



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos  
Hidráulicos (ERIS)

**VALORIZACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE SUBPRODUCTOS DEL PROCESO DE  
BENEFICIADO DE CAFÉ HÚMEDO Y PROPUESTAS DE MEDIDAS SANITARIAS PARA SU  
REUSO**

**Inga. Valeria Michelle Stewart Pineda**

Asesorado por el MSc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos

Guatemala, noviembre de 2020



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**VALORIZACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE SUBPRODUCTOS DEL PROCESO DE  
BENEFICIADO DE CAFÉ HÚMEDO Y PROPUESTAS DE MEDIDAS SANITARIAS PARA SU  
REÚSO**

ESTUDIO ESPECIAL

PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y  
RECURSOS HIDRÁULICOS (ERIS)

POR

**INGA. VALERIA MICHELLE STEWART PINEDA**

ASESORADO POR EL MSC. ING. ADÁN ERNESTO POCASANGRE  
COLLAZOS

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE  
**MAESTRO (MAGISTER SCIENTIFICAE) EN CIENCIAS  
DE INGENIERÍA SANITARIA**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2020



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE ESTUDIO ESPECIAL**

EXAMINADOR	MSc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos
EXAMINADOR	MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis
EXAMINADOR	MSc. Ing. Zenón Much Santos



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **VALORIZACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE SUBPRODUCTOS DEL PROCESO DE BENEFICIADO DE CAFÉ HÚMEDO Y PROPUESTAS DE MEDIDAS SANITARIAS PARA SU REUSO**

Tema que me fuera asignado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, con fecha 24 de septiembre de 2019.

**Inga. Valeria Michelle Stewart Pineda**

Correo electrónico: [stewartpineda.valeria@gmail.com](mailto:stewartpineda.valeria@gmail.com)

Carné No. 201990375



Universität Potsdam, Institut für Ernährungswissenschaft, AG  
Instrumentelle Analytik in der Ernährungswissenschaft, Arthur-  
Scheunert-Allee 114-116 14558 Nuthetal OT Bergholz-Rehbrücke

University of San Carlos  
of Guatemala.

**Mathematisch-Naturwissenschaftliche  
Fakultät**

Institut für Ernährungswissenschaft

AG Instrumentelle Analytik in der  
Ernährungswissenschaft  
apl. Prof. Dr. Harshadrai M. Rawel

Email: rawel@uni-potsdam.de

Telefon: (033200) 88-5525

Telefax: (033200) 88-5541

Datum: 22.07.2020

#### DAAD support for Valeria Michelle Stewart Pineda

Hereby, I inform you that the student Valeria Michelle Stewart Pineda with Passport E561847 (date of birth: 06.08.1992; Honduran; - student of Prof. Dr. Pedro Saravia from the University of San Carlos of Guatemala - Regional School of Sanitary Engineering and Water Resources (ERIS)), has successfully completed the characterization of by-products and wastewater from the wet-coffee processing (Main constituents on different colored coffee cherries throughout wet-coffee processing) as part of her master thesis.

The characterization was carried out since March to July of the present year in the laboratory at the University of Potsdam, Institute of Nutritional Science 14558 Nuthetal (Bergholz-Rehbrücke) Arthur-Scheunert-Allee 114-116.

Yours sincerely,

apl. Prof. H. M. Rawel, Bergholz-Rehbrücke, den 22.07.2020

Head of the working group: Instrumental Analysis in Nutritional Science







Guatemala, 5 de noviembre 2020

Señores Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado  
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS):

Respetuosamente les comunico que he revisado y aprobado, en mi calidad de asesor y coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria, el informe final del Estudio Especial titulado:

**VALORIZACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE SUBPRODUCTOS  
DEL PROCESO DE BENEFICIADO DE CAFÉ HÚMEDO Y  
PROPUESTAS DE MEDIDAS SANITARIAS PARA SU REUSO**

Presentado por el estudiante:

**Inga. Valeria Michelle Stewart Pineda**

Les manifiesto que la estudiante cumplió en forma satisfactoria con todos los requisitos establecidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos - ERIS- y por la Universidad de San Carlos de Guatemala en la realización de su estudio. Agradeciéndoles de antemano la atención a la presente, se suscribe de ustedes,

Atentamente,  
"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

M.Sc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos  
Coordinador Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria

El director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos -ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: M.Sc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre, M.Sc. Ing. Zenón Much Santos y, M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis, así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria ; M.Sc Ing. Adán Ernesto Pocasangre y la revisión lingüística realizada por la Licenciada Jéssica Melgarejo Monterroso, Colegiada No. 27003, al trabajo de la estudiante Inga. Valeria Michelle Stewart Pineda, titulado: **VALORIZACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE SUBPRODUCTOS DEL PROCESO DE BENEFICIADO DE CAFÉ HÚMEDO Y PROPUESTAS DE MEDIDAS SANITARIAS PARA SU REUSO.** En representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo, en Guatemala a los seis días del mes de noviembre de 2020.

### IMPRIMASE

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis

DIRECTOR



## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Mis padres**

Waleska Pineda y Charles Stewart.  
Por su apoyo incondicional y ser los principales formadores de mis principios.

### **Mi familia**

Por ser un ejemplo en mi formación y darme aliento en los momentos difíciles.

### **Mis amigos**

Por estar presente en mi proceso de aprendizaje y ayudarme a seguir adelante.

### **Dolores Pineda**

Por siempre brindarme su apoyo y palabras de ánimo necesarias para no rendirme y alcanzar mis metas.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por formarme en esta gran etapa de mi crecimiento académico.
<b>Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos</b>	Pilar indispensable para mi crecimiento académico y profesional.
<b>DAAD</b>	Sin su apoyo nunca habría sido posible recibir todo el conocimiento y crecimiento a lo largo de esta etapa.
<b>Mis compañeros de la ERIS</b>	Mi mano derecha en todo este camino de formación académica.
<b>Profesor Rawel</b>	Por brindare la oportunidad de hacer el intercambio académico en su institución y apoyo a lo largo de la pasantía.
<b>Gustavo Figueroa</b>	Por dedicar su tiempo a instruirme y lograr finalizar con éxito mi estudio.
<b>Catedráticos de ERIS</b>	Por compartir sus conocimientos y experiencias y enriquecer mi vida académica y profesional.





## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	III
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN .....	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XIII
JUSTIFICACIÓN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
HIPÓTESIS.....	XIX
ANTECEDENTES.....	XXI
ALCANCES Y LIMITACIONES .....	XXVII
INTRODUCCIÓN .....	XXIX
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Agua residual.....	1
1.2. Reutilización de aguas residuales .....	4
1.3. Propiedades antioxidantes .....	6
1.4. Compuestos fenólicos .....	7
1.5. Procesamiento de café .....	9
2. METODOLOGÍA.....	21
2.1. Sitio de estudio .....	21
2.2. Desarrollo de la investigación.....	22
2.2.1. Subproductos líquidos .....	22
2.2.1.1. Muestreo.....	22
2.2.1.2. Parámetros determinados.....	24

2.2.2.	Subproductos sólidos .....	25
2.2.2.1.	Muestreo .....	25
2.2.2.2.	Parámetros determinados .....	27
3.	RESULTADOS.....	39
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	47
4.1.	Tratamiento de aguas residuales .....	47
4.2.	Reúso de residuos sólidos .....	53
4.3.	Condiciones y medidas sanitarias.....	62
	CONCLUSIONES.....	67
	RECOMENDACIONES .....	69
	BIBLIOGRAFÍA.....	71
	APÉNDICES.....	77

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Relación de biodegradabilidad. ....	3
2.	Dosis de nitrógeno durante crecimiento vegetativo. ....	4
3.	Dosis de nitrógeno luego del corte. ....	4
4.	Dosis de fósforo durante crecimiento vegetativo. ....	5
5.	Dosis de fósforo luego del corte. ....	5
6.	Nutrientes necesarios por tipo de cultivo. ....	5
7.	Partes del fruto de café .....	10
8.	Diferencias entre especies de café. ....	11
9.	Variedades de café más cultivadas en Centroamérica. ....	12
10.	Regiones cafetaleras en Guatemala. ....	13
11.	Porcentaje de variedades cultivadas en Guatemala. ....	14
12.	Diagrama de procesos de beneficiado de café húmedo. ....	16
13.	Diagrama del proceso de beneficiado en lugar de muestreo. ....	18
14.	Principales diferencias entre variedades Bourbon y Caturra. ....	19
15.	Ubicación del beneficio de café. ....	21
16.	Puntos de muestreo de agua residual. ....	23
17.	Reactores de fermentación a escala. ....	25
18.	Diagrama de puntos de muestreo. ....	27
19.	Procesos de extracción para realizar métodos FC y FRAP en muestras sólidas recolectadas. ....	30
20.	Procesos de extracción para realizar métodos FC y FRAP en muestras líquidas recolectadas. ....	30

21. Sólidos sedimentables en agua residual del proceso de beneficiado de café húmedo. ....	49
22. Sólidos suspendidos en agua residual del proceso de beneficiado de café húmedo. ....	49
23. Potencial de hidrógeno en agua residual del proceso de beneficiado de café húmedo. ....	50
24. DBO <sub>5</sub> en agua residual del proceso de beneficiado de café húmedo. ....	51
25. Nitrógeno total en agua residual del proceso de beneficiado de café húmedo. ....	52
26. Fósforo total en agua residual del proceso de beneficiado de café húmedo. ....	52
27. Potencial de hidrógeno al inicio y final de la fermentación en café. ....	54
28. Potencial de óxido reductor al inicio y final de la fermentación en café. ...	54
29. Porcentaje de humedad de muestras de café. ....	55
30. Contenido de compuestos fenólicos totales en muestras sólidas de procesos de beneficiado de café húmedo. ....	55
31. Contenido de compuestos fenólicos totales en muestras de agua residual. ....	56
32. Capacidad antioxidante de muestras sólidas de proceso de beneficiado de café húmedo. ....	57
33. Capacidad antioxidante de muestras de agua residual. ....	57
34. Contenido de principales compuestos fenólicos en muestras de café Bourbon. ....	58
35. Contenido de principales compuestos fenólicos en muestras de café Caturra. ....	59
36. Contenido de % de compuestos fenólicos en café pergamino Bourbon. ...	59
37. Contenido de % de compuestos fenólicos en café pergamino Caturra. ....	60
38. Contenido de 5-FQA en el agua residual del proceso de fermentación. ...	60
39. Contenido de cafeína en muestras de café. ....	61

40.	Contenido de cafeína en muestras de agua residual. ....	62
41.	Vista superior de fosa de ensilaje.....	64
42.	Corte longitudinal de fosa de ensilaje.....	64
43.	Corte transversal de fosa de ensilaje. ....	65

