidez del producto, que se expresa como ácido aconítico, ya que es el ácido que se presenta en mayor proporción, hasta tres veces más que otros ácidos como el cítrico, málico, oxálico, entre otros. Además, los minerales mayoritarios fueron Ca, P, Mg, K y Na, mientras los minoritarios fueron Cu, Fe, Mn y Zn (Clavijo, 2010).

En Colombia, la investigación sobre jugos y mieles se ha desarrollado en el departamento de Santander con la variedad de caña RD, una de las más usadas en esta zona. En Cundinamarca, la variedad de caña utilizada es la POJ; en esta zona no se han reportado estudios de caracterización de jugos y mieles (Osorio, 2007). En el trabajo titulado “*Determinación de propiedades fisicoquímicas de jugos y mieles de caña panelera*” (Peña, 2009), se tomaron muestras de jugo clarificado, concentrado y mieles procesadas con la variedad de caña RD, en un trapiche del departamento de Santander. Se realizó análisis fisicoquímico de sólidos solubles totales, pH y azúcares. Además, se estudió la viscosidad, capacidad calorífica y densidad con respecto a seis niveles de concentración, entre 20 y 70°Brix, y siete niveles de temperatura divididos entre 10 a 70°C.

Los azúcares totales se analizaron por el método Lane y Eynon, y la sacarosa por polarimetría. La viscosidad se analizó en viscosímetros rotacionales de cilindros concéntricos HAAKE. La capacidad calorífica por Calorimetría Diferencial de Barrido (Differential Scanning Calorimetry, DSC) en el intervalo de 5 a 60°C y la densidad se determinó por gravimetría, usando picnómetros. Adicionalmente, este trabajo reporta modelos matemáticos de viscosidad, capacidad calorífica y densidad con respecto a temperatura y sólidos solubles totales, los cuales se reportan en la tabla 1-6.

Tabla 1-6 Modelos matemáticos reportados de mieles de caña panelera. Tomado de:
(Alvarado & Naranjo, 2008; Peña, 2009).

Parámetro	Modelo matemático
Viscosidad	$\ln(\mu) = -31,1343 + \left(\frac{103,150}{T}\right)$ (1.1), donde μ es la viscosidad en mPa*s, T es la temperatura (°C). $R^2 = 0,9665$, muestras procesadas en el laboratorio entre 50 y 70°Brix; 35 y 55°C (Alvarado & Naranjo, 2008).
	$\log(\mu) = -0,218 + 0,044 * SST - 0,019 * T$ (1.2), donde μ es la viscosidad en c_p , SST son los sólidos solubles totales (°Brix), T es la temperatura (°C). $R^2 = 0,93$, muestras tomadas en un trapiche de Santander (Peña, 2009).
Capacidad calorífica	$C_p = 3,228 - 0,03 * SST + 0,226 * \ln(T)$, (1.3), donde c_p es la capacidad calorífica en $J \cdot g^{-1} \cdot C^{-1}$, SST son los sólidos solubles totales (°Brix) y T es la temperatura (°C). $R^2 = 0,94$. Según el autor los SST tienen un mayor impacto que la temperatura en esta propiedad (Peña, 2009).
Densidad	$D = 0,956 + 0,005 * SST$, [g/cm^3] (1.4), donde D es la densidad y SST son los sólidos solubles totales (°Brix). $R^2 = 0,99$. Según el autor la temperatura no tiene un efecto significativo en el modelo (Peña, 2009).

Dentro de la revisión bibliográfica, la información publicada sobre la caracterización de jugos y mieles de caña panelera es escasa. Como se mostró, en Ecuador se ha estudiado el proceso a nivel laboratorio, mientras que, en Colombia, se hizo directamente en un trapiche en Santander, el mayor productor en el país. En cuanto a las metodologías, en dos de estos casos, los azúcares fueron medidos por técnicas volumétricas y en otro por HPLC, que suele tener mejor precisión. Las propiedades térmicas no se encuentran estudiadas detalladamente. Solo uno de estos estudios, midió la conductividad térmica y la difusividad térmica. No obstante, no es muy clara la temperatura a la que se reportan los datos. Usualmente, la conductividad térmica se obtiene por medio de modelos predictivos, con factores empíricos de productos específicos, lo que restringe su aplicación. Estos modelos se basan en la composición de

los alimentos y la dependencia de la temperatura en cada uno de sus constituyentes, como agua, carbohidratos, proteínas, cenizas, grasa y hielo (*Sahin & Sumnu, 2006*).

1.4.2. Estado del arte en soluciones de azúcar

El término azúcar es coloquialmente asignado a la sacarosa, sólido cristalino que se usa para endulzar alimentos y bebidas. Este compuesto es un disacárido encontrado en muchas plantas, principalmente en la caña de azúcar y la remolacha azucarera, y se valora por su pureza, que es de aproximadamente del 99,96%, y su sabor dulce, razón por la cual es estándar para los demás endulzantes (*Colonna et al., 2006*).

Dentro de las propiedades de las soluciones de azúcar, las más importantes para el estudio realizado en este proyecto se presentan a continuación:

La densidad del azúcar en solución en función de la temperatura entre 20°C y 35°C, y concentración en °Brix, entre 30 y 70°Brix, se encuentra entre 1,128 y 1,367g/ml (*Zavaleta, 2011*). Las cenizas se encuentran en el rango de 0,003 a 0,008% (*Colonna et al., 2006*).

Asimismo, las propiedades reológicas y térmicas de las soluciones de sacarosa a concentraciones entre 30 y 70 °Brix, y temperaturas de 30°C y 70°C, tienen valores para la viscosidad entre 2,4mPa*s y 214,1mPa*s (*Asadi, 2006; Mohos, 2017*), y un comportamiento newtoniano e independiente del tiempo (*Rojas-Cazares, Delgado-Reyes, & Martínez-Padilla, 2005*). La capacidad calorífica (c_p) se reporta entre 3,5 y 2,8 kJ/kg°C (*Asadi, 2006*), incrementando con el contenido de agua y con la temperatura. Así a concentraciones bajas se aproxima al valor del agua pura (*Darros-Barbosa, Balaban, & Teixeira, 2003*). Finalmente, la conductividad térmica se encuentra entre 0,514 y 0,449 W/mK, para concentraciones entre 30 y 60°Brix y temperaturas de 30°C y 70°C (*Mohos, 2017*).

Por otro lado, los compuestos fenólicos totales del azúcar y panela se han determinado por la metodología de Folin-Ciocalteu, reportando valores para el azúcar de 0,004 mg equivalentes de ácido gálico (GAE)/g, los cuales son menores a los fenoles totales de la panela que se encuentran entre el rango de 1,02 – 2,50 mgGAE/g, esta variación debida a diferentes tipos de panela como bloque oscura, clara y granulada (*Segui et al., 2015*).

En cuanto a los flavonoides totales, el azúcar blanca tiene 0,022 mg equivalente de Quercetina (QE)/g, mientras que la panela tiene entre 1,59 y 3,78 mgQE/g. Este parámetro se midió por método colorimétrico de cloruro de aluminio (Segui et al., 2015).

Adicionalmente, se han realizado extracciones de fenoles en azúcar y panela, encontrando diferentes ácidos fenólicos. En el azúcar sólo se han encontrado trazas de ácido gálico y gentísico, mientras que en la panela se han reportado 122µg/g de ácido gálico, 60 µg/g de ácido protocatequico, 130 µg/g de ácido gentísico, 29,5 µg/g de ácido 4-hidroxifenilacetico, 25,6 µg/g de ácido vainillico, 0,75 µg/g de ácido siríngico, 13,0 µg/g de ácido p-cumárico y 34 µg/g de ácido ferúlico (*Harish Nayaka et al., 2009*). Finalmente, se ha reportado que los compuestos fenólicos imparten tanto color como sabor a los endulzantes, sin embargo, su remoción está asociada al proceso de manufactura, razón por la cual el azúcar tiene valores bajos. Además del aporte de color que le dan los fenoles a la panela, la presencia de productos de la reacción de Maillard y la hidrolisis de la sacarosa, formados durante la elaboración, influyen también en el color y el aroma (*Colonna et al., 2006; Harish Nayaka et al., 2009*).

2. Formulación del problema

La panela se considera un endulzante natural y saludable por su carácter nutricional y funcional (Jaffé, 2015). Por esta razón, se convierte en un producto adecuado dentro de las tendencias de consumo (Guerrero Useda & Escobar Guzmán, 2015), caracterizado por una demanda creciente de productos orgánicos para sustituir aquellos que usan químicos en el proceso de elaboración (Castellanos et al., 2009).

En Colombia, la panela es uno de los productos promisorios de exportación. Sin embargo, se presentan dificultades para generar un producto que cumpla con las especificaciones de calidad necesarias para su exportación (tabla 1-3), lo cual disminuye la competitividad en el mercado (Castellanos et al., 2010). Más del 90% de las unidades productoras tienen una producción menor a los 100 kg/h de panela y no cuentan con capacidad económica para adoptar buenas prácticas de manufactura, lo cual retrasa el posicionamiento de la cadena y su competitividad (Castellanos et al., 2009).

El proceso de elaboración se basa en el conocimiento empírico, el cual permite a los operarios identificar el inicio o el final de una etapa de operación. Como consecuencia de lo anterior, y de la baja tecnificación de los trapiches, no se llevan controles de calidad durante el proceso, generando problemas de calidad (Castellanos et al., 2009). Además, se presenta alta variabilidad de las propiedades físicas y químicas entre marcas comerciales de panela (Guerra & Mujica, 2010), lo que lleva a tener una competitividad débil frente a otros endulzantes (Guerrero Useda & Escobar Guzmán, 2015).

Adicionalmente, los sistemas de calentamiento tradicionales de hornilla se caracterizan por tener bajo nivel de mecanización y eficiencia energética, lo cual se refleja en el incremento de riesgos operacionales, ambientales y de mercado (Guerrero Useda & Escobar Guzmán, 2015). Últimamente, se están implementando trapiches a vapor para tecnificar el proceso, por lo que es de interés identificar si existen diferencias en las

propiedades de los jugos y mieles, cuando se tienen diferentes tecnologías de calentamiento, pues los tiempos de producción disminuyen con evaporadores y por ende las características del producto cambian (*Ordoñez, Hernández, & Pedraza, 2012*). Igualmente, la caracterización del producto a través de las etapas de procesamiento, da paso a la estandarización del proceso (*Guerra & Mujica, 2010*), identificación de puntos críticos y desarrollo de tecnologías con miras a reducir los riesgos actuales.

Por otro lado, en cuanto a nuevas presentaciones de panela, los productores han enfocado sus esfuerzos en la generación de valor agregado, es así como la panela granulada es una realidad en el mercado, con un mayor potencial de consumo que la panela en bloque, debido a su fácil dosificación (*L. M. Palacios, 2012*). Durante su obtención (ver sección 1.3) se incluyen las etapas de batido y tamizado manual, incrementando los tiempos de producción y la necesidad de personal capacitado. Esto ha generado que se realicen investigaciones en equipos, procesos y control de variables, con el fin de mejorar el rendimiento e incrementar volúmenes de producción (*Castellanos et al., 2010*).

Otro producto es la panela pulverizada, que se obtiene por secado por aspersion. Este proceso es muy usado en la industria agroalimentaria, en productos como lychee, sandia, naranja, mango, tomate, entre otros (*Rezaul, Shishir, & Chen, 2017*). Su aplicación en el sector panelero se ha estudiado, concluyendo que es una tecnología viable (*Cortes, Ciro, Rodríguez, & Largo, 2012; L. Palacios, Orjuela, Narváez, César, & Osorio, 2016*). Sin embargo, esta tecnología tiene desventajas como productos con alta pegajosidad, inestabilidad, higroscopicidad, colores más claros, y suele ser de difícil manejo y manipulación. Por esta razón, se ha optado por agregar agentes encapsulantes como maltodextrina a los jugos concentrados (*Cortes et al., 2012*), adquiriendo propiedades organolépticas que disminuyen su aceptación (*L. Palacios et al., 2016*). Por lo anterior para obtener un pulverizado a través de secado por aspersion, es necesario conocer las propiedades de los jugos y mieles, con el fin de generar conocimiento científico que permitan el desarrollo de esta tecnología con y sin aditivos.

Generar información sobre las muestras incluye una etapa previa de estandarización de metodologías de análisis, ya que para panela la normatividad es escasa. Esta etapa

incluye documentar un protocolo de análisis basado en normas de alimentos (como AOAC, ASTM, NTC, entre otras) con características similares o productos de caña de azúcar. La información específica generada y modelos matemáticos que describan el comportamiento de las propiedades de jugos y mieles, permitirían conocer el proceso con mayor profundidad. Esto se traduciría en una herramienta que permite ajustar condiciones de operación durante el procesamiento para cumplir especificaciones de calidad del producto. Igualmente, los resultados obtenidos sirven como base para desarrollar nuevos productos y tecnologías, y mejorar investigaciones en donde no se contaban con las propiedades (*Ordoñez et al., 2012*). En el largo plazo, esto permitirá ampliar el portafolio de productos y fortalecer la competitividad en el mercado nacional e internacional.

En consecuencia, el objetivo de este proyecto es estandarizar y determinar las propiedades fisicoquímicas, reológicas y térmicas de jugos y mieles de caña panelera en función de la tecnología de calentamiento, temperatura y concentración. Por otra parte, se realizará la caracterización cromática y el perfil de compuestos fenólicos, necesaria para identificar diferencias del producto según el proceso de obtención, tal y como ya se ha identificado en la tesis doctoral: “Secado por aspersion de mieles de caña como base para la obtención de productos instantáneos de panela”. En donde se han hecho ensayos sin agentes encapsulantes y se ha encontrado que el polvo tiene tamaño de partícula más pequeño y color más claro que la panela granulada tradicional y en bloque.

2.1. Objetivos

Objetivo general

Determinar las propiedades fisicoquímicas, reológicas y térmicas de jugos y mieles provenientes de dos trapiches con tecnologías de calentamiento por hornilla y evaporadores abiertos.

Objetivos específicos

- Estandarizar los métodos de análisis fisicoquímicos, reológicos y térmicos para jugos y mieles de caña panelera.
- Determinar las propiedades fisicoquímicas de jugos y mieles en función de sólidos solubles y temperatura durante el proceso de producción.
- Evaluar el comportamiento de los azúcares sacarosa, glucosa y fructosa, durante el proceso de producción.
- Determinar las propiedades reológicas y térmicas de jugos y mieles en función de sólidos solubles y temperatura durante el proceso de producción.
- Establecer modelos matemáticos que permitan relacionar las propiedades reológicas y térmicas en función de sólidos solubles y temperatura.
- Determinar las diferencias de color en dilución y compuestos fenólicos entre panela granulada tradicional, panela en bloque, panela obtenida por secado por aspersión y mieles de caña panelera.

2.2. Metodología general

Para cumplir con los objetivos de este proyecto se tomaron muestras de trapiches con dos tecnologías de calentamiento, hornilla y evaporadores abiertos. Se seleccionaron trapiches que cumplieran con buenas prácticas de manufactura, estos fueron el trapiche Dulce Ventorrillo que tiene tecnología de hornilla y el trapiche panelero del SENA con tecnología de evaporadores abiertos. Ambos trapiches se ubican en la zona panelera del departamento de Cundinamarca, Colombia.

Para la toma de muestras se hizo seguimiento a dos lotes de producción de cada trapiche y se tomaron cinco muestras durante la etapa de concentración de la siguiente manera: dos muestras aleatorias de jugos a 30 y 40°Brix, en este punto los jugos se

encuentran clarificados y con el pH regulado lo cual favorece el almacenamiento de los jugos por más tiempo, y tres muestras aleatorias de mieles a 50, 60 y 70°Brix.

Teniendo en cuenta lo anterior, se desarrolló el proyecto en las siguientes fases:

- Búsqueda de información

Se hizo una revisión bibliográfica de las propiedades a medir en mieles de caña, mieles de abeja, productos con alta concentración de azúcares y soluciones de sacarosa.

- Medición de las propiedades fisicoquímicas y del perfil de azúcares

Las propiedades fisicoquímicas que se midieron en los jugos y mieles de caña panelera fueron sólidos solubles totales, pH, acidez, humedad, cenizas y densidad. La densidad de las muestras se realizó a temperaturas de 20, 25, 30 y 35°C, debido a las condiciones de trabajo del equipo. En cuanto al perfil de azúcares se midió la concentración de sacarosa, glucosa y fructosa, que son los carbohidratos principales en la caña de azúcar. Adicionalmente, se realizó un análisis proximal de las mieles a 70°Brix, que consistió en proteína, grasa, carbohidratos, contenido calórico y minerales de Na, K, Ca, Mg, Fe, Cu y Zn.

- Medición de las propiedades reológicas y térmicas

La propiedad reológica que se midió fue la viscosidad y las térmicas fueron capacidad calorífica, conductividad térmica y difusividad térmica. Estas propiedades se determinaron a temperaturas entre 35, 45, 55, 65 y 75°C. Se definieron estas temperaturas ya que a partir de 35°C se clarifican y encalan los jugos, es decir, la etapa en donde se inicia el muestreo. Por otro lado, la temperatura de 75°C es la más alta debido a que a mayor temperatura las muestras concentradas comienzan a cristalizarse y no permiten una buena caracterización por la presencia de dos fases.

- Medición del color en dilución y perfil fenólico

Para esta fase del proyecto se tomaron muestras de panela granulada tradicional elaboradas en el trapiche del SENA, panela pulverizada obtenida por secado por

aspersión a partir de mieles de 50 y 70°Brix, tomadas previamente en el trapiche del SENA (del mismo lote de la panela granulada), y panela en bloque comercial marca *el mensaje*, proveniente de Cundinamarca. Las muestras granuladas se separaron por tamaño de partícula y se midieron: fenoles totales, flavonoides totales, el perfil de compuestos fenólicos, color en dilución y el perfil de azúcares, sacarosa, glucosa y fructosa.

3. Caracterización fisicoquímica y perfil de azúcares

En este capítulo se presentan los resultados de la caracterización fisicoquímica y del perfil de azúcares de los jugos y mieles durante el proceso de producción de panela. Las muestras fueron tomadas en dos trapiches con tecnologías de calentamiento diferentes, y a la salida de diferentes etapas del proceso, lo que permitió identificar la variación de las propiedades evaluadas en función de la concentración y si hay diferencia al modificar el proceso de producción. Adicionalmente, se presenta el análisis proximal de mieles de 70°Brix recogidas en ambos trapiches, así como la discusión de los resultados obtenidos.

3.1. Materiales y métodos

El proyecto de investigación se desarrolló con muestras tomadas en el trapiche panelero del Servicio Nacional de Aprendizaje – SENA y en el trapiche Dulce Ventorrillo, ubicados en Nimaima y Nocaima, respectivamente, en el departamento de Cundinamarca, Colombia (figura 3-1). Se decidió realizar el estudio en este departamento debido a que Cundinamarca es el segundo productor de caña panelera en el país¹ (ICA, 2011).

El trapiche del SENA opera al servicio de la sociedad. Allí, los productores llevan caña, generalmente variedad POJ y la procesan con ayuda de operarios del SENA. Esta unidad de producción trabaja con evaporadores abiertos con medio de calentamiento vapor de agua. Por otro lado, el trapiche Dulce Ventorrillo (DV) procesa caña de azúcar variedad POJ proveniente de cultivos propiedad de los dueños del trapiche. Este es un trapiche tradicional con hornilla en donde el calentamiento se realiza con los humos de combustión. En la figura 3-2 se muestran las unidades de producción estudiadas.

¹ Información de los años 2015 y 2016 reportada por FEDEPANELA vía e-mail

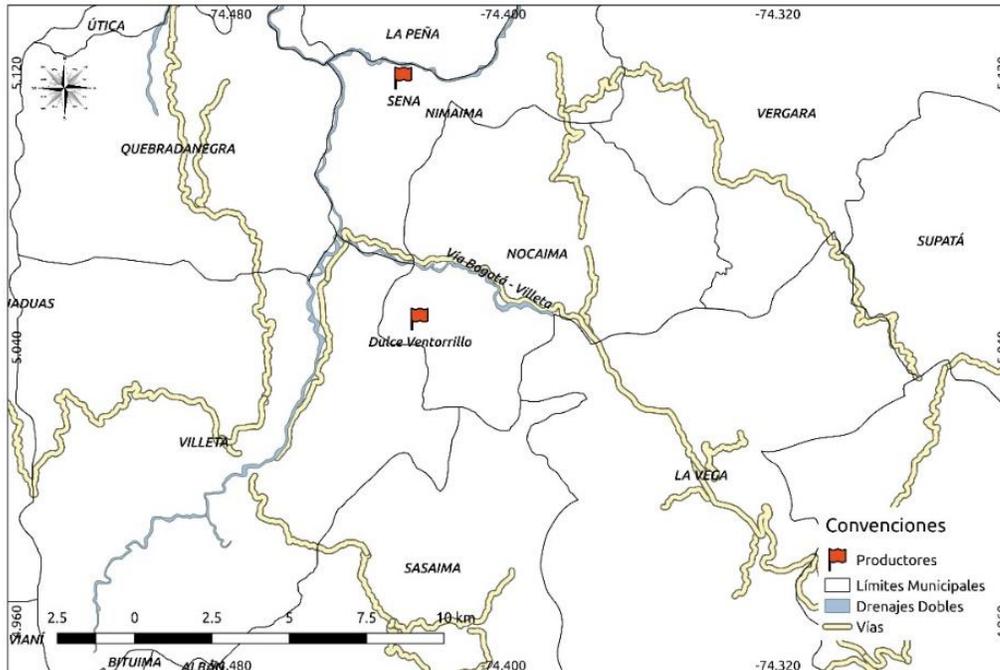


Figura 3-1 Ubicación de los trapiches en los municipios de Nimaíma (SENA) y Nocaíma (Dulce ventorrillo)



Figura 3-2 Trapiches donde se realizó el muestreo. A la izquierda, el trapiche del SENA (tecnología de evaporadores abiertos) y a la derecha el trapiche DV (tecnología de hornilla).

En la figura 3-3 se muestra el esquema del proceso de producción de ambos trapiches. La recolección de muestras en el trapiche DV se efectuó en el mes de septiembre de 2016 y el del SENA en enero de 2017. El muestreo se realizó en dos lotes de producción de panela granulada, tomando cinco muestras aleatorias en las etapas de concentración. Las muestras consistieron en dos jugos durante la concentración 1, a los tiempos, presentados en la tabla 3-1. Además, se colectaron tres mieles de caña panelera durante la concentración 2, a los tiempos presentados en la tabla 3-1. En conclusión, se tomaron cinco muestras de cada trapiche, en dos lotes de producción, para un total de 20 muestras, tomadas por duplicado.



Figura 3-3 Proceso de producción de panela granulada y puntos de muestreo de ambos trapiches

Tabla 3-1 Descripción de los puntos de muestreo en donde se tomaron las muestras de cada trapiche

Punto de muestreo	Tiempo a partir del inicio de la etapa (minutos) SENA	Tiempo a partir del inicio de la etapa (minutos) DV	Descripción de la muestra	Nomenclatura
Concentración 1	10	13	Jugos 1	J1
Concentración 1	15	20	Jugos 2	J2
Concentración 2	5	8	Mieles 1	M1
Concentración 2	10	15	Mieles 2	M2
Concentración 2	15	22	Mieles 3	M3

3.1.1. Sólidos solubles totales

Los sólidos solubles totales (SST), expresados como °Brix, se midieron siguiendo la metodología de la norma AOAC 932.14, 2012. La muestra se llevó a 20°C, se homogeneizó y los °Brix se midieron en un refractómetro digital ATAGO RX-5000 (Tokio,

Japón). Debido a la presencia de carbohidratos diferentes a la sacarosa, los sólidos solubles expresados como sacarosa o °Brix, se supusieron iguales al total de los sólidos solubles contenidos en las muestras (*Prada Forero, García Bernal, & Chaves Guerrero, 2015*). La determinación de sólidos solubles totales se realizó por triplicado (ver tabla 3-2)

3.1.2. Contenido de humedad

El contenido de humedad se midió por el método gravimétrico, siguiendo la norma AOAC 925.45, 2012, con algunas modificaciones. En una caja Petri de 5cm de diámetro se agregaron 4g de arena de cuarzo (*Merk, Darmstadt*). Sobre la arena se pesaron 2g de muestra y se llevó a un horno directo de circulación forzada LabTech Daihan (*Korea*). La temperatura de secado fue $85\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ y la muestra se secó por 24 horas. Posteriormente, se enfrió en un desecador y se pesó, se repitió el proceso de calentamiento por 2 horas hasta obtener peso constante. La diferencia de peso se registró como pérdida de agua y se expresó como % humedad, de acuerdo con la ecuación 3.1. Las muestras se analizaron por triplicado (ver tablas 3-3 y A-1).

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{\text{Peso muestra húmeda (g)} - \text{Peso muestra seca (g)}}{\text{Peso muestra húmeda (g)}} * 100 \quad (3.1)$$

3.1.3. pH

El pH de las muestras se determinó siguiendo la norma AOAC 981.12, 2012. Se tomó una muestra de 50ml, previamente aclimatada a 20°C , y se midió en el pH-metro Mettler Toledo MPC227 (*Greifensee, Suiza*). La determinación de pH se realizó por triplicado y se reportó como unidades de pH (ver tablas 3-3 y A-1).

3.1.4. Acidez

La acidez se midió potenciométricamente, siguiendo la norma AOAC 962.19, 1977. Se tomaron 10g de muestra homogeneizada previamente, y se disolvieron en 75ml de agua libre de CO_2 . La mezcla se agitó con un agitador magnético a 400rpm, y se registró el pH inicial. Enseguida, se tituló con NaOH 0,05M (*Merck, Darmstadt*) a una velocidad de 5 mL/min, hasta que el pH fue 8.3, que es el punto de viraje de la fenolftaleína. Se realizaron tres repeticiones por muestra y los resultados se expresaron en meq de ácido aconítico / g de muestra en base seca (ver tablas 3-3 y A-1). El ácido aconítico es el

ácido de mayor cantidad en la caña por lo que la acidez suele expresarse de esta forma (Jaffé, 2015). La ecuación 3.2 describe los cálculos realizados.

$$Acidez \left(\frac{mg \text{ ácido aconítico}}{100 g \text{ muestra en base seca}} \right) = \frac{N * V * Eq - p}{P * C} * 100 \quad (3.2) \text{ (Nielsen, 2014)}$$

Donde N: Normalidad del NaOH (mEq/ml), V: Volumen de NaOH gastado en la titulación (ml), Eq-p: Peso equivalente del ácido predominante (mg/mEq) = 58.03 para el ácido aconítico (Chen, 1991), p: Peso de la muestra (g), C: Contenido de sólidos (°Brix).

3.1.5. Contenido de cenizas

El contenido de cenizas se determinó por método gravimétrico siguiendo la norma AOAC 900.02, 2012. En una cápsula de porcelana se agregaron 1,5g de muestra, que se precalcinaron en una placa de calentamiento. Enseguida se calcinó en una mufla *Lindberg (Watertown, WI, USA)* a 525°C durante 5 horas. Posteriormente, las cápsulas se dejaron enfriar en un desecador y se pesaron. La diferencia de pesos se registró como cenizas y se expresó como g de cenizas/100g muestra en base seca, como se muestra en la ecuación 3.3. La determinación de cenizas se realizó por triplicado (ver tablas 3-3 y A-1).

$$Cenizas \left(\frac{g \text{ Cenizas}}{100g \text{ muestra en base seca}} \right) = \frac{\text{Peso final (g)} - \text{Peso capsula (g)}}{\text{Peso muestra (g)} * C} * 100 \quad (3.3)$$

Donde, C: Concentración de los sólidos (°Brix)

3.1.6. Densidad

La densidad se midió en el densímetro digital *Mettler Digital Density Meter - DMA 45 (Graz, Austria)*. Las muestras, homogeneizadas previamente, se insertaron con ayuda de una jeringa en los tubos capilares del equipo. Se permitió la estabilización y se registró el resultado. Las temperaturas para el estudio fueron 20, 25, 30 y 35°C, y se controlaron con un baño termostataado conectado al densímetro. Las temperaturas de medición fueron definidas de acuerdo con los límites de trabajo del equipo. Este proceso fue realizado por cuadruplicado y los resultados se expresaron en g/mL (ver tabla 3-4 y A-2).

3.1.7. Perfil de azúcares

El perfil de azúcares de jugos y mieles de caña panelera se determinó por cromatografía líquida de alta precisión - HPLC, utilizando un cromatógrafo Thermo Dionex Ultimate 3000 (*Sunnyvale, CA*) equipado con un detector de índice de refracción (IR). La columna utilizada fue *Waters Sugar Pak 300 (Milford, MA, USA)*, y la fase móvil fue agua desionizada, filtrada a través de una membrana de 0,45µm de poro (*Millipore Corp., Billerica, MA, USA*) y desgasificada. Las condiciones de operación fueron: 80°C, flujo 0,5 mL/min, volumen de inyección de 20µL y tiempo de análisis de 15 minutos.

El tratamiento de las muestras se adaptó de *Asikin et al., 2014*. Se tomaron 300mg de muestra y se disolvieron en 10ml de agua destilada. Luego se filtró a través de una membrana de 0,45µm de poro (*Millipore Corp., Billerica, MA, USA*). La cuantificación de azúcares se realizó por medio de la calibración de estándares de sacarosa, glucosa y fructosa grado HPLC Sigma-Aldrich (*Madrid, España*). Se prepararon soluciones de 0,5g/10ml de sacarosa, glucosa y fructosa para identificar el tiempo de retención de cada azúcar. Luego, se preparó una mezcla patrón de 60 mg/ml de sacarosa, 4 mg/ml de glucosa y 10 mg/ml de fructosa. Esta mezcla se diluyó para obtener siete patrones de la curva de calibración, el intervalo de concentración de sacarosa fue entre 60 – 2,4 mg/ml, glucosa entre 4 – 0,16 mg/ml y fructosa entre 10 – 0,4 mg/ml. Las curvas de calibración tuvieron un coeficiente de correlación lineal (R^2) mayor a 0,99 y se muestran en el anexo C.

Los picos de los cromatogramas de las muestras fueron identificados por los tiempos de retención de las soluciones patrón. La cuantificación de los azúcares se realizó por medio de la calibración de las soluciones patrón de cada azúcar. El contenido de azúcar en las muestras se expresó en g/100g de muestra en base seca. Las muestras se analizaron por cuadruplicado (ver tabla 3-5 y A-5).

3.1.8. Análisis proximal

El análisis proximal consistió en la determinación de proteína por el método de Kjeldahl, grasa por extracción Soxhlet, minerales por espectroscopía de absorción atómica y cálculo de carbohidratos y contenido calórico, de mieles de 70°Brix. La determinación de minerales se describe en el siguiente numeral. Los demás análisis se realizaron en el

laboratorio del Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos – ICTA de la Universidad Nacional de Colombia (ver tabla 3-6).

3.1.9. Contenido de minerales

El contenido de minerales de Na, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn se determinó por medio de espectroscopía de absorción atómica. Se tomaron 2 gramos de muestra y se obtuvieron cenizas blancas, siguiendo el procedimiento descrito previamente para la determinación de cenizas. Luego, se diluyeron las cenizas en 2,5ml de ácido nítrico al 65% hasta dilución completa. Enseguida, se llevaron a un matraz de 50ml y se aforó con ácido nítrico al 65%. Las muestras se leyeron en un espectrofotómetro Thermo Scientific – SOLAAR S Series AA (*Waltham, MA, Estados Unidos*), con las lámparas respectivas. El potasio se midió en un Shimadzu AA-680 spectrometer (*Kioto, Japón*). Se utilizó aire/acetileno como mezcla de oxidante/combustible para Zn, Cu, Fe, Na y K. Para Mg y Ca se utilizó la mezcla óxido nitroso/acetileno.

Las curvas de calibración se realizaron con soluciones estándar Merck (*Darmstadt, Alemania*) de cada mineral, y se muestran en el Anexo B. Los resultados de cada mineral se expresaron en mg de mineral/100g de muestra en base seca (ver tabla 3-7).

3.1.10. Análisis estadístico

Se realizó un diseño completamente al azar (DCA), para identificar diferencias dentro de un mismo muestreo, donde el tratamiento fue la concentración y las respuestas fueron todos los parámetros analizados. Para conocer las diferencias de los parámetros medidos entre los muestreos del mismo trapiche, se realizó un diseño en bloques completamente al azar, donde los bloques fueron los muestreos y los tratamientos fueron las concentraciones. Finalmente, para analizar las diferencias entre trapiches se realizó un diseño factorial en donde los factores fueron los trapiches y la concentración.