## TABLAS

I.	Valores recomendados en Acuerdo Gubernativo 236-2006.....	3
II.	Consumo de agua por proceso.....	18
III.	Preparación de soluciones estándar para FC.....	32
IV.	Preparación de soluciones estándar para FRAP.....	34
V.	Gradiente de operación de HPLC.....	36
VI.	Preparación de soluciones estándar para HPLC.....	37
VII.	Resultados de parámetros en el agua de fuente de abastecimiento.....	39
VIII.	Resultados de parámetros en agua residual del proceso de despulpado.	40
IX.	Resultados de parámetros del agua residual de lavado.....	40
X.	Resultados de parámetros de agua residual en procesos de lavado por recirculado.....	41
XI.	Resultados de ORP y pH al inicio y final de la fermentación.....	41
XII.	Porcentaje de humedad de muestras de café del proceso de beneficiado húmedo.....	42
XIII.	Resultados de contenido de compuestos fenólicos totales en muestras sólidas de Bourbon.....	42
XIV.	Resultados de contenido de compuestos fenólicos totales en muestras sólidas de Caturra.....	43
XV.	Resultados de contenido de compuestos fenólicos totales en muestras líquidas de Bourbon.....	43
XVI.	Resultados de capacidad antioxidante en muestras sólidas de Bourbon..	43
XVII.	Resultados de capacidad antioxidante en muestras sólidas de Caturra...	44

XVIII.	Resultados de capacidad antioxidante en muestras líquidas de Bourbon.	44
XIX.	Resultados de capacidad antioxidante en muestras líquidas de Caturra..	44
XX.	Principales compuestos fenólicos presentes en muestras sólidas de Caturra.....	45
XXI.	Contenido de 5-FQA en muestras líquidas.....	45
XXII.	Contenido de cafeína en muestras sólidas.....	46
XXIII.	Contenido de cafeína en muestras líquidas.....	46
XXIV.	Comparación de resultados con respecto al Acuerdo Gubernativo 236-2006 para descargar a un cuerpo receptor.....	47
XXV.	Análisis de biodegradabilidad de agua residual.....	48
XXVI.	Carga contaminante por kilogramo de café producido.....	51
XXVII.	Tratamiento de aguas residuales.....	53
XXVIII.	Porcentaje de pulpa utilizado en suplemento alimenticio animal.....	66

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>CQA</b>	Ácido clorogénico
<b>FQA</b>	Ácido felúrico
<b>CRHF</b>	Capacidad para reducir el hierro férrico.
<b>cm<sup>3</sup>/L/h</b>	Centímetros cúbicos por litro por hora
<b>σ</b>	Conductividad eléctrica
<b>HPLC</b>	Cromatografía líquida de alta resolución
<b>DBO<sub>5</sub></b>	Demanda biológica de oxígeno
<b>DQO</b>	Demanda química de oxígeno
<b>FRAP</b>	Ferric Reducing Ability of Plasma
<b>FC</b>	Folin-Ciocalteu
<b>FCR</b>	Fuerza centrífuga
<b>g</b>	Fuerza centrífuga con respecto a la fuerza de gravedad
<b>g GAE</b>	Gramos de ácido gálico equivalente
<b>g FE</b>	Gramos de FRAP equivalente
<b>μg/L</b>	Microgramo por litro
<b>μM</b>	Micromolar
<b>μS/cm</b>	Microsiemens por cm
<b>mg/L</b>	Miligramos por litro
<b>mV</b>	Milivoltios
<b>OD</b>	Oxígeno disuelto
<b>pH</b>	Potencial de hidrógeno
<b>ORP</b>	Potencial de óxido de reducción
<b>RPM</b>	Revoluciones por minuto

**SD**

Sólidos disueltos

**TCR**

Temperatura del cuerpo receptor



## GLOSARIO

<b>Agua residual</b>	Líquido al cual se le alteran sus propiedades físicas y químicas debido a que es usado como medio de transporte de otras sustancias o para realizar algún proceso de transformación de la materia.
<b>Antioxidantes</b>	Sustancias que disminuyen la generación de productos oxidados en un sistema de reacciones de radicales libres.
<b>Cafeína</b>	Alcaloide presente en la dieta diaria, en bebidas como el café, el té, el chocolate y algunos refrescos. Puede ser usado como fármaco o nutriente
<b>Compuestos fenólicos</b>	Son todas aquellas sustancias que poseen varios grupos funcionales fenólicos, también llamado hidroxibenceno. Sus estructuras pueden ser aromáticas o alifáticas.



## RESUMEN

En este estudio se caracterizaron los subproductos sólidos y líquidos generados en el proceso de beneficiado húmedo del café. El muestreo se llevó a cabo en un beneficio exportador de café del departamento de Huehuetenango, Guatemala, recolectando muestras por triplicado en cada una de las diferentes etapas del proceso.

A las aguas residuales se les evaluó su calidad midiendo una serie de parámetros físicos y químicos. *In situ* se determinó su temperatura, potencial de hidrógeno, conductividad eléctrica, sólidos disueltos y potencial óxido reductor. En el Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria se determinó su contenido de fósforo total, nitrógeno total, DQO, DBO<sub>5</sub>, sólidos sedimentables y suspendidos. Esta etapa de la investigación se llevó a cabo en la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Con los resultados de estos parámetros se determinó la relación de biodegradabilidad, para poder determinar los posibles métodos de tratamiento, teniendo como resultado que todas las aguas residuales pueden ser tratadas por métodos biológicos.

También se compararon sus resultados con los valores recomendados en el Acuerdo Gubernativo 236-2006 del Ministerio de Ambiente de la República de Guatemala, con lo que se determinó que estas aguas no son aptas para ser descargadas a cuerpos receptores.

De acuerdo al alto contenido de fósforo y nitrógeno total determinado en las muestras de lavado por recirculado y despulpado del proceso, se detectó que estas poseen un valor agregado con un alto potencial de reuso para fertilización de suelos o riego de cultivos.

Para poder determinar otro posible valor agregado a los subproductos se determinó su contenido de antioxidantes, principales compuestos fenólicos y cafeína. Para estas determinaciones las muestras recolectadas fueron trasladadas al Instituto de Ciencias de la Nutrición de la Universidad de Potsdam, en Alemania.

De acuerdo al contenido de estos se determinó que la pulpa de café puede ser utilizada como suplemento de alimento animal luego de llevar a cabo un proceso de estabilización por ensilaje. También puede ser considerada para elaboración de insuficientes de consumo humano, tomando en cuenta las medidas sanitarias de secado y almacenamiento.

Para el caso de las aguas residuales la única que posee una concentración significativa de estos componentes es el agua de fermentado. Y de acuerdo a su contenido de cafeína se podría buscar un posible reuso para consumo humano.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la región centroamericana el café es uno de los productos que sostiene la economía. En el periodo de 2016 a 2017 en Honduras se produjo aproximadamente 8 000 mil miles de sacos de 60 kg de café, en Guatemala aproximadamente 4 000 miles, en Nicaragua 2 500 miles, Costa Rica 1 500 miles<sup>1</sup>.

En el estudio realizado por Claudia Cerrato en 2013, Guatemala muestra que el consumo de agua mínima por quintal de café procesado es de 150 litros, para un beneficio húmedo semitecnificado es de 1 000 litros y para uno tradicional es de 2 000 litros<sup>2</sup>.

Según la investigación realizada por Diego Sánchez y Cecilia Anzola e en 2012, en Colombia para el proceso de beneficiado seco se produce una tonelada de residuos sólidos por cada tonelada de café y en el proceso húmedo para obtener una tonelada de café se producen 3,06 toneladas de residuos sólidos más 22,7 toneladas de aguas residuales<sup>3</sup>.

En Guatemala se tiene una tasa de mortalidad infantil del 34 %. Las principales causas de muerte son neumonía y enfermedades diarreicas, ambas están asociadas a la desnutrición. La desnutrición es una de las principales causas del bajo rendimiento escolar. En Guatemala el 49,8 % de los niños sufre

---

<sup>1</sup> International Coffee Organization. *Informe del mercado de café*. <http://www.ico.org/es/Council-17-18-c.asp>. Consulta: octubre de 2020.

<sup>2</sup> *Ibíd.*

<sup>3</sup> CERRATO, Claudia. *Neutralización del potencial de hidrógeno del agua del agua miel de un beneficio húmedo tecnificado de café*. p. 149.

desnutrición crónica, teniendo en cuenta que es el primer lugar en América Latina y el cuarto a nivel mundial<sup>4</sup>.

Tomando en cuenta estas cifras se pretende determinar si es posible darles un reúso alimenticio a los subproductos del proceso de beneficiado de café húmedo.

---

<sup>4</sup> International Coffee Organization. *Informe del mercado de café*. <http://www.ico.org/es/Council-17-18-c.asp>. Consulta: octubre de 2020.

## JUSTIFICACIÓN

- Residuos sólidos

En el proceso de beneficiado de café húmedo para lograr obtener una tonelada de café limpio se produce 0,16 toneladas de pergamino, 0,9 toneladas de película plateada y dos toneladas de pulpa. Tomando en cuenta estos datos se produce el triple de desechos sólidos. A los residuos sólidos orgánicos en la mayoría de los casos no se les da un uso adecuado. En el mejor de los casos son utilizados para compostajes para luego ser utilizados en los cultivos como abono. Algunos beneficios lo que hacen es quemar estos desechos en las secadoras de café para disminuir costos energéticos. Tomando en cuenta los estudios presentados anteriormente y viendo la cantidad de residuos sólidos obtenidos se podría dar un mejor uso y convertirlos en subproductos que pueden ser mejor aprovechados.

- Valorización

Con una caracterización química de estos se les podría dar un valor agregado a estos subproductos. Analizando de manera adecuada las características se puede elegir la mejor forma de reutilización, ya que actualmente el reuso que se les da es muy empírico o en el peor de los casos solo son llevados a un centro de disposición final.

- Reúso

Tomando en cuenta los antecedentes de otros países vemos que el valor económico que tienen estos subproductos es muy alto, ya que puede ser utilizado tanto en la industria alimenticia como en la de producción energética.

- Desnutrición

Guatemala pierde anualmente más de tres mil millones de dólares por la desnutrición, tomando en cuenta que las madres desnutridas dan a luz a niños desnutridos. Las principales causas de la desnutrición son la falta de alimento y los malos hábitos alimenticios. En 2018 Unicef reportó que la desnutrición crónica en Guatemala afecta a uno de cada dos niños menores de cinco años.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Caracterizar y valorizar los subproductos provenientes del proceso de beneficiado de café húmedo para poder darles reuso y un mejor aprovechamiento.

### **Específicos**

- Determinar la biodegradabilidad ( $DBO_5/DQO$ ), el contenido de nutrientes (nitrógeno y fósforo), sólidos suspendidos y sedimentables en el agua residual del proceso de beneficiado de café húmedo.
- Determinar el contenido de los principales compuestos fenólicos, capacidad antioxidante y cafeína en los subproductos provenientes del proceso de beneficiado de café húmedo.
- Determinar la influencia de la coloración de la cereza de café en el contenido de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante.
- Proponer un método sanitario para el correcto manejo de los subproductos del proceso de beneficiado de café húmedo para ser utilizados para elaboración de alimento.



## **HIPÓTESIS**

Según la caracterización de los subproductos, tanto sólidos como líquidos, del proceso de beneficiado de café húmedo, ¿será posible encontrar un valor agregado para un posible reuso?



## ANTECEDENTES

Centroamérica es la tercera región cafetalera del mundo y el café es uno de los principales productos de exportación, por lo que está muy ligado al desarrollo social y económico de los países del istmo. A partir de 1950 se intensificó su demanda, por lo cual se empezó a mejorar el rendimiento en el proceso de su obtención. Pero el aumento de rendimiento provocó un efecto negativo en el deterioro ambiental.

A pesar de que este se cultiva en muchas regiones hay gran diversidad de sistemas agrarios. Esto debido a las condiciones históricas, demográficas y geográficas de las zonas centroamericanas. El café se ha beneficiado en Centroamérica tanto por vía húmeda como seca. La elección del método depende de la disponibilidad de agua y medios de transporte de la zona.

Al inicio de la caficultura los productores secaban las cerezas al sol, para luego separar la pulpa seca de las semillas y esta era utilizada para otros productos alimenticios o elaboración de compostajes. Esta tradición fue traída desde la Colonia. A mediados del siglo XX se empezó a fomentar el uso de agroquímicos para mejorar su rendimiento debido al deterioro del suelo a través del tiempo, y la pulpa (*compost*) dejó de ser la principal fuente de abono para los cultivos<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> SÁNCHEZ, Diego; ANZOLA, Cecilia. *Caracterización química de la película plateada del café (Coffea arábica) en variedades Colombia y Caturra*. pp. 211-226

Los sistemas tradicionales de café pueden sostenerse básicamente con los mismos recursos del sistema, los que pueden ser reciclados permanentemente. Este es un tema que genera mucha controversia ya que algunos estudios dicen que en los sistemas tradicionales al tener mayor diversidad del ecosistema se tiene una mayor cantidad de microorganismos, los cuales contribuyen al control biológico de plagas y enfermedades en los cultivos.<sup>6</sup> El sistema tradicional de producción de café orgánico especial es uno de los que tiene el potencial de generar un ingreso estable y aceptable haciendo uso del *compost*.

El verdadero desafío que se tiene actualmente es buscar una manera de que el caficultor logre su propósito ya sea por alguno de los métodos, utilizando la mínima cantidad de agua de riesgo que sea sostenible y rentable para su propio beneficio, lo cual como consecuencia mejorará la economía del país productor. Por lo que actualmente el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) y centros nacionales y regionales de investigación de toda Centroamérica trabajan en iniciativas para dar mejoras a estos sistemas.

Actualmente se cuenta con varios estudios realizados en la región latinoamericana para proponer posibles reúsos de los subproductos generados por el beneficiado de café, entre ellos:

Un estudio realizado por un equipo multidisciplinario entre la Universidad de Valencia (España), la Universidad de Granma (Cuba), el Centro Desarrollo de la Montaña (Cuba) y el Centro Universitario Guantánamo (Cuba), titulado *Utilización de la pulpa de café en la alimentación de alevines de tilapia roja*. Desarrollado por Yanixi Acosta, Nelson Betancourt, Elba Castellanos, Ana Matos, Víctor Cobos y Miguel Jover en el 2002. Ellos evaluaron el efecto de la inclusión de la pulpa de

---

<sup>6</sup> ACUÑA, Victor Hugo; FERNÁNDEZ, José Antonio. *Historia del istmo centroamericano Volumen 1*. p. 248.

café deshidratada a la dieta de alevines. En el estudio se hizo un análisis de la composición de materia seca, fibra cruda, proteína cruda y cenizas a la pulpa del café deshidratada. En el proceso se le hicieron análisis de transparencia, pH, % de transparencia, color, nitritos, nitratos y cantidad de fitoplancton al agua de las peceras, las cuales arrojaron valores aceptables para la calidad de agua, teniendo como conclusión del estudio que se puede utilizar hasta un 20 % de pulpa deshidratada en la alimentación de alevines y que es mucho más económico que las dietas convencionales.

La Facultad de Agronomía, del Departamento de Biología Aplicada y Alimentos de la Universidad de Buenos Aires, realizó un estudio titulado *Evaluación de lípidos en residuos de café y determinación de posibles usos bioenergéticos*, el cual fue llevado a cabo por Paz, Chludil, Leicach y Mongeli en 2019, se tomaron muestras del residuo del café (chingaste), el cual dio como resultado un 10 % de aceite que puede ser utilizado como fuente para obtener biodisel.

En la Universidad Regional Autónoma de los Andes de Ecuador, se hizo un estudio titulado *Estudio de la película plateada del café para su reutilización en panadería*. Realizado por Jonathan Yáñez en el 2018. Se llevó a cabo un análisis de la cantidad de proteínas, grasas e hidratos de carbono de pan horneado, dando como resultado un pan con un contenido calórico de 198 kilocalorías, el cual está cumpliendo la función de fortificación debido al contenido de fibra dietética que posee. Tomando en cuenta esto se concluyó que la utilización de esta película plateada en la industria de la panificación contribuiría a la disminución de la generación de residuos sólidos por el beneficiado de café, a su vez tendría un valor económico ya que generaría empleos y disminución del uso de otros materiales que aportan fibra al pan.

En la Universidad Nacional de Colombia se realizó un estudio titulado *Caracterización química de la película plateada del café en variedades Colombia y Caturra*. Desarrollado por Diego Sánchez y Cecilia Anzola en 2012. En este estudio los investigadores tomaron muestras de dos variedades de café (Colombia y Caturra) y analizaron su contenido de fibra y la actividad antioxidante de la película plateada, dándoles como resultado que ellos recomiendan el uso de este subproducto en las industrias alimentarias de producción de pan, galletas, carnes o embutidos debido a su alto contenido de fibra.

Según la *Guía ambiental para el sector café de Guatemala* (Acuerdo Ministerial número 314-2018), elaborada por la Asociación Nacional del Café (Anacafe, 2019), se presenta un plan de gestión ambiental para cada una de las etapas del proceso de obtención del café desde su cultivo hasta el proceso de bonificado. Además de esto se tiene un plan de gestión ambiental de los procedimientos secundarios. Para la gestión de la pulpa se recomienda como medida de mitigación:

- El uso de esta para abono de los cultivos del café y otros productos.
- La acumulación de esta con un adecuado manejo de los lixiviados, para su disposición adecuada.

En diciembre de 2018 Francisco Fabian Juárez Padilla, con el apoyo del Departamento de Investigación y Consultoría Económica de Guatemala, publicó un documento titulado *El café guatemalteco. Un enfoque en el mercado mundial y su productividad*. En este documento él presenta una serie de propuestas para hacer uso de los subproductos del café. Plantea que la utilización de los subproductos tiene como beneficio reducir la contaminación de las tierras y agua, además de generarle un ingreso adicional al productor.



En la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), de la Universidad de San Carlos Guatemala, se han realizado varios estudios relacionados con el proceso de beneficiado de café, entre ellos:

- La tesis desarrollada por Bianca Alas y Marco Moreno en 2013, titulada *Evaluación de la eficiencia de modelos experimentales de lecho de roca caliza y lagunas facultativas, a escala de laboratorios, para el ajuste del potencial de hidrógeno y la remoción de la carga contaminante de las aguas mieles de un beneficio húmedo tecnificado de café*. Demuestran que el contenido de nitrógeno presente en el agua residual es mayor que el de fósforo.
- En el estudio realizado por Claudia Cerrato en 2013, titulado *Neutralización del potencial de hidrógeno del agua miel de un beneficio húmedo tecnificado de café*. Muestra que el consumo de agua mínima por quintal de café procesado es de 150 litros. Para un beneficio húmedo semitecnificado es de 1 000 litros y para uno tradicional es de 2 000 litros. Al agua residual utilizada para despulpar y lavar el café se le denomina agua miel (agua residual).



## ALCANCES Y LIMITACIONES

Entre los alcances del presente estudio exploratorio está que se realizaron muestreos puntuales de los subproductos sólidos y líquidos en cada uno de los puntos del proceso de beneficiado de café húmedo, en la comunidad de La Libertad en el municipio de la Democracia del departamento de Huehuetenango de la República de Guatemala. Seguido por el análisis de las muestras líquidas tomadas en el laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria Dra. Alba Tabarini de Molina de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Para el análisis de las muestras sólidas tomadas se analizó en el Laboratorio de Analítica Instrumental en Ciencias de la Nutrición ubicado en el Instituto de Ciencias de la Nutrición de la Universidad de Potsdam, Alemania.

Dentro de las limitaciones del estudio exploratorio se encontró el traslado y tiempo de recolección de las muestras, ya que debido a la temporada de procesamiento de café solo se realiza en los primeros dos meses del año y el acceso al lugar es limitado. En cuanto al traslado de las muestras sólidas, se limitó el número de las mismas ya que los análisis se realizaron en Instituto de Ciencias de la Nutrición de la Universidad de Potsdam, Alemania, y el costo del traslado de las muestras es muy alto.



## INTRODUCCIÓN

En los procesos industriales para obtener un producto final se debe transformar la materia prima a través de etapas. Estas etapas pueden ser procesos unitarios u operaciones unitarias, en las cuales se generan subproductos o residuos que puede ser sólidos, líquidos o gaseosos. En el proceso de beneficiado húmedo del café se obtienen grandes cantidades de residuos sólidos y líquidos, los cuales llamaremos subproductos en este documento, ya que se les quiere caracterizar sus propiedades para poder darles un reuso.

La recolección de muestras analizadas se llevó a cabo en el departamento de Huehuetenango en la comunidad de La Libertad en el municipio de La Democracia del departamento de Huehuetenango de la República de Guatemala. La finalidad fue hacer una comparación entre los dos diferentes tipos de coloraciones de fruto de café que se procesan en el beneficio, recolectando muestras de cada uno de los subproductos sólidos y líquidos generados en el proceso.

El presente estudio se dividió en dos etapas. La primera de ellas se llevó a cabo en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. En esta etapa se evaluó la calidad de las aguas residuales y de la fuente de abastecimiento del proceso. La segunda etapa se realizó en el Instituto de Ciencias de la Nutrición de la Universidad de Potsdam, Alemania, donde se analizó contenido de algunos grupos funcionales presentes.



# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. Agua residual

Para determinar el tratamiento que se debe dar a estas se deben determinar una serie de parámetros fisicoquímicos que dicen su calidad y si puede ser reutilizada.<sup>7</sup> Es posible clasificar los parámetros en físicos y químicos. En este estudio se midieron los siguientes parámetros:

- Parámetros fisicoquímicos:
  - Potencial de hidrógeno (pH) que mide la acidez o alcalinidad que posee el agua residual, en este caso de suma importancia<sup>8</sup>, ya que dice si esta agua puede ser reutilizada o descargada al cuerpo receptor sin algún tratamiento previo.
  - Conductividad eléctrica ( $\sigma$ ) y sólidos disueltos (SD) están muy relacionados debido a que dicen la cantidad de sólidos disueltos presentes que no son perceptibles al ojo humano.
  - Oxígeno disuelto (OD) presente en el agua es de suma importancia para la sobrevivencia de los ecosistemas en el agua y el proceso natural de degradación de la materia orgánica presente en ella.
  - Potencial de óxido reductor (ORP) dice si la materia orgánica presente en el agua se encuentra oxidada o reducida a mayor valor de POR, la materia se encuentra más oxidada y a menor ORP se encuentra

---

<sup>7</sup> SCHULZE, Ernst-Detlef; MOONEY, Harold. *Biodiversity and Ecosystem Function (Ecological Studies, Vol 99)*. p. 525.

<sup>8</sup> *Ibíd.*

reducida. Este parámetro también está directamente relacionado con el pH de manera inversamente proporcional.

- Sólidos sedimentables permiten determinar la cantidad de sólidos que pueden ser eliminados por medio de un proceso físico de precipitación.
- Fósforo total y nitrógeno total miden la cantidad de fósforo y nitrógeno disuelto en el agua residual, dándonos parámetros que permiten tomar mejores decisiones si se desea hacer un reuso del agua o del tipo de tratamiento a implementar.
- Demanda química de oxígeno (DQO) mide el “contenido de materia orgánica tanto de las aguas naturales como de las residuales”.<sup>9</sup>
- Demanda bioquímica de oxígeno cinco (DBO<sub>5</sub>) es un parámetro que mide el “oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica”<sup>10</sup>.