En cada uno de los casos, se realizó la prueba de Shapiro-Wilk, para conocer la distribución normal de los datos, un test de Bartlett para identificar la homocedasticidad de las varianzas, un análisis ANOVA y un test de Tukey en el caso en que se rechazará la hipótesis nula del ANOVA. Todas las pruebas estadísticas se realizaron con un valor de significancia de 0,05.

El análisis estadístico se realizó en el software R-CRAN versión 3.4.1, 2017 (the R Foundation for Statistical Computing).

3.2. Resultados y discusión

3.2.1. Propiedades fisicoquímicas

Las muestras tomadas en cada trapiche tuvieron la concentración de sólidos solubles totales (°Brix) que se muestra en la tabla 3-2. Estas tuvieron una concentración cercana a 30, 40, 50, 60 y 70°Brix. Además, no presentaron diferencias significativas de concentración entre muestreos del mismo trapiche. A manera de ejemplo se mostrarán los resultados y el tratamiento de datos de las muestras tomadas en el trapiche del SENA. Por otro lado, en el anexo A se mostrarán los resultados del trapiche DV.

Tabla 3-2 Concentración en SST de las muestras tomadas en cada trapiche

Muestra	Trapiche SENA		Trapiche Dulce Ventorrillo	
	SST (°Brix) Muestreo 1	SST (°Brix) Muestreo 2	SST (°Brix) Muestreo 1	SST (°Brix) Muestreo 2
J1	30,97±0,15	30,94±0,09	29,97±0,31	30,20±0,44
J2	38,90±0,05	38,73±0,11	40,56±0,08	40,55±0,06
M1	48,81±0,09	48,78±0,10	50,02±0,09	50,05±0,13
M2	59,87±0,33	59,31±0,45	58,15±0,59	57,72±0,36
M3	70,81±0,34	70,81±0,34	69,55±0,15	69,82±0,60

Los parámetros fisicoquímicos medidos entre ambos muestreos del trapiche del SENA cumplieron con los supuestos de las pruebas Shapiro-Wilks y Bartlett. Además, mostraron no tener diferencias significativas entre ellos, por lo que se mostrarán los resultados de las propiedades fisicoquímicas del muestreo 1, que se reportan en la tabla 3-3.

Adicionalmente, los análisis estadísticos de los resultados fisicoquímicos, dentro del muestreo 1, cumplieron con los supuestos de las pruebas Shapiro-Wilks y Bartlett en todos los parámetros. Se encontraron diferencias significativas entre las concentraciones. A continuación, se describirá cada propiedad en forma detallada.

Tabla 3-3 Propiedades fisicoquímicas de las muestras del trapiche del SENA

Muestra	Concentración (°Brix)	Humedad (%)	pH	Acidez (mg ácido aconítico/100g muestra en base seca)	Cenizas (g cenizas /100g muestra en base seca)
J1	30,97±0,15	69,42±1x10 ⁻²	6,72±3x10 ⁻²	0,79±3x10 ⁻²	0,015±1x10 ⁻⁴
J2	38,90±0,05	61,71±4 x10 ⁻²	6,59±1x10 ⁻²	0,81±2x10 ⁻²	0,015±2x10 ⁻⁴
M1	48,81±0,09	51,68±3x10 ⁻²	6,25±4x10 ⁻²	0,86±1x10 ⁻²	0,015±1x10 ⁻⁴
M2	59,87±0,33	41,00±1,1 x10 ⁻¹	6,18±2x10 ⁻²	0,92±3x10 ⁻²	0,015±1x10 ⁻⁴
M3	70,81±0,34	29,69±8 x10 ⁻²	6,08±1x10 ⁻²	1,06±3 x10 ⁻³	0,015±1x10 ⁻⁴

La humedad fue decreciendo a medida que el proceso de concentración avanzaba, lo cual se muestra en la figura 3-4. Esto se esperaba ya que se va eliminando agua tras esta etapa. La prueba Tukey distingue 5 grupos diferentes, por lo que todas las muestras presentan diferencias significativas entre ellas.

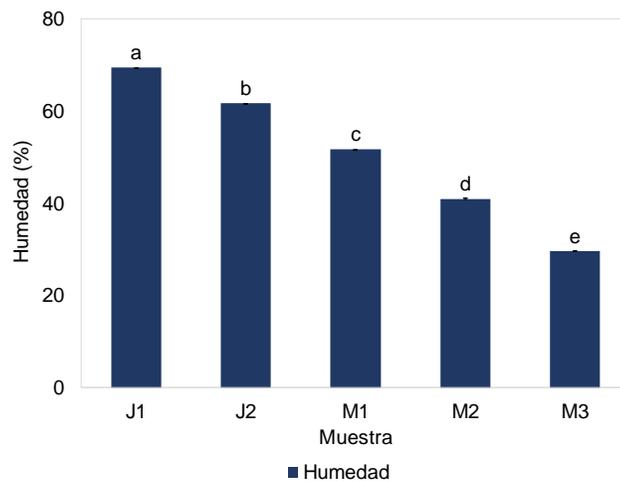


Figura 3-4 Valores de la humedad durante la etapa de evaporación del proceso de producción de panela - trapiche del SENA

El comportamiento del pH y la acidez se muestra en la figura 3-5, en donde se observa que el pH decrece levemente y como es de esperar, la acidez aumenta. Todas las muestras tienen diferencias significativas en el pH. El pH de las muestras tomadas en este trabajo es mayor al reportado en otros trabajos para los jugos y mieles de caña panelera (Alvarado & Naranjo, 2008; Clavijo, 2010; Peña, 2009). Estas diferencias pueden deberse a las condiciones edafoclimáticas del cultivo y la madurez de la caña,

que, suele ser diferente entre cultivos, ya que los agricultores usan métodos empíricos para determinar la madurez y el tiempo de corte de la caña (*Chen, 1991; García et al., 2007*). También puede ser a causa de la cantidad, no estandarizada, de carbonato de calcio agregado en la etapa de encalado. Este insumo se agrega para regular el pH, evitando la hidrólisis de la sacarosa y favoreciendo la limpieza en la etapa de clarificación (*García et al., 2007*).

En el parámetro de acidez se expresó como ácido aconítico en base seca. En este parámetro se encontraron diferencias significativas entre los puntos de muestreo, a excepción de los puntos M1-M2 y M2-M3. Los valores de acidez son menores a las reportadas en la panela, cuyos valores se encuentran dentro del intervalo de 0,97 a 1,35 mg/100g de muestra en base seca (*Asikin et al., 2014*). Lo anterior indica que la concentración de ácido aumenta hasta llegar al producto final, que es la panela. El incremento de la acidez puede deberse a los productos de la descomposición de la sacarosa durante el tratamiento térmico al que está sometida la mezcla. Algunos de estos productos son ácidos orgánicos como el acético, fórmico y pirúvico (*Kitts, Wu, Kopec, & Nagasawa, 2006*).

Por otra parte, en la figura 3-6 se muestran las cenizas durante el proceso de evaporación. Los valores de esta propiedad tuvieron cambios, pero solo hay diferencias significativas entre los puntos de muestreo J1 y M3. En otras palabras, entre el inicio y el final del muestreo. El contenido de cenizas representa la cantidad total de minerales presentes en el alimento, es decir, es una primera aproximación al valor nutricional. Sin embargo, suele variar cuando la materia prima proviene de plantas (*Nielsen, 2014*), como es el caso de la panela. Por lo anterior, los intervalos de cenizas reportados en panela son amplios y están entre 0,3 y 3,6% (*Jaffé, 2015*).

En este caso los valores de cenizas son menores a los intervalos reportados por *Guerra & Mujica, (2010)* para panela, 1,39 y 2,56 g/100g en base seca. Además, estas muestras tuvieron menor contenido de cenizas que lo reportado en mieles de caña panelera entre 50 y 70°brix (*Alvarado & Naranjo, 2008*), posiblemente por las condiciones edafoclimáticas de la caña.

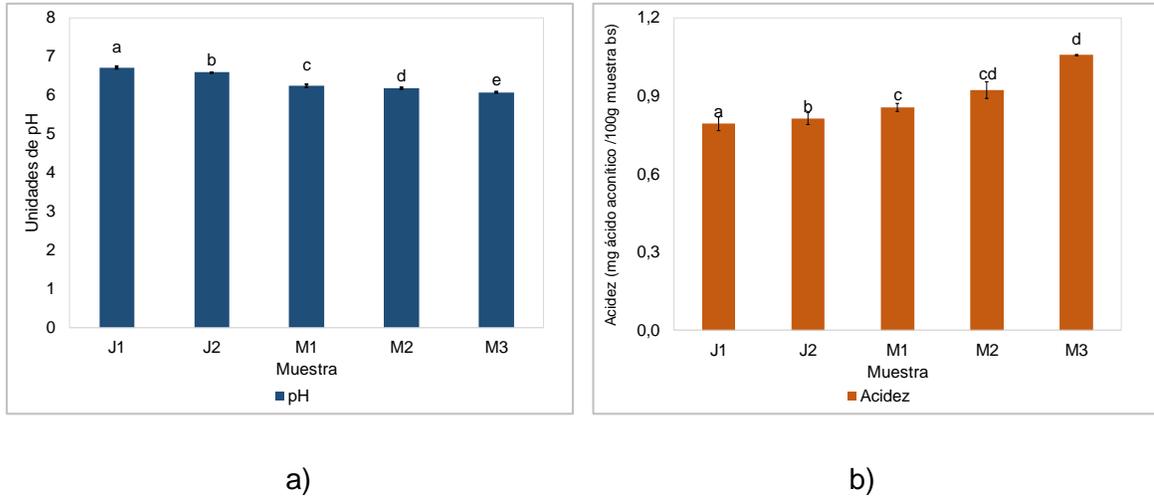


Figura 3-5 Valores de a) pH y b) acidez durante la etapa de evaporación del proceso de producción de panela - trapiche del SENA

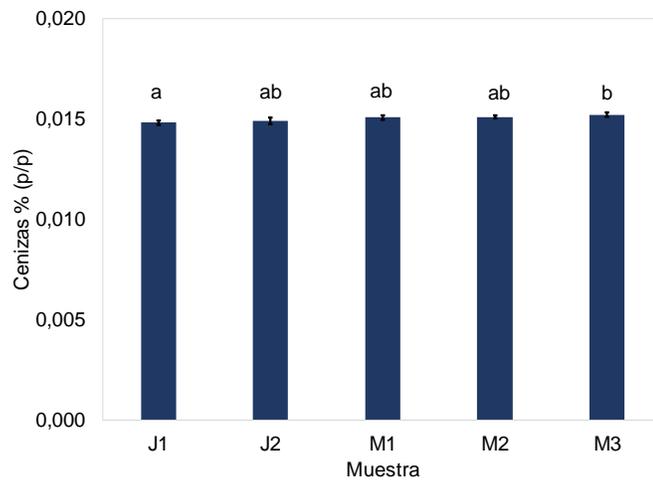


Figura 3-6 Valores de las cenizas durante la etapa de evaporación en el proceso de producción de panela - trapiche del SENA.

- **Análisis entre trapiches**

Para comparar los resultados entre los trapiches estudiados se promediaron los valores del muestreo 1 y muestreo 2 de cada propiedad y cada trapiche. Estos valores cumplieron con los test de Shapiro-Wilks y Bartlett. De acuerdo con el ANOVA, hay diferencias significativas entre los dos trapiches en todos los parámetros. A continuación, se identifican los grupos diferentes para cada propiedad medida.

La humedad de las muestras en cada trapiche se muestra en la figura 3-7, donde se confirma que la cantidad de agua disminuye a medida que el proceso de concentración avanza. De acuerdo con el test de Tukey todas las muestras tienen diferencias significativas entre ellas, por lo que, en cuanto a humedad, los dos trapiches son diferentes, lo cual está relacionado con la variación de las concentraciones en los muestreos.

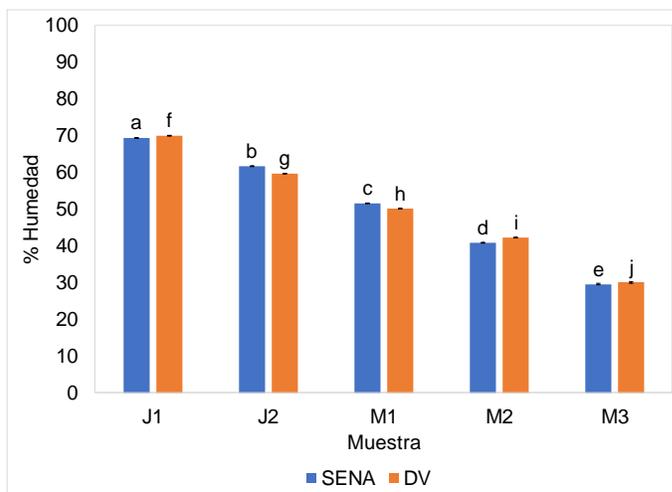


Figura 3-7 Porcentaje de humedad de cada punto de muestreos en ambos trapiches

El comportamiento del pH a través de la etapa de concentración en ambos trapiches se muestra en la figura 3-8. En general el pH decreció durante el proceso de ambos trapiches, como suele pasar en la industria panelera (*Luz Esperanza, Arlex, & Hugo Reinel, 2015*). El trapiche del SENA tuvo un proceso con un pH menor al del trapiche DV. Además, este parámetro disminuyó más rápido en el trapiche del SENA, por lo que existen diferencias significativas entre cada punto de muestreo de cada trapiche.

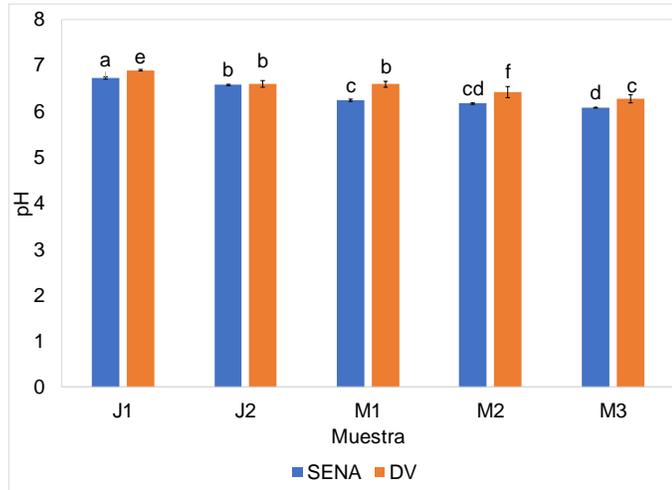


Figura 3-8 Comportamiento del pH en los trapiches SENA y DV, en función de la etapa de proceso

La acidez en base seca para cada punto de muestreo de cada trapiche se muestra en la figura 3-9. Esta variable aumentó al incrementarse la evaporación. El trapiche del SENA tuvo la acidez más alta, lo cual confirma el comportamiento del pH. En cada punto de muestreo hubo diferencias significativas, por lo que en cuanto a acidez los trapiches son diferentes estadísticamente.

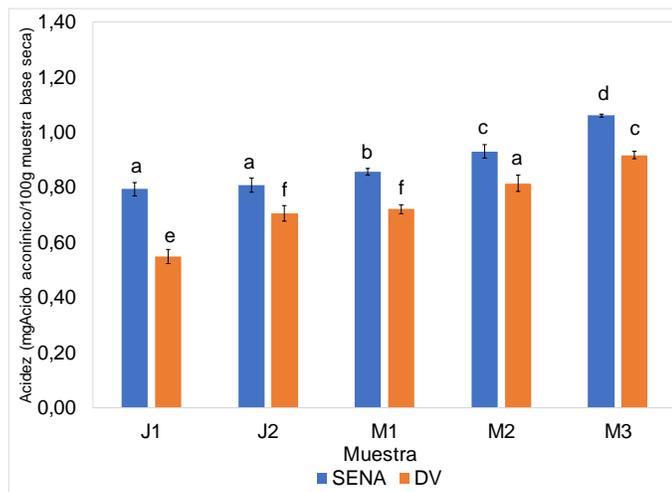


Figura 3-9 Acidez en base seca, expresada como ácido acético, en los trapiches SENA y DV, en función de la etapa de proceso

Finalmente, las cenizas de las muestras tomadas en los trapiches se muestran en la figura 3-10. En el trapiche del SENA no hubo diferencias entre todos los puntos de muestreo, mientras que en el trapiche Dulce Ventorrillo, el último punto de muestreo fue diferente a los demás. Entre los dos trapiches se evidenciaron diferencias significativas, por lo tanto, son diferentes en cuanto a esta variable.

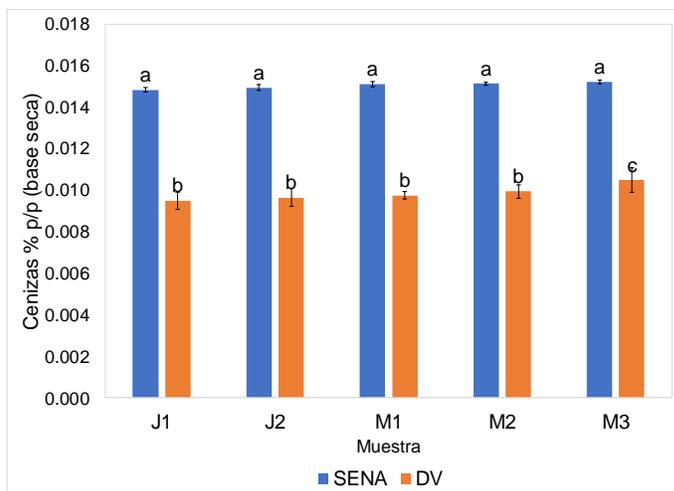


Figura 3-10 Cenizas en los trapiches SENA y DV, en función de la etapa de proceso

3.2.2. Propiedades en función de la temperatura

Densidad

La variación de la densidad en función de la temperatura y la concentración, para el muestreo 1 del trapiche SENA, se presentan en la tabla 3-4. No hubo diferencias entre los muestreos del trapiche del SENA, por lo que se presentan los resultados del muestreo 1. Por otro lado, los valores de densidad del trapiche DV se mostrarán en el anexo A, pero en general, muestran el mismo comportamiento de los que aquí se describen.

Tabla 3-4 Densidad de jugos y mieles de caña panelera en función de temperatura y la concentración para las muestras del trapiche del SENA

Muestra	Concentración (°Brix)	Temperatura (°C)			
		20	25	30	35
		Densidad (g/ml)			
J1	30,97	$1,136 \pm 3,3 \times 10^{-4}$	$1,135 \pm 9,6 \times 10^{-5}$	$1,130 \pm 9,6 \times 10^{-5}$	$1,130 \pm 1,1 \times 10^{-3}$
J2	38,90	$1,170 \pm 2,6 \times 10^{-4}$	$1,168 \pm 1,2 \times 10^{-4}$	$1,167 \pm 4,6 \times 10^{-4}$	$1,165 \pm 3,1 \times 10^{-4}$
M1	48,81	$1,224 \pm 1,7 \times 10^{-4}$	$1,221 \pm 1,0 \times 10^{-4}$	$1,219 \pm 9,6 \times 10^{-5}$	$1,218 \pm 5,0 \times 10^{-5}$
M2	59,87	$1,285 \pm 3,0 \times 10^{-4}$	$1,282 \pm 1,4 \times 10^{-4}$	$1,279 \pm 1,5 \times 10^{-4}$	$1,278 \pm 1,3 \times 10^{-4}$
M3	70,81	$1,360 \pm 2,2 \times 10^{-4}$	$1,356 \pm 6,2 \times 10^{-4}$	$1,352 \pm 4,3 \times 10^{-4}$	$1,351 \pm 1,3 \times 10^{-4}$

Los valores de densidad están entre 1,136 y 1,351 g/ml y estuvieron dentro del intervalo reportado por *Alvarado & Naranjo, (2008)*. Por otro lado, comparando los datos experimentales con modelos matemáticos reportados en función de la concentración y la temperatura (*La Madrid, Marcelo, Orbegoso, & Saavedra, 2016; Tiwari, Prakash, & Kumar, 2004*), se encontraron errores menores al 3,5% y comparado con soluciones de sacarosa (*Zavaleta, 2011*) se obtuvo un error del 1,2%. Lo anterior indica que, para la densidad de jugos y mieles de caña panelera, podrían emplearse los datos de soluciones de sacarosa. Las diferencias observadas entre este trabajo y otros reportes pueden deberse a las diferencias en las variedades de caña y las condiciones del cultivo, e incluso al proceso de producción (*García et al., 2007*).

En la figura 3-11 se muestran los valores experimentales y los calculados a través de los modelos ajustados en este trabajo para la densidad. Los modelos lineales tuvieron coeficientes de correlación mayores de 0,95, con excepción del modelo para 30 °Brix, que fue 0,80. Así pues, la densidad tiene un comportamiento lineal en función de la temperatura. De la misma manera, los modelos en función de la concentración tuvieron un coeficiente de correlación mayor a 0,99, lo cual indica que la densidad en función de la concentración también tiene un comportamiento lineal. Adicionalmente, se encontraron diferencias significativas de la densidad, entre todas las concentraciones y todas las temperaturas.

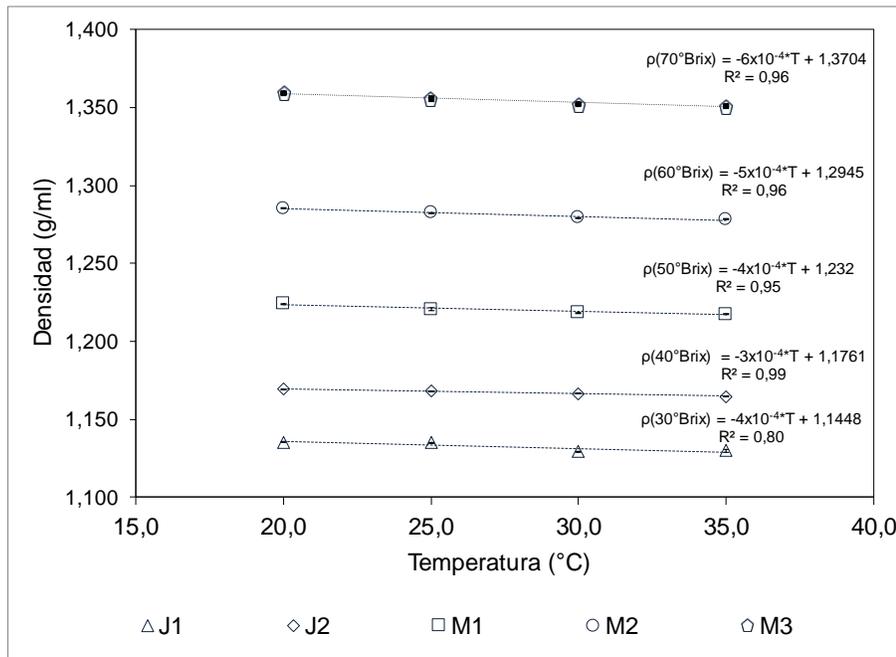


Figura 3-11 Densidad a diferentes concentraciones en función de la temperatura del trapiche del SENA

▪ Análisis entre trapiches

Para comparar los resultados entre trapiches se promediaron los valores del muestreo 1 y muestreo 2 de cada trapiche. Los datos promedio cumplieron con los test de Shapiro-Wilks y Bartlett. Se encontraron diferencias significativas de la densidad entre los trapiches, lo cual fue verificado por el test de Tukey. Por lo anterior, el trapiche del SENA, con calentamiento de evaporadores abiertos, y el trapiche DV, con calentamiento de hornilla, fueron diferentes en cuanto a densidad en cada punto de muestreo y temperatura.

De esta manera, se obtuvieron los modelos para la densidad en función de la temperatura y la concentración para cada trapiche. Los modelos para el trapiche SENA y DV se muestran en las ecuaciones 3.4 y 3.5, respectivamente. A pesar de las diferencias estadísticamente significativas del comportamiento de la densidad de las muestras entre trapiches, se generó una ecuación general (3.6) para ambos procesos el cual se ajusta satisfactoriamente a los datos experimentales, $R^2=0,99$.

$$\rho = 0,9649 - 5 \times 10^{-4} * T + 5,6 \times 10^{-3} * C \quad (3.4)$$

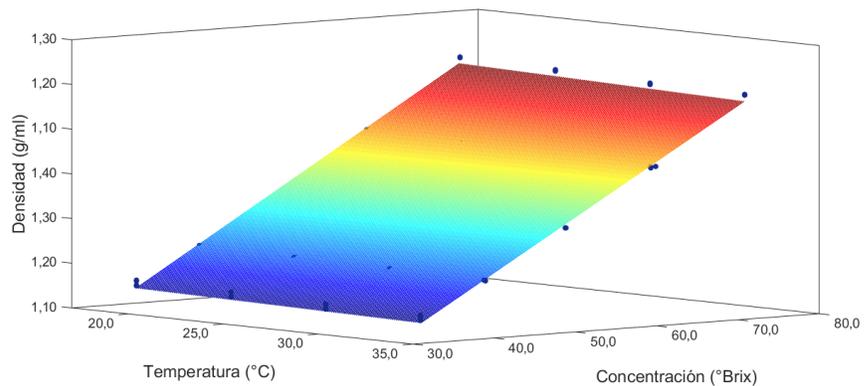
$$\rho = 0,9622 - 5 \times 10^{-4} * T + 5,7 \times 10^{-3} * C \quad (3.5)$$

$$\rho = 0,9650 - 5 \times 10^{-4} * T + 5,6 \times 10^{-3} * C \quad (3.6)$$

Donde ρ es la densidad en g/ml, T es la temperatura en °C, entre 20 y 35°C, C es la concentración de jugos o mieles en °Brix, entre 30 y 70°Brix.

Los modelos matemáticos de los jugos y mieles de ambos trapiches tienen un comportamiento lineal en función de la temperatura y concentración. Las superficies de respuesta y los datos experimentales, de cada trapiche, se muestran en la figura 3-12. Adicionalmente, los datos experimentales se ajustaron a los modelos con un coeficiente de correlación mayor a 0,98, en ambos casos, como se muestra en la figura 3-13.

Por otra parte, los modelos se compararon con información reportada en la *literatura* (*La Madrid et al., 2016; Tiwari et al., 2004*), mostrando diferencias de hasta 3,8%. Asimismo, se hizo la comparación con la información reportada para muestras tomadas del proceso en un trapiche de Santander con variedad de caña RD, y se observaron diferencias de hasta 3,4%. Finalmente, se compararon con soluciones de sacarosa, obteniendo diferencias de hasta 1,9%, respectivamente.



a)

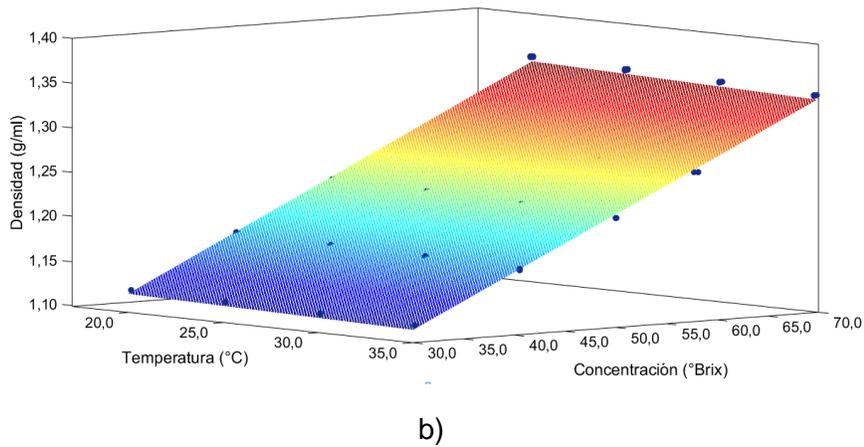


Figura 3-12 Superficies de respuesta de los modelos de densidad en función de la concentración y la temperatura a) trapiche del SENA b) trapiche DV.

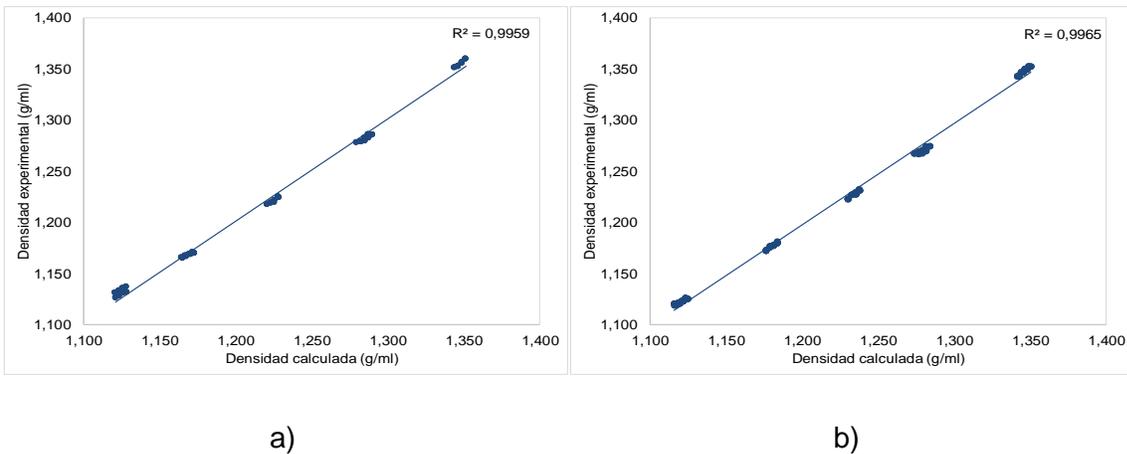


Figura 3-13 Ajuste de los modelos de densidad en función de la temperatura y la concentración a) trapiche del SENA b) trapiche DV.

3.2.3. Perfil de azúcares en jugos y mieles de caña panelera

El perfil de azúcares de jugos y mieles de caña consistió en la determinación de las concentraciones de sacarosa, glucosa y fructosa en los jugos y mieles, expresados en g de cada azúcar en 100g de muestra en base seca. En la tabla 3-5 se presentan los resultados para las muestras provenientes del trapiche del SENA. El perfil de azúcares del trapiche DV se muestra en el anexo A, y los valores y comportamiento son similares a los aquí descritos

Tabla 3-5 Perfil de azúcares en jugos y mieles de caña panelera del trapiche del SENA

Muestra	Concentración (°Brix)	Sacarosa	Glucosa	Fructosa
		(g/100g muestra en base seca)		
J1	30,97	92,60±0,47	3,81±0,04	4,04±0,08
J2	38,90	92,58±0,44	3,77±0,08	3,94±0,02
M1	48,81	92,35±0,58	3,83±0,06	3,84±0,05
M2	59,87	92,10±0,29	3,83±0,03	3,76±0,05
M3	70,81	92,10±0,47	3,85±0,04	3,74±0,06

Inicialmente, de acuerdo con el análisis estadístico, no hubo diferencia entre los dos muestreos realizados. La sacarosa fue el azúcar predominante en el perfil de azúcares, cuya concentración en base seca fue del 92%. El perfil de sacarosa en función de la etapa de proceso se muestra en la figura 3-14, donde se observa que hay cambios de concentración durante el proceso de concentración, lo cual se verificó con el análisis de Tukey. La concentración de sacarosa fue diferente entre el punto de muestreo J1 y M3. Esta diferencia puede deberse a reacciones como la hidrólisis de la sacarosa y la caramelización, que son favorecidas por la temperatura del proceso. Además, estas reacciones producen ácidos orgánicos como acético, fórmico y pirúvico (*Kitts et al., 2006*), contribuyendo al aumento de la acidez y disminución del pH durante la concentración de jugos de caña panelera (*Luz Esperanza et al., 2015*).