Una relación muy utilizada por la ingeniería sanitaria es el análisis de la biodegradabilidad del agua residual para poder saber si estas pueden ser tratadas por un método biológico de acuerdo a la ecuación 1.

$$\text{Biodegradabilidad} = \frac{DBO_5}{DQO} \quad (1)^{11}$$

Donde: DBO<sub>5</sub> = demanda bioquímica de oxígeno cinco

DQO = demanda química de oxígeno

---

<sup>9</sup> ROMERO, Jairo. *Tratamiento de aguas residuales*. p. 1235.

<sup>10</sup> *Ibíd.*

<sup>11</sup> ARDILLA, Alba; REYES, Juliana; ARRIOLA, Erasmo; HERNÁNDEZ, José. *Remoción Fotocatalítica de DQO, DQO y COT de efluentes de la industria farmacéutica*. pp. 9-17.



Figura 1. **Relación de biodegradabilidad**

<b>DBO<sub>5</sub>/DQO</b>	<b>Carácter</b>
> 0.8	Muy biodegradable
0.7 – 0.8	Biodegradable
0.3 – 0.7	Poco biodegradable
<0.3	No biodegradable

Fuente: METCALF & EDDY, INC. *Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización*. p. 1485.

Para términos legales de la evolución de la calidad de agua residual y poder determinar si esta agua es apta para ser descargada a un cuerpo receptor, se creó el Acuerdo Gubernativo 236-2006 del Ministerio de Ambiente de la República de Guatemala. En la tabla 1 se muestran algunos de los valores recomendados por este acuerdo para poder descargar el agua residual a un cuerpo receptor.

Tabla I. **Valores recomendados en Acuerdo Gubernativo 236-200**

Parámetro	Unidades	Valor recomendado
Temperatura	°C	TCR +/- 7
Potencial de hidrógeno	Unidades de pH	6 a 9
Sólidos suspendidos	mg/L	400
Nitrógeno total	mg/L	25
Fósforo total	mg/L	15
DBO <sub>5</sub>	mg/L	450

Fuente: Acuerdo Gubernativo 236-2016 del Ministerio de Ambiente. *Calidad de agua residual*. Capítulo V. p. 25.

## 1.2. Reutilización de aguas residuales

De acuerdo con el contenido de nutrientes presentes en ella, se puede considerar una opción muy viable para riego de cultivos o piscicultura, tomando las consideraciones de tratamiento previo adecuadas. Las recomendaciones de fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia se muestran en las tablas 1 y 2. Las dosis de fertilización nitrogenada deben hacerse durante las etapas de crecimiento vegetativo y después del corte. Esto debe hacerse de acuerdo al contenido de materia orgánica (MO) en el suelo. En las tablas 3 y 4 se muestran los valores para las dosis de fósforo<sup>12</sup>.

Figura 2. **Dosis de nitrógeno durante crecimiento vegetativo**

Contenido de MO en suelo	Dosis de Nitrógeno (g/planta)				
	Mes 2	Mes 6	Mes 10	Mes 14	Mes 18
≤ 8 %	12	14	12	14	16
> 8 %	14	16	9	12	14

Fuente: SADEGHIAN, Siavosh. *Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia*. p. 45.

Figura 3. **Dosis de nitrógeno luego del corte**

Contenido de MO en suelo	Dosis de Nitrógeno (g/planta)				
	Mes 1	Mes 6	Mes 12	Mes 14	Mes 18
≤ 8 %	7	9	12	14	16
> 8 %	5	7	9	12	14

Fuente: SADEGHIAN, Siavosh. *Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia*. p. 45.

<sup>12</sup> ARDILLA, Alba; REYES, Juliana; ARRIOLA, Erasmo; HERNÁNDEZ, José. *Remoción Fotocatalítica de DQO, DQO y COT de efluentes de la industria farmacéutica*. pp. 9-17.

Figura 4. **Dosis de fósforo durante crecimiento vegetativo**

Contenido de fosforo en suelo	Dosis de Fósforo (g/planta)		
	Mes 1	Mes 6	Mes 18
P ≤ 30 mg/kg	4	5	6

Fuente: SADEGHIAN, Siavosh. *Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia*. p. 45.

Figura 5. **Dosis de fósforo luego del corte**

Contenido de fosforo en suelo	Dosis de Fósforo (g/planta)		
	Mes 6	Mes 12	Mes 18
P ≤ 30 mg/kg	6	5	6

Fuente: SADEGHIAN, Siavosh. *Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia*. p. 45.

El consumo de nutrientes por tipo de cultivo se muestra en la tabla 5.

Figura 6. **Nutrientes necesarios por tipo de cultivo**

Cultivo	Consumo de nutrientes (kg*ha <sup>-1</sup> *año <sup>-1</sup> )	
	Nitrógeno	Fósforo
Cebada	71	17
Maíz	174 - 193	19 - 28
Caña	80 - 200	50 - 90
Algodón	74 - 112	14
Papa	260	23
Soya	106 - 44	13 - 21
Trigo	56 - 91	17

Fuente: SILVA, Jorge; TORRES, Patricia; MADERA, Carlos. *Reúso de aguas residuales domésticas en agricultura*. pp. 347-359.

### 1.3. Propiedades antioxidantes

Los antioxidantes naturales están presentes en las plantas y alimentos, estos tienen la propiedad de retrasar la oxidación (ranciedad) en ellos. Un antioxidante dietético es una sustancia que forma parte de los alimentos de consumo cotidiano y que puede prevenir los efectos adversos de especies reactivas sobre las funciones fisiológicas normales de los humanos<sup>13</sup>.

Estos pueden prevenir, retrasar o reparar la formación de radicales libres, los cuales son responsables de la aparición de muchas enfermedades degenerativas. Entre ellas están la diabetes, cáncer y enfermedades cardiovasculares. Los antioxidantes pueden ingresar al organismo mediante los alimentos y entre los más importantes tenemos:

- Vitamina
- Carotenoides
- Polifenoles
- Glucosinolatos y algunos compuestos orgánicos azufrados

Es muy importante considerar agregar a nuestra dieta alimentos con capacidad antioxidante para prevenir estas enfermedades y mejorar nuestra calidad de vida.<sup>14</sup> Para saber la cantidad de antioxidantes presentes en un alimento se mide por medio de su capacidad antioxidante. “La actividad antioxidante es la capacidad de una sustancia para inhibir la degradación

---

<sup>13</sup> SILVA, Jorge; TORRES, Patricia; MADERA, Carlos. *Reuso de aguas residuales domésticas en agricultura*. pp. 347-359.

<sup>14</sup> CORONADO, Marta; VEGA, Salvador; REY, León; VAZQUÉZ, Marcela; RADILLA, Claudia. *Antioxidantes: perspectiva actual para la salud humana*. pp. 206-212.

oxidativa.”<sup>15</sup> Para la medición de esta capacidad existe una gran variedad de métodos, entre ellos está la capacidad de absorbanza de radicales de oxígeno (CARO), en inglés llamado ORAC, parámetro antioxidante total de atrapamiento de radicales (PATAR), conocido en inglés como TRAP, capacidad para reducir el hierro férrico (CRHF), en inglés sus siglas son FRAP, y muchos otros.

En este estudio se seleccionó el método de la capacidad para reducir el hierro férrico (CRHF), para determinar la capacidad antioxidante que consiste en una técnica espectrofotométrica en que el reactivo de CRHF originalmente es color verde y cambia a azul cuando entra en contacto con los antioxidantes.<sup>16</sup>

El fruto de café, el café tostado, la bebida derivada del mismo e incluso algunos de los subproductos obtenidos durante el procesamiento del grano, contienen también altas cantidades de compuestos antioxidantes.<sup>17</sup>

#### **1.4. Compuestos fenólicos**

Estos compuestos se encuentran presentes en frutas y verduras, forman parte de los metabolitos secundarios en las plantas, y estos contribuyen a la salud humana previniendo enfermedades cardiovasculares y el cáncer.<sup>18</sup>

En el café el compuesto fenólico presente en mayor cantidad es el ácido clorogénico (CQA) y el ácido felúrico (FQA). Se encuentran sus respectivos

---

<sup>15</sup> DELGADO, Luis; BETANZOS, Gabriel; SUMAYA, Teresa. *Importancia de los antioxidantes dietarios en la disminución del estrés oxidativo*. pp. 10-15.

<sup>16</sup> *Ibíd.*

<sup>17</sup> LONDOÑO, Julian. *Antioxidantes: Importancia biológica y métodos para medir su actividad. Desarrollo y transversalidad*. pp. 129–162.

<sup>18</sup> ESQUIVEL, Patricia; JIMENEZ, Victor. *Functional properties of coffee and coffee by-products*. pp. 488 - 495.

isómeros, los cuales son 3-CQA, 4-CQA, 5-CQA, 3-FQA, 4-FQA, 5-FQA, 3,4-di-CQA, 3,5-di-CQA y 4,5-di-CQA.<sup>19</sup>

Los ácidos clorogénicos, además de poseer actividad antioxidante, son hipoglicemiantes, antivirales, hepatoprotectores y nutraceuticos. Estos ácidos son muy importantes ya que dan las características de aroma y saber al café. Una taza de café posee entre 200 y 500 mg de estos. Los compuestos fenólicos no solo están presentes en el grano del café.<sup>20</sup>

El método espectrofotométrico de Folin-Ciocalteu es el más utilizado para medir la cantidad de compuestos fenólicos totales en productos vegetales. El principio de este método es el cambio de coloración de color amarillo a azul cuando los compuestos fenólicos entran en contacto con el reactivo de Folin-Ciocalteu, a pH básico y se deja que los metales presentes en el reactivo de Folin-Ciocalteu (Wolframio y Molibdeno) se oxiden para luego ser leídos espectrofotométricamente a 765 nm.<sup>21</sup>

Para poder determinar la concentración presente de cada uno de ellos en las muestras se necesita analizar las muestras por medio de la técnica de cromatografía líquida de alta definición (HPLC). Esta técnica consiste en la separación los componentes de una mezcla mediante una fase estacionaria (columna empacada) y una fase móvil (eluyentes). La selección de la fase móvil

---

<sup>19</sup> PORRA, Maria; LÓPEZ, Aurelio. *Importancia de los grupos fenólicos en los alimentos*. pp. 121-134.

<sup>20</sup> ABDELFATAH, Mostafa. *Effect of interaction of food proteins with secondary plant metabolites - consequences on structural and functional properties*. p. 137.

<sup>21</sup> CHÁVEZ, Carolina; ESQUIVEL, Patricia. *Ácidos clorogénicos presentes en el café: capacidad antimicrobina y antioxidante*. p. 13.

y estacionaria depende de la naturaleza de los compuestos que se desean determinar.<sup>22</sup>

## 1.5. Procesamiento de café

El procesamiento del café consiste en la eliminación de cada una de las capas que cubren el fruto de café en diferentes etapas por medio de diferentes operaciones. El fruto de café está compuesto de las siguientes partes:

- Exocarpio (pulpa), esta es de color rojo o amarillo cuando se encuentra maduro.
- Mesocarpio (mucilago), de color cremoso y gelatinoso.
- Endocarpio (pergamino), color crema o marrón.
- Espermodermo (película plateada), esta envuelve la semilla.
- Endospermo que es la semilla.
- Embrión, que este se localiza en la superficie convexa de la semilla.

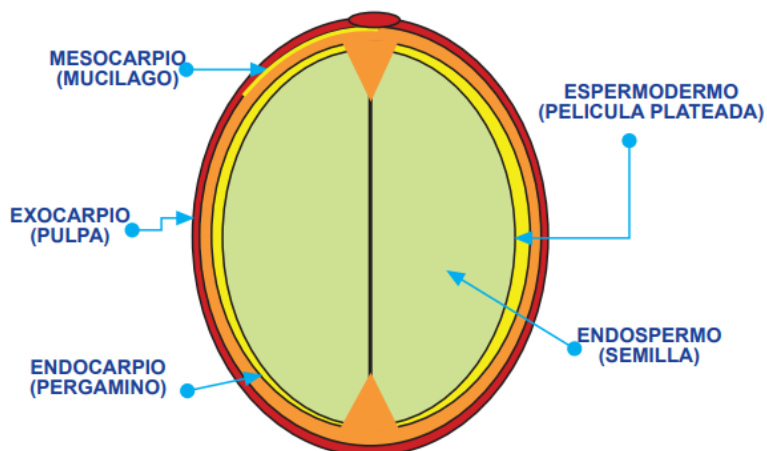
En el mundo se cultivan cuatro diferentes tipos de plantas de café, las más conocidas son *arábica*, *canephora* y *libérico*.<sup>23</sup> Actualmente el 99 % del cultivo comercial de café se concentra en las especies *arábica* y *canephora*, debido a la altura de las otras dos especies, ya que esto dificulta el proceso de corte y cuando los vientos son muy fuertes el fruto cae al suelo antes de llegar a su punto óptimo de maduración.

---

<sup>22</sup> GARCÍA, Eva; FERNÁNDEZ, Isabel; FUENTES, Ana. *Determinación de polifenoles totales por el método de Folin-Ciocalteu*. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/52056/?jsessionid=908DA24DA1F922834445DC1FE681CE1D?sequence=1#:~:text=El%20ensayo%20Folin%2DCiocalteu%20se,determinada%20espectrofotom%C3%A9tricamente%20a%20765%20nm>. Consulta: marzo de 2020.

<sup>23</sup> PLOU, Francisco; TORRES, Pamela. *Cromatografía Líquida de alta resolución (HPLC)*. [http://www.icp.csic.es/abgroup/web3/documentos/Tecnicas\\_Analisis\\_baja%20sin%20ind%20analitico\\_0789.pdf](http://www.icp.csic.es/abgroup/web3/documentos/Tecnicas_Analisis_baja%20sin%20ind%20analitico_0789.pdf). Consulta: junio de 2020.

Figura 7. Partes del fruto de café



Fuente: SOTO, Carlos. *Guía técnica para el beneficiado de café protegido bajo una indicación geográfica o denominación de origen*. p. 211.

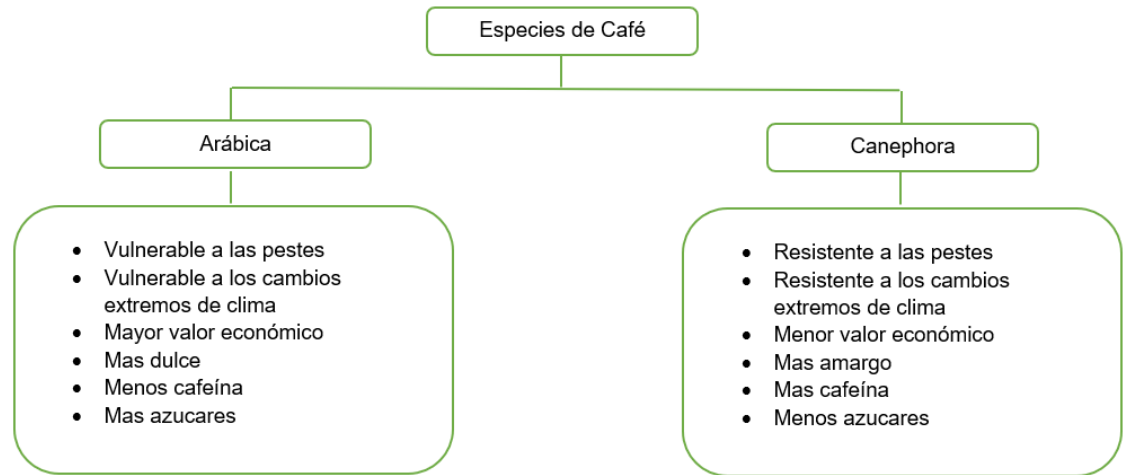
De las dos especies la más cultivada en el mundo es la *coffea arábica*, que representa el 65 % de la producción mundial.<sup>24</sup> Las diferencias entre una especie u otra varían a grandes rasgos de la siguiente manera.

---

<sup>24</sup> VÁZQUEZ, Luis. *Especies y variedades de café*. pp. 18-23



Figura 8. Diferencias entre especies de café



Fuente: BANEGAS, Karen. *Identificación de las fuentes de variación que tienen efecto sobre la calidad de café (Coffea arabica) en los municipios de El Paraíso y Turrialba*. p. 74.

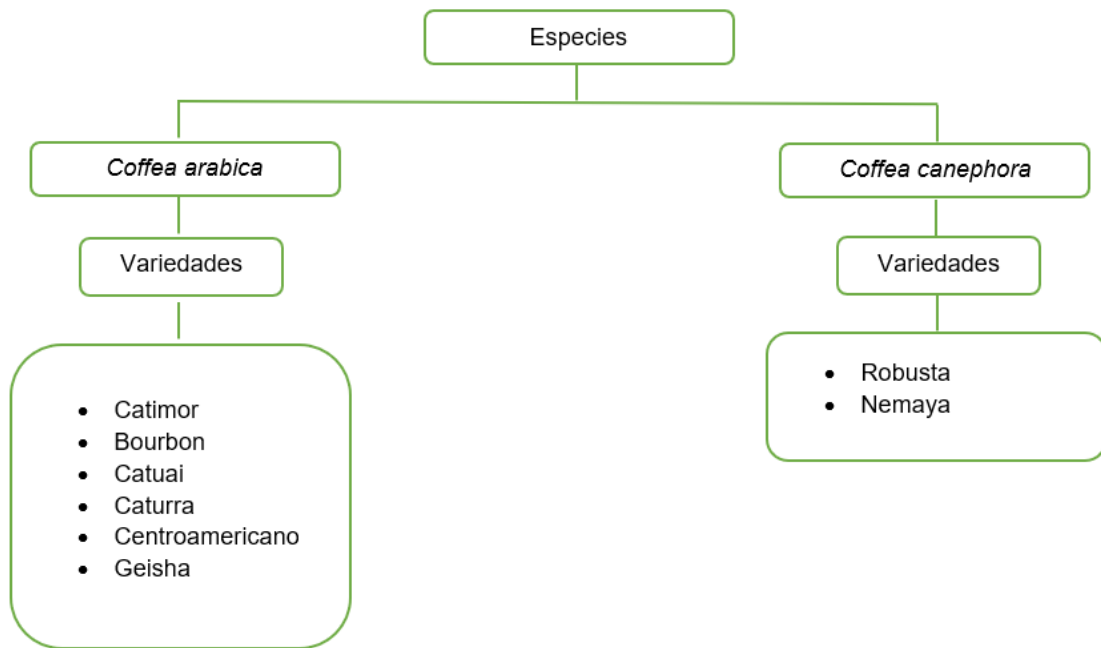
Cada especie a su vez se divide en diferentes tipos de variedades. Estas variedades han ido apareciendo de híbridos formados por la misma naturaleza y en algunos casos desarrollados en laboratorios de investigación con el objetivo de que estas sean más resistentes a algunos factores como cambio climático, altitud o crear resistencia a algunas plagas específicas que se den en las zonas de cultivo, por ejemplo, la variedad centroamericana.<sup>25</sup> En la figura 4 se encuentran algunas variedades existentes.

En la cosecha de 2014/2015, Anacafe creó un programa en el que clasificó el territorio guatemalteco en 8 regiones cafetaleras (Guatemalan Coffees). Estas regiones fueron divididas de acuerdo al sabor y aroma de la taza de café, lo cual

<sup>25</sup> BANEGAS, Karen. *Identificación de las fuentes de variación que tienen efecto sobre la calidad de café (Coffea arabica) en los municipios de El Paraíso y Turrialba*. p. 74.

permite clasificar la calidad del café de acuerdo a sus variedades y procesos de especialidad.<sup>26</sup> Puede verse la figura 5 para identificar mejor dichas regiones.

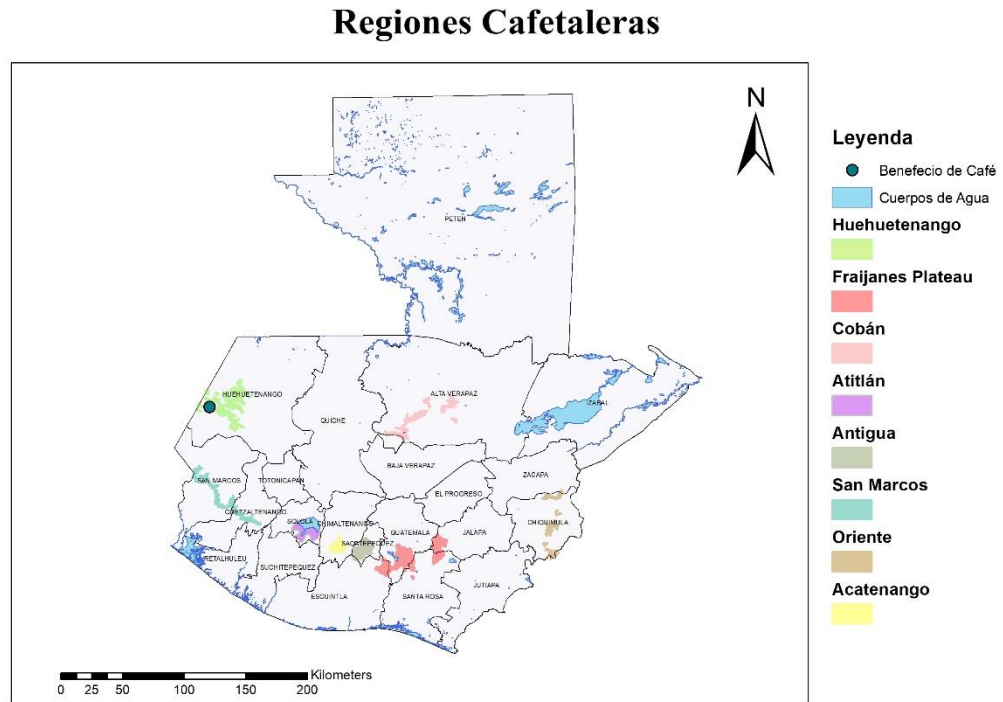
Figura 9. **Variedades de café más cultivadas en Centroamérica**



Fuente: Asociación Nacional del Café. *Innovación y tecnología al servicio del café*. p. 162.

<sup>26</sup> World Coffee Research. *Las variedades de café de Mesoamérica y el Caribe*. worldcoffeeresearch.org. Consulta: febrero de 2016.