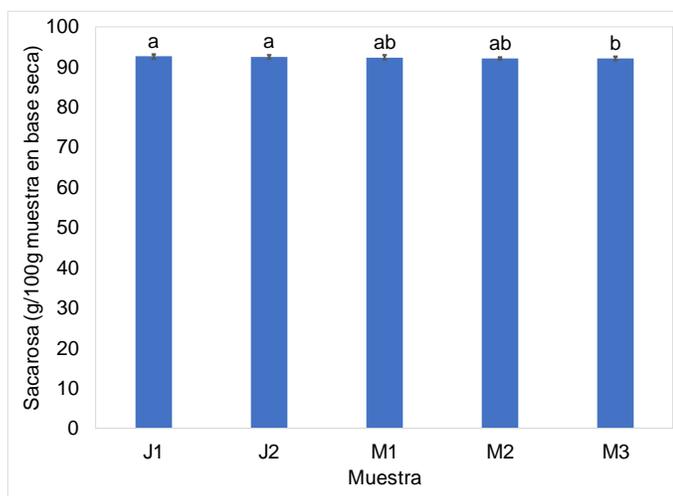


Figura 3-14 Perfil de la sacarosa en el trapiche del SENA

El comportamiento para la glucosa y la fructosa, azúcares reductores presentes en la panela, se muestra en las figuras 3-15 y 3-16, respectivamente. La concentración de

glucosa fue en promedio 3,8% y no hubo cambios de concentración en función de las etapas de evaporación. La concentración de fructosa fue cercana al 4,0% del total de azúcares y disminuyó durante el proceso de concentración. Se encontró que las muestras provenientes de la etapa de concentración 1 son diferentes a las muestras de la etapa de concentración 2. La disminución de la fructosa puede deberse a la reacción de Maillard, que consiste en la reacción del grupo carbonilo de los azúcares reductores y el grupo amino presente en las proteínas. Es comúnmente aceptado que la fructosa tiene mayor reactividad que la glucosa (Ioannou, Daskalakis, & Varotsis, 2017), lo cual explica su disminución durante el proceso de producción de panela.

En general, los azúcares reductores son más del 7% en masa y durante el proceso su porcentaje se redujo en un 0,27%, principalmente por la fructosa. Adicionalmente, la relación sacarosa – azúcares reductores entre las diferentes muestras, varió entre 11,8 y 12,1, indicando una baja descomposición química de los azúcares durante el proceso de concentración en la producción de panela granulada.

En cuanto a normatividad, la NTC 1311 define los porcentajes máxicos de sacarosa y azúcares reductores que debe cumplir la panela granulada. Para la sacarosa debe haber máximo 93% y de azúcares reductores mínimo 5,0% (ICONTEC, 2009). En el caso de que estas muestras se siguieran concentrando hasta obtener panela, cumplirían con las especificaciones de la norma.

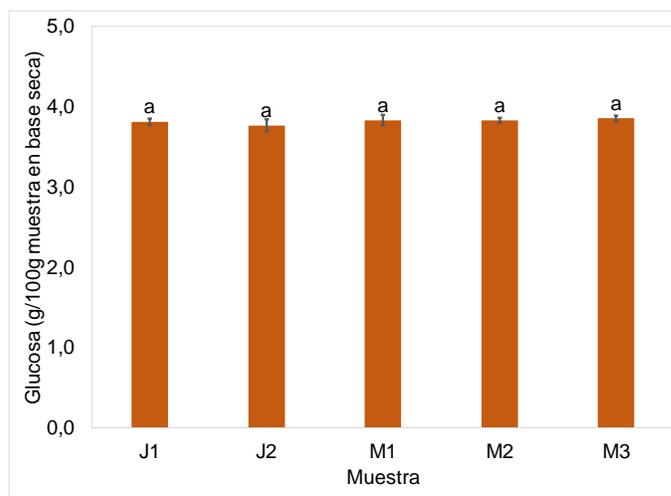


Figura 3-15 Perfil de la glucosa en el trapiche del SENA

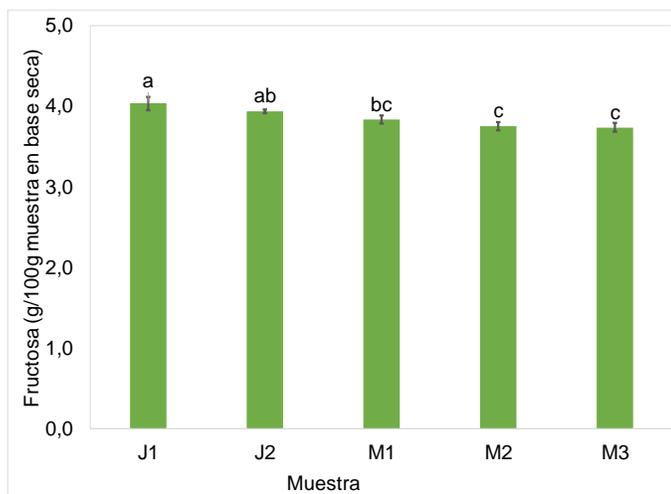


Figura 3-16 Perfil de la fructosa en el trapiche del SENA

- **Análisis entre trapiches**

La evaluación de los perfiles de azúcares entre los trapiches analizados se realizó usando el promedio de los resultados del muestreo 1 y muestreo 2, de cada trapiche. Como resultado, se encontraron diferencias significativas entre ambos trapiches, las cuales se explicarán a continuación.

Las diferencias en la concentración de sacarosa se muestran en la figura 3-17, donde se observa, que, si se comparan los mismos puntos de muestreo en los dos trapiches, las concentraciones de sacarosa son estadísticamente diferentes. Además, en el trapiche del SENA hubo menor degradación de sacarosa durante el proceso, es decir, la concentración disminuyó 0,52% p/p, mientras que el trapiche DV disminuyó 1,16% p/p en base seca; es decir, más de 2 veces. Esto puede deberse a que en el trapiche DV los jugos y las mieles tienen un tiempo de residencia mayor en las pailas, lo que induce a que haya mayor descomposición térmica.

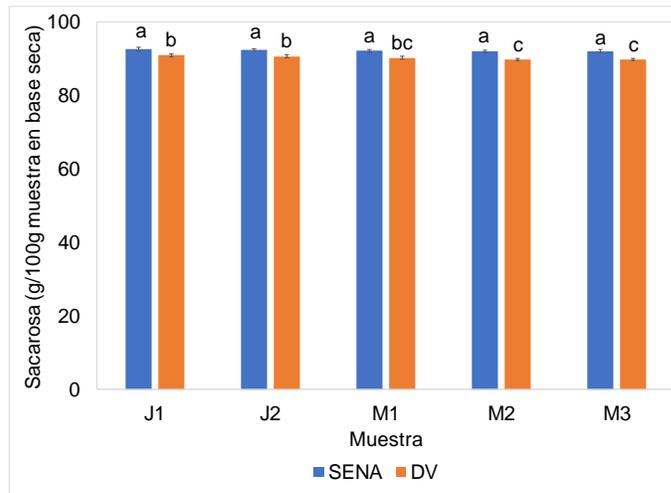


Figura 3-17 Perfil de sacarosa de los puntos de muestreo de cada trapiche estudiado

Por otro lado, el perfil de glucosa en función de la etapa del proceso en cada trapiche se muestra en la figura 3-18. Se observa que las muestras provenientes del trapiche del SENA tienen una menor concentración que las del trapiche DV. En las muestras del trapiche del SENA, la concentración de glucosa no cambia en función de la etapa de concentración, mientras que en el caso de DV, la concentración de glucosa empieza a ser diferente entre las etapas de concentración 1 y 2. En general, durante el proceso la concentración decreció 0,12% p/p.

Asimismo, en la figura 3-19 se muestra el perfil de fructosa de ambos trapiches. El trapiche del SENA tuvo menor concentración, y en ambos casos hay disminución de la concentración. En el caso del SENA, hay un mayor decrecimiento de la concentración, cerca del 0,33% p/p en base seca, mientras que en el otro trapiche disminuyó 0,15% p/p en base seca, es decir, dos veces menos que el trapiche del SENA.

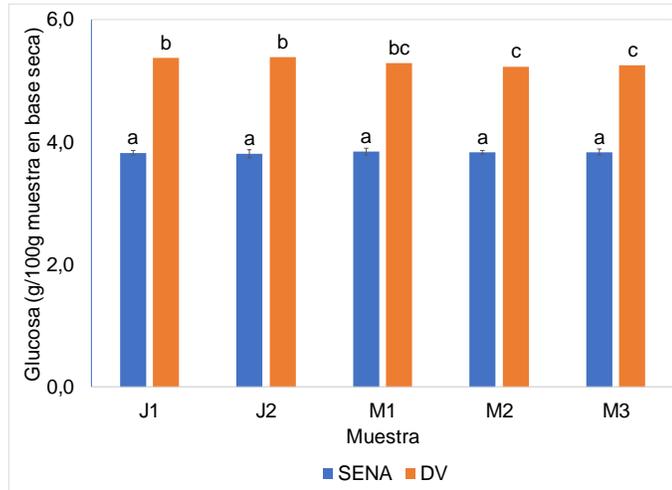


Figura 3-18 Perfil de glucosa de los puntos de muestreo de cada trapiche estudiado

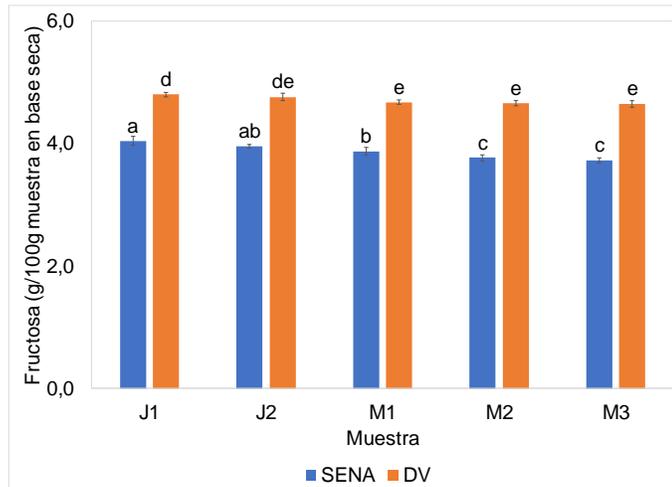


Figura 3-19 Perfil de fructosa de los puntos de muestreo de cada trapiche estudiado

Durante la concentración de los jugos y mieles de caña panelera entre dos trapiches con tecnologías de calentamiento diferente, hubo diferencias significativas en cada uno de los azúcares de sacarosa, glucosa y fructosa. Igualmente, hubo diferencias significativas entre los azúcares reductores. En el SENA tuvieron una concentración mayor a 7%, mientras que en DV fue mayor a 9%. En ambos casos la tendencia de estos azúcares reductores es decreciente, 0,30% y 0,27%, respectivamente. Además, la relación de sacarosa - azúcares reductores fue del 12% y 9%, respectivamente, lo cual indica que en el trapiche del SENA hay mayor cantidad de sacarosa por cada g de azúcares reductores.

Las condiciones del cultivo como el clima, el suelo, los fertilizantes usados por cada productor y la madurez de la caña pueden afectar la producción de azúcar en la planta (*Larrahondo, 1995*). Por ejemplo, una ligera deficiencia de potasio resulta en la disminución de sacarosa. Asimismo, una alta cantidad de nitrógeno retarda la maduración, generando cañas de bajos °Brix y alto contenido de azúcares reductores (*ICA, 2011*). Además, es importante resaltar que los muestreos fueron tomados en diferentes épocas del año, por lo que el tiempo de corte de la caña, también puede influir en estas diferencias encontradas (*García et al., 2007*).

Por otro lado, el proceso llevado en cada trapiche afecta el perfil de cada azúcar durante las etapas de concentración, posiblemente debido al tiempo de permanencia de los jugos en las pailas, ya que la temperatura y el tiempo cataliza las reacciones de degradación (*Kitts et al., 2006*). En el trapiche del SENA, el tiempo es menor produciendo cerca de 100kg/h de panela, mientras que en el trapiche DV los tiempos de residencia en las pailas son mayores, con menor capacidad de producción de panela granulada.

3.2.4. Análisis proximal

El análisis proximal se realizó a las muestras de 70°Brix de cada trapiche y los resultados se muestran en la tabla 3-6. Allí se observa que el contenido de proteína en ambos trapiches se encuentra en un intervalo de 0,25 a 0,41%p/p, similar al reportado en mieles de caña (*ICBF, 2015; Nath, Dutta, Kumar, & Jp, 2015*). Algunos aminoácidos presentes en la caña son los ácidos: aspártico, glutámico y alanina. Así mismo, algunas proteínas son albuminas, nucleínas y peptonas (*García et al., 2007*).²

Las proteínas son componentes complejos e importantes en las células de la planta, ya que cumplen funciones biológicas. La caracterización de estos, en un alimento, es importante para incluir en la tabla nutricional y muchas veces para definir su precio, pues el costo del alimento suele basarse en el contenido de proteína (*Nielsen, 2010*).

² La harina de maíz y la manzana tienen un contenido de proteínas similar al de la miel de caña (*Nielsen, 2010*).

Por otro lado, en la producción de panela suele agregarse aceite o manteca como antiespumante y antiadherente en la etapa de punteo. Las mieles recolectadas se tomaron antes de que se agregaran estos agentes, con el fin de conocer el contenido de las grasas y ceras, propias de la caña, que no se retuvieron en el proceso de clarificación (*García et al., 2007*). De esta manera, se presentaron valores de grasa menores a 0,1%p/p³ en todas las muestras. Estos son menores a lo reportado por el ICBF (*ICBF, 2015*) probablemente porque las mieles usadas en ese reporte provenían del departamento de Santander y tanto las condiciones agroclimáticas como las de procesamiento son diferentes a Cundinamarca, y pueden incidir en el resultado. Comparando con valores de grasa en panela (*Jaffé, 2015*), las muestras evaluadas tuvieron una concentración similar.

Adicionalmente, los resultados de los carbohidratos en las muestras analizadas tuvieron un comportamiento similar entre ellos y menores a los de panela; es decir, por cada 100g de miel, se ingiere menor cantidad de carbohidratos (*Jaffé, 2015*), por efecto de la presencia de agua. En general, los carbohidratos en alimentos se componen por monosacáridos, disacáridos, alcoholes de azúcar, oligosacáridos, polisacáridos y gomas (*Nielsen, 2010*). Es así como, además de los azúcares mayoritarios como la sacarosa, glucosa y fructosa, se han encontrado polisacáridos como el almidón, principalmente en hojas y tallos de la caña que logran extraerse durante la molienda. Su presencia en los jugos dificulta la clarificación, debido a su alta solubilidad en caliente (*García et al., 2007*). Así mismo, polisacáridos como los arabinogalactanos se han encontrado ya que son solubles en agua y no se afectan por el proceso (*Schlumbach, Pautov, & Flöter, 2017*).

El contenido calórico de las muestras fueron similares entre ellas, y mayores a lo reportado en mieles de caña, 293 Kcal/100g (*ICBF, 2015*). La panela en bloque y granulada tiene valores mayores a 320 y 378 kcal/100g, respectivamente (*Jaffé, 2015*). Este comportamiento es de esperar, debido a que sus constituyentes están más concentrados. Esta propiedad es calculada a partir de las contribuciones de grasa,

³ La naranja y el espárrago son alimentos que tienen un aporte de grasas cercano a las mieles de caña, y bajo en comparación con otros alimentos (*Nielsen, 2010*).

proteína y carbohidratos del alimento, y representa la energía metabolizable, es decir, la energía disponible para que el organismo lo use en el metabolismo (Nielsen, 2010).

A nivel de publicaciones, los reportes de la composición proximal de panela y mieles de caña panelera es escasa (Jaffé, 2015). Incluso se encontraron documentos nacionales como la tabla de composición de alimentos colombianos del ICBF (ICBF, 2015), en donde no hay información completa sobre ellas. Así, lo encontrado aquí complementa las deficiencias de información identificadas.

Tabla 3-6 Análisis proximal de mieles de 70°Brix provenientes de los trapiches SENA y DV

Parámetro	Trapiche SENA		Trapiche DV	
	Miel 3 Muestreo 1	Miel 3 Muestreo 2	Miel 3 Muestreo 1	Miel 3 Muestreo 2
Proteína %p/p	0,41	0,25	0,34	0,40
Grasa %p/p	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Carbohidratos %p/p	75,40	76,28	76,55	76,25
Contenido calórico Kcal/100g	302	305	306	305

Los minerales analizados por absorción atómica no tuvieron diferencias significativas entre muestreos del mismo trapiche. Los resultados de cada mineral, en cada trapiche, se muestran en la tabla 3-7 y en la figura 3-20. En todos los casos hubo diferencias significativas entre los trapiches, lo cual coincide con la diferencia que hubo entre las cenizas, anteriormente descrita.

El potasio tuvo la concentración más alta, seguida por el calcio en ambos trapiches. Este comportamiento coincide con resultados en panela (Guerra & Mujica, 2010; Jaffé, 2015). Esta alta concentración de potasio se atribuye a su absorción desde el suelo, y por lo general, es el catión más abundante en las plantas (Wahhed & Ahmad, 2008). Adicionalmente, en los suelos colombianos hay deficiencias de K por lo que se fertilizan y se agregan aditivos que contienen este mineral (García et al., 2007), contribuyendo a altos niveles de concentración. Por otro lado, la concentración de calcio no solo es debida a la caña, sino también a lo aportado por el óxido de calcio o carbonato de calcio que se agrega al proceso con el fin de ajustar el pH y evitar reacciones como la hidrólisis de la sacarosa.

En cuanto a los demás minerales, Zn, Cu, Fe, Mg y Na, se encontraron en menor proporción que el K y el Ca. El orden de mayor a menor concentración en ambos trapiches fue Mg, Na, Fe, Zn y Cu; este orden coincide con lo reportado en panela (Guerra & Mujica, 2010). Aunque, los valores de Mg y Na fueron menores a los intervalos reportados en panela: 28,29 a 102,58mg de Mg/100g muestra en base seca, 24,78 a 45,37 mg de Na/100g muestra en base seca (Guerra & Mujica, 2010). Lo anterior depende de las condiciones del cultivo como el tipo de suelo, la variedad de caña, características climáticas e incluso el proceso de producción (García et al., 2007).

Tabla 3-7 Minerales en las mieles de 70°Brix de los dos trapiches

Mineral (mg/100g muestra en base seca)	Trapiche	
	SENA	Dulce Ventorrillo
Zn	$0,99 \pm 2 \times 10^{-2} \text{ a}$	$0,79 \pm 3 \times 10^{-2} \text{ b}$
Cu	$0,41 \pm 2 \times 10^{-2} \text{ a}$	$0,46 \pm 1 \times 10^{-2} \text{ b}$
Fe	$2,46 \pm 5 \times 10^{-2} \text{ a}$	$0,91 \pm 5 \times 10^{-2} \text{ b}$
Mg	$4,35 \pm 1,5 \times 10^{-1} \text{ a}$	$3,47 \pm 2,1 \times 10^{-1} \text{ b}$
Na	$3,22 \pm 1,4 \times 10^{-1} \text{ a}$	$2,32 \pm 5 \times 10^{-2} \text{ b}$
Ca	$23,84 \pm 7,9 \times 10^{-1} \text{ a}$	$22,13 \pm 5,1 \times 10^{-1} \text{ b}$
K	$186,71 \pm 5,33 \text{ a}$	$217,30 \pm 3,92 \text{ b}$

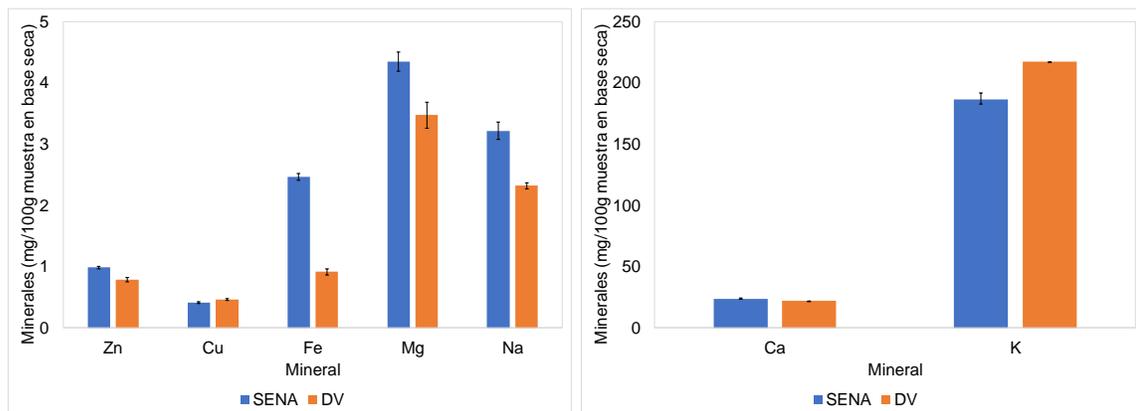


Figura 3-20 Minerales en mieles de 70°Brix de ambos trapiches

4. Caracterización reométrica y térmica de jugos y mieles de caña

En este capítulo se presentan las propiedades reológicas y térmicas de las muestras recolectadas de la primera y segunda etapa del proceso de producción de panela. Estas propiedades son necesarias para evaluar, diseñar y modelar los procesos de transferencia de calor como refrigeración, calentamiento y secado (*Alexandre, Cabral, Orrego-alzate, Gabas, & Telis-romero, 2007*), que ocurren durante la producción de panela.

Dentro de estas propiedades, la medición de conductividad térmica de líquidos suele ser difícil, debido a que la principal fuente de error es la convección (*Telis-Romero, Telis, Gabas, & Yamashita, 1998*). En el caso de líquidos y gases, la conducción de calor ocurre por colisiones moleculares. El transporte de energía suele ser menos efectiva en fluidos que en sólidos, debido a que el espacio intermolecular es más grande y el movimiento de las moléculas es más aleatorio (*Sahin & Sumnu, 2006*).

Usualmente, la conductividad térmica de los alimentos se obtiene por métodos predictivos. Sin embargo, muchos de ellos contienen factores empíricos o información específica, que limita su aplicabilidad (*Sahin & Sumnu, 2006*). Por esto, se han propuesto recomendaciones para la medición de esta propiedad, evitando los errores por el fenómeno de convección, como agregar 0,5% de agar o 1% de fibra de vidrio al medio líquido (*Pongsawatmanit, Miyawaki, & Yano, 1993; Telis-Romero et al., 1998*). Otras estrategias, como el sistema de cilindros concéntricos que contiene la muestra entre estos, se basan en el supuesto de suprimir la convección, si el espacio entre los cilindros es muy pequeño y la diferencia de temperaturas entre las dos paredes de los cilindros no es muy grande (*Bellet, Sengelin, & Thirriot, 1975*). El sistema de cilindros concéntricos ha sido aceptado por ser simple y conveniente (*Pongsawatmanit et al., 1993*), y ha sido usado ampliamente para la medición de la conductividad en alimentos líquidos como jugo

de pasiflora, lulo, naranja, leche, entre otros (Alexandre et al., 2007; Giraldo-Gómez, Gabas, Telis, & Telis-Romero, 2010; Gratão, Silveira Júnior, Polizelli, & Telis-romero, 2004; Telis-Romero et al., 1998)

4.1. Materiales y métodos

4.1.1. Viscosidad

La viscosidad (μ) se determinó en un reómetro CVO-R 150 NF (Woecestershire, United Kingdom), a temperaturas de 35, 45, 55, 65 y 75°C. Aproximadamente, 20ml de muestra se insertaron entre los cilindros del sistema *Double Gap*. Las mediciones se realizaron entre una velocidad de corte de 1 a 100 rpm, a temperatura constante y por triplicado (ver tabla 4-1 y A-4).

4.1.2. Capacidad calorífica

El Calor específico (c_p) se determinó en un calorímetro HP-DSC1 STAR^e System Mettler Toledo (Ohio, USA), entre temperaturas de 35, 45, 55, 65 y 75°C, y siguiendo la norma ASTM E1269-05. Se tomó como blanco una cápsula de aluminio de 20 μ l con tapa, y como material de referencia se utilizó zafiro (60,9mg). Aproximadamente, 15 μ l de muestra se cargaron en una cápsula. El método utilizado consistió en una isoterma a 25°C durante 4 minutos, una rampa entre 25°C y 80°C, con velocidad de calentamiento de 2°C/min y, finalmente, una isoterma de a 80°C por 0,5 minutos. Los experimentos se realizaron con nitrógeno a 50mL/min. Todos los experimentos se realizaron a 1MPa, debido a la propiedad de las muestras de generar espuma durante el calentamiento. Estos análisis se realizaron por triplicado (ver tabla 4-3 y A-6).

4.1.3. Conductividad térmica

La conductividad térmica de las muestras se midió en un equipo diseñado y construido como se muestra en la figura 4-1, en el marco de esta tesis. Las temperaturas a las cuales se midió fueron 35, 45, 55, 65 y 75°C. El equipo consiste en dos cilindros concéntricos en aluminio 6061, con un espacio de 3mm entre ellos para la muestra. En el cilindro interno se insertó una resistencia térmica tubular de 206 Ω , que se conectó a una fuente de energía BK precision XLN 15010 (Yorba Linda, CA, Estados Unidos). El voltaje

y la intensidad fueron 50V y 0,2A, respectivamente. Se colocaron dos termocuplas en la pared externa del cilindro interno (Termocupla 1 – T1- en la Figura 4-1) y la pared interna del cilindro externo (Termocupla 2 – T2- en la figura 4-1), para medir la diferencia de temperatura entre los cilindros. Estas se conectaron a un módulo sensor de temperatura MAX6675 y este a la vez a un Arduino Mega 2560. Este dispositivo se conecta a un computador en donde se recibe la información de las temperaturas T1 y T2 para cada intervalo de 1 segundo, hasta que T1 > 80°C. El equipo fue aislado térmicamente para disminuir pérdidas al ambiente. La figura 4-2 presenta una foto de este.

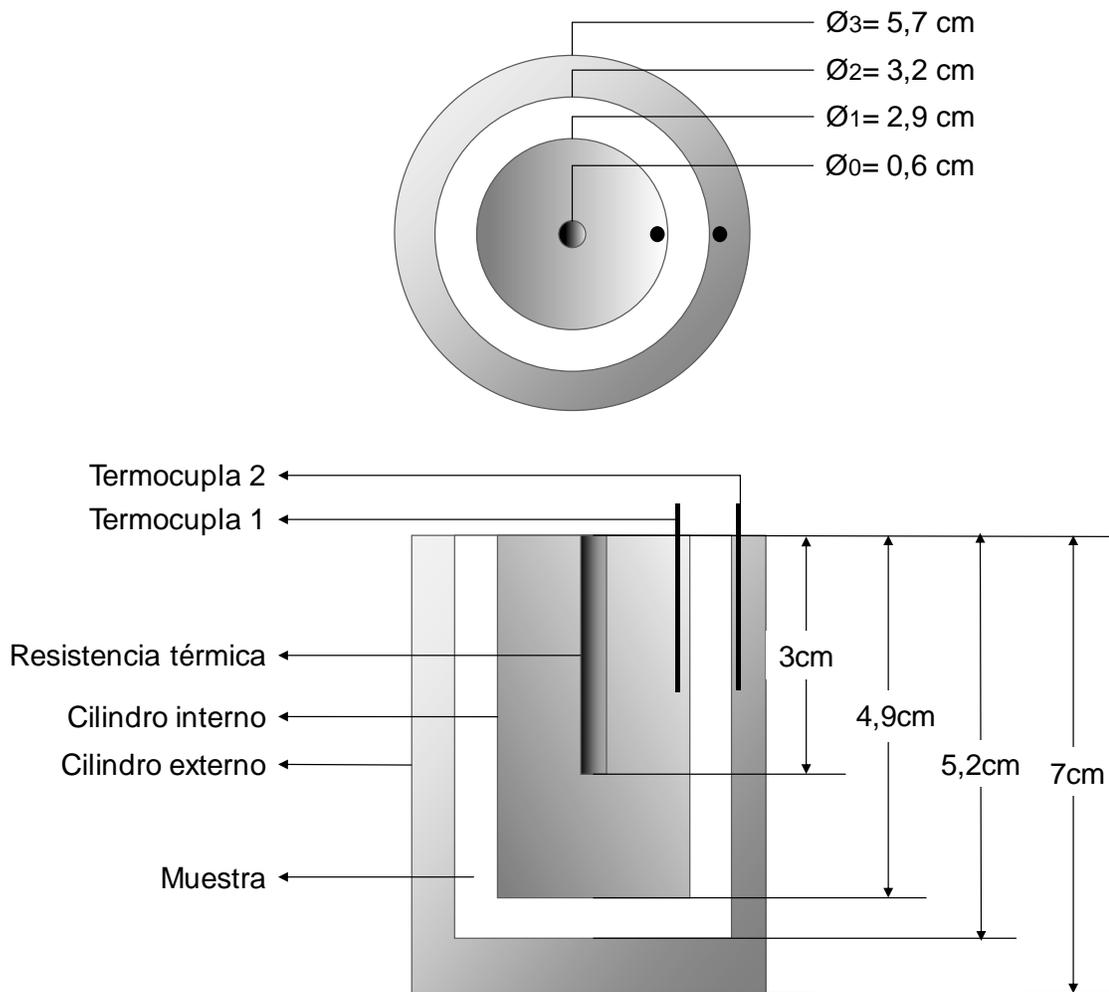


Figura 4-1 Esquema del equipo construido para medir conductividad térmica de líquidos

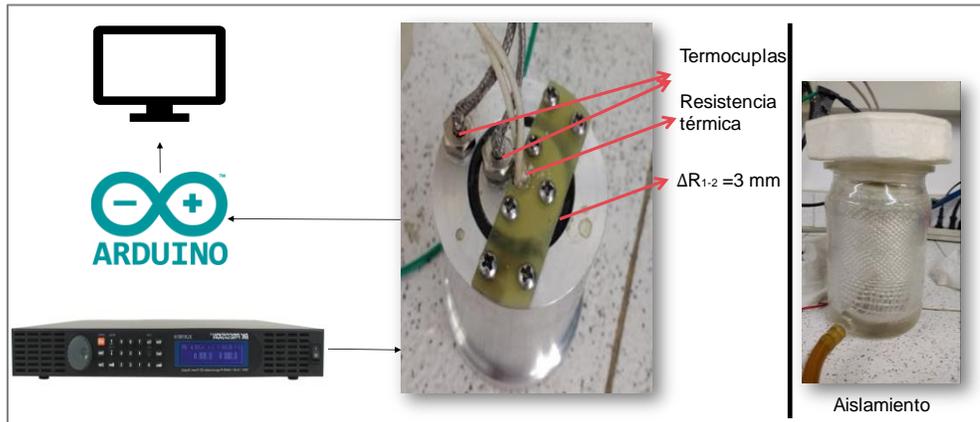


Figura 4-2 Equipo diseñado y construido en esta tesis para la medición de conductividad térmica de líquidos

La transferencia de calor en estado estacionario a través de la muestra se basó en la ecuación de Fourier en coordenadas cilíndricas (ecuación 4.4). Esta ecuación describe el flujo de calor en función de las resistencias. Las condiciones para obtener esta expresión se describen a continuación y el volumen de control se presenta en la figura 4-3 (Alexandre et al., 2007; Bellet et al., 1975; Telis-Romero et al., 1998):

- La transferencia de calor en el medio líquido ocurre, predominantemente, por el fenómeno de conductividad.
- El flujo de calor que genera la resistencia térmica se define en la ecuación 4.1.
- El calor transferido entre las superficies de los dos cilindros concéntricos de radios R_1 y R_2 , y longitud L , se produce por la diferencia de temperaturas, T_1 y T_2 , que se describen en las ecuaciones 4.2 y 4.3.

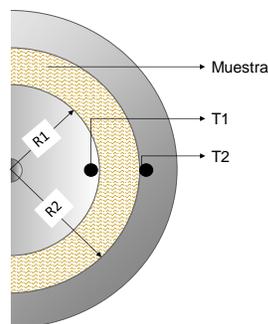


Figura 4-3 Medio líquido como volumen de control para el análisis de la transferencia de calor

$$Q = V * I \quad (4.1)$$

$$T_{(r=R1)} = T1 \quad (4.2)$$

$$T_{(r=R2)} = T2 \quad (4.3)$$

$$Q_r = -\lambda_r A \frac{\partial T}{\partial r} \quad (4.4)$$

Sabiendo que el área del cilindro interno es constante, $A=2\pi R_1 L$, se reemplaza en la ecuación 4.4, integrando se obtiene la ecuación 4.5, que describe la conductividad para los cálculos de esta propiedad a partir de los datos medidos en el equipo previamente descrito.

$$\lambda = \frac{Q \text{Log}\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2\pi L(T_1 - T_2)} \quad (4.5)$$

En las ecuaciones 4.1 a 4.5 Q = Flujo de calor (W), A = Área transversal (m^2), t = tiempo (s), λ = conductividad térmica (W / m K), T = temperatura ($^{\circ}C$), r = radio (m), L = longitud del cilindro interno (m).