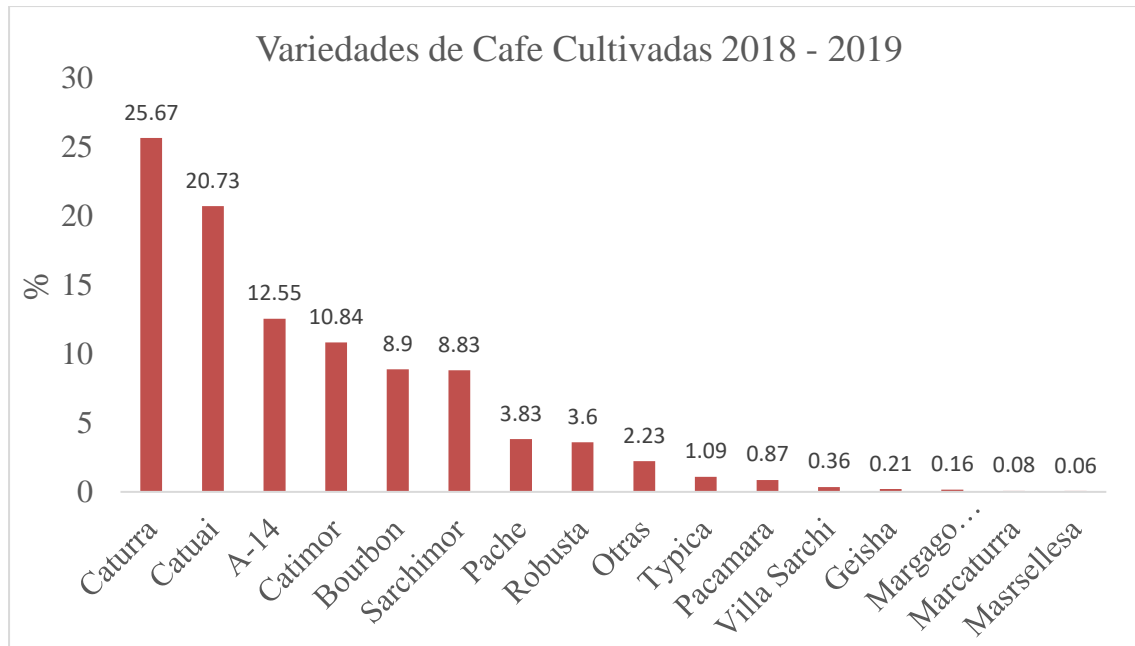
Figura 10. Regiones cafetaleras en Guatemala



Fuente: World Coffee Research. *Las variedades de café de Mesoamérica y el Caribe.*  
worldcoffeeresearch.org. Consulta: febrero de 2016.

En la mayor parte de las 8 regiones cafetaleras se cultiva en mayor porcentaje las variedades Bourbon, Caturra, Catuai y Pache. En la figura 6 se muestran los porcentajes de las variedades que fueron cultivadas en el periodo de 2018-2019.

Figura 11. **Porcentaje de variedades cultivadas en Guatemala**



Fuente: World Coffee Research. *Las variedades de café de Mesoamérica y el Caribe*.  
 worldcoffeeresearch.org. Consulta: febrero de 2016.

Actualmente los procesos de beneficiado de café más aplicados en Centroamérica son el método de vía seca y el método de vía húmeda. En ambos procesos las condiciones y tiempo de cada etapa van a variar con las condiciones de presión y temperatura del lugar, la variedad del café, la calidad del agua que se utilice en caso de ser por vía húmeda, entre otros factores externos. Pero se puede decir que generalmente ambos procesos se llevan a cabo de la siguiente manera:

El proceso de vía seca se lleva a cabo normalmente en los lugares que poseen limitado acceso a fuentes de agua. Las etapas del proceso son las siguientes:

- **Recolección del fruto:** este proceso es manual, los cortadores van a las plantaciones y cortan la uva (fruto) comúnmente hallado en su punto óptimo de maduración.
- **Secado del grano:** este proceso se puede llevar a cabo de manera natural en patios de secado en los cuales el café se extiende y se expone al sol durante un periodo de tiempo, hasta que alcanza la humedad óptima o de manera mecánica (aire caliente) por medio de una secadora en la cual la temperatura óptima se encuentra entre 60 y 70 °C.
- **Trillado:** este proceso es mecánico, se lleva a cabo en una trilla en la cual se elimina la cascarilla y el pergamino al café por medio de una malla vibratoria (tamiz).
- **Clasificado y almacenado:** etapa final donde el café está listo para ser llevado al proceso de tueste y molido en caso de ser vendido molido.

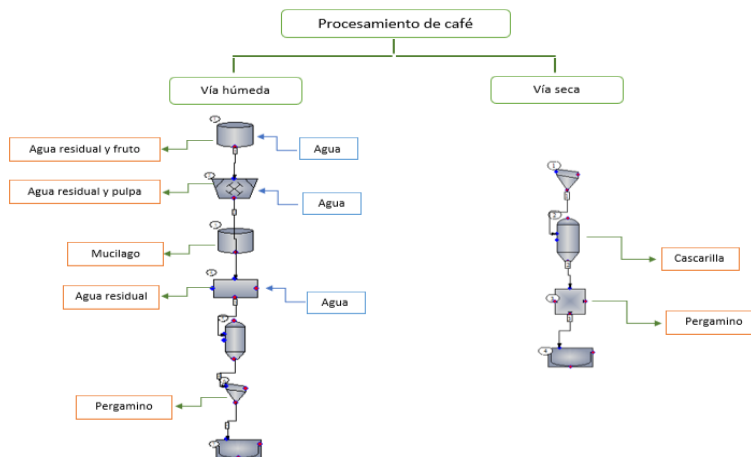
El proceso de vía húmeda se lleva a cabo en las siguientes etapas:

- **Clasificación del fruto:** para saber si el fruto se encuentra en el punto de maduración correcto, se colocan dentro de un tanque que se llena con agua y los frutos que no flotan no son procesados.
- **Despulpado:** este es un proceso mecánico en el cual se desprende la primera capa del fruto de café pulpa. Este proceso se lleva a cabo mediante una máquina llamada despulpadora, se agrega agua para transportar el fruto y desprender la pulpa. Esto permite que parte de la materia orgánica se disuelva en el agua. En esta etapa del proceso se obtienen los subproductos de la pulpa y agua residual del despulpado.
- **Fermentación:** en la tercera etapa del proceso se elimina el mucilago del grano por medio del proceso de fermentación natural. Este proceso depende principalmente de la temperatura ambiente del lugar, suele durar

de 24 a 48 horas. En esta etapa se obtiene el agua residual en la cual va disuelto el mucilago del fruto.

- Lavado: la penúltima etapa del proceso tiene como objetivo eliminar la miel que queda adherida al grano, este proceso se lleva a cabo mediante unos canales llamados correteos en los que se coloca el grano y se deja correr agua para poder eliminar la capa pegajosa. Para hacer el proceso más eficiente el grano se mueve mediante paletas de madera, teniendo como subproducto final el agua residual de lavado y producto principal el grano de café húmedo.
- Secado: en la etapa final del proceso se elimina la humedad del grano de café hasta dejarlo con una humedad entre 10 a 12 %. Este proceso se puede realizar de las mismas maneras que el proceso de vía seca, teniendo como resultado el café pergamino.
- Por último, se tiene las etapas de trillado, clasificado y empackado mencionadas anteriormente en el proceso de vía seca.
- 

Figura 12. Diagrama de procesos de beneficiado de café húmedo



Fuente: elaboracion propia.

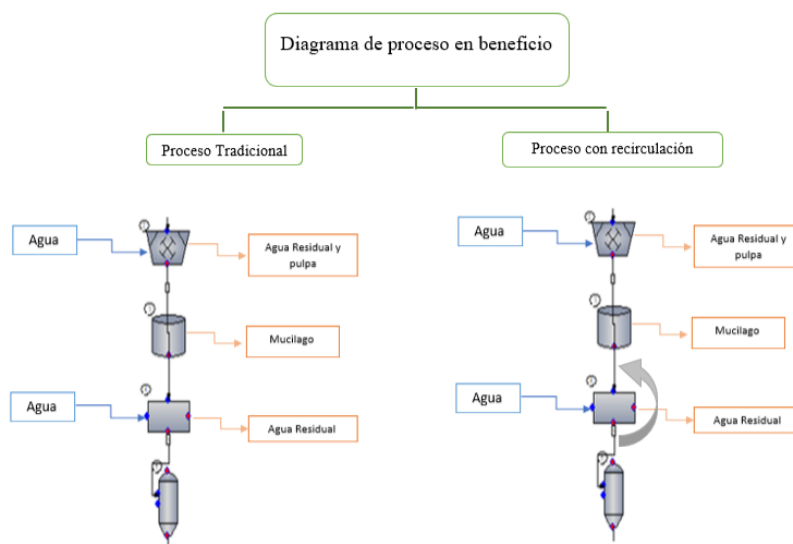
El proceso de beneficiado de café húmedo en el lugar de muestreo se lleva a cabo de la siguiente manera:

- Recepción del fruto: en esta etapa se recibe el fruto y se revisa que este se encuentre en el punto óptimo de maduración y en condiciones ideales para su procesamiento. También aquí se realiza una limpieza por posible presencia de impurezas o materia inerte.
- Despulpado: se utiliza una despulpadora de discos armados alrededor de un eje rotatorio horizontal. Los lados ásperos de los discos mueven el fruto y se exprimen entre la barra despulpadora y los discos, una placa separa a la pulpa de los granos del café.
- Fermentado: el grano despulpado es trasladado a unas pilas de fermentación se deja reposar durante aproximadamente 48 horas. El punto final de fermentación se determina de manera empírica, el encargado de saber el punto final toma los granos con la mano y los estruja y si los granos crujen al chocar quiere decir que están listos para ir a la siguiente etapa.
- Lavado: los granos son llevados a los canales llamados correteos por medio de agua limpia y se mueven con unas paletas de madera. Este proceso se repite hasta cuatro veces con agua nueva hasta dejar el grano completamente libre de la capa ligosa adherida durante la fermentación.
- Secado: el beneficio posee patios de secado en los cuales el café es expuesto aproximadamente durante dos días hasta que alcanza la humedad del 12 %, lo cual también es determinado empíricamente.
- Por último, ellos venden el café pergamino a otra compañía para su exportación.

En un establecimiento de la misma compañía un poco más alejado se realiza el proceso de la misma manera descrita anteriormente con la excepción que se recircula el agua del proceso de lavado hasta saturarla, esto debido al

difícil acceso a la fuente de agua en el lugar. La diferencia entre las etapas del proceso es más fácil de visualizar en la figura 6. El consumo de agua al realizar el proceso de recirculación disminuye diez veces para procesar la misma cantidad de café (ver figura 6 y tabla 2).

Figura 13. Diagrama del proceso de beneficiado en lugar de muestreo



Fuente: elaboracion propia.