Para el tratamiento de los datos se realizó una media móvil de 20 datos para las temperaturas T_1 y T_2 , y cada pareja de datos fue reemplazada en la ecuación 4.5. La temperatura de la muestra se calculó como el promedio de T_1 y T_2 en cada intervalo. Los ensayos se realizaron por triplicado (ver tabla 4-4 y A-7). Finalmente, se calculó la conductividad térmica del líquido en W/m K, en función de la temperatura de la muestra. La validación de la técnica de medición se realizó con agua destilada, glicerina y una solución de sacarosa de 30°Brix, obteniendo errores de 3,0%, 2,3% y 2,4%, respectivamente.

4.1.4. Difusividad térmica

La difusividad térmica, (α) se calculó por medio de la ecuación 4.6, usando los valores de las propiedades medidas previamente a cada concentración del punto de muestreo y a 35, 45, 55, 65 y 75°C. En el caso de la densidad los valores se extrapolaron a partir del modelo presentado en el capítulo 3.

$$\alpha = \frac{\lambda}{C_p \rho} \quad (4.6)$$

4.2. Resultados y discusión

4.2.1. Viscosidad

La viscosidad en función de la temperatura y la concentración de las muestras tomadas en el trapiche del SENA no mostró diferencias entre los muestreos, por lo que se presentarán los resultados del muestreo 1 (tabla 4-1). Por otro lado, los valores de viscosidad del trapiche DV se presentan en el anexo A, pero en general, tienen el mismo comportamiento de los que aquí se describen.

Tabla 4-1 Viscosidad de jugos y mieles de caña panelera en función de temperatura y la concentración para las muestras del trapiche del SENA, muestreo 1

Muestra	Concentración (°Brix)	Temperatura (°C)				
		35	45	55	65	75
		Viscosidad (mPa*s)				
J1	30,97	$3,1\pm 1 \times 10^{-1}$	$2,3\pm 1 \times 10^{-1}$	$2,15\pm 7 \times 10^{-2}$	$1,6\pm 1 \times 10^{-1}$	$1,4\pm 1 \times 10^{-1}$
J2	38,90	$8,3\pm 7 \times 10^{-2}$	$6,1\pm 7 \times 10^{-2}$	$4,3\pm 7 \times 10^{-2}$	$3,1\pm 1 \times 10^{-1}$	$2,5\pm 7 \times 10^{-2}$
M1	48,81	$10,5\pm 4 \times 10^{-1}$	$8,3\pm 1 \times 10^{-1}$	$6,9\pm 3 \times 10^{-1}$	$6,3\pm 7 \times 10^{-2}$	$5,3\pm 1 \times 10^{-1}$
M2	59,87	$25,9\pm 4 \times 10^{-1}$	$18,6\pm 4 \times 10^{-1}$	$14,2\pm 3 \times 10^{-1}$	$12,2\pm 2 \times 10^{-1}$	$9,9\pm 5 \times 10^{-1}$
M3	70,81	$165,8\pm 2$	$118,6\pm 5$	$90,7\pm 5$	$54,5\pm 3$	$28,9\pm 3$

La viscosidad tuvo un comportamiento newtoniano en el intervalo de la velocidad de corte empleado, y para todas las muestras y temperaturas. A manera de ejemplo, se muestra el esfuerzo cortante en función de la velocidad de corte para la muestra J1 (Figura 4-4). Este comportamiento es similar a lo reportado en mieles de caña panelera (*W. Naranjo, 2009*). Los valores se encuentran entre 1,4 y 165,8 mPa*s y según el análisis de Tukey, hubo diferencias de viscosidad entre todas las concentraciones y las temperaturas. En la Figura 4-5 se muestra la viscosidad en función de los puntos de muestreo y la temperatura. En general, la viscosidad fue mayor a altas concentraciones de azúcares (mayor para mieles que para jugos), lo que concuerda con lo reportado para soluciones de glucosa, fructosa y sacarosa (*Oroian, Ropciuc, Amariei, & Gutt, 2015*). Además, la viscosidad disminuyó a medida que aumentaba la temperatura, lo cual se describe con el modelo de Arrhenius (ecuación 4.7), cuyos parámetros a las diferentes concentraciones se muestran en la Tabla 4-24-2.

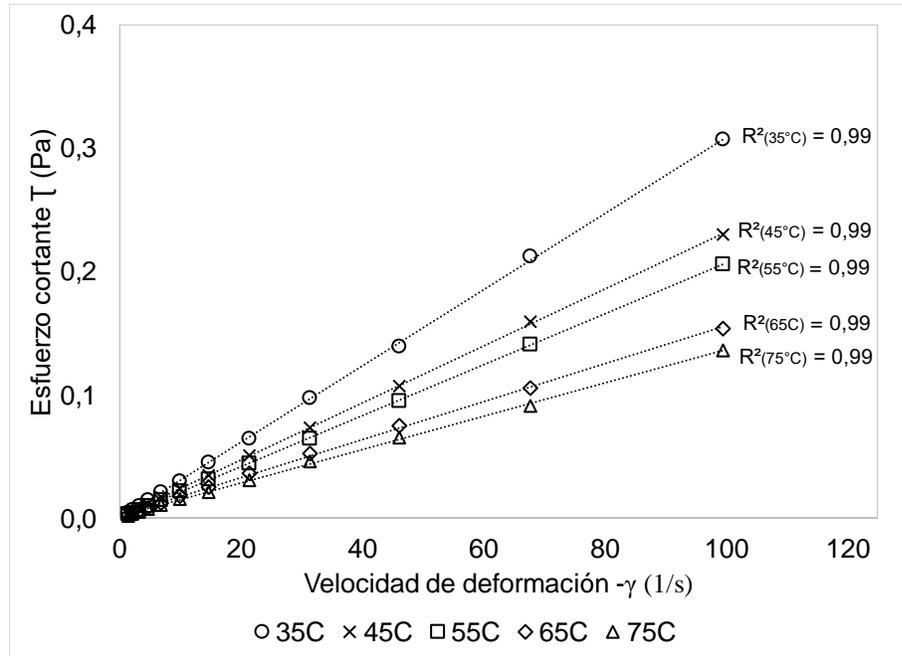


Figura 4-4 Esfuerzo cortante en función de la velocidad de corte para la muestra J1 del trapiche del SENA.

$$\mu = \beta_A \exp\left(\frac{E_a}{R_g T}\right) * 1000 \quad (4.7) \text{ (Singh \& Heldman, 2008)}$$

Donde μ = viscosidad (mPa*s), β_A = constante de Arrhenius, E_a = Energía de activación, (kJ/nK), T = temperatura (K).

Tabla 4-2 Parámetros de viscosidad en función de la temperatura del modelo de Arrhenius

Muestra	Concentración (°Brix)	E_a (kJ/kn K)	B_A	R^2
J1	30,97	17416,9	$3,4 \times 10^{-6}$	0,97
J2	38,90	27626,6	$1,7 \times 10^{-7}$	0,99
M1	48,81	14764,0	$3,2 \times 10^{-5}$	0,99
M2	59,87	21119,2	$6,5 \times 10^{-6}$	0,99
M3	70,81	37833,6	$7,1 \times 10^{-8}$	0,96

Entre mayor sea el valor de la E_a mayor el efecto de la temperatura sobre la viscosidad (Rojas-Cazares et al., 2005), razón por la cual, y con base en los resultados que muestra la Tabla 4-24-2, a mayor concentración de azúcares, el efecto de la temperatura en la viscosidad es mayor; es decir, las viscosidades de las mieles (M1, M2 y M3) tienen

mayor sensibilidad a la temperatura que los jugos (J1 y J2). Finalmente, la viscosidad en función de la concentración se ajustó al comportamiento exponencial.

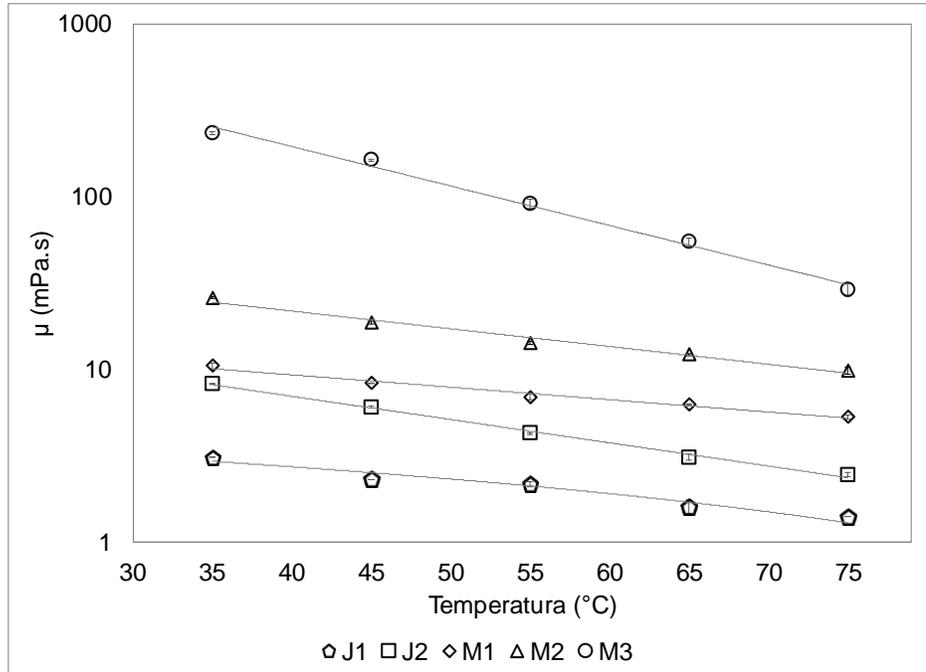


Figura 4-5 Viscosidad en función de la temperatura para los jugos y mieles del trapiche del SENA

- Análisis entre trapiches

Si se compara la viscosidad de las muestras provenientes de las mismas etapas entre los dos trapiches, se concluye que estadísticamente no hay diferencias significativas. Por lo que es posible generar un modelo de la viscosidad en función de la concentración y la temperatura, empleando los datos colectados en ambos trapiches. El modelo se muestra en la ecuación 4.8, con un coeficiente de correlación, R^2 , de 0,97. Este modelo, que se muestra en la Figura 4-6, concuerda con ecuaciones propuestas para la viscosidad en alimentos líquidos, en donde, esta propiedad reológica es una función exponencial de la concentración y la temperatura (Cepeda & Villar, 1999; Magerramov, Abdulagatov, Azizov, & Abdulagatov, 2007). Además, comparando con soluciones de sacarosa la diferencia fue 1,94%. Con modelos reportados para muestras de un trapiche de Santander (Peña, 2009), se obtuvo una diferencia de 0,98%. La Figura 4-7 muestra la relación entre los datos experimentales y los que predice la ecuación 4.8.

$$\mu = \exp(-0,4159 + 68,8592 * \frac{1}{T} - 0,0454 * C + 0,0013 * C^2) \quad (4.8)$$

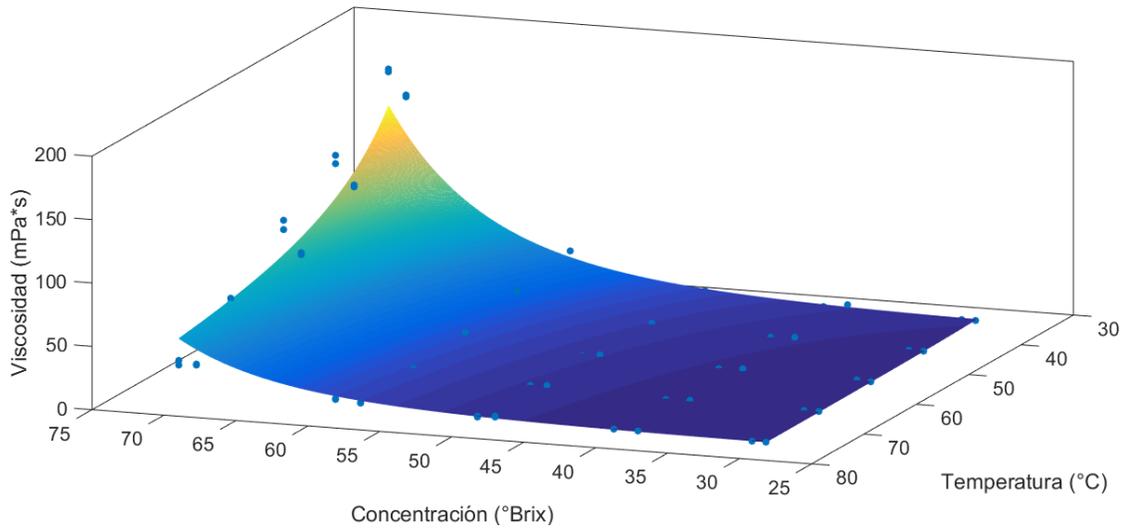


Figura 4-6 Viscosidad en función de la etapa de concentración y la temperatura

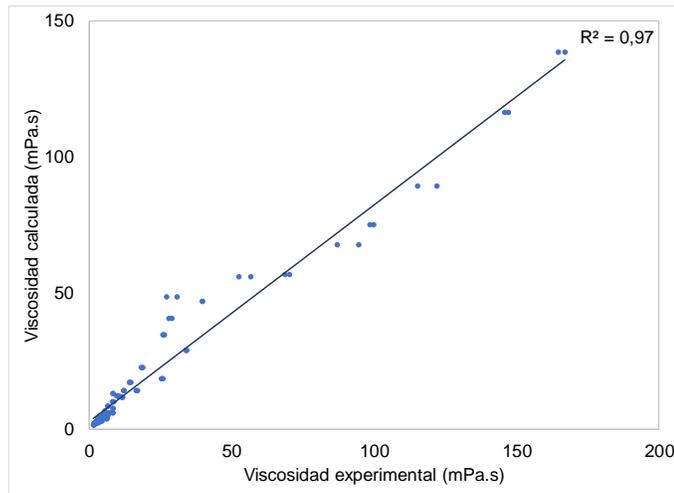


Figura 4-7 Comparación entre los valores experimentales y calculados a partir del modelo de predicción de viscosidad

4.2.2.Capacidad calorífica

La capacidad calorífica (c_p) en función de la temperatura y la concentración, no mostró diferencias entre los muestreos del trapiche del SENA. Por lo tanto, se presentarán los resultados del muestreo 1. Por otro lado, los valores de c_p del trapiche DV se mostrarán en el anexo A, pero en general, muestran el mismo comportamiento de los que aquí se

describen. La Tabla 4-3 muestra la c_p en función de la temperatura y la concentración para las muestras provenientes del trapiche SENA, en el muestreo 1.

Tabla 4-3 Capacidad calorífica de jugos y mieles de caña panelera del trapiche del SENA, en función de la temperatura

Muestra	Concentración (°Brix)	Temperatura (°C)				
		35	45	55	65	75
		Capacidad calorífica (J/gK)				
J1	30,97	$3,96 \pm 1 \times 10^{-1}$	$4,03 \pm 4 \times 10^{-2}$	$4,07 \pm 4 \times 10^{-2}$	$4,12 \pm 5 \times 10^{-2}$	$4,20 \pm 4 \times 10^{-2}$
J2	38,90	$3,63 \pm 2 \times 10^{-1}$	$3,61 \pm 2 \times 10^{-1}$	$3,65 \pm 2 \times 10^{-1}$	$3,73 \pm 2 \times 10^{-1}$	$3,84 \pm 2 \times 10^{-1}$
M1	48,81	$3,26 \pm 2 \times 10^{-1}$	$3,27 \pm 1 \times 10^{-1}$	$3,28 \pm 1 \times 10^{-1}$	$3,33 \pm 1 \times 10^{-1}$	$3,41 \pm 2 \times 10^{-1}$
M2	59,87	$2,85 \pm 1 \times 10^{-1}$	$2,87 \pm 1 \times 10^{-1}$	$2,91 \pm 8 \times 10^{-2}$	$2,98 \pm 7 \times 10^{-2}$	$3,09 \pm 7 \times 10^{-2}$
M3	70,81	$2,56 \pm 4 \times 10^{-2}$	$2,57 \pm 4 \times 10^{-2}$	$2,60 \pm 4 \times 10^{-2}$	$2,65 \pm 5 \times 10^{-2}$	$2,73 \pm 7 \times 10^{-2}$

El c_p de las muestras está en el intervalo de 2,56 y 4,20 J/gK. Se encontraron diferencias, estadísticamente significativas, entre las concentraciones y entre las temperaturas. La Figura 4-8 muestra el comportamiento del c_p en función de la temperatura. Se observa que, a mayor temperatura, el c_p aumenta, y a medida que, se incrementa la concentración de azúcares el valor del c_p disminuye. Estos comportamientos corresponden a lo esperado y son similares a lo reportado por otros investigadores (*W. Naranjo, 2009; Peña, 2009*).

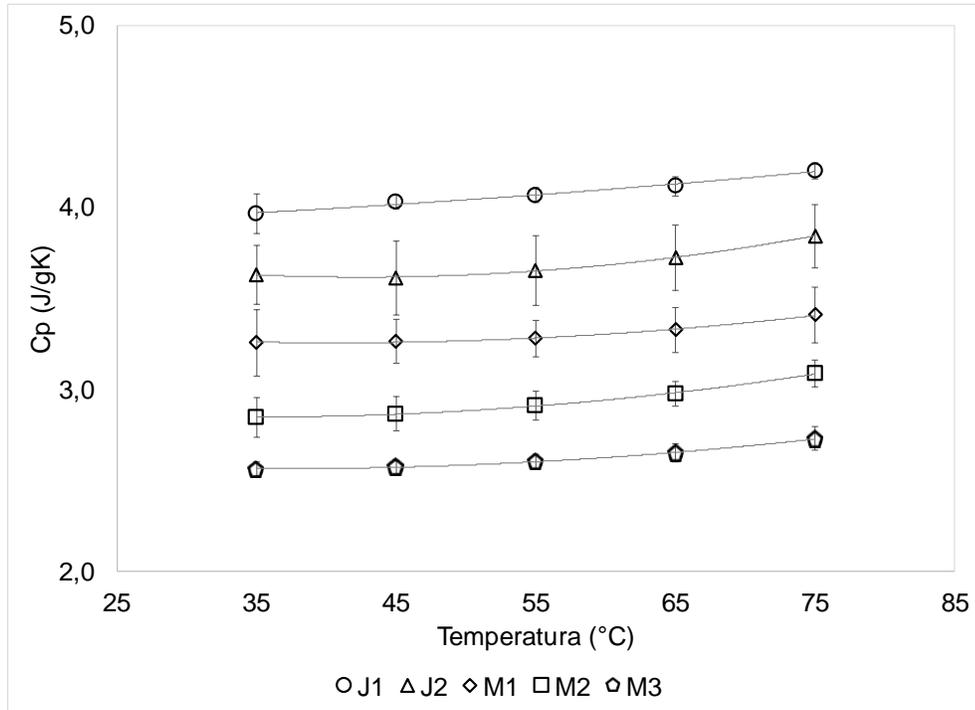


Figura 4-8 Capacidad calorífica de jugos y mieles del trapiche del SENA en función de la temperatura

- Análisis entre trapiches

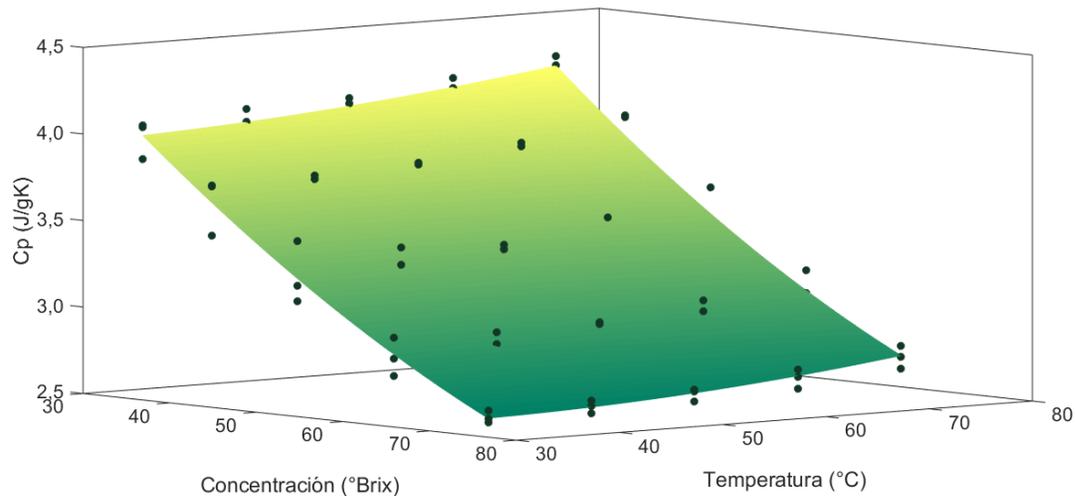
Los resultados de c_p mostraron diferencias estadísticamente significativas entre los trapiches evaluados, razón por la cual se ajustó un modelo de la capacidad calorífica en función de la temperatura y la concentración para cada trapiche. En la ecuación 4.9 se muestra el modelo para el trapiche del SENA y en la ecuación 4.10, el modelo para el trapiche DV. En ambos casos, el c_p es función una polinómica de segundo orden de la temperatura y una función lineal de la concentración. Estos modelos tienen un coeficiente de correlación (R^2) mayor a 0,94. Los datos experimentales y los calculados con los modelos se muestran en la Figura 4-10.

$$c_p = 5,215 - 9,0x10^{-3} * T + 1,3x10^{-4} * T^2 - 3,6x10^{-2} * C, R^2 = 0,98 \quad (4.9)$$

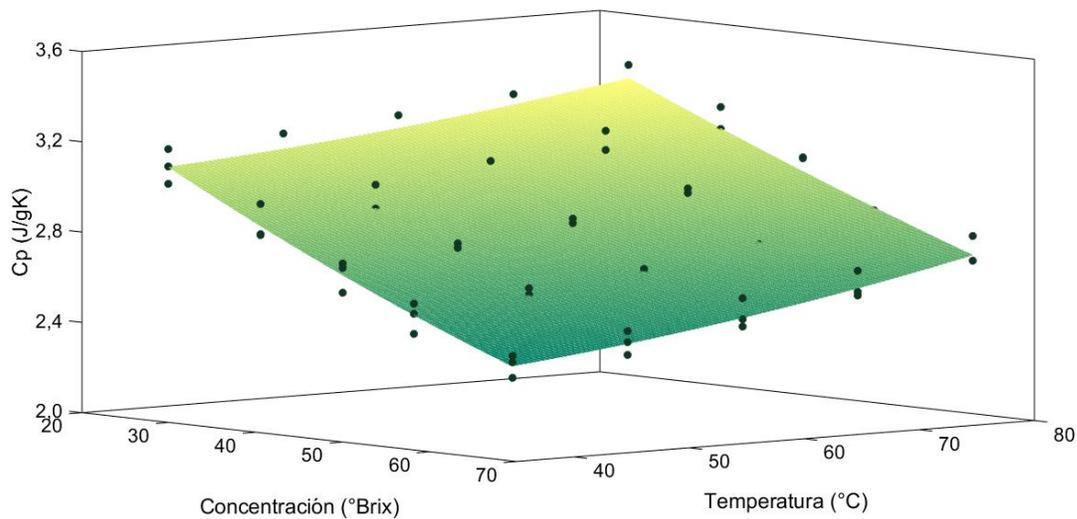
$$c_p = 3,591 - 3,1x10^{-3} * T + 9,4x10^{-5} * T^2 - 1,7x10^{-2} * C, R^2 = 0,97 \quad (4.10)$$

Donde c_p = capacidad calorífica (J/gK), T = temperatura (°C), C = concentración (°Brix).

Las superficies de respuesta de cada modelo se muestran en la Figura 4-9. Comparando los valores determinados experimentalmente con información reportada para jugos y mieles de un trapiche de santander (*Peña, 2009*), se encontraron diferencias para el SENA y DV de 0,27% y 0,29%, respectivamente. Asimismo, los valores de los dos trapiches se compararon con soluciones de sacarosa (*Asadi, 2006*) obteniendo diferencias del 0,16 y 0,13%, respectivamente.



a)



b)

Figura 4-9 Superficies de respuesta de los modelos de capacidad calorífica en función de la concentración y la temperatura a) trapiche del SENA b) trapiche DV.

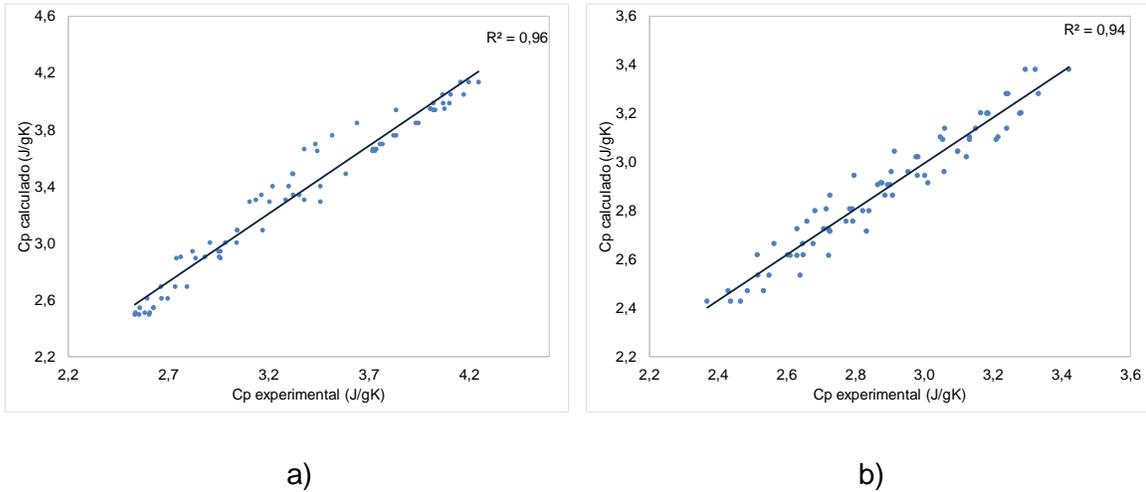


Figura 4-10 Comparación entre los valores experimentales y calculados a partir del modelo de predicción de capacidad calorífica en a) trapiche del SENA b) trapiche DV.

4.2.3. Conductividad térmica

Los resultados de conductividad térmica (λ) en función de la temperatura y la concentración, no presentaron diferencias entre los dos muestreos realizados en el trapiche del SENA. Por lo tanto, se presentarán los resultados del muestreo 1. Por otro lado, los valores de λ del trapiche DV se muestran en el anexo A, pero en general, tienen el mismo comportamiento de los que aquí se describen. La Tabla 4-44-4 presenta los valores de λ en función de la temperatura y la concentración.

Tabla 4-4 Conductividad térmica en función de la temperatura y concentración del trapiche del SENA

Muestra	Concentración (° Brix)	Temperatura (°C)				
		35	45	55	65	75
Conductividad térmica (W/mK)						
J1	30,97	$0,44 \pm 4 \times 10^{-2}$	$0,44 \pm 2 \times 10^{-2}$	$0,45 \pm 2 \times 10^{-2}$	$0,45 \pm 2 \times 10^{-2}$	$0,46 \pm 3 \times 10^{-2}$
J2	38,90	$0,39 \pm 5 \times 10^{-3}$	$0,40 \pm 7 \times 10^{-3}$	$0,41 \pm 9 \times 10^{-3}$	$0,42 \pm 9 \times 10^{-3}$	$0,42 \pm 7 \times 10^{-3}$
M1	48,81	$0,37 \pm 2 \times 10^{-3}$	$0,38 \pm 5 \times 10^{-3}$	$0,39 \pm 1 \times 10^{-2}$	$0,40 \pm 5 \times 10^{-3}$	$0,40 \pm 6 \times 10^{-3}$
M2	59,87	$0,32 \pm 2 \times 10^{-2}$	$0,32 \pm 2 \times 10^{-2}$	$0,32 \pm 1 \times 10^{-2}$	$0,32 \pm 1 \times 10^{-2}$	$0,32 \pm 8 \times 10^{-3}$
M3	70,81	$0,26 \pm 6 \times 10^{-3}$	$0,27 \pm 6 \times 10^{-3}$	$0,26 \pm 6 \times 10^{-3}$	$0,26 \pm 8 \times 10^{-4}$	$0,26 \pm 1 \times 10^{-3}$

Los valores obtenidos estuvieron dentro del intervalo de 0,26 y 0,46 W/mK y fueron similares a los reportados en la literatura (Jagannadha Rao, Das, & Das, 2009; W.

Naranjo, 2009). Se presentaron diferencias entre las concentraciones y la temperatura, según el análisis de Tukey. Por otro lado, la conductividad térmica de jugos y mieles de caña panelera tuvieron un comportamiento creciente en función de la temperatura y decreciente en función de la concentración, como puede observarse en la Figura 4-11. En general, la λ incrementa con el contenido de humedad y en alimentos suele estar entre la λ del agua (0,614W/mK) y el aire (0,026 W/mK), ya que estos son los componentes de mayor y menor conductividad térmica presentes en ellos (*Sahin & Sumnu, 2006*).

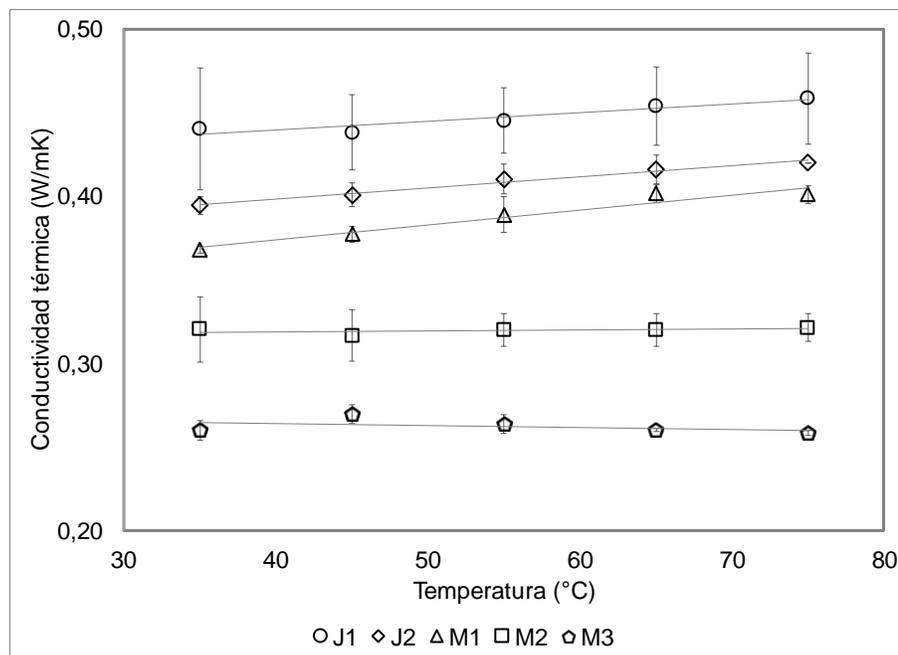


Figura 4-11 Conductividad térmica de jugos y mieles del trapiche del SENA, en función de la temperatura

- Análisis entre trapiches

Se encontraron diferencias, estadísticamente significativas, para los valores de la λ entre los trapiches estudiados, por lo que se describirá el modelo de la λ en función de la temperatura y la concentración para cada uno de ellos. En las ecuaciones 4.11 y 4.12 se presentan los modelos ajustados para el trapiche del SENA y DV, respectivamente. Estos se ajustaron a los datos experimentales con un coeficiente de correlación mayor a 0,91 y mostraron ser lineales en función de la temperatura y concentración. Este

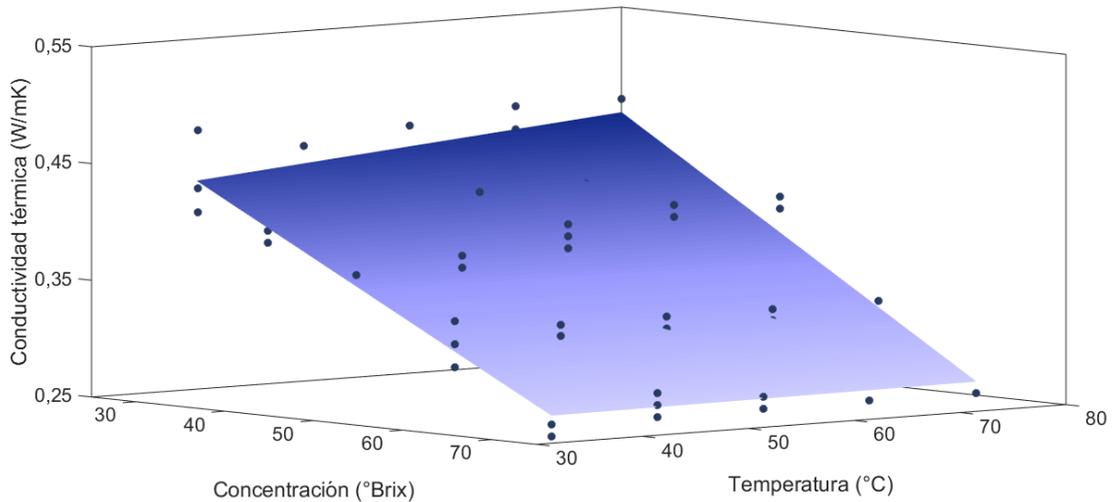
comportamiento es similar a lo reportado en jugo de caña de azúcar y jugos de alimentos (Alexandre et al., 2007; Gratão et al., 2004; Tiwari et al., 2004). Adicionalmente, para mayor practicidad se generó una ecuación general (4.13) para los dos trapiches, la cual se ajusta satisfactoriamente a los datos experimentales con un $R^2=0,90$.

$$\lambda = 0,571 + 4,0 \times 10^{-4} * T - 4,5 \times 10^{-3} * C \quad (4.11)$$

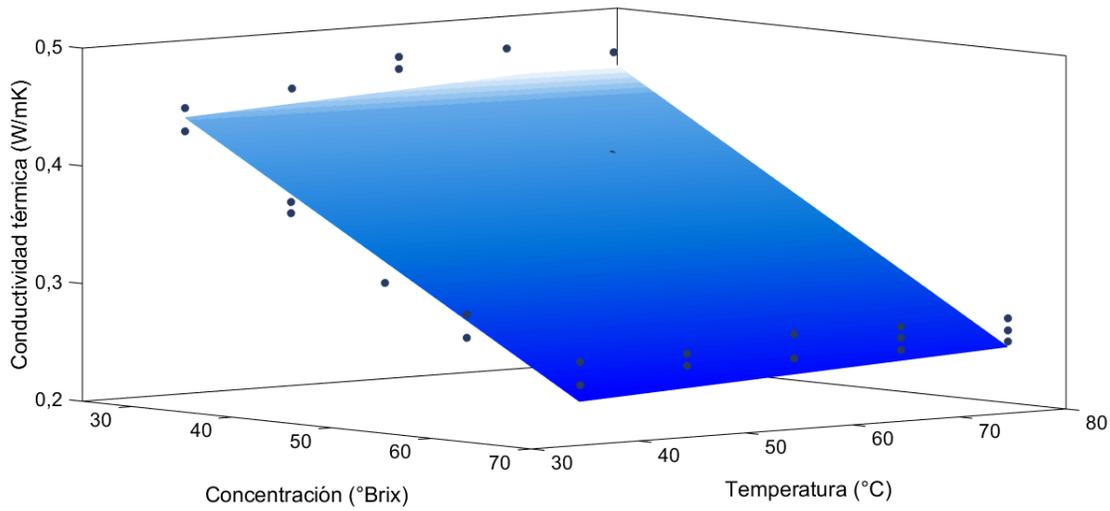
$$\lambda = 0,581 + 4,8 \times 10^{-4} * T - 5,2 \times 10^{-3} * C \quad (4.12)$$

$$\lambda = 0,571 + 4,4 \times 10^{-4} * T - 4,9 \times 10^{-3} * C \quad (4.13)$$

Las superficies de respuesta de estos modelos y los datos experimentales se muestran en la Figura 4-12. Por otro lado, la Figura 4-13 presenta la comparación entre los valores experimentales y los calculados con los modelos. Si los valores experimentales se comparan con los reportados para soluciones de sacarosa en función de la concentraciones y la temperaturas, se encuentran diferencias de 0,32 y 0,39% para los modelos del trapiche del SENA y DV, respectivamente. Así mismo, si se comparan con lo reportado para jugos de caña panelera en India (La Madrid et al., 2016; Tiwari et al., 2004), las diferencias son de 2,5%. En general, los datos se aproximan al intervalo de conductividad termica de las soluciones de sacarosa.

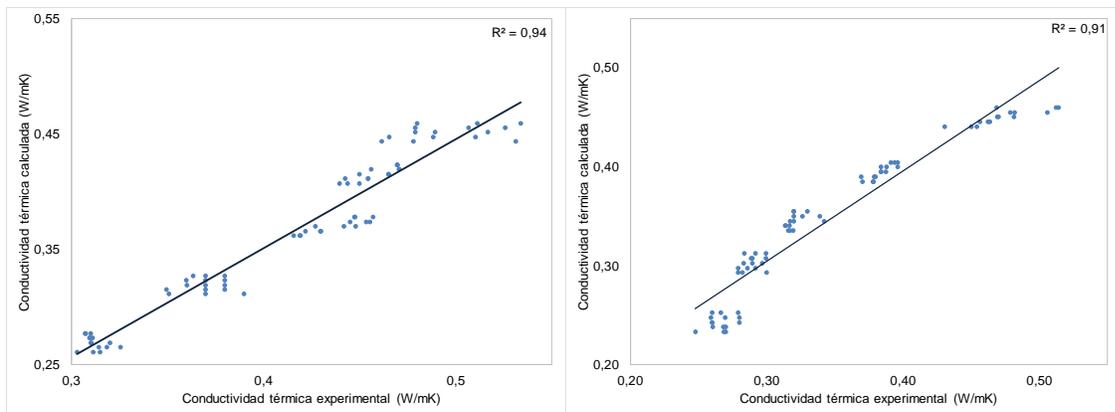


a)



b)

Figura 4-12 Superficies de respuesta de los modelos de conductividad térmica en función de la concentración y la temperatura a) trapiche del SENA b) trapiche DV.



a)

b)

Figura 4-13 Comparación entre los valores experimentales y calculados a partir del modelo de predicción de capacidad calorífica a) trapiche del SENA b) trapiche DV.

4.2.4. Difusividad térmica

La difusividad térmica de jugos y mieles de caña panelera del trapiche del SENA se presentan en la

Tabla 4-5. Se observó que la difusividad térmica fue menor en las concentraciones mayores. Este comportamiento se observa en la figura 4-14, donde se observa que las muestras J1 y J2, correspondientes a jugos, tienen mayor difusividad térmica que las mieles.

Los valores obtenidos son similares a lo reportado en la literatura (*W. Naranjo, 2009*), y menores a los reportados en soluciones de sacarosa a las mismas condiciones de concentración y temperatura (*Mohos, 2017*). Esto indica que las soluciones de sacarosa conducen mejor la energía térmica en relación con la capacidad de almacenamiento que los jugos y mieles de caña panelera.

Tabla 4-5 Difusividad térmica de jugos y mieles del trapiche del SENA, en función de la temperatura

Muestra (°C)	Temperatura (°C)				
	35	45	55	65	75
	Difusividad térmica x10 ⁷ (m ² /s)				
J1	1,01	1,02	1,02	1,02	1,01
J2	0,96	0,97	0,97	0,97	0,96
M1	0,91	0,92	0,92	0,91	0,90
M2	0,85	0,86	0,86	0,85	0,84
M3	0,79	0,80	0,80	0,80	0,78

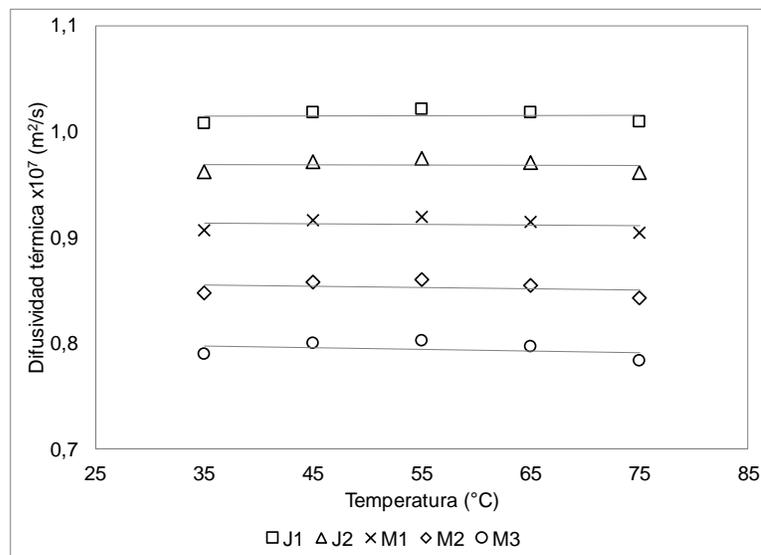


Figura 4-14 Difusividad térmica de jugos y mieles del trapiche del SENA, en función de la temperatura

5. Perfil fenólico y color de panela obtenida por diferentes procesos

En este capítulo se presentan la metodología y los resultados de la determinación del perfil de azúcares, fenoles y flavonoides totales, el perfil de compuestos fenólicos y el color en dilución de panela en bloque, mieles de caña panelera y panela granulada, obtenidas por el proceso tradicional en el trapiche del SENA, y para panela pulverizada obtenida por secado por aspersion, en diferentes tamaños de partícula. Esta determinación se hizo con el fin de identificar diferencias en las propiedades medidas en cada proceso de obtención.

5.1. Materiales y métodos

En esta fase del proyecto se evaluaron los siguientes tipos de muestras: panela en bloque, panela granulada, panela pulverizada y mieles de caña panelera. La panela en bloque (B) marca *El Mensaje*, proviene de un trapiche localizado en el departamento de Cundinamarca. La panela granulada (G) y las mieles de 50°Brix (M2) y 70°Brix (M3) se tomaron del trapiche del SENA, durante el mes de febrero, en el mismo lote de producción. Las mieles se tomaron de la etapa de concentración 2, en los puntos de muestreo M2 y M3, definidos en el capítulo 3. Finalmente, la panela pulverizada se obtuvo a partir de las mieles de M2 y M3 en un secador por aspersion LabPlant SD-06 (*Huddersfield, UK*), sin aditivos, con flujo co-corriente y atomización por boquilla a presión. La panela pulverizada a partir de M2 se denominó P50 y a partir de M3, P70. Así, en total se estudiaron seis muestras.

Las muestras granuladas (G) y pulverizada (P50 y P70) se separaron por tamaño de partícula en la serie de tamices que se presenta en la Tabla 5-1, empleando un agitador mecánico de tamices Retsch AS2 (*Alemania*) a una amplitud de 70, durante 30 minutos.

La cantidad retenida en cada tamiz fue pesada y registrada, y luego expresado como fracción (%) de la muestra original.

Tabla 5-1 Nomenclatura y tamaño de partícula de las muestras de panela granulada y pulverizada

Muestra	Malla (mm)	Nomenclatura	Fracción (%)
Panela granulada	> 1	G1	23,64
	0,8	G2	4,95
	0,6	G3	5,92
	0,5	G4	35,60
	<0,5	G5	29,48
Panela pulverizada a partir de mieles de 50°Brix	> 0,6	P50-1	36,14
	0,4	P50-2	9,46
	0,3	P50-3	12,20
	< 0,3	P50-4	41,72
Panela pulverizada a partir de mieles de 70°Brix	> 0,6	P70-1	41,99
	0,4	P70-2	26,89
	0,3	P70-3	23,43
	< 0,3	P70-4	7,22

5.1.1. Perfil de azúcares

Aproximadamente, 0,5g de muestra se diluyeron en una solución acuosa de acetonitrilo al 15%, en un balón aforado de 10ml. Se usó acetonitrilo grado HPLC de *Fisher Scientific (Loughborough, UK)*. Luego, se filtró un mililitro de la dilución, en una membrana hidrofílica PVDF Millex-HV 0,45 μm de poro (*Milipore, Bedford, MA, USA*). Para la calibración de la técnica de análisis por cromatografía, se prepararon soluciones stock de las siguientes concentraciones: 50mg/ml de sacarosa, 6mg/ml de glucosa y 6mg/ml fructosa. Todos los estándares usados fueron de *Sigma-Aldrich (Madrid, Spain)*. La determinación del perfil de azúcares fue realizada en un cromatógrafo líquido de alto desempeño (HPLC) Agilent 1100 (*Agilent Technologies, Palo Alto, CA, USA*), equipado con un detector de índice de refracción (RID). La separación se realizó usando la columna *Zorbax carbohydrate analysis* (4,6 x 250mm) con un diámetro de partícula de 5 μm . Los parámetros de operación durante el análisis fueron 30°C, fase móvil 75% de

acetonitrilo/agua con flujo de 1,4 mL/min y el volumen de inyección de las muestras fue de 20 μ L.

Los picos cromatográficos de las muestras fueron identificados comparando los tiempos de retención de los estándares. La cuantificación fue llevada a cabo por una calibración de las áreas y los resultados se expresaron en g de carbohidrato respectivo / 100g de muestra en base seca.

5.1.2. Fenoles totales

Los fenoles totales fueron determinados espectrofotométricamente de acuerdo al método de Folin-Ciocalteu descrito por *Kuś, Jerković, Tuberoso, Marijanović, & Congiu, (2014)*. Se tomaron 0,5g de muestra y se diluyeron en 10mL de agua destilada. Luego, se tomaron 100 μ L de esta dilución y se agregaron 0,5mL de reactivo Folin-Ciocalteu *Scharlau (Sentmenat, Spain)*. Después de 5 minutos, se adicionaron 3mL de una solución acuosa al 20% de Na_2CO_3 (w/v), se agitó y se aforó con agua en un balón de 10mL. Después de dos horas a temperatura ambiente, se leyó la absorbancia a 725nm, con respecto a un blanco, en una celda de cuarzo de 10mm en un espectrofotómetro Agilent Technologies Cary 8454 UV-vis (*Santa Clara, CA, USA*). El contenido de fenoles totales se calculó usando una curva de calibración preparada con soluciones estándar de ácido gálico (10 – 500 mg/L) y se expresó en mg de ácido gálico equivalente (GAE) / 100g de muestra en base seca. El procedimiento se realizó por cuadruplicado.

5.1.3. Flavonoides totales

Los flavonoides totales se determinaron espectrofotométricamente de acuerdo con la metodología descrita por *Habib, Al Meqbali, Kamal, Souka, & Ibrahim, 2014*. Aproximadamente, 0,5g de muestra se diluyeron en 10mL de agua destilada. Se adicionaron 200 μ L de esta dilución a un balón de 5mL. Luego, se agregaron 2mL de agua destilada y 0,15mL de NaNO_2 (5g/100mL). Después de 5 minutos, se agregaron 0,15mL AlCl_3 (10g/100mL) y se dejó reaccionar por 6 minutos. Enseguida, se agregó 1mL de NaOH 1M, se agitó y se completó a volumen con agua destilada. La absorbancia de la mezcla se midió en un espectrofotómetro Agilent Technologies Cary 8454 UV-vis (*Santa Clara, CA, USA*) a 510nm, tomando como referencia un blanco constituido por los reactivos sin muestra. El contenido total de flavonoides fue calculado usando una curva

de calibración de soluciones estándar de catequina (20 – 200mg/L) y los resultados se expresaron como mg de catequina equivalente (CE) / 100g de muestra en base seca. El procedimiento fue hecho por cuadruplicado.

5.1.4. Perfil de compuestos fenólicos

- Extracción de los compuestos fenólicos

Para la medición de compuestos fenólicos, se tomaron 2g de muestra y se diluyeron en agua desionizada en un balón de 10mL. La mezcla fue homogeneizada y acidificada a pH 2 con HCL 37%, usando un pH-metro Fisher Scientific (*Loughborough, UK*). Luego, se tomaron 500 μ L de esta dilución y se mezclaron con 500 μ L de dietil éter grado HPLC Fisher Scientific (*Loughborough, UK*), en un tubo eppendorf. La mezcla fue homogenizada en un vortex, sonicada por 3 minutos y centrifugada por 5 minutos a 14rpm. Se tomó el sobrenadante y el residuo se sometió a cinco extracciones más. Los sobrenadantes se mezclaron y se diluyeron en 100 μ L de metanol grado HPLC Fisher Scientific (*Loughborough, UK*). Después, se filtró a través de una membrana hidrofílica de PVDF Millex-HV de 0,45 μ m de poro (*Milipore, Bedford, MA, USA*). Los extractos obtenidos se usaron para la determinación de compuestos fenólicos individuales por UHPLC-DAD.

- Análisis de los compuestos fenólicos por UHPLC-DAD

Los análisis se realizaron en un cromatógrafo Agilent 1260 (*Agilent Technologies, Palo Alto, CA, USA*) equipado con un detector de arreglo de diodos, que fue ajustado para escanear desde 200 a 770 nm. Se utilizó la columna C18 Eclipse Plus 120 (1,8 μ m, 50 x 2,5mm). Los solventes usados fueron 0,01% de ácido fórmico en agua, con una velocidad de flujo de 0,8mL/min. La temperatura de la columna fue ajustada a 25°C.

Los compuestos fenólicos fueron identificados por tiempo de retención y las características del espectro UV-Vis, usando los estándares correspondientes. La cuantificación fue llevada a cabo por una calibración de las áreas de los picos cromatográficos por detección DAD a 280nm. Las curvas de calibración fueron hechas de

los siguientes estándares: ácido protocatequico, vainillico, clorogénico, siríngico, p-cumárico, ferúlico.

Cada muestra fue analizada por cuadruplicado con un volumen de inyección de 0,2µL. Los resultados fueron expresados como µg de compuesto fenólico / g de muestra en base seca.

5.1.5. Color

El color fue medido por colorimetría triestímulo basado en el espectro de reflectancia. Aproximadamente, 0,5g de muestra se diluyeron con agua destilada, en un balón de 10mL. La muestra fue homogeneizada y filtrada por medio de una membrana hidrofílica de PVDF Millex-HV de 0,45 µm de poro (*Milipore, Bedford, MA, USA*). La absorbancia fue medida en la región visible del espectro ($\lambda=380-770\text{nm}$), usando el iluminante CIE D₆₅ en un espectrofotómetro Agilent Technologies Cary 8454 UV-vis (*Santa Clara, CA, USA*). Los siguientes atributos del espacio CIELAB: L* (claridad), a* y b* (dos coordenadas de color) y h_{ab} (hue angle, por sus siglas en inglés), fueron evaluados usando CromaLab® software (*Herdía, Álvarez, González-Miret, & Ramírez, 2004*).

5.1.6. Análisis estadístico

Se utilizó un análisis de varianza ANOVA y Tukey para determinar diferencias, con un valor de significancia de $p<0,05$. El análisis estadístico se realizó en el software R-CRAN versión 3.4.1, 2017 (the R Foundation for Statistical Computing).

5.2. Resultados y discusión

5.2.1. Perfil de azúcares

El perfil de azúcares de las muestras analizadas se muestra en la tabla 5-2. La sacarosa es el azúcar predominante, seguido por glucosa y fructosa. Este comportamiento fue similar a lo reportado en panela por otros autores (*Guerra & Mujica, 2010; Segui et al., 2015*). La concentración de sacarosa no presentó diferencias entre mieles, panela en bloque y los diferentes tamaños de partícula de panela granulada y pulverizada, como se muestra en la figura 5-1a. Sin embargo, la concentración de glucosa (figura 5-1b) mostró

diferencias significativas entre las muestras de panela G y P70. No hubo diferencias en las muestras M2 y M3, y P50. En las muestras de panela G y P70, los menores tamaños de partícula tuvieron la menor concentración de glucosa.

Por otro lado, la concentración de fructosa se muestra en la figura 5-1c. En este componente hubo diferencias entre los tamaños de partícula de las muestras G y P50, mientras que no hubo entre M2 y M3, y los tamaños de partícula de P70. La fructosa tuvo un comportamiento similar a la glucosa, pues la concentración fue menor en las muestras de menor tamaño.

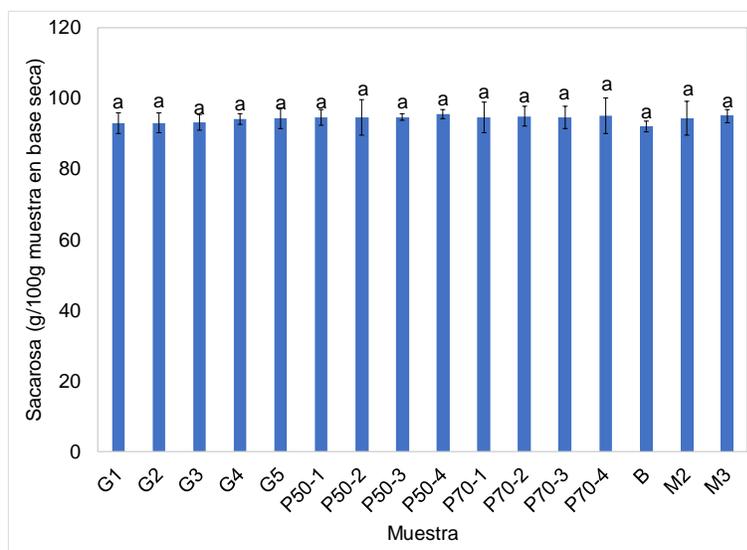
En general, el perfil de azúcares de panela obtenido por diferentes tipos de procesamiento y mieles de caña panelera no tienen diferencias en la concentración de sacarosa, pero sí en las concentraciones de glucosa y fructosa. La concentración de azúcares reductores en las mieles, P50 y P70 fue menor en G y B, lo cual puede deberse al tipo de proceso, pues G y B tienen mayor tiempo de procesamiento a temperaturas altas, por lo que se pueden generar reacciones de descomposición de la sacarosa, como hidrólisis, aumentando la concentración de reductores (*Guerra & Mujica, 2010; Instituto Nacional de Salud, 2012; Ioannou et al., 2017*).

En cuanto a normatividad, la NTC 1311 define los porcentajes máximos de sacarosa y azúcares reductores que debe tener la panela granulada y en bloque. Para la panela granulada el contenido de sacarosa debe ser máximo 93% y de azúcares reductores mínimo 5,0%. Para panela en bloque máximo 83% de sacarosa y mínimo 5,5% de azúcares reductores (*ICONTEC, 2009*). Comparando estos valores con los resultados del perfil de azúcares de panela granulada y pulverizada, las muestras G, P50 y P70 cumplen con las especificaciones de sacarosa, ya que la concentración está entre el intervalo de 81,29 y 88,22% de sacarosa en base húmeda. En cuanto a los azúcares reductores, el grupo de muestras G y P70-3 cumplen con los valores de la norma, pues se encuentran entre 6,2 y 5,0% en base húmeda, mientras que las muestras P50 y P70, no cumplen con el porcentaje mínimo de azúcares reductores, pues su intervalo se encuentra entre 4,0 y 4,9% de azúcares reductores en base húmeda. Adicionalmente, la panela en bloque cumple ambas especificaciones de azúcares, con valores en base húmeda de 78,89% de sacarosa y 6,9% de azúcares reductores.

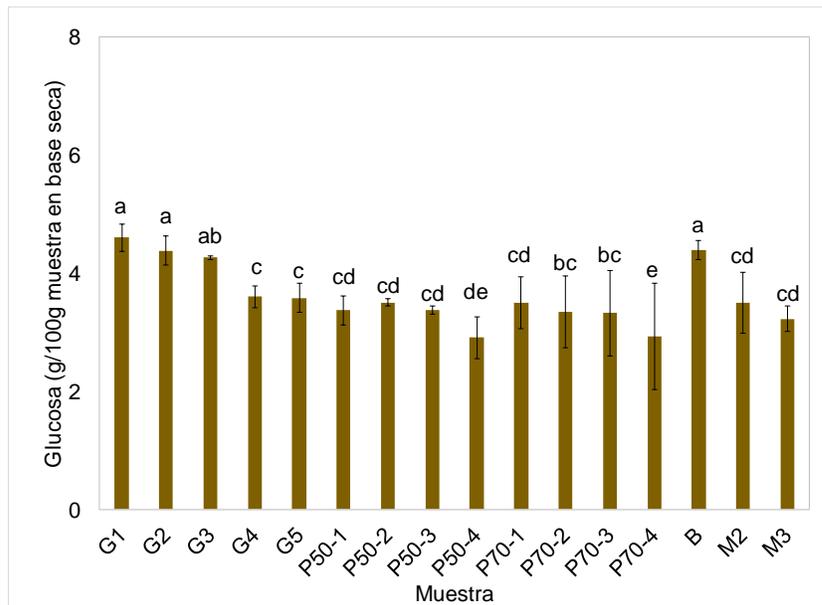
Tabla 5-2 Perfil de azúcares, fenoles y flavonoides totales en panela obtenida por diferentes procesos, en base seca.

Muestra	Sacarosa (g / 100g producto)	Glucosa (g / 100g producto)	Fructosa (g / 100g producto)	Fenoles totales (mg GAE/100g producto)	Flavonoides totales (mg CE/100g producto)
G1	92,90±2,94 ^a	4,60±0,23 ^a	3,70±0,19 ^a	5,77±0,10 ^{ab}	2,84±0,14 ^{cde}
G2	92,96±2,89 ^a	4,38±0,24 ^a	2,65±0,06 ^b	5,87±0,20 ^a	3,04±0,34 ^{bcd}
G3	93,08±2,18 ^a	4,26±0,03 ^{ab}	2,66±0,17 ^b	5,88±0,17 ^a	2,98±0,07 ^{bcd}
G4	94,05±1,45 ^a	3,60±0,19 ^c	2,35±0,04 ^{bc}	5,36±0,18 ^{bc}	2,92±0,13 ^{bcd}
G5	94,24±2,90 ^a	3,58±0,24 ^c	2,17±0,11 ^{cd}	5,06±0,21 ^{cd}	3,75±0,13 ^a
P50-1	94,53±2,21 ^a	3,37±0,25 ^{cd}	2,10±0,15 ^{cd}	3,95±0,21 ^h	2,46±0,20 ^{ef}
P50-2	94,56±5,00 ^a	3,50±0,06 ^{cd}	1,94±0,14 ^{cde}	4,38±0,13 ^{fg}	2,66±0,19 ^{def}
P50-3	94,63±0,95 ^a	3,37±0,07 ^{cd}	1,98±0,11 ^{cde}	4,61±0,13 ^{efg}	2,88±0,14 ^{bcd}
P50-4	95,48±1,38 ^a	2,91±0,35 ^{de}	1,62±0,14 ^e	4,50±0,21 ^{fg}	3,22±0,18 ^{bc}
P70-1	94,60±4,33 ^a	3,50±0,44 ^{cd}	1,91±0,16 ^{cde}	4,93±0,05 ^{de}	3,30±0,08 ^b
P70-2	94,85±2,86 ^a	3,35±0,61 ^{bc}	1,80±0,25 ^{de}	4,72±0,05 ^{def}	2,64±0,20 ^{def}
P70-3	94,60±3,19 ^a	3,33±0,72 ^{bc}	2,08±0,19 ^{cde}	4,55±0,03 ^{efg}	2,31±0,18 ^{fg}
P70-4	94,98±5,00 ^a	2,93±0,90 ^e	2,10±0,14 ^{cd}	4,72±0,16 ^{def}	2,37±0,14 ^{fg}
B	91,94±1,49 ^a	4,39±0,17 ^a	3,67±0,13 ^a	4,30±0,12 ^{gh}	2,03±0,21 ^g
M2	94,36±4,83 ^a	3,50±0,52 ^{cd}	2,14±0,18 ^{cd}	5,68±0,09 ^{ab}	3,16±0,12 ^{bc}
M3	94,89±1,79 ^a	3,23±0,21 ^{cd}	1,88±0,19 ^{cde}	5,62±0,25 ^{ab}	2,69±0,10 ^{def}

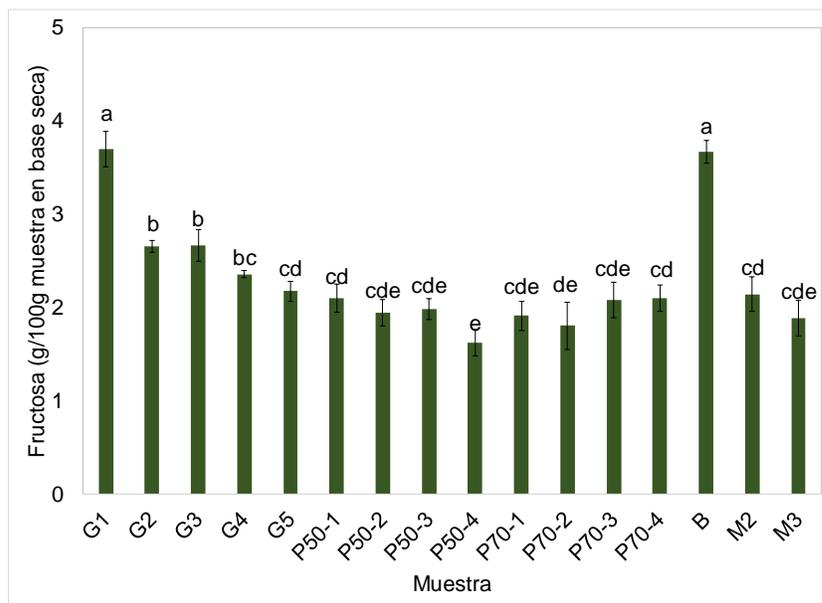
Letras iguales en la misma columna indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$).



a)



b)



c)

Figura 5-1 Perfil de azúcares de panela obtenida por diferentes procesos y mieles de caña panelera, a) sacarosa, b) glucosa, c) fructosa.

5.2.2. Fenoles totales

La tabla 5-2 muestra los fenoles totales de panela obtenida por diferentes tipos de procesamiento y mieles de caña panelera. El mayor contenido de fenoles totales fue obtenido por las muestras G1, G2, G3 y las mieles M2 y M3. El menor contenido fue observado en las muestras P50-1 y B. La figura 5-2 muestra el comportamiento de fenoles en las muestras analizadas.

En las mieles no hubo diferencias y la panela en bloque mostró tener un contenido similar al grupo de muestras P50 y P70-3. En los diferentes tamaños de G, se encontraron diferencias significativas, pues en los tamaños de partícula menores, G4 y G5, se observó un menor contenido de fenoles que en las demás. En el grupo de muestras P50 se observó que el tamaño de partícula mayor tuvo la menor concentración de fenoles, mientras que en las demás no hubo diferencias. Finalmente, no hubo diferencias en los tamaños de partícula del grupo de P70.

En general, se observa que durante el proceso de secado por aspersion los fenoles totales disminuyen en comparación con el contenido en las mieles, que son la materia prima. Esto puede deberse a que en los procesos térmicos con mayores tiempos de contacto se extraen fenoles de las células remanentes provenientes de las fuentes vegetales (*Segui et al., 2015*). Por ejemplo, el proceso de la panela G, conlleva más tiempo a altas temperaturas, y los compuestos fenólicos tienen valores medios mayores o similares a los de las mieles, ya que al intensificar el tratamiento térmico pueden originarse nuevos compuestos (*Segui et al., 2015*). Así, la destrucción de paredes celulares vegetales o compartimientos sub-celulares libera componentes que incrementan el contenido de fenoles. Además, durante el calentamiento, se puede descomponer la quercetina, produciendo ácidos como el protocatequico (*Yamaguchi et al., 2001*).

Por otro lado, el contenido fenólico en base húmeda de todas las muestras está entre 2,41 y 5,23 mgGAE/g de producto. Estos valores son mayores a lo reportado en muestras de panela hecha en España (1,00 – 2,62 mg GAE/g de producto) (*Harish Nayaka et al., 2009*), probablemente por las condiciones agroclimáticas durante el cultivo de la caña de azúcar (*García et al., 2007; Prada Forero et al., 2015*). Adicionalmente, los resultados fueron 121 y 10 veces mayores que el contenido de fenoles en azúcar blanca

y azúcar morena, respectivamente, debido al mínimo procesamiento químico durante la fabricación de la panela (*Harish Nayaka et al., 2009*).