Tabla II. Consumo de agua por proceso

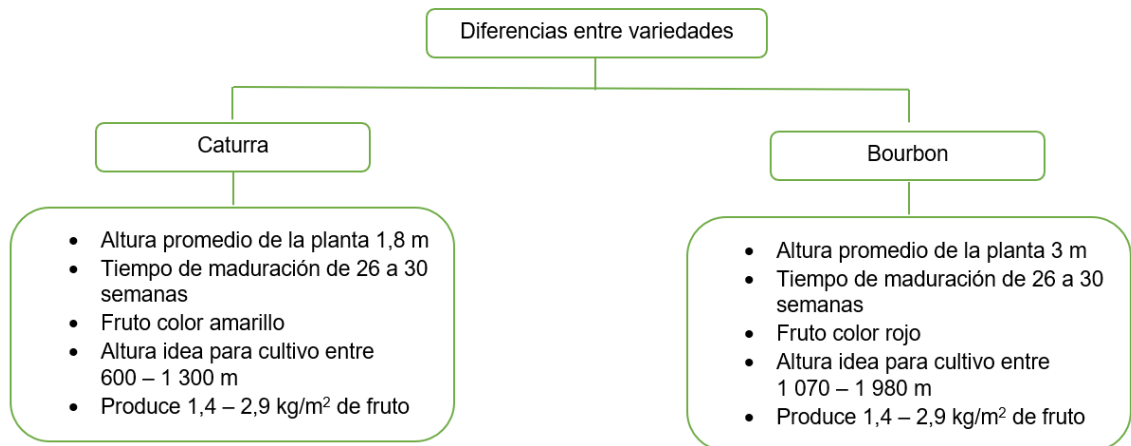
	Consumo de agua por peso de café pergamino (L/kg)
Proceso sin recirculación	7,57
Proceso con recirculación	0,757

Fuente: elaboracion propia.



Para llevar a cabo este estudio se seleccionaron las variedades de *coffea arábica* Bourbon y Caturra. El fruto de la variedad Bourbon cuando llega a su punto de maduración óptimo es color rojo, en cambio en el caso de la variedad Caturra es color amarillo. En la figura 7 se muestran las principales características en cada una de estas variedades.

Figura 14. Principales diferencias entre variedades Bourbon y Caturra



Fuente: Asociación Nacional del Café. *Innovación y tecnología al servicio del café*. p. 162.



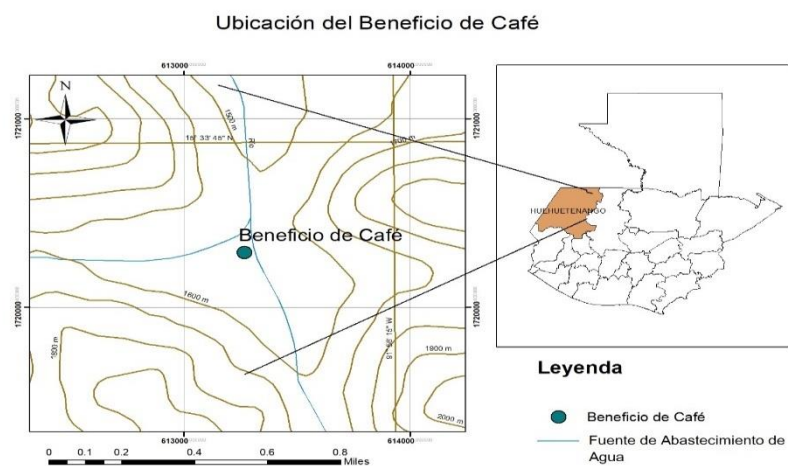
## 2. METODOLOGÍA

El enfoque metodológico del estudio exploratorio es cuantitativo, ya que se midieron ciertos parámetros en cada una de las etapas del proceso de beneficiado de café húmedo. La metodología se describe a continuación:

### 2.1. Sitio de estudio

El beneficio de café húmedo está ubicado en la comunidad de La Libertad en el municipio de la Democracia del departamento de Huehuetenango de la República de Guatemala. En este lugar el café es cultivado a una altura de 1 650 metros sobre el nivel del mar. Con coordenadas: 15°33'27.7"N 91°56'37.3"W.

Figura 15. Ubicación del beneficio de café



Fuente: elaboración propia.

## **2.2. Desarrollo de la investigación**

Para el desarrollo de la investigación se dividió en dos grandes partes, análisis de la fuente de agua del proceso y el agua residual generada, y análisis de muestras sólidas y líquidas de simulaciones a escala realizadas en el lugar.

### **2.2.1. Subproductos líquidos**

Son los siguientes:

#### **2.2.1.1. Muestreo**

Se llevó a cabo de la siguiente manera para el análisis de la fuente de agua del proceso y el agua residual generada:

Tipo de muestras: puntuales

Número de muestras: 9

- Determinación del número de muestras:

En el estudio exploratorio se recolectaron muestras por triplicado en cada uno de los puntos del proceso donde se genera agua residual y la fuente de alimentación de agua.

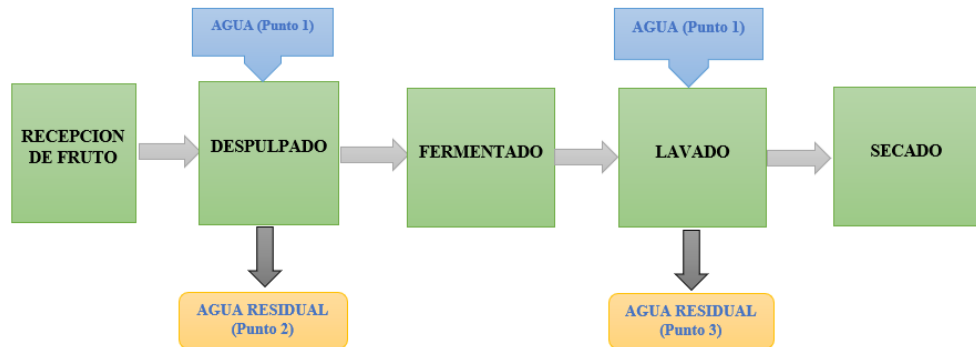
Número de muestras en cada punto  $(n) = 3$

Teniendo un total  $(n) = 3 \times 3 = 9$

- Puntos de muestreo:
  - Punto 1: río de abastecimiento
  - Punto 2: después del proceso de despulpado

- Punto 3: al finalizar el proceso de lavado

Figura 16. **Puntos de muestreo de agua residual**



Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente se recolectaron dos muestras de agua del proceso de lavado del café que se realiza en el beneficio de la misma compañía, en el cual se dificulta el acceso a la fuente de agua y para disminuir el consumo de agua se realiza el proceso de recirculado mencionado anteriormente, teniendo un total de once muestras para llevar a cabo el análisis de calidad de agua.

Las muestras se recolectaron en recipientes con un volumen de 1 galón, trasladándolas a una temperatura aproximada de 4 °C, utilizando hielo para mantener la temperatura de acuerdo al protocolo de toma de muestras de agua residual, según lo indica la toma y preservación de muestras del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.<sup>27</sup>

---

<sup>27</sup> Asociación Nacional del Café. *Guía de variedades de café*. p. 49.

### 2.2.1.2. Parámetros determinados

- Parámetros medidos *in situ*:

Por medio del electrodo multiparamétrico (HI 98194, HANNA, Italia) se midieron los siguientes parámetros:

- Potencial de hidrógeno
  - Temperatura
  - Conductividad eléctrica
  - Oxígeno disuelto
  - Sólidos disueltos
  - Potencial de óxido reducción (ORP)
- Parámetros en el laboratorio:

Las determinaciones se llevaron a cabo en el Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria Dra. Alba Tabarini de Molina del edificio T3 de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, siguiendo el procedimiento planteado en el Manual de Química y Microbiología Sanitaria de ERIS.<sup>28</sup>

- Parámetros químicos: DBO5, DQO, nitrógeno total y fósforo total
- Parámetros físicos: sólidos sedimentables y sólidos suspendidos

---

<sup>28</sup> IDEAM. *Toma de muestras de aguas residuales*. [http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma\\_Muestras\\_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428](http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma_Muestras_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428). Consulta: septiembre de 2020.

## 2.2.2. Subproductos sólidos

Son los siguientes:

### 2.2.2.1. Muestreo

Para asegurar no mezclar frutos de café amarillo (Caturra) con rojo (Bourbon) se hizo una simulación a escala del proceso en el lugar de muestreo, utilizando dos reactores de cinco galones elaborados artesanalmente a los cuales se le colocó fondo falso y quedando el líquido producido después del proceso de fermentación (mucílago) acumulado en el fondo.

Figura 17. Reactores de fermentación a escala



Fuente: elaboración propia.

Tipo de muestras: puntuales

Número de muestras: 48

- Determinación del número de muestras:

Como se trata de caracterizar en un estudio exploratorio se tomaron tres muestras de cada uno de los diferentes subproductos sólidos y líquidos generados en el proceso. Tomando muestras por triplicado. Se tomaron 5 puntos de muestreo para muestras sólidas y 3 para muestras líquidas. Esto se repitió para cada variedad de café.

$$\text{Total de muestras sólidas (n)} = 3 \times 2 \times 5 = 30$$

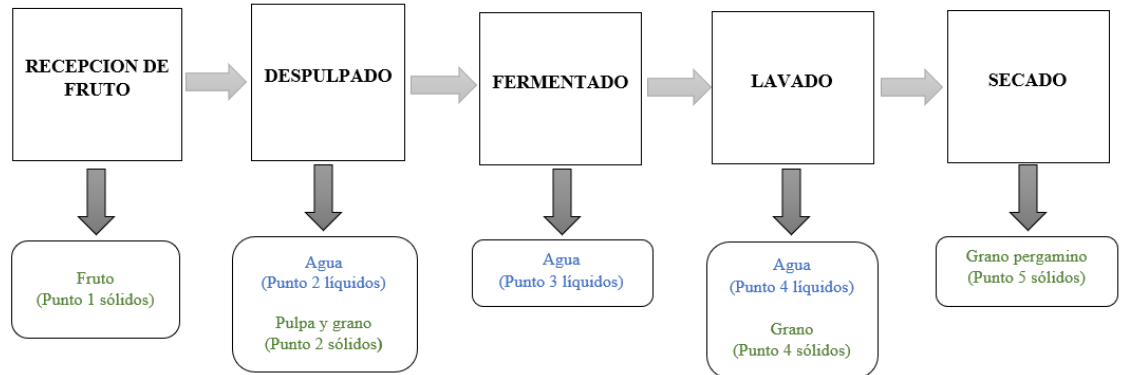
$$\text{Total de muestras líquidas (n)} = 3 \times 2 \times 3 = 18$$

Para poder visualizar de una mejor manera los puntos de muestreo se puede ver la figura 10, donde se observa en los siguientes puntos de muestreo:

- Puntos de muestreo:
  - Punto 1: tanque de recepción
    - Tipo de muestra: fruto de café
  - Punto 2: final del proceso de despulpado
    - Tipo de muestra: granos y pulpa de café
  - Punto 3: final del proceso de fermentación
    - Tipo de muestra: grano de café y agua residual
  - Punto 4: final del proceso de lavado
    - Tipo de muestra: granos de café y agua residual
  - Punto de 5: final del proceso de secado
    - Tipo de muestra: granos de café pergamino



Figura 18. Diagrama de puntos de muestreo



Fuente: elaboración propia.

El procedimiento de muestreo se llevó a cabo colocando las muestras en tubos falcón de 45 mL. Luego de estos fueron trasladadas desde el sitio de muestreo siguiendo el mismo procedimiento que las muestras mencionadas anteriormente y fueron almacenadas en un congelador a 0 °C. Se almacenaron en este congelador hasta el día de su respectivo envío al Instituto de Ciencias de la Nutrición de la Universidad de Potsdam, Alemania.