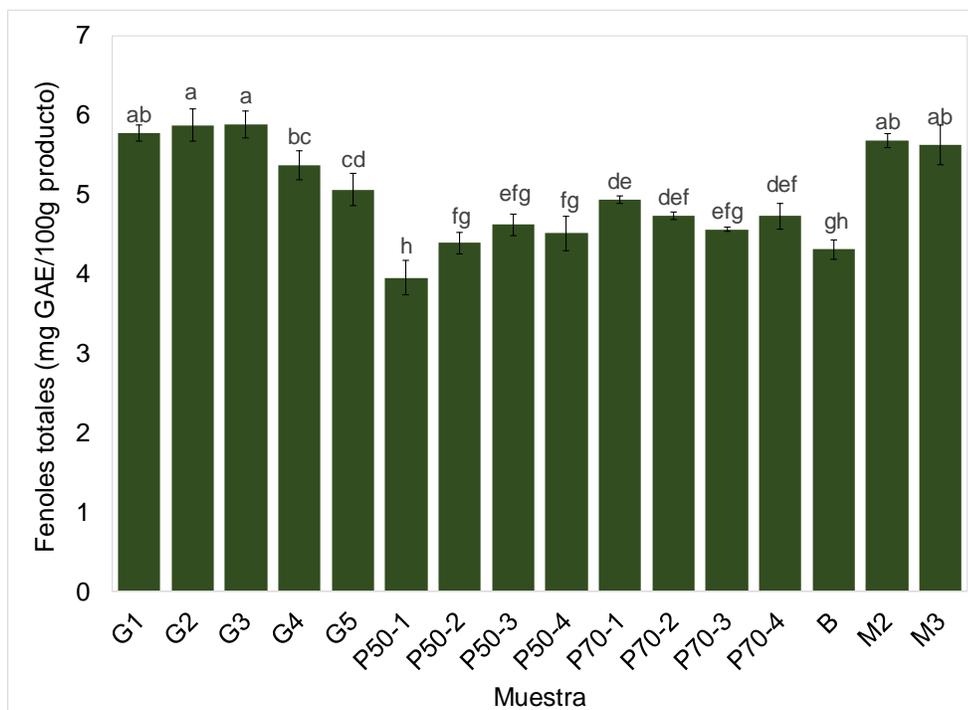


Figura 5-2 Fenoles totales de panela obtenida por diferentes tipos de proceso y mieles de caña panelera.

5.2.3. Flavonoides totales

Los resultados del contenido de flavonoides totales en base seca se muestran en la tabla 5-2 y la figura 5-3. El mayor contenido se observó en la muestra G5, mientras que el menor en las muestras P70-3, P70-4 y B. Las mieles tuvieron diferencias entre ellas, siendo M2 mayor que M3. Por otro lado, el grupo de las muestras G, tuvo concentraciones similares, a excepción de la muestra G5. En el grupo P50 se observó que, a menor tamaño de partícula, aumenta el contenido de flavonoides, lo que puede influir en el comportamiento de los fenoles totales, ya que tienen el mismo comportamiento. Por el contrario, el grupo P70 tuvo la mayor concentración para el tamaño de partícula más grande y en los otros tamaños, las concentraciones fueron similares.

El contenido de flavonoides totales en base húmeda estuvo en el intervalo de 1,34 – 3,32 g CE/g de producto. Estos valores concuerdan con lo reportado en la literatura, que reporta entre 1,59 y 6,15mg QE/g de producto (Segui et al., 2015). Adicionalmente, las muestras de panela analizadas tuvieron mayor concentración de flavonoides totales que el azúcar blanco y azúcar morena, 0 y 0,38 µg QE/g de producto, respectivamente (Segui et al., 2015). Debido al mínimo proceso químico de la panela, que permite retener más fitoquímicos, y minerales (Harish Nayaka et al., 2009).

En las muestras analizadas se encontraron diferencias según el proceso de obtención de panela e incluso entre las mieles de caña a diferente concentración. Esto puede deberse a que los flavonoides están sujetos a reacciones de oxidación enzimática que generan sustancias coloreadas, usualmente durante las etapas tempranas del procesamiento (Riffer, 1988). Además, durante tratamientos térmicos suelen liberarse tanto fenoles como flavonoides, generando las variaciones observadas entre las muestras analizadas (Kim, Kang, & Gweon, 2013; Yamaguchi et al., 2001).

Por lo general, los fenoles y flavonoides tienen características fuertemente oxidativas y en algunos casos el contenido de estos se convierte en compuestos bioactivos, que constituyen alimentos funcionales (Kim et al., 2013). La actividad antioxidante de la panela es comparable con frutas como la fresa, piña, naranja, mora y frambuesa, y es aún mayor que otras como la manzana, banana, mango y albaricoque y algunos vegetales (Segui et al., 2015).

El interés por flavonoides y fenoles ha incrementado, debido a su papel en la prevención de enfermedades, como complicaciones cardiovasculares, diabetes, úlceras y cáncer (Harish Nayaka et al., 2009). La panela, obtenida bajo cualquier proceso de los estudiados, tiene este tipo de compuestos lo que puede explicar los efectos positivos en la salud que se han publicado como actividad citoprotectora, el uso para el tratamiento de garganta e infecciones en los pulmones, entre otros (Harish Nayaka et al., 2009).

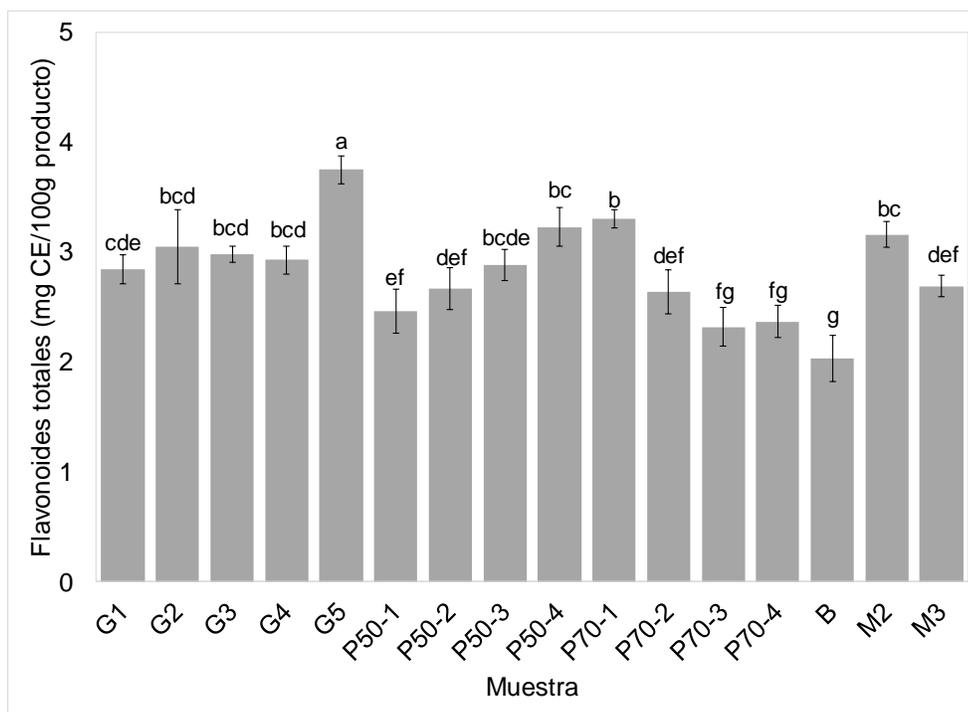


Figura 5-3 Flavonoides totales de panela obtenida por diferentes tipos de proceso y mieles de caña panelera.

5.2.4. Perfil de compuestos fenólicos

El perfil de compuestos fenólicos, en base seca, se presenta en la tabla 5-3. Los resultados evidencian la presencia de los ácidos clorogénico, siríngico, p-cumárico, vainílico, ferúlico y protocatéquico en panela. Los resultados coinciden con lo reportado por otros investigadores (*Harish Nayaka et al., 2009; Jaffé, 2015*). Los ácidos que presentaron mayor concentración en todas las muestras fueron el clorogénico y el siríngico, seguidos por p-cumárico, vainílico, ferúlico y protocatéquico. Estos se muestran en la figura 5-4.

En el caso del ácido clorogénico se observa una disminución de la concentración en todas las muestras con relación a la miel M2. Esto puede deberse a que este ácido se usa en reacciones enzimáticas con polifenol oxidasa (*Yamaguchi et al., 2001*). Por otro lado, el ácido ferúlico tuvo un incremento entre M2 y M3, debido a que en etapas tempranas del tratamiento térmico ocurre liberación enzimática (*Inns, Buggay, Booer, Nursten, & Ames, 2007*) y/o se extrae del rompimiento de enlaces con otras moléculas (*Maillard & Berset, 1995*). En las muestras G y P70 disminuye la concentración con

respecto a M3. Debido a que, en etapas siguientes del calentamiento, el ácido ferúlico se afecta por su inestabilidad térmica (*Inns et al., 2007; Maillard & Berset, 1995*).

En cuanto a las muestras, la miel de 50°Brix, M2, tuvo la mayor concentración del total de estos compuestos fenólicos, 9,60 µg/g de producto en base seca, mientras que P70-4 tuvo la menor concentración del total de fenoles medidos, 6,68 µg/g de producto en base seca.

En general, los resultados mostraron tener variaciones en la cantidad total de compuestos fenólicos en panela obtenida por diferentes procesos: granulación manual y secado por aspersión. Los diferentes tamaños de partícula de panela G tuvieron la media de concentración de fenoles totales más alta, entre 8,98 – 7,21 µg de fenoles medidos/g de producto en base seca. Este proceso de granulación manual conlleva más tiempo de tratamiento, por lo que aumenta la concentración de los compuestos fenólicos, ya que se generan más compuestos, debido a la destrucción térmica (*Yamaguchi et al., 2001*) y reacciones químicas influenciadas por la temperatura (*Segui et al., 2015; Yamaguchi et al., 2001*).

El proceso de secado por aspersión tuvo menores promedios totales de estos compuestos fenólicos que G, e incluso menor a las mieles M2 y M3, que se usaron como materia prima del proceso. En el caso de P50, hubo una disminución de 1,78 µg de fenoles medidos/g de producto en base seca, al compararlos con M2. Mientras que P70 disminuyó 1,99 µg de fenoles medidos/g de producto en base seca, al compararlos con M3. Esto demuestra que los compuestos fenólicos se degradan menos en el proceso de secado por aspersión, cuando se emplean mieles de 50°Brix que usando mieles de 70°Brix.

Tabla 5-3 Perfil fenólico en base seca de panela obtenida por diferentes procesos y mieles de caña panelera

Muestra	Ácido protocatéuico	Ácido vainílico	Ácido clorogénico	Ácido sirínico	Ácido p-cumárico	Ácido Ferúlico
	µg de fenol / g de producto en base seca					
G1	0,54±5x10 ⁻² b	0,97±9x10 ⁻² bc	2,68±1,2x10 ⁻¹ bcd	2,56±4x10 ⁻² bc	1,31±3x10 ⁻² a	0,81±1x10 ⁻² bcde
G2	0,54±3x10 ⁻² b	0,97±8x10 ⁻² bc	2,62±1,2 x10 ⁻¹ bcd	2,61±5x10 ⁻² ab	1,30±3x10 ⁻² a	0,95±1x10 ⁻¹ bc
G3	0,49±3x10 ⁻² b	0,93±2x10 ⁻² cd	2,80±6x10 ⁻² bcd	2,57±4x10 ⁻² abc	1,35±1x10 ⁻² a	0,76±1x10 ⁻¹ bcde
G4	0,45±5x10 ⁻² b	0,80±1x10 ⁻² def	2,48±7x10 ⁻² cde	2,27±1x10 ⁻¹ d	0,71±4x10 ⁻² e	0,50±4x10 ⁻² e
G5	0,49±2x10 ⁻² b	0,86±3x10 ⁻² cdef	2,48±1,0x10 ⁻¹ de	2,35±1x10 ⁻¹ cd	0,69±5x10 ⁻² e	0,66±7x10 ⁻² cde
P50-1	0,39±3x10 ⁻² b	0,85±4x10 ⁻² cdef	3,09±1,2x10 ⁻¹ b	1,76±3x10 ⁻² e	0,99±5x10 ⁻² bcd	0,94±8x10 ⁻² bc
P50-2	0,36±1x10 ⁻² b	0,83±2x10 ⁻² cdef	3,09±1,4x10 ⁻¹ b	1,73±7x10 ⁻² e	0,94±5x10 ⁻² bcd	0,86±4x10 ⁻² bcde
P50-3	0,41±6x10 ⁻² b	0,82±4x10 ⁻² def	2,94±7 x10 ⁻² bc	1,77±4x10 ⁻² e	0,90±6x10 ⁻² d	0,80±6x10 ⁻² bcde
P50-4	0,38±1,0x10 ⁻¹ b	0,83±3x10 ⁻² def	2,85±8x10 ⁻² bcd	1,77±7x10 ⁻² e	1,07±3x10 ⁻² bcd	0,91±1x10 ⁻¹ bcd
P70-1	0,46±8x10 ⁻² b	0,77±3x10 ⁻² ef	2,57±7x10 ⁻² cd	1,58±5x10 ⁻² ef	1,01±4x10 ⁻² bcd	0,791±9x10 ⁻² bcde
P70-2	0,43±1,5x10 ⁻¹ b	0,80±9x10 ⁻² def	2,52±4x10 ⁻² cde	1,58±2x10 ⁻² ef	0,99±4x10 ⁻² bcd	0,73±8x10 ⁻² bcde
P70-3	0,42±1,2x10 ⁻¹ b	0,81±3x10 ⁻² def	2,66±2,7x10 ⁻¹ bcd	1,60±5x10 ⁻² ef	1,01±7x10 ⁻² bcd	0,77±9x10 ⁻² bcde
P70-4	0,43±9,9x10 ⁻² b	0,71±4x10 ⁻² f	2,62±8x10 ⁻² bcd	1,09±5x10 ⁻² g	0,95±2x10 ⁻² bcd	0,89±7x10 ⁻² bcd
B	0,49±2x10 ⁻² b	0,89±3x10 ⁻² cde	2,08±1,1x10 ⁻¹ e	2,81±4x10 ⁻² a	0,93±5x10 ⁻² cd	0,60±1x10 ⁻³ de
M2	0,95±1,9x10 ⁻¹ a	1,45±7x10 ⁻² a	3,82±5x10 ⁻² a	1,43±1x10 ⁻¹ f	1,03±4x10 ⁻² bc	0,93±1x10 ⁻¹ b
M3	0,79±1,8x10 ⁻¹ a	1,09±6x10 ⁻² b	2,83±3x10 ⁻² bcd	1,79±3x10 ⁻² e	1,01±4x10 ⁻² bc	1,51±7x10 ⁻² a

Letras iguales en la misma columna indican que no hay diferencias significativas (p>0,05).

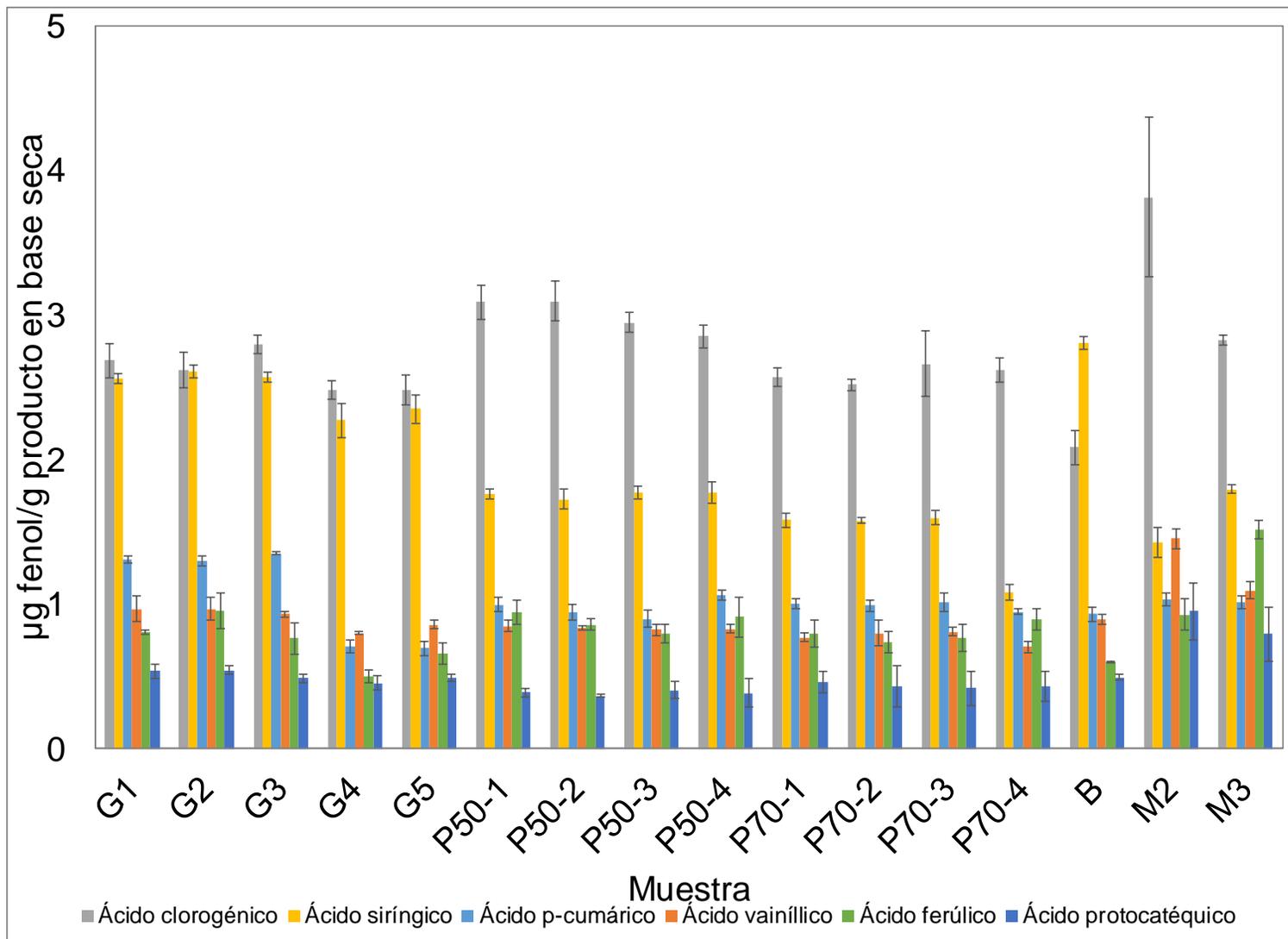


Figura 5-4 Compuestos fenólicos identificados en panela obtenida por diferentes procesos y mieles de caña panelera

5.2.5. Color

Los parámetros de color en dilución en el espacio CIELAB (figura 5-5) de las muestras de panela y miel estudiadas se encuentran en la tabla 5-4. En el parámetro de luminosidad (L) se obtuvieron valores positivos y se encontraron diferencias significativas entre las muestras. Las muestras M2, G y B fueron más oscuras que las muestras P50, P70 y M3, lo cual se presenta en la figura 5-6. El parámetro *a* tuvo valores positivos en las muestras G y B, lo cual indica que tienden a tonos rojos, y valores negativos en las muestras P50, P70, M2 y M3, distribuyéndose entre el punto central y los tonos verdes. El parámetro *b* tuvo diferencias significativas entre las muestras. Sus valores fueron positivos, lo que indica tonos amarillos. Los valores de cada parámetro tuvieron un comportamiento similar a lo reportado por *Guerra & Mujica, 2010; María, César, José, Orjuela, & Osorio, 2017*.

En general, la panela pulverizada presentó diferencias de color con respecto a la panela granulada y en bloque. La pulverizada en dilución tuvo tonalidades verdes y menos rojizas, y mayor luminosidad, lo cual puede deberse a la materia prima, ya que reflejan más luz al tener menor tamaño de partícula (*Hui, 2005*), y al tipo de proceso, pues tienen menor tiempo de procesamiento a altas temperaturas.

El color en la panela es una de las características de calidad que influye en las decisiones de compra de los consumidores. Este usualmente varía por factores como la variedad de caña, presencia de compuestos fenólicos, condiciones agroecológicas, temperatura del proceso y uso de agentes blanqueadores (*María et al., 2017*).

Los compuestos de bajo peso molecular, como los compuestos fenólicos, provenientes naturalmente de la caña aportan cerca del 30% del color, mientras que el 70% restante se debe a reacciones de degradación durante el proceso, que se clasifican en reacciones enzimáticas y no enzimáticas (*Schlumbach et al., 2017*). Dentro de las enzimáticas se encuentran la oxidación de fenoles a polímeros oscuros (*Paton, 1992; Schlumbach et al., 2017*). Por otro lado, las reacciones no enzimáticas hacen referencia a la caramelización de los azúcares y la reacción de Maillard (*Guerra & Mujica, 2010; Schlumbach et al., 2017*). Estas reacciones, resultan en un pool de sustancias que afectan no solo el color sino también el sabor de los alimentos (*Ioannou et al., 2017*).

Tabla 5-4 Parámetros de color de panela obtenida por diferentes procesos y mieles de caña panelera en dilución.

Muestra	L	a	b
G1	49,1±0,1 ^c	6,1±0,0 ^c	35,0±0,1 ^c
G2	46,4±1,8 ^b	6,9±0,6 ^a	36,0±0,8 ^b
G3	45,9±0,2 ^d	6,2±0,0 ^b	34,2±0,1 ^d
G4	47,7±0,0 ^{de}	6,1±0,0 ^c	34,0±0,0 ^{de}
G5	46,8±0,1 ^{ef}	6,1±0,0 ^c	33,5±0,1 ^{ef}
P50-1	73,9±0,0 ^{de}	1,3±0,0 ^e	34,0±0,1 ^{de}
P50-2	77,8±0,0 ^h	0,0±0,0 ^g	31,5±0,0 ^h
P50-3	77,7±0,0 ^h	-0,1±0,0 ^g	31,3±0,0 ^h
P50-4	73,9±0,4 ^d	0,9±0,1 ^f	34,1±0,4 ^d
P70-1	81,8±0,0 ^h	-2,0±0,0 ^j	31,8±0,1 ^h
P70-2	80,6±0,1 ^h	-1,9±0,0 ^j	31,8±0,1 ^h
P70-3	79,5±0,1 ^f	-1,6±0,0 ^h	33,4±0,1 ^f
P70-4	79,6±0,0 ^g	-1,8±0,0 ⁱ	32,3±0,0 ^g
B	59,0±0,1 ^a	4,5±0,0 ^d	36,8±0,0 ^a
M2	66,7±0,1 ^j	0,8±0,0 ^f	18,9±0,0 ^j
M3	84,8±0,1 ⁱ	-3,0±0,0 ^k	26,8±0,0 ⁱ

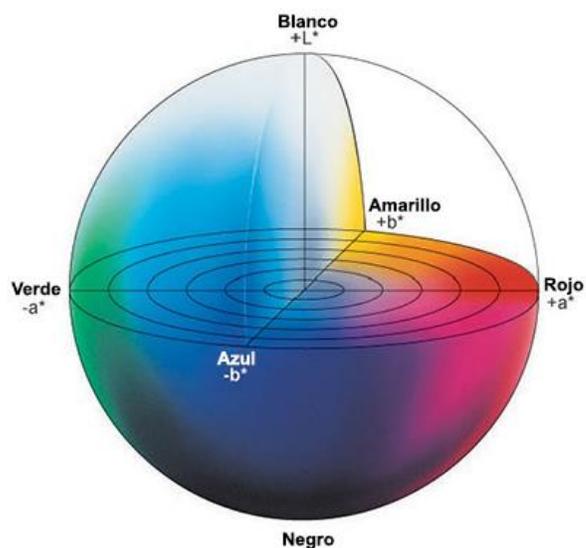


Figura 5-5 Coordenadas L, a, b del espacio CIELAB (Konica Minolta, 2014)

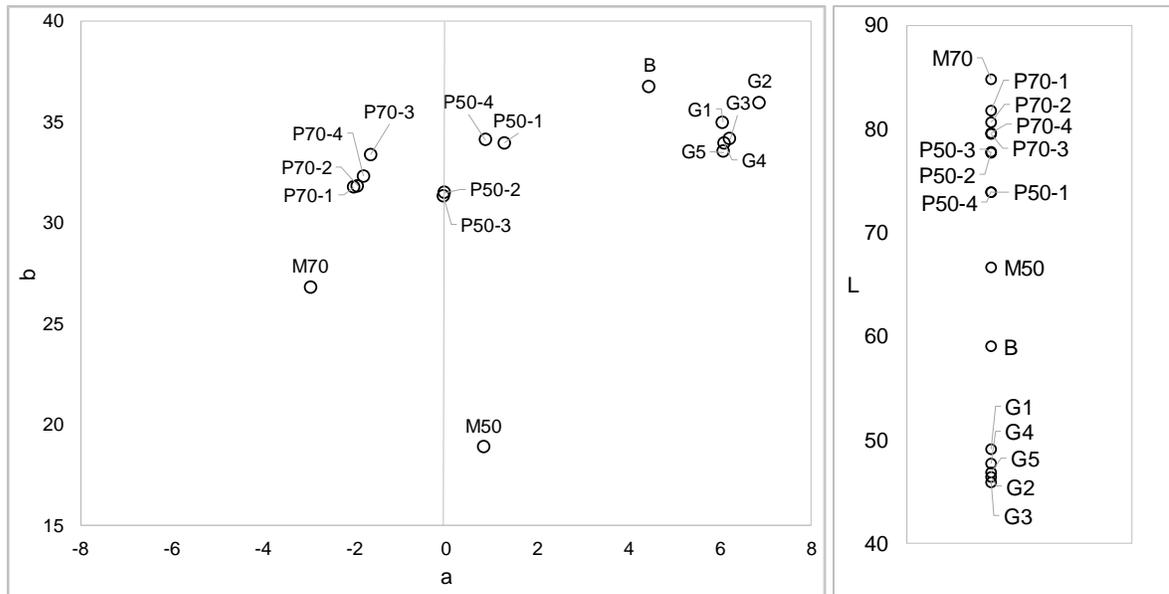


Figura 5-6 Ubicación de los parámetros de color de panela obtenida por diferentes procesos y diferentes tamaños de partícula en el diagrama (a, b).

6. Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se estandarizaron las metodologías de las propiedades fisicoquímicas pH, acidez, humedad, cenizas y densidad de jugos y mieles de caña panelera. Estas propiedades varían según la tecnología de calentamiento usada, ya sea por hornilla con medio de calentamiento aire caliente o por evaporadores abiertos con medio de calentamiento vapor de agua. Sin embargo, presentaron el mismo comportamiento en ambos trapiches y no hubo diferencias entre los lotes evaluados del mismo trapiche. Adicionalmente, estas propiedades presentaron diferencias durante las etapas de muestreo, concentración 1 y 2 de ambos trapiches, debido al proceso térmico y de eliminación de agua al que es sometido.

El comportamiento de los azúcares sacarosa, glucosa y fructosa fue diferente entre las dos tecnologías de procesamiento evaluadas. Así, el tipo de proceso afecta el perfil de azúcares durante las etapas de concentración 1 y 2. La sacarosa fue el azúcar predominante y su concentración disminuyó en las etapas de concentración, de ambos trapiches. La concentración de la glucosa tuvo un comportamiento diferente durante las etapas de concentración de ambos trapiches. La fructosa tuvo un comportamiento decreciente durante las etapas de concentración de ambos trapiches. Estas variaciones en el perfil de azúcares son influenciadas por el proceso y las condiciones agroclimáticas del cultivo de caña. Finalmente, se estandarizó la metodología del perfil de azúcares por HPLC.

Se estandarizaron las propiedades reológicas y térmicas de viscosidad, capacidad calorífica, conductividad térmica y difusividad térmica de jugos y mieles de caña panelera. Se encontraron diferencias de todas las propiedades a excepción de la

viscosidad, entre las tecnologías de los trapiches evaluados. El comportamiento de estas propiedades fue similar a las propiedades de soluciones de sacarosa y a modelos reportados en la literatura. Además, se establecieron modelos matemáticos en función de la concentración (°Brix) y la temperatura (°C) de las propiedades reológicas y térmicas estudiadas. Estos modelos se representaron en superficies de respuesta y se ajustaron satisfactoriamente a los datos experimentales con coeficientes de correlación mayores a 0,9.

Las propiedades fisicoquímicas y térmicas de jugos y mieles provenientes de dos trapiches con tecnologías de calentamiento por hornrilla y evaporadores abiertos, fueron determinadas y se encontraron diferencias por el tipo de calentamiento usado en el proceso. Además, durante las etapas de concentración 1 y 2 de cada trapiche, se encontraron diferencias entre los valores, pero en general el comportamiento fue similar durante el procesamiento para la obtención de panela.

Por otra parte, se establecieron diferencias de color en dilución, compuestos fenólicos y azúcares entre panela granulada tradicional, panela en bloque, panela pulverizada obtenida por secado por aspersión y mieles de caña panelera. Esto representó diferencias de los productos terminados según el método de obtención.

Para futuras investigaciones se recomienda realizar un estudio similar en diferentes zonas del país con el fin de encontrar diferencias o similitudes de las propiedades evaluadas en el proceso y contribuir con productos diferenciados por región y así fortalecer el sector panelero Colombia.

Finalmente, puede realizarse el análisis de color de mieles durante el proceso de producción de panela y correlacionarlo con propiedades de calidad como los azúcares, para poder evaluar el contenido de estos por medio de parámetros de color durante el proceso. De esta manera, implementar en el proceso de producción de panela, un sistema de control de bajo precio para los productores paneleros.

A. Anexo: Propiedades fisicoquímicas del trapiche Dulce Ventorrillo

- Propiedades fisicoquímicas

En esta sección se presentan los resultados de las propiedades fisicoquímicas del trapiche DV. Se analizaron los resultados de cada parámetro y no hubo diferencias significativas entre los muestreos realizados, así que se presentarán los resultados del muestreo 1. En la Tabla A-1 se resumen los parámetros medidos a las muestras recolectadas en el trapiche.

Tabla A-1 Propiedades fisicoquímicas de las muestras del trapiche DV

Muestra	Concentración (°Brix)	Humedad (%)	pH	Acidez (mg ácido aconítico/100g muestra en base seca)	Cenizas (g cenizas /100g muestra en base seca)
J1	29,97	$69,93 \pm 7 \times 10^{-2}$	$6,89 \pm 2 \times 10^{-2}$	$0,55 \pm 3 \times 10^{-2}$	$0,009 \pm 5,7 \times 10^{-4}$
J2	40,56	$59,68 \pm 7 \times 10^{-2}$	$6,63 \pm 8 \times 10^{-2}$	$0,70 \pm 4 \times 10^{-2}$	$0,009 \pm 3,6 \times 10^{-4}$
M1	50,02	$50,10 \pm 7 \times 10^{-2}$	$6,61 \pm 9 \times 10^{-2}$	$0,72 \pm 2 \times 10^{-2}$	$0,009 \pm 9,8 \times 10^{-5}$
M2	58,15	$42,22 \pm 9 \times 10^{-2}$	$6,42 \pm 1,4 \times 10^{-1}$	$0,82 \pm 4 \times 10^{-2}$	$0,010 \pm 4,1 \times 10^{-4}$
M3	69,55	$30,07 \pm 3 \times 10^{-2}$	$6,30 \pm 7 \times 10^{-2}$	$0,92 \pm 2 \times 10^{-2}$	$0,011 \pm 5,5 \times 10^{-4}$

Los datos de las propiedades medidas mostraron ser normales, con homocedasticidad de varianza y los resultados del ANOVA muestran que hay diferencias significativas, en todas las propiedades, entre las concentraciones dentro de cada muestreo.

La Figura A-1 muestra la humedad de las muestras tomadas. Como era de esperarse, mientras la concentración aumenta, la humedad disminuye, ya que es un proceso de

evaporación. Se encontraron cinco grupos estadísticos con la prueba Tukey, por lo que, cada punto de muestreo tiene diferencias significativas con los demás.

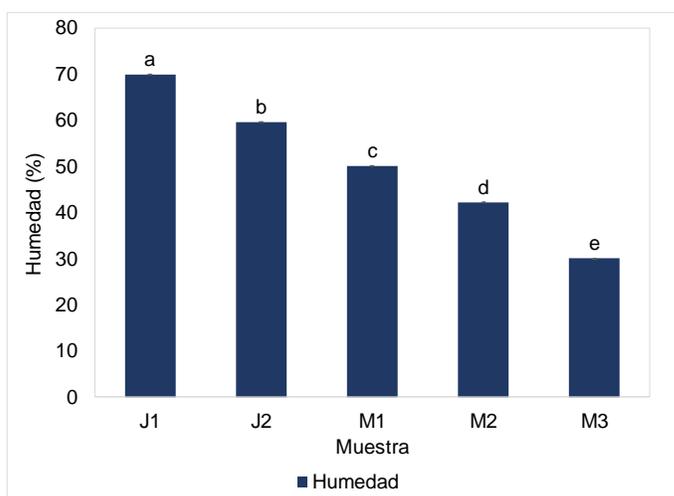


Figura A-1 Valores de la humedad durante la etapa de evaporación del proceso de producción de panela - trapiche DV

El comportamiento de la acidez y el pH se muestran en la Figura A-2, en donde ocurre una leve disminución del pH y aumento de la acidez durante la concentración. El pH no tiene diferencias significativas entre las concentraciones J2 – M1 y M2, ni entre, M2 y M3. En cuanto a la acidez, no hay diferencias significativas entre las concentraciones medias de M1 y M2.

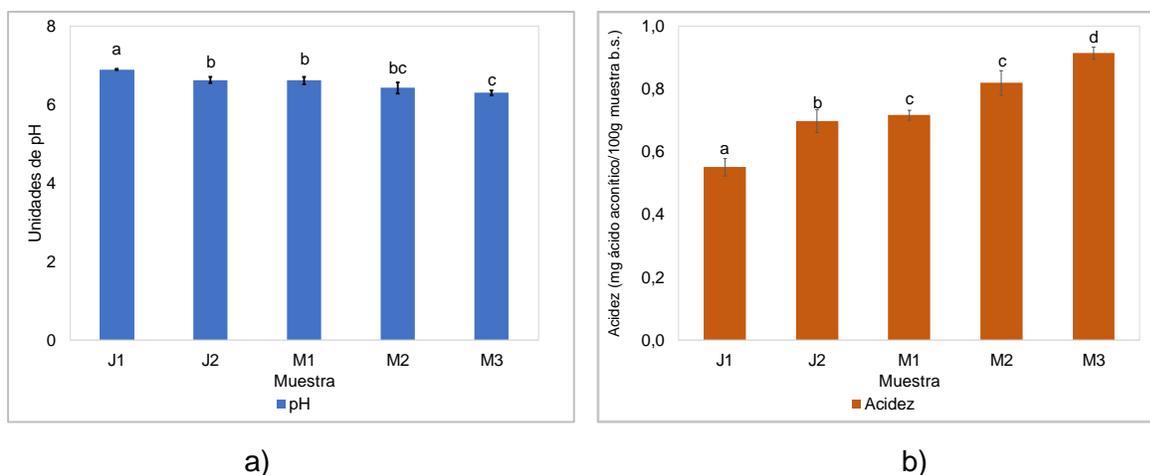


Figura A-2 Valores de a) pH y b) acidez durante la etapa de evaporación del proceso de producción de panela - trapiche DV

Las cenizas durante el proceso de concentración se muestran en la Figura A-3. Aparentemente la concentración de cenizas tiene una tendencia creciente. Sin embargo, no existen diferencias significativas entre las muestras por lo que se mantienen constantes en el proceso.

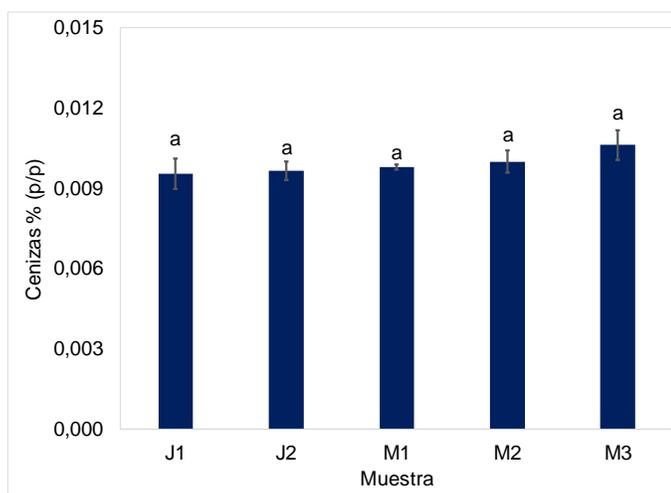


Figura A-3 Valores de las cenizas durante la etapa de evaporación en el proceso de producción de panela - trapiche DV

- Fisicoquímicos en función de la temperatura.

Densidad

Los resultados de densidad entre los muestreos realizados en el trapiche no tuvieron diferencias significativas. Por lo anterior, se mostrarán los resultados del muestreo 1. En la Tabla A-2, se consigna la media y la desviación a la concentración y temperatura respectiva. Los datos se encuentran entre 1,125 y 1,343 g/ml, los cuales son próximos a los reportado por (Alvarado & Naranjo, 2008).

Tabla A-2 Densidad de jugos y mieles de caña panelera en función de temperatura y la concentración para las muestras del trapiche DV

Muestra	Concentración (°Brix)	Temperatura (°C)			
		20	25	30	35
J1	29,97	1,126±1,3 x10 ⁻⁴	1,123±1,8 x10 ⁻⁴	1,121±1,7 x10 ⁻⁴	1,120±9,6 x10 ⁻⁴
J2	40,56	1,181±3,0 x10 ⁻⁴	1,177±4,8 x10 ⁻⁴	1,176±4,3 x10 ⁻⁴	1,173±5,6 x10 ⁻⁴
M1	50,02	1,232±2,4 x10 ⁻⁴	1,228±1,1 x10 ⁻⁴	1,227±1,6 x10 ⁻⁴	1,223±2,0 x10 ⁻⁴
M2	58,15	1,274±2,9 x10 ⁻⁴	1,270±7,2 x10 ⁻⁴	1,268±5,3 x10 ⁻⁴	1,267±1,9 x10 ⁻⁴
M3	69,55	1,352±3,5 x10 ⁻⁴	1,350±8,9 x10 ⁻⁴	1,347±2,8 x10 ⁻⁴	1,343±3,5 x10 ⁻⁴

En la Figura A-4 se muestra la densidad y las regresiones a diferentes concentraciones en función de la temperatura. Se muestra un buen ajuste lineal con coeficientes de correlación mayores a 0,93. Así mismo, los datos se ajustan linealmente en función de la concentración, con valores mayores a 0,99. Por otro lado, comparando los datos experimentales con modelos matemáticos reportados, a escala laboratorio, en función de la concentración y la temperatura (*La Madrid et al., 2016; Tiwari et al., 2004*), se encontraron errores menores al 3,7% y comparado con soluciones de sacarosa (*Zavaleta, 2011*) se obtuvo un error del 2,2%.

Adicionalmente, los valores del muestreo mostraron distribución normal y homocedasticidad de varianza. Dentro del muestreo hubo diferencias significativas, entre todas las concentraciones y todas las temperaturas.

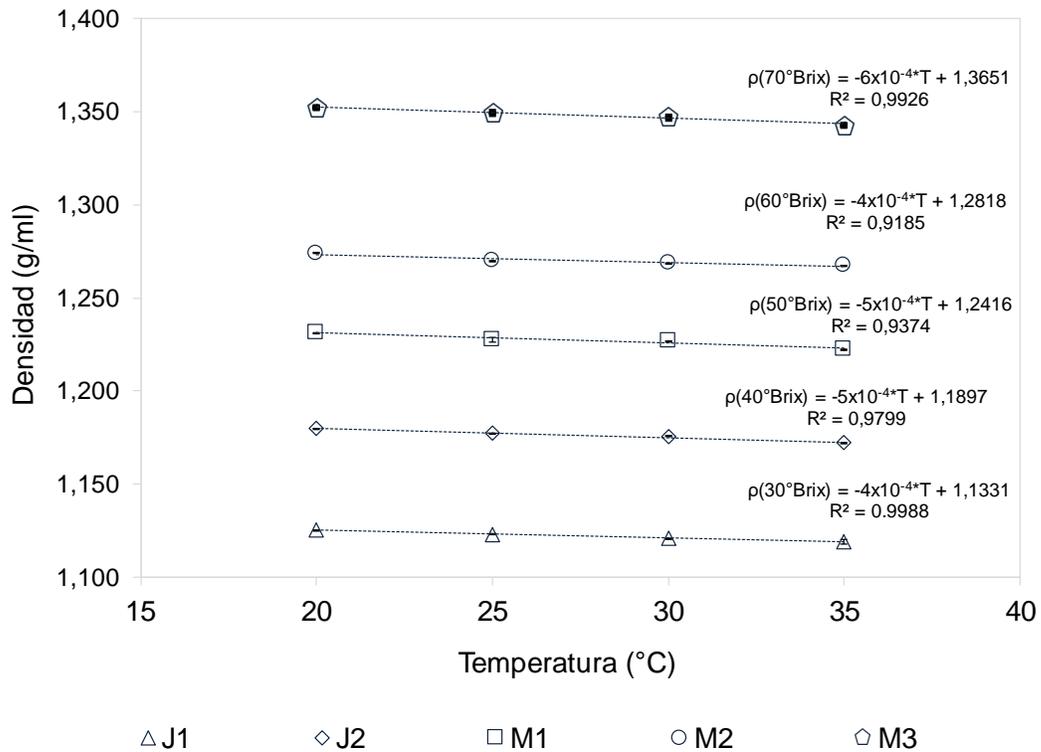


Figura A-4 Densidad a diferentes concentraciones en función de la temperatura del trapiche DV

- Perfil de azúcares en jugos y mieles de caña panelera

Los muestreos realizados en el trapiche DV no presento diferencias significativas entre ellos, por lo que se mostrarán los resultados del muestreo 1. En la Tabla A-3 se muestra la concentración en g de cada azúcar por 100g de muestra en base seca.

Tabla A-3 Perfil de azúcares del trapiche Dulce Ventorrillo

Muestra	Concentración (°Brix)	Sacarosa	Glucosa	Fructosa
		g / 100g muestra en base seca		
J1	29,97	90,96±0,40	5,37±0,03	4,80±0,03
J2	40,56	90,68±0,54	5,39±0,09	4,76±0,08
M1	50,02	90,17±0,46	5,28±0,02	4,69±0,05
M2	58,15	89,82±0,28	5,22±0,05	4,66±0,02
M3	69,55	89,87±0,19	5,25±0,07	4,64±0,08

El azúcar predominante en este perfil fue la sacarosa, con cerca del 90% de participación. Su comportamiento se muestra en la Figura A-5, donde se observa que hay diferencias significativas de concentración durante el muestreo. El primer punto de muestreo fue diferente a los puntos de M2 y M3, debido a la descomposición de la sacarosa, por ejemplo, por caramelización, generando ácidos orgánicos (*Kitts et al., 2006*) que explican el aumento de la acidez y disminución del pH durante la concentración de jugos de caña panelera (*Luz Esperanza et al., 2015*).

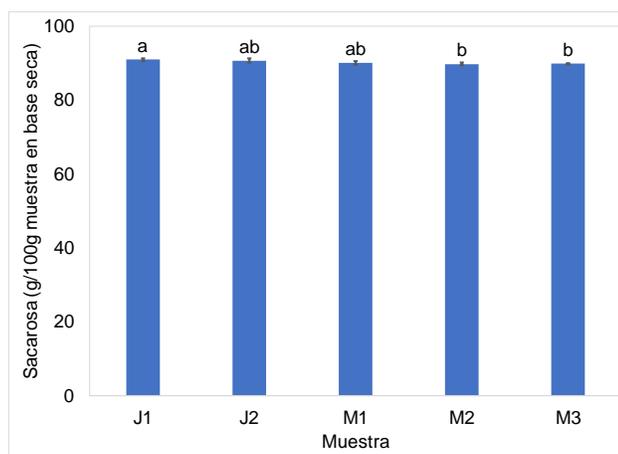


Figura A-5 Perfil de la sacarosa en el trapiche DV

Por otro lado, los azúcares reductores como la glucosa y la fructosa representaron cerca del 10% del perfil de azúcares. El comportamiento de la glucosa se muestra en la Figura A-6, donde se observa que no hubo diferencias significativas durante el muestreo. Por otro lado, el comportamiento de la fructosa se muestra en la Figura A-7, se observa que hubo diferencias significativas entre la primera muestra y la última, posiblemente efecto de reacciones de descomposición como la reacción de Maillard, generando productos que aportan sabor y color a la panela.

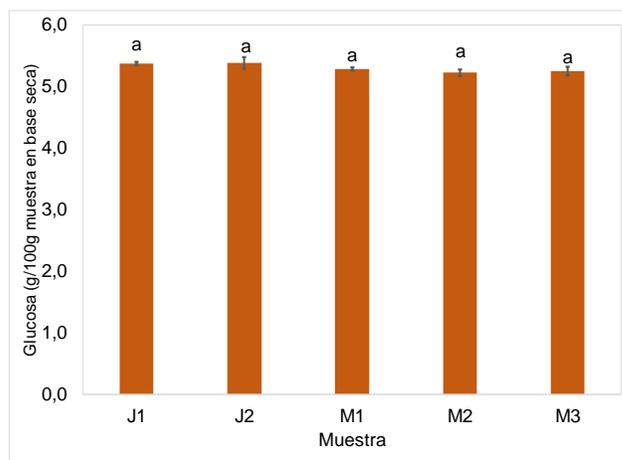


Figura A-6 Perfil de la glucosa en el trapiche DV



Figura A-7 Perfil de la fructosa en el trapiche DV

En cuanto a normatividad, la NTC 1311 expone los porcentajes máxicos de sacarosa (máximo 93%) y azúcares reductores (mínimo 5,0%) (ICONTEC, 2009). Si las muestras se siguieran concentrando hasta obtener panela, entonces se cumpliría con las

especificaciones de la norma. Por otro lado, los resultados del perfil de azúcares son mayores a lo reportado en procesos a nivel laboratorio, (Alvarado & Naranjo, 2008).

PROPIEDADES REOLÓGICAS Y TÉRMICAS

- Viscosidad

La viscosidad de las muestras del trapiche DV se muestran en la Tabla A-4. Estas son los resultados del muestreo 1, debido a que no hubo diferencias entre los muestreos realizados en este trapiche. Los valores se encuentran entre 1,4 y 146,6 mPa*s y hubo diferencias entre todas las concentraciones y las temperaturas. Además muestran un comportamiento Newtoniano, similares a lo reportado por (W. Naranjo, 2009). En general, la viscosidad fue mayor en los puntos de muestreo con concentraciones altas, análogo a lo reportado en soluciones de glucosa, fructosa y sacarosa (Oroian et al., 2015).

Tabla A-4 Viscosidad de jugos y mieles del trapiche DV

Muestra	Concentración (°Brix)	Temperatura (°C)				
		35	45	55	65	75
		Viscosidad (mPa*s)				
J1	29,97	$2,9 \pm 1 \times 10^{-1}$	$2,3 \pm 7 \times 10^{-2}$	$2,0 \pm 1 \times 10^{-1}$	$1,8 \pm 7 \times 10^{-2}$	$1,4 \pm 1 \times 10^{-1}$
J2	40,56	$5,4 \pm 7 \times 10^{-2}$	$4,2 \pm 1 \times 10^{-1}$	$3,1 \pm 7 \times 10^{-2}$	$2,4 \pm 1 \times 10^{-1}$	$2,1 \pm 1 \times 10^{-1}$
M1	50,02	$8,3 \pm 1 \times 10^{-1}$	$6,5 \pm 7 \times 10^{-2}$	$5,4 \pm 1 \times 10^{-1}$	$5,0 \pm 7 \times 10^{-2}$	$4,3 \pm 2 \times 10^{-1}$
M2	58,15	$34,0 \pm 3 \times 10^{-1}$	$25,6 \pm 3 \times 10^{-1}$	$16,6 \pm 3 \times 10^{-1}$	$11,5 \pm 2 \times 10^{-1}$	$8,4 \pm 3 \times 10^{-1}$
M3	69,55	$146,6 \pm 9 \times 10^{-1}$	$99,1 \pm 8 \times 10^{-1}$	$69,4 \pm 1$	$39,6 \pm 1 \times 10^{-1}$	$28,4 \pm 8 \times 10^{-1}$

El comportamiento con respecto a la temperatura se describe con el modelo de Arrhenius (ecuación 4.7), cuyos parámetros a las diferentes concentraciones se muestran en la

Tabla A-5. En la Figura A-8 se muestra el comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura.

Tabla A-5 Parámetros de viscosidad en función de la temperatura del modelo de Arrhenius

Muestra	E_a (kJ/nK)	B_A	R^2
J1	15222,1	$7,5 \times 10^{-6}$	0,98
J2	21716,9	$1,1 \times 10^{-6}$	0,98
M1	14357,4	$2,9 \times 10^{-5}$	0,98
M2	32151,1	$1,3 \times 10^{-7}$	0,98
M3	37367,3	$7,1 \times 10^{-8}$	0,99

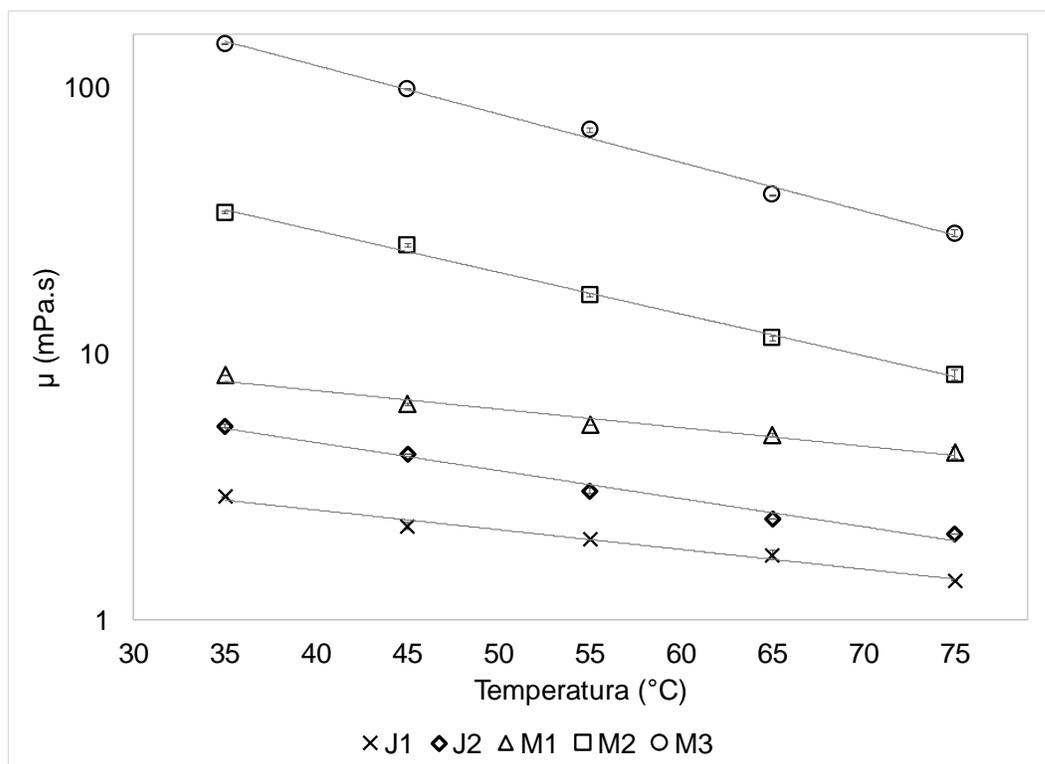


Figura A-8 Viscosidad de jugos y mieles del trapiche DV, en función de la temperatura

- Capacidad calorífica

La capacidad calorífica de los muestreos realizados en el trapiche DV no tuvieron diferencias significativas entre ellos. En la Tabla A-6, se muestran los resultados del muestreo 1, los cuales se encuentran dentro del intervalo reportado en la literatura (*W. Naranjo, 2009; Peña, 2009*). Además, no hubo diferencias entre las concentraciones y temperaturas estudiadas. El comportamiento de los datos se muestra en la Figura A-9.

Tabla A-6 Capacidad calorífica de las muestras del trapiche DV

Muestra	Concentración (°Brix)	Temperatura (°C)				
		35	45	55	65	75
		Capacidad calorífica (J/gK)				
J1	29,97	$3,13\pm 8\times 10^{-2}$	$3,15\pm 9\times 10^{-2}$	$3,22\pm 5\times 10^{-2}$	$3,27\pm 5\times 10^{-2}$	$3,35\pm 7\times 10^{-2}$
J2	40,56	$2,92\pm 8\times 10^{-2}$	$2,97\pm 8\times 10^{-2}$	$3,03\pm 8\times 10^{-2}$	$3,13\pm 8\times 10^{-2}$	$3,21\pm 6\times 10^{-2}$
M1	50,02	$2,74\pm 7\times 10^{-2}$	$2,78\pm 9\times 10^{-2}$	$2,84\pm 1\times 10^{-1}$	$2,93\pm 1\times 10^{-1}$	$3,04\pm 1\times 10^{-1}$
M2	58,15	$2,59\pm 7\times 10^{-2}$	$2,63\pm 6\times 10^{-2}$	$2,69\pm 5\times 10^{-2}$	$2,76\pm 4\times 10^{-2}$	$2,89\pm 2\times 10^{-2}$
M3	69,55	$2,42\pm 5\times 10^{-2}$	$2,48\pm 5\times 10^{-2}$	$2,57\pm 6\times 10^{-2}$	$2,65\pm 6\times 10^{-2}$	$2,76\pm 6\times 10^{-2}$

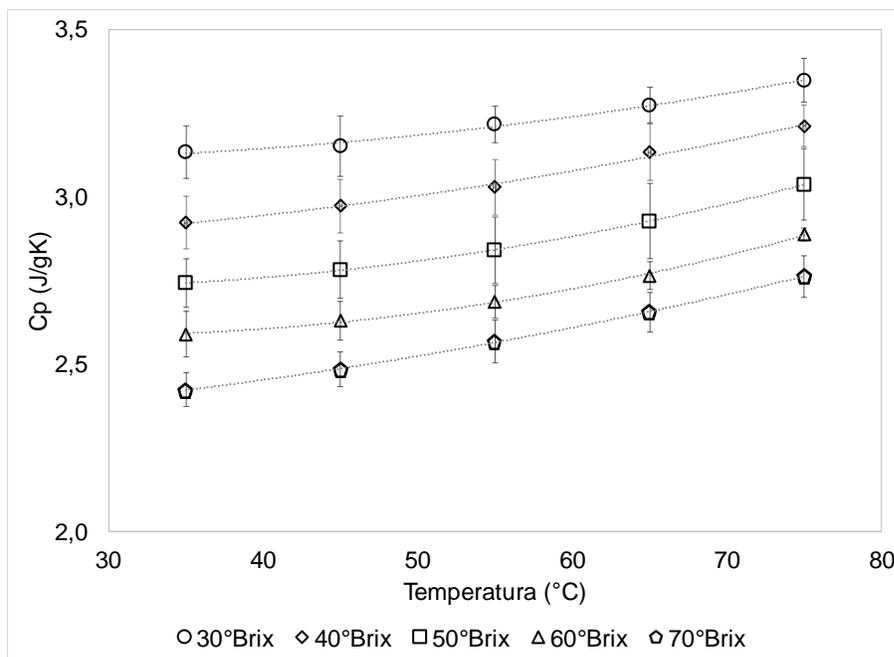


Figura A-9 Capacidad calorífica de jugos y mieles del trapiche DV, en función de la temperatura

- Conductividad térmica

La conductividad térmica de los muestreos realizados en el trapiche DV no tuvieron diferencias significativas entre ellos. En la Tabla A-7, se muestran los resultados del muestreo 1, los cuales se encuentran dentro del intervalo reportado en la literatura (W. Naranjo, 2009). Además, no hubo diferencias entre las concentraciones y temperaturas estudiadas. El comportamiento de los datos se muestra en la Figura A-10.

Tabla A-7 Conductividad térmica de jugos y mieles del trapiche DV

Muestra	Concentración (°Brix)	Temperatura (°C)				
		35	45	55	65	75
		Conductividad térmica (W/mK)				
J1	29,97	$0,45 \pm 1 \times 10^{-2}$	$0,46 \pm 4 \times 10^{-3}$	$0,47 \pm 7 \times 10^{-3}$	$0,49 \pm 1 \times 10^{-2}$	$0,50 \pm 3 \times 10^{-2}$
J2	40,56	$0,38 \pm 5 \times 10^{-3}$	$0,38 \pm 6 \times 10^{-3}$	$0,39 \pm 2 \times 10^{-3}$	$0,39 \pm 6 \times 10^{-3}$	$0,39 \pm 3 \times 10^{-3}$
M1	50,02	$0,32 \pm 2 \times 10^{-3}$	$0,31 \pm 2 \times 10^{-3}$	$0,33 \pm 1 \times 10^{-2}$	$0,33 \pm 1 \times 10^{-2}$	$0,32 \pm 6 \times 10^{-3}$
M2	58,15	$0,29 \pm 1 \times 10^{-2}$	$0,29 \pm 6 \times 10^{-3}$	$0,29 \pm 7 \times 10^{-3}$	$0,29 \pm 6 \times 10^{-3}$	$0,29 \pm 8 \times 10^{-3}$
M3	69,55	$0,26 \pm 1 \times 10^{-2}$	$0,27 \pm 5 \times 10^{-3}$	$0,27 \pm 1 \times 10^{-2}$	$0,27 \pm 1 \times 10^{-2}$	$0,27 \pm 1 \times 10^{-2}$

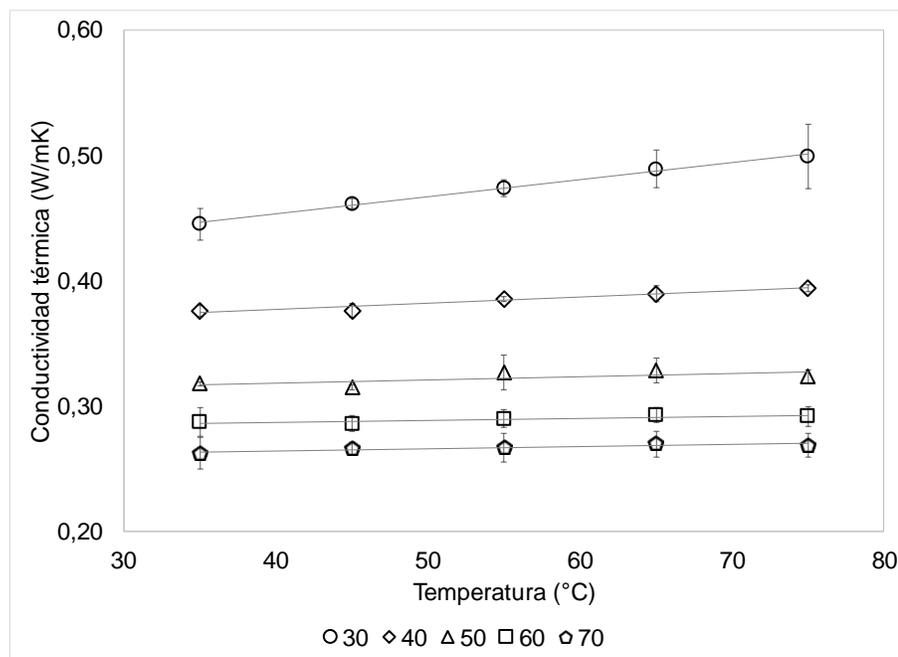


Figura A-10 Conductividad térmica de jugos y mieles del trapiche DV, en función de la temperatura

- Difusividad térmica

La difusividad térmica de los muestreos realizados en el trapiche DV no tuvieron diferencias significativas entre ellos. En la Tabla A-8, se muestran los resultados del

muestreo 1, los cuales se encuentran dentro del intervalo reportado en la literatura (*W. Naranjo, 2009*). Además, no hubo diferencias entre las concentraciones. El comportamiento de los datos se muestra en la Figura A-11.

Tabla A-8 Difusividad térmica de jugos y mieles del trapiche DV

Muestra	Temperatura (°C)				
	35	45	55	65	75
	Difusividad térmica $\times 10^5$ (m^2/s)				
J1	1,3	1,3	1,3	1,4	1,4
J2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
M1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
M2	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8
M3	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7

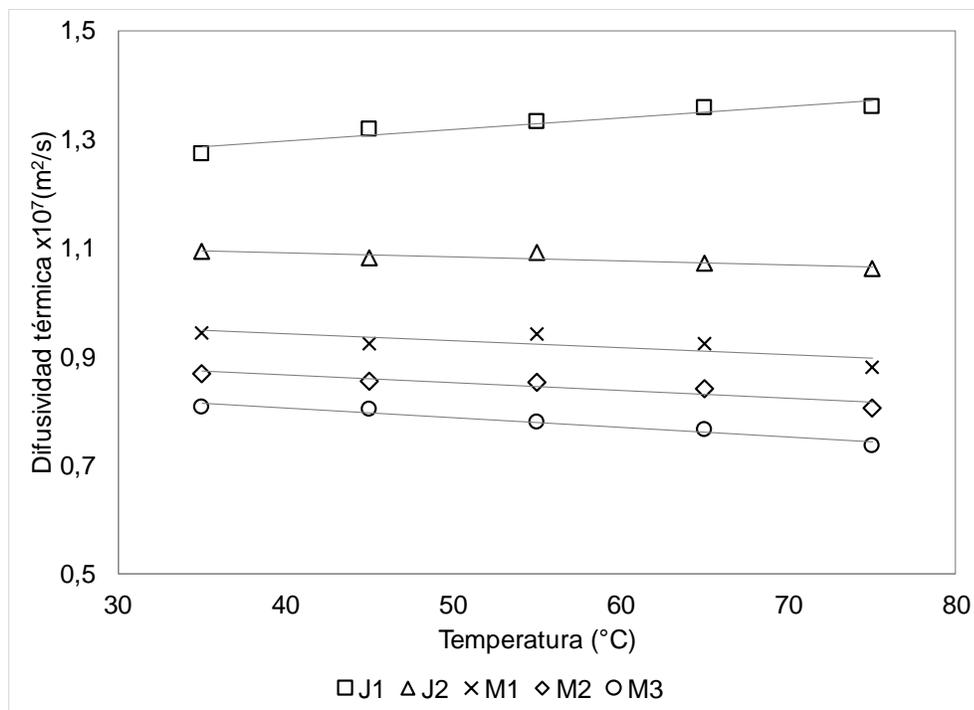


Figura A-11 Difusividad térmica de jugos y mieles del trapiche DV, en función de la temperatura

B. Anexo: Curvas de calibración

- Curvas de calibración del perfil de azúcares por HPLC

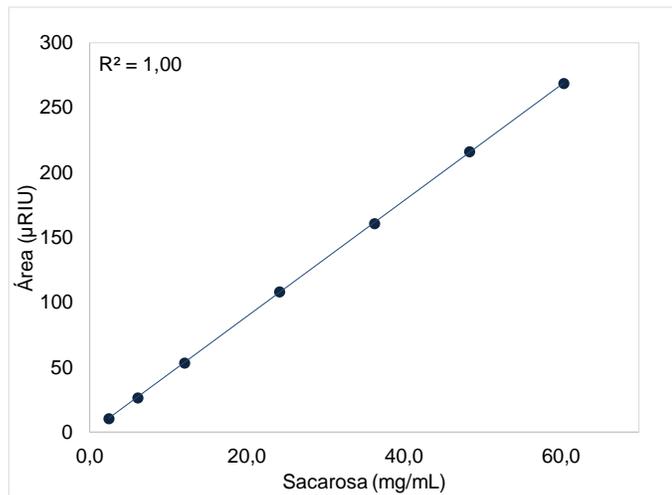


Figura B-12 Curva de calibración de sacarosa - HPLC

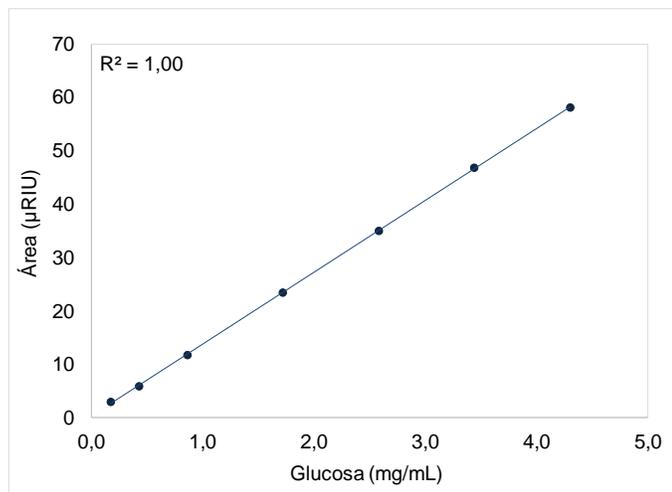


Figura B-2 Curva de calibración de glucosa - HPLC

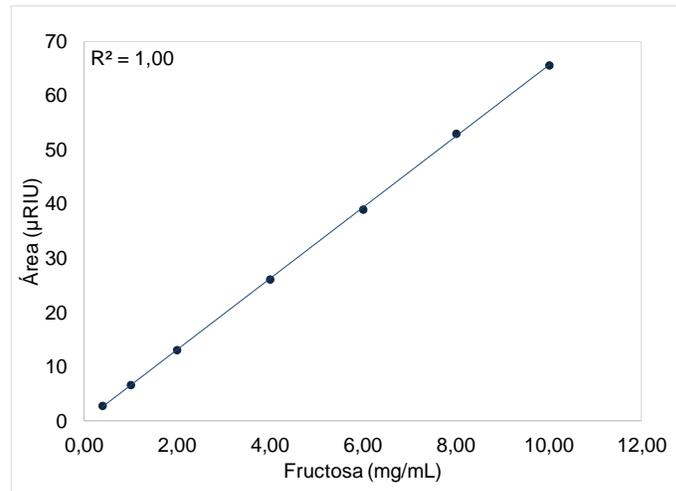


Figura B-3 Curva de calibración de fructosa - HPLC

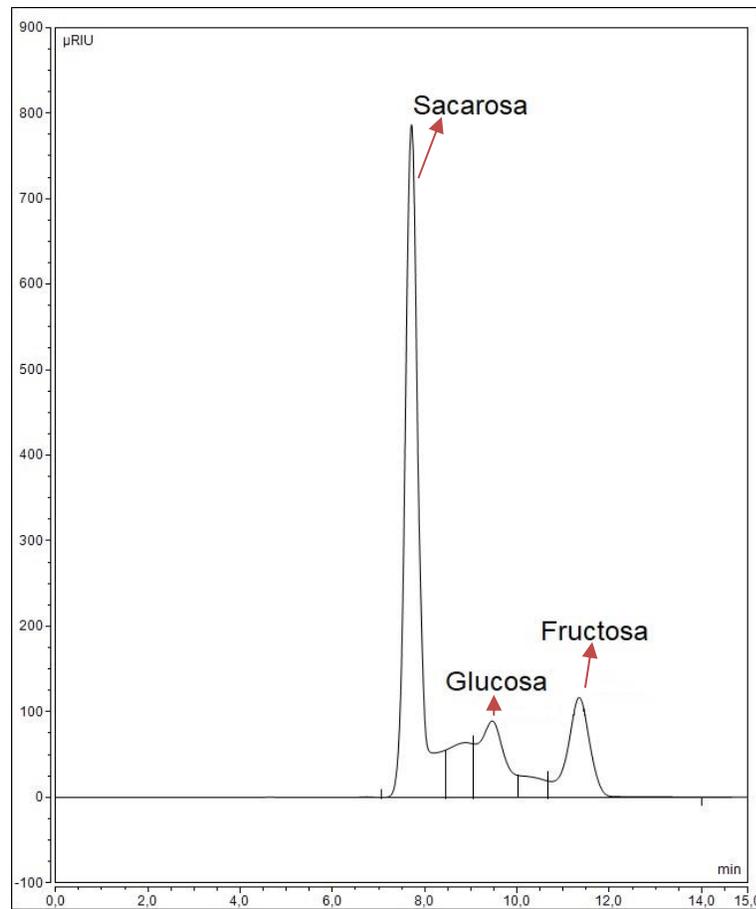


Figura B-413 Cromatograma de la solución patrón de 60, 4,3 y 10 mg/ml de sacarosa, glucosa y fructosa, respectivamente

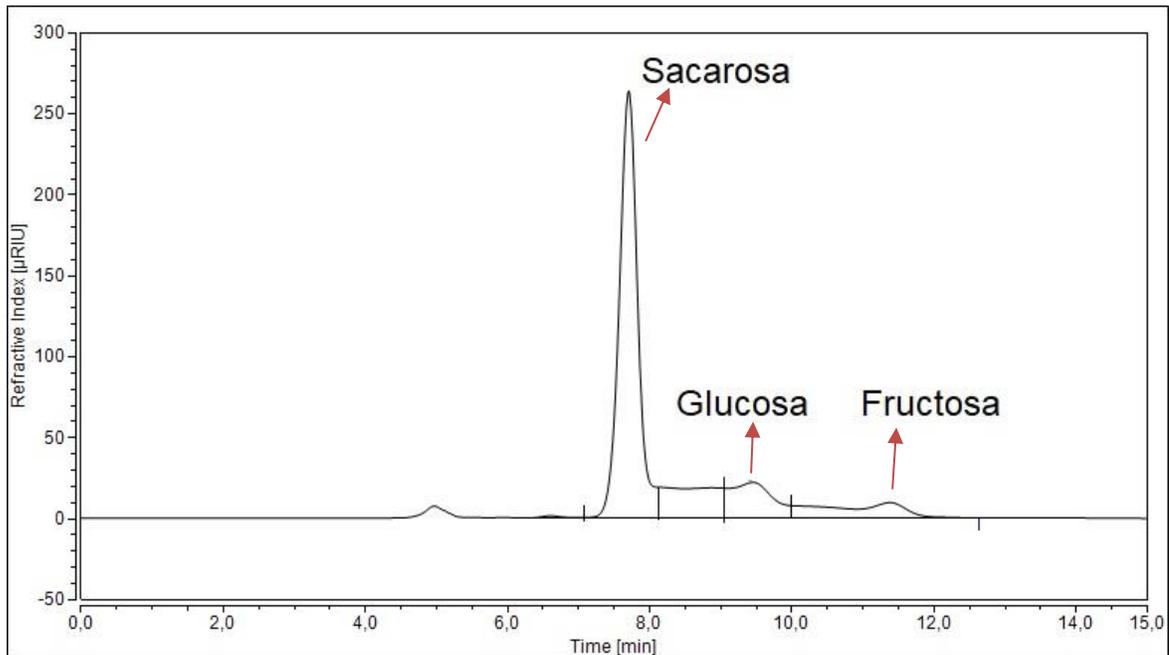
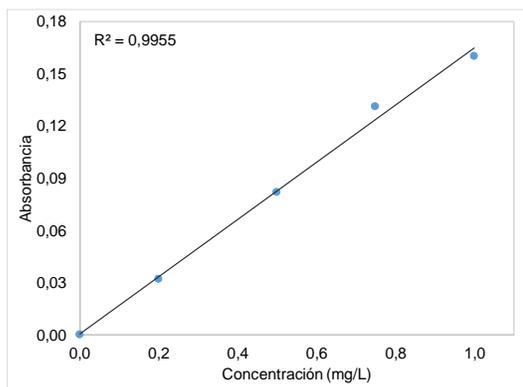
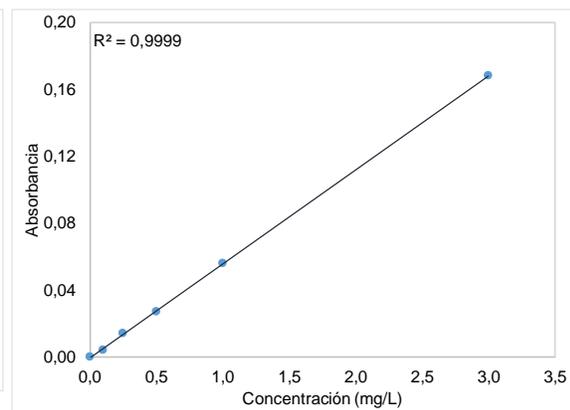


Figura B-514 Cromatograma de una muestra de 70°Brix del trapiche DV

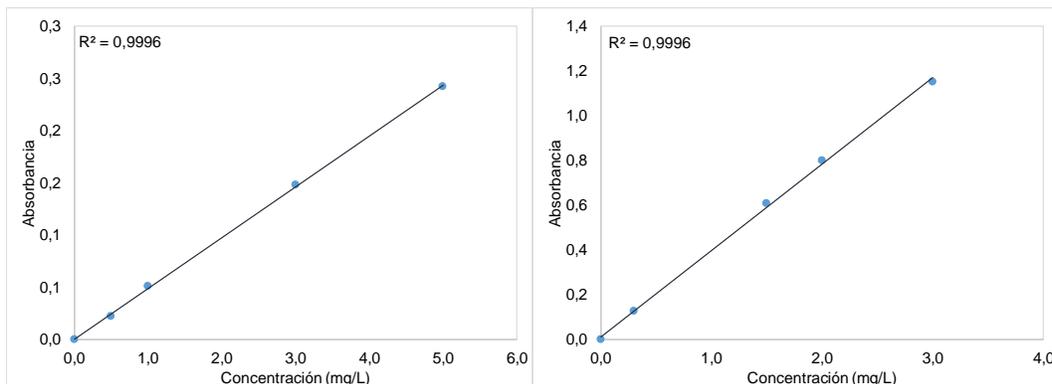
- Curvas de calibración de minerales por absorción atómica



a)

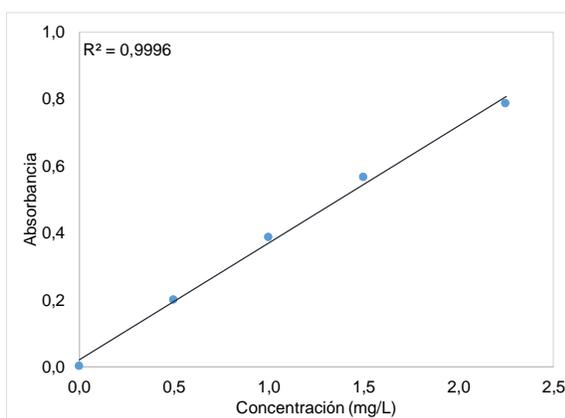


b)

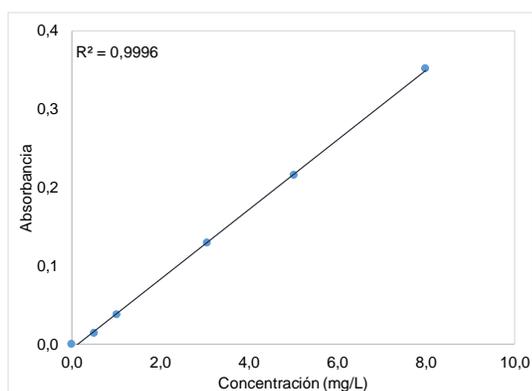


c)

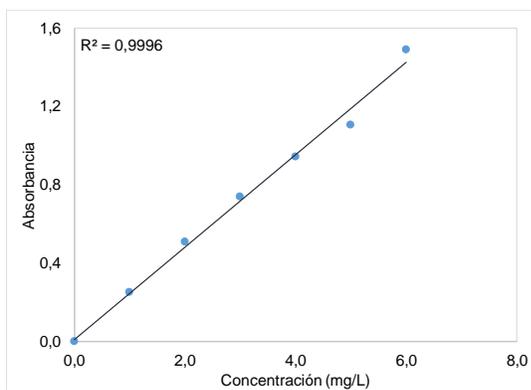
d)



e)



f)



g)

Figura B-6 Curvas de calibración de espectroscopia de absorción atómica. a) Zn, b) Cu, c) Fe, d) Mg, e) Na, f) Ca, g) K

Bibliografía

Alarcón, Á., Narváez, P. C., Orjuela, Á., & Osorio, C. (2016). Caracterización fisicoquímica y perfil de azúcares de mieles de caña en la producción de panela. *Agronomía Colombiana*, 34(1), S1280-S1283.

Alexandre, R., Cabral, F., Orrego-alzate, C. E., Gabas, A. L., & Telis-romero, J. (2007). Rheological and thermophysical properties of blackberry juice. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 27(3), 589-596.

Alonso, J. (2010). Edulcorantes naturales. *Revista de ciencias de la vida de la Universidad Politécnica Salesiana*, 12(2), 3-12.

Alvarado, J., & Naranjo, W. (2008). *Caracterización reológica y térmica de miel de dos variedades de caña (Tesis de pregrado)*. Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.

Asadi, M. (2006). *Beet-Sugar Handbook*. John Wiley & Sons, Inc.

Asikin, Y., Kamiya, A., Mizu, M., Takara, K., Tamaki, H., & Wada, K. (2014). Changes in the physicochemical characteristics, including flavour components and Maillard reaction products, of non-centrifugal cane brown sugar during storage. *Food Chemistry*, 149, 170-177.

Bellet, D., Sengelin, M., & Thirriot, C. (1975). Determination des propriétés thermophysiques de liquides non-Newtoniens a l'aide d'une cellule a cylindres coaxiaux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 18(10), 1177-1187.

Castellanos, O., Torres, L., & Florez, D. (2009). *Agenda prospectiva de investigación y desarrollo tecnológico para la cadena productiva de la panela y su agroindustria en Colombia*. Bogotá. Recuperado a partir de http://www.bdigital.unal.edu.co/1908/1/Agenda_panela.pdf

Castellanos, O., Torres, L., & Flórez, D. (2010). *Agenda prospectiva de investigación y desarrollo tecnológico para la cadena productiva de la panela y su agroindustria en Colombia* (2.^a ed.). Bogotá. Recuperado a partir de http://190.14.254.237/docs/CONVOCATORIAS_PROY_INVESTIGACION/CONVOCAT_PROGR_Y_PROY_2012/CONVOC_FEB-2012/CONVOC_MACROPROYECTOS_VRIN_UV/PROPUESTA_CERTIFIC_TRAPICHES_PANELEROS_MACROPROYECTO/cadena_productiva_panela.pdf

Cepeda, E., & Villar, M. C. (1999). Density and viscosity of *Malus Floribunda* juice as a

function of concentration and temperature. *Journal of Food Engineering*, 41, 103-107.

Chen, J. (1991). *Manual del azúcar de caña*. (Limusa, Ed.) (1a ed.). México: Noriega.

Clavijo, M. (2010). *Estudio del efecto del uso de jugo de dos genotipos de caña de azúcar previamente descortezada y de la temperatura de la fuente de calentamiento sobre el proceso en la elaboración de panela granulada (Tesis de pregrado)*. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador.

CNPMLTA. (2009). Etapas y equipos del proceso de panela. Recuperado 27 de febrero de 2016, a partir de http://www.tecnologiaslimpias.org/html/central/311802/311802_ee.htm#ETAPAS Y EQUIPOS DEL PROCESO.

Colonna, W., Samaraweera, U., Clarke, M., Cleary, M., Godshall, M. A., & White, J. (2006). Sugar. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 1-67.

Comite Nacional del Codex Alimentarius de Colombia. Propuesta de norma internacional codex para la panela (2010). Recuperado a partir de <https://www.mincomercio.gov.co/descargar.php?id=41247>

Cortes, M., Ciro, H., Rodríguez, E., & Largo, E. (2012). Secado por aspersion de concentrado de caña panelera: una tecnología apropiada para mejorar la competitividad de la cadena. *Vitae*, 19(1). Recuperado a partir de <http://www.redalyc.org/pdf/1698/169823914009.pdf>

DANE. (2017). Encuesta Anual Manufacturera (EAM). Recuperado 17 de junio de 2017, a partir de <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/industria/encuesta-anual-manufacturera-enam>

Darros-Barbosa, R., Balaban, M. O., & Teixeira, A. A. (2003). Temperature and Concentration Dependence of Heat Capacity of Model Aqueous Solutions. *International Journal of Food Properties*, 6(2), 239-258.

Euromonitor International. (2014). The Sugar Backlash and its Effects on Global Consumer Markets. Recuperado 22 de febrero de 2016, a partir de <http://www.euromonitor.com/the-sugar-backlash-and-its-effects-on-global-consumer-markets/report>

FAOSTAT. (2017). FAO - Food and Agricultural Organization of the United Nations. FAOSTAT. Recuperado 9 de junio de 2017, a partir de <http://www.fao.org/faostat/en/#data>

Fedepanela. (2015). *NOTA DE INFORMACIÓN DE LA NAMA (NINO) RECONVERSIÓN PRODUCTIVA Y TECNOLÓGICA DEL SUBSECTOR PANELERO*. Bogotá. Recuperado a partir de file:///E:/Downloads/NINO PANELA VFINAL.pdf

Fischer, J. C. (2014). *Declaración del VII simposio internacional del Ka ' a He ' e – Stevia*

2014. *Declaración de la V reunión internacional de la FAS*. FAS. Recuperado a partir de http://www.elnuevoagro.com.ar/files/dc4fb3_2014_04_26_Acta_FAS_2014.pdf

García, H., Albarracín, L., Toscano, A., Santana, N., & Insuasty, O. (2007). *Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de caña panelera*. Bogotá: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural; Corpoica. Recuperado a partir de <http://www.panelamonitor.org/documents/519/guia-tecnologica-para-el-manejo-integral-del-siste/>

García, H., Peña, A., López, R., Duran, E., & Olvera, G. (2010). *Desarrollo de un sistema de evaporación y concentración de jugos de múltiple efecto para mejorar la eficiencia térmica y productividad y disminuir el impacto ambiental en la producción de panela*. Recuperado a partir de [http://201.234.78.28:8080/jspui/bitstream/123456789/1876/1/Microsoft Word-MINAGRICULTURA.-_proyecto Pa.pdf](http://201.234.78.28:8080/jspui/bitstream/123456789/1876/1/Microsoft%20Word-MINAGRICULTURA.-_proyecto%20Pa.pdf)

Giraldo-Gómez, G. I., Gabas, A. L., Telis, V. R. N., & Telis-Romero, J. (2010). Propiedades termofísicas del jugo concentrado de lulo a temperaturas por encima del punto de congelación. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 30, 90-95.

Gratão, A. C. A., Silveira Júnior, V., Polizelli, M. A., & Telis-romero, J. (2004). Thermal Properties of Passion Fruit Juice As Affected By Temperature and Water Content. *Journal of Food Process Engineering*, 27(2005), 413-431.

Guerra, M. J., & Mujica, M. V. (2010). Physical and chemical properties of granulated cane sugar «panelas». *Food Science and Technology (Campinas)*, 30(1), 250-257.

Guerrero Useda, M. E., & Escobar Guzmán, J. D. (2015). Eficiencia técnica de la producción de panela. *Revista de Tecnología*, 14(1), 107-116.

Habib, H. M., Al Meqbali, F. T., Kamal, H., Souka, U. D., & Ibrahim, W. H. (2014). Bioactive components, antioxidant and DNA damage inhibitory activities of honeys from arid regions. *Food Chemistry*, 153, 28-34.

Harish Nayaka, M. A., Sathisha, U. V., Manohar, M. P., Chandrashekar, K. B., & Dharmesh, S. M. (2009). Cytoprotective and antioxidant activity studies of jaggery sugar. *Food Chemistry*, 115(1), 113-118.

Herdia, F. J., Álvarez, C., González-Miret, M. L., & Ramírez, A. (2004). CromaLab® análisis de color. Sevilla, España.

Hui, Y. H. (2005). *Handbook of food science, technology, and engineering* (4.^a ed.). New York, NY: Taylor & Francis Group.

ICA. (2011). *Manejo fitosanitario del cultivo de la caña panelera. Medidas para la temporada invernal*. Bogotá. Recuperado a partir de <http://www.ica.gov.co/getattachment/4b87aa13-4cb4-4f5d-915c-e4b672f57251/Cartilla-de-prueba.aspx>

ICBF. (2015). *Tabla de Composición de Alimentos Colombianos*. Recuperado a partir de <http://www.icbf.gov.co/portal/page/portal/PortallCBF/bienestar/nutricion/tabla-alimentos/TCAC 2015 FINAL.pdf>

ICONTEC. NTC 1311 Productos agrícolas. Panela (2009). Colombia.

Industria Panelera. (2010). Minagricultura pide denunciar panela adulterada. Recuperado a partir de <https://industriapanelera.wikispaces.com/Articulo+Informativo+sobre+el+Uso+de+Clarol>

Inns, E. L., Buggey, L. A., Booer, C., Nursten, H. E., & Ames, J. M. (2007). Effect of Heat Treatment on the Antioxidant Activity, Color, and Free Phenolic Acid Profile of Malt. *Agricultural and food chemistry*, *55*, 6539-6546.

Instituto Nacional de Salud. (2012). *Concepto científico acrilamida en panela*. Bogotá. Recuperado a partir de <http://www.ins.gov.co/lineas-de-accion/investigacion/ueria/Publicaciones/CONCEPTO ACRILAMIDA EN PANELA.pdf>

International Trade Centre. (2016). ITC TRADE MAP. Recuperado 11 de junio de 2017, a partir de <http://www.trademap.org>

Ioannou, A., Daskalakis, V., & Varotsis, C. (2017). Detection of Maillard reaction products by a coupled HPLC-Fraction collector technique and FTIR characterization of Cu(II)-complexation with the isolated species. *Journal of Molecular Structure*, *1141*, 634-642.

Jaffé, W. (2012a). Azúcar no-centrifugada (Panela): producción mundial y comercio. *Panela Monitor*, *48*. Recuperado a partir de www.panelamonitor.org

Jaffé, W. (2012b). Health Effects of Non-Centrifugal Sugar (NCS): A Review. *Sugar Tech*, *14*(2), 87-94.

Jaffé, W. (2015). Nutritional and functional components of non centrifugal cane sugar: A compilation of the data from the analytical literature. *Journal of Food Composition and Analysis*, *43*, 194-202.

Jagannadha Rao, P. V. K., Das, M., & Das, S. K. (2009). Changes in physical and thermo-physical properties of sugarcane, palmyra-palm and date-palm juices at different concentration of sugar. *Journal of Food Engineering*, *90*(4), 559-566.

Kim, J.-S., Kang, O.-J., & Gweon, O.-C. (2013). Comparison of phenolic acids and flavonoids in black garlic at different thermal processing steps. *Journal of Functional Foods*, *5*, 80-86.

Kitts, D. D., Wu, C. H., Kopec, A., & Nagasawa, T. (2006). Chemistry and genotoxicity of caramelized sucrose. *Molecular Nutrition and Food Research*, *50*(12), 1180-1190.

Konica Minolta. (2014). Entendiendo El Espacio de Color CIE L*A*B*. Recuperado 15 de noviembre de 2017, a partir de <http://sensing.konicaminolta.com.mx/2014/09/entendiendo-el-espacio-de-color-cie-lab/>

Kuš, P. M., Jerković, I., Tuberoso, C. I. G., Marijanović, Z., & Congiu, F. (2014). Cornflower (*centaurea cyanus l.*) honey quality parameters: Chromatographic fingerprints, chemical biomarkers, antioxidant capacity and others. *Food Chemistry*, *142*, 12-18.

La Madrid, R., Marcelo, D., Orbegoso, E. M., & Saavedra, R. (2016). Heat transfer study on open heat exchangers used in jaggery production modules – Computational Fluid Dynamics simulation and field data assessment. *Energy Conversion and Management*, *125*, 107-120.

Langley, S. (2014). Negative attitude towards sugar changes consumer choices, research. Recuperado a partir de <http://ausfoodnews.com.au/2014/11/26/negative-attitude-towards-sugar-changes-consumer-choices-research.html>

Lara, N., Poaquiza, D., & Oswaldo, A. (2008). Panela granulada: isotermas de sorción de humedad, modelos de ajuste y calor de sorción. *Panela Monitor*, 1-5. Recuperado a partir de <http://www.panelamonitor.org/media/docrepo/document/files/panela-granulada-isotermas-de-sorcion-de-humedad-modelos-de-ajuste-y-calor-de-sorcion.pdf>

Larrahondo, J. E. (1995). Calidad de la Caña de Azúcar. En D. Cassalet, A. Torres, & E. Isaacs (Eds.), *El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia* (pp. 337-355). Cenicaña. Recuperado a partir de http://www.cenicana.org/publicaciones/libro_cana/libro_cana.php

Luz Esperanza, P. F., Arlex, C. G., & Hugo Reinel, G. B. (2015). Efectos de la presión de evaporación y la variedad de caña en la calidad de la miel y la panela / Effects of Evaporation Pressure and the Variety of Cane on the Quality of Sugar Honey and Panela. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria VO - 16*, *16(2)*, 153.

Magerramov, M. A., Abdulagatov, A. I., Azizov, N. D., & Abdulagatov, I. M. (2007). Effect of temperature, concentration, and pressure on the viscosity of pomegranate and pear juice concentrates. *Journal of food engineering*, *80(2)*, 476-489.

Maillard, M.-N., & Berset, C. (1995). Evolution of Antioxidant Activity during Kilning: Role of Insoluble Bound Phenolic Acids of Barley and Malt. *Food Chem*, *43*, 1789-1793.

Malik, V. S., Popkin, B. M., Bray, G. A., Despres, J.-P., & Hu, F. B. (2010). Sugar-Sweetened Beverages, Obesity, Type 2 Diabetes Mellitus, and Cardiovascular Disease Risk. *Circulation*, *121(11)*, 1356-1364.

María, J., César, P., José, F., Orjuela, Á., & Osorio, C. (2017). Physicochemical and sensory (aroma and colour) characterisation of a non-centrifugal cane sugar (“ panela ”) beverage. *Food Chemistry*, *228*, 7-13.

MinAgricultura. (2013). *Informe de resultados rendimientos de producción de panela en trapiches* (Vol. 1). Bogotá. Recuperado a partir de <http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11438/7774/1/OA-PN-INF-06> Informe RENDIMIENTOS PRODUCCIÓN PANELA _Ajust_2014.pdf

MinAgricultura. (2017). Agronet. Bogotá, Colombia. Recuperado 17 de junio de 2017, a

partir de <http://www.agronet.gov.co/Paginas/default.aspx>

Ministerio de la Protección Social. Resolución Número 779 de 2006 (2006). Recuperado a partir de http://www.fedepanela.org.co/files/RESOLUCIN_779_DE_2006.pdf

Mohos, F. Á. (2017). *Data on engineering properties of materials used and made by the confectionery industry, in confectionery and chocolate engineering: principles and applications*. John Wiley & Sons, Ltd. Oxford, UK. <https://doi.org/10.1002/9781444320527.app1>

Naranjo, D. (2008). *Caracterización reológica y térmica de miel de dos variedades de caña*. Universidad Técnica de Ambato.

Naranjo, W. (2009). Caracterización reológica y térmica de miel de dos variedades de caña. *Alimentos ciencia e ingeniería*, 18(2), 5-12.

Nath, A., Dutta, D., Kumar, P., & Jp, S. (2015). Review on Recent Advances in Value Addition of Jaggery based Products. *J Food Process Technol*, 6(6).

Nielsen, S. (2010). *Food analysis*. Springer US.

Nielsen, S. (2014). *Food Analysis Fourth Edition*. Springer.

Ordoñez, R. A., Hernández, C. A., & Pedraza, L. F. (2012). Modelado de un Sistema de Evaporación de Múltiple Efecto para la Producción de Panela (Azúcar no Centrifugado). *Información tecnológica*, 23(6), 105-120.

Oroian, M., Ropciuc, S., Amariei, S., & Gutt, G. (2015). Correlations between density, viscosity, surface tension and ultrasonic velocity of different mono- and di-saccharides. *Journal of Molecular Liquids*, 207, 145-151.

Osorio, G. (2007). *Buenas prácticas agrícolas -BPA- y buenas prácticas de manufactura -BPM- en la producción de caña y panela*. Medellín.

Palacios, L. M. (2012). *Factibilidad técnica para la obtención de panlea porcionada de alta velocidad de disolución a nicel de trapiche (Tesis de maestría)*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Palacios, L., Orjuela, Á., Narváez, César, P., & Osorio, C. (2016). Spray drying of sugarcane honeys (*Saccharum officinarum* L .) without additives. *Agronomía Colombiana*, 34(September), 649-651.

Paton, N. (1992). The origin of color in raw sugar. *Proceedings of australian society of sugar cane technologists*, 8-17. Recuperado a partir de <http://www.panelamonitor.org/media/docrepo/document/files/the-origin-of-colour-in-raw-sugar.pdf>

Peña, A. (2009). *Determinación de propiedades fisicoquímicas de jugos y mieles de caña panelera*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Pongsawatmanit, R., Miyawaki, O., & Yano, T. (1993). Measurement of the Thermal Conductivity of Unfrozen and Frozen Food Materials by a Steady State Method with Coaxial Dual-cylinder Apparatus. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 57(7), 1072-1076.

Prada, L. (2002). *Mejoramiento en la calidad de miel y panela*. Recuperado a partir de <http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/jspui/handle/11348/4687>

Prada, L., & Chaves, A. (2015). Efecto de las variables de evaporación: presión y flujo calórico en la calidad de la panela. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 16, 7-23.

Prada Forero, L. E., García Bernal, H. R., & Chaves Guerrero, A. (2015). Efecto de las variables de evaporación: presión y flujo calórico en la calidad de la panela Effect of the variables of evaporation: pressure and heat flux in the quality of panela. *Corpoica Cienc. Technol. Agropecu*, 16(1).

Procolombia. (2017). *Perspectivas comerciales de los productos paneleros*. Bogotá.

Rezaul, M., Shishir, I., & Chen, W. (2017). Trends of spray drying: A critical review on drying of fruit and vegetable juices. *Trends in Food Science & Technology*, 65, 49-67.

Riffer, R. (1988). *The Nature of Colorants in Sugarcane and Cane Sugar Manufacture. Sugar Series* (Vol. 9). Elsevier B.V.

Rojas-Cazares, S., Delgado-Reyes, V., & Martínez-Padilla, P. (2005). Efecto de la temperatura y concentración de sólidos solubles en la viscosidad de soluciones de sacarosa. *Proceedings of CIBIA*, 5(1), 1-5.

Sahin, S., & Sumnu, S. G. (2006). Thermal Properties of Foods. En *Physical Properties of Foods* (pp. 107-155). New York, NY: Springer New York.

Schlumbach, K., Pautov, A., & Flöter, E. (2017). Crystallization and analysis of beet and cane sugar blends. *Journal of Food Engineering*, 196, 159-169.

Segui, L., Calabuig-Jimenez, L., Betoret, N., & Fito, P. (2015). Physicochemical and antioxidant properties of non-refined sugarcane alternatives to white sugar. *International Journal of Food Science and Technology*, 50(12), 2579-2588.

SENA. (2014). *La cadena productiva de la caña panelera y la sostenibilidad*. Recuperado a partir de <http://comunidad.udistrital.edu.co/ieud/files/2014/11/Presentación-Cadena-Productiva-de-La-Panela.pdf>

Singh, P., & Heldman, D. (2008). *Introduction to food engineering*. Elsevier.

SIOC. (2010). *Acuerdo de competitividad cadena agroindustrial de la panela*. Recuperado a partir de http://sioc.minagricultura.gov.co/templates/sioc_cadenas/docs/1278.pdf

Superintendencia de Industria y Comercio. (2012). *Estudios de Mercado. Cadena*

productiva de la panela en Colombia: diagnóstico de libre competencia (2010-2012). Superintendencia de Industria y Comercio. Recuperado a partir de http://www.sic.gov.co/recursos_user/documentos/promocion_competencia/Estudios_Economicos/Panela2012.pdf

Telis-Romero, J., Telis, V. R. N., Gabas, A. L., & Yamashita, F. (1998). Thermophysical properties of Brazilian orange juice as affected by temperature and water content. *Journal of Food Engineering*, 38(1), 27-40.

Tiwari, G. N., Prakash, O., & Kumar, S. (2004). Evaluation of convective heat and mass transfer for pool boiling of sugarcane juice. *Energy Conversion and Management*, 45(2), 171-179.

Velásquez, Hector; Chejne, Janna; Agudelo, A. (2011). Diagnóstico energético de los procesos productivos de la panela en Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 57(2), 14.

Wahhed, S., & Ahmad, S. (2008). Instrumental neutron activation analysis of different products from the sugarcane industry in pakistan part 1: Essential elements for nutritional adequacy. *Journal of AOAC international*, 91(2), 392-399.

Yamaguchi, T., Mizobuchi, T., Kajikawa, R., Kawashima, H., Miyabe, F., Terao, J., ... Matoba, T. (2001). Radical-Scavenging Activity of Vegetables and the Effect of Cooking on Their Activity. *Food Sci. Technol. Res*, 7(3), 250-257.

Zavaleta, R. (2011). Preparación de jarabes de sacarosa mediante mediciones volumétricas. *Acta Nova*, 5(1), 110-137.