#### 2.2.2.2. Parámetros determinados

- Parámetros medidos *in situ*:

Por medio de una sonda HI 991002 (HANNA, Italia) se midió el pH y el potencial óxido reductor. Se colocaron 50 mL de agua destilada en un vaso de precipitado y agregando los granos de café. Las mediciones se realizaron al inicio y al final del proceso de fermentación. Este proceso se llevó a cabo para ambas variedades de café.

- Parámetros en el laboratorio

Las determinaciones se llevaron a cabo en el laboratorio de Analítica Instrumental en Ciencias de la Nutrición ubicado en el Instituto de Ciencia Nutricional de la Universidad de Potsdam, Alemania.

- Parámetros químicos:
  - Compuestos fenólicos
  - Capacidad antioxidante
  - Contenido de cafeína
- Parámetros físicos:
  - Porcentaje de humedad

Para la determinación de cada uno de estos parámetros se tuvo que dar un tratamiento previo a las muestras descrito a continuación:

- Liofilización

La técnica de secado de productos alimenticios fue realizada en el liofilizador ubicado en el Instituto de Procesamientos de Granos (IGV) de Potsdam, Alemania. El objetivo de este proceso es preservar las muestras sin perder ninguno de los compuestos y propiedades. El proceso se llevó a cabo siguiendo los siguientes pasos:

- Colocar y etiquetar en placas Petri.
- Lectura de peso inicial de las muestras.
- Congelación de muestras a -20 °C.

- Secado de muestras en liofilizador (Home Freeze Dryers, Harvest Right, EE. UU).
- Lectura de peso final de las muestras.
- Cálculo del porcentaje de humedad perdido en el proceso.

$$\% \text{ Humedad} = \left( \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} \right) * 100^{29}$$

- Molido de muestras

Por medio del triturador AR1105 (Moulinex, Francia) se molieron las muestras hasta dejarlas como un polvo homogéneo. Las muestras fueron pesadas luego de llevar a cabo este proceso.

- Extracción de metabolitos secundarios

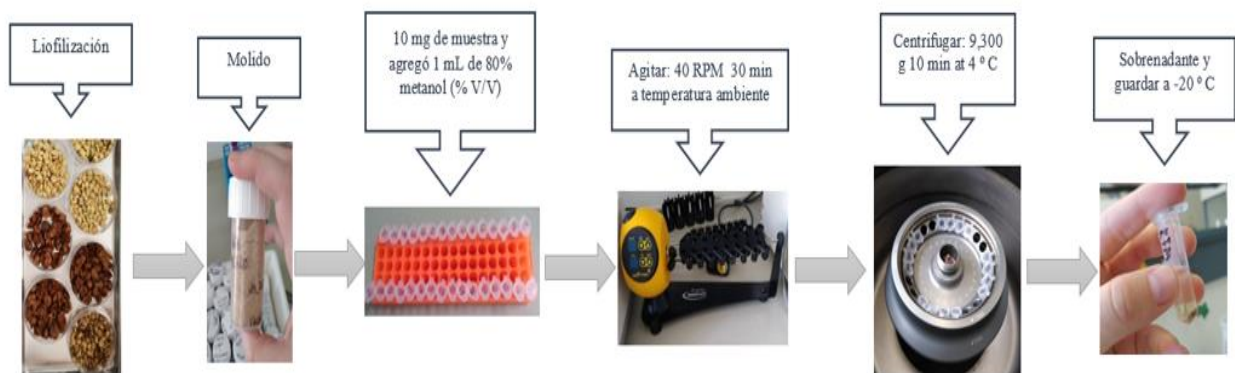
Procedimiento para métodos de FC y FRAP. Se realizó la extracción de los antioxidantes presentes en las muestras sólidas usando como solventes etanol, siguiendo el siguiente procedimiento para cada muestra:

- Pesar 10 mg de muestra y agregar 1 mL solución (80 % etanol, %v/v).
- Agitar por un periodo de 30 minutos a temperatura ambiente a 40 RPM.
- Centrifugar durante 10 minutos a una FCR 9300 x g.
- Recolectar el líquido (sobrenadante) y almacenar a -20 °C.
- El sólido precipitado se desecha.

<sup>29</sup> IDEAM. *Toma de muestras de aguas residuales*. [http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma\\_Muestras\\_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428](http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma_Muestras_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428). Consulta: septiembre de 2020.

Para el caso de las muestras líquidas se tomó 1 mL de las muestras y únicamente fueron realizados los últimos tres pasos antes mencionados.

**Figura 19. Procesos de extracción para realizar métodos FC y FRAP en muestras de sólidos recolectadas**



Fuente: elaboración propia.

**Figura 20. Procesos de extracción para realizar métodos FC y FRAP en muestras líquidas recolectadas**



Fuente: elaboración propia.

- Preparación de muestras para HPLC

Se realizó la extracción de los principales compuestos fenólicos y cafeína en las muestras sólidas usando como solventes etanol y ácido acético siguiendo el siguiente procedimiento para cada muestra:

- Tomar 10 mg muestra y adicionar 1 mL de solución (50 % etanol , 1 % ácido acético, %v/v).
- Agitar por un periodo de 30 minutos a temperatura ambiente a 40 RPM.
- Centrifugar durante 10 minutos a una FCR 9300 x g.
- Recolectar el líquido (sobrenadante) y congelar a -20 °C.
- El sólido precipitado se desecha.

Para el caso de las muestras líquidas se tomó 1 mL de las muestras y se llevaron a cabo los últimos tres pasos antes mencionados. Seguidamente se tomaron 500 µL del sobrenadante y se agregó 500 µL de solución (98 % metanol, 2 % ácido acético, %v/v).

- Procedimiento de método de Folin-Ciocalteu

El método de Folin-Ciocalteu se realizó de acuerdo a la teoría de Zenon Much<sup>30</sup>, con algunas modificaciones.

- Reactivos
  - Reactivo FC
  - Hidróxido de sodio 0,01 M
  - Acido gálico (estándar)

---

<sup>30</sup> MUCH, Zenón. *Manual de Química y Microbiología Sanitaria*. p. 30.

- Equipo
  - Placa de micro titulación (1 x 96)
  - Espectrofotómetro BIO-RAD iMark
  
- Procedimiento
  - Se preparó la solución de Folin agregando 11.25 mL del reactivo de Folin-Ciocalteu y 9 mL de NaOH.
  - Para preparar la solución madre del estándar se tomó 1 mg de ácido gálico en 1 mL de agua destilada.
  - Las diferentes concentraciones para la curva de calibración se prepararon de la siguiente manera:

**Tabla III. Preparación de soluciones estándar para FC**

Solución estándar	Solución madre	Agua destilada
10 µg/mL	10 µL	990 µL
20 µg/mL	20 µL	980 µL
40 µg/mL	40 µL	960 µL
80 µg/mL	80 µL	920 µL
100 µg/mL	100 µL	900 µL
160 µg/mL	160 µL	840 µL

Fuente: MUCH, Zenón. *Manual de Química y Microbiología Sanitaria*. p. 30.

- Se colocaron 20 µl de cada una de las soluciones estándar y de las muestras en cada uno de los agujeros de la placa de micro titulación.
- Luego se agregó cuidadosamente 180 µl de la solución de Folin a cada una de las muestras y soluciones estándar colocadas en la placa de micro titulación.
- Incubar durante 30 minutos a temperatura ambiente.

- Medición de la absorbancia a una longitud de onda de 765 nm.
- Resultados

Los resultados fueron presentados en gramos de ácido gálico equivalente por 100 gramo de muestra seca (g GAE/100 g) para las muestras sólidas y miligramo de ácido gálico equivalente por litro (mg GAE/L) para las muestras líquidas.

- Procedimiento de método FRAP

El método de FRAP se realizó de acuerdo a la teoría de Singleton y Rossi<sup>31</sup>, con algunas modificaciones.

- Reactivos
  - Hidróxido de sodio (2 M)
  - Ácido acético 100 % (v/v%)
  - Ácido clorhídrico (40 mM)
  - L (+) ácido ascórbico
  - Cloruro de hierro III (20 mM)
  - 2,4,6-Tris (2-piridil) -s-triazina (10mM)
- Equipo
  - Placa de micro titulación (1 x 96)
  - Espectrofotómetro BIO-RAD iMark

---

<sup>31</sup> SINGLETON, Vernon; ROSSI, Joe. *Colorimetría de fenoles totales con reactivo de ácido fosfomolibdico-fosfotúngstico*. pp. 144-153

○ Procedimiento

Se preparó una solución de 1,76 mg de ácido ascórbico en 1 mL de agua destilada. A partir de la solución anterior se preparó la solución madre que servirá para preparar el resto de estándares tomando 300  $\mu$ L de la anterior y agregando 2700  $\mu$ L de agua destilada. Luego se prepararon las soluciones estándar para la calibración de la siguiente manera:

Tabla IV. **Preparación de soluciones estándar para FRAP**

Solución madre [ $\mu$ L]	Agua destilada [ $\mu$ L]	Concentración [ $\mu$ M]
800	200	800
600	400	600
400	600	400
200	800	200
100	900	100
50	950	50

Fuente: MUCH, Zenón. *Manual de Química y Microbiología Sanitaria*. p. 30.

- Se preparó una solución *buffer* pesando 1,5g de ácido acético 100 % y se le agregó 80 mL de agua destilada y se ajustó el pH a 3,6 agregando NaOH.
- Luego se disolvió 54,06 mg de  $\text{FeCl}_3$  en 10 mL de la solución *buffer* (solución 1).
- La segunda solución fue preparada pesando 31,33 mg de TPTZ y se agregó 10 mL de HCl (solución 2).
- Por último, se mezclan las dos soluciones y se obtiene el reactivo de FRAP.



- Para el análisis se tomaron 10 µL de los estándares y muestras y se colocó en la placa de micro titulación.
  - Se le agregaron 150 µL del reactivo de FRAP y finalmente se incubó la solución preparada por 6 minutos a temperatura ambiente.
  - Medición de la absorbancia a una longitud de onda de 595 nm.
- Resultados

Los resultados fueron presentados en gramos de FRAP equivalentes por 100 gramos de muestra seca (g FE/100 g) para las muestras sólidas y miligramos de FRAP equivalente por litro (mg FE/L) para las muestras líquidas.

- Procedimiento para determinación de principales compuestos fenólicos presentes

El método para determinación de los principales compuestos fenólicos y contenido de cafeína por medio de HPLC se realizó de acuerdo a Benzie y Strain<sup>32</sup>, con algunas modificaciones.

- Reactivos
- 0,1 % (% v/v) ácido tetra fluoroacético (TFA) Eluyente A
  - 100 % (% v/v) Metanol Eluyente B
  - Ácido clorogénico hemihidratado (CQA) estándar
- Equipo

---

<sup>32</sup> BENZIE, Iris y STRAIN, Sean. *El método de FRAP*. pp. 70-76

- HPLC Shimadzu UV-Vis detector SPD-10 AVP ( $\lambda = 280 \text{ nm} / 325 \text{ nm}$ ).
  - Columna Prontosil 120-3-C18 ACE-EPS 150 x 4,6 mm; 3  $\mu\text{m}$  conectada a una precolumna C18 (Nr. 23).
- Condiciones de operación del HPLC
- Temperatura: 40 °C
  - Tasa del flujo 1 mL/min
  - Presión 156 bar
  - 10  $\mu\text{L}$  de las muestras sólidas y 20  $\mu\text{L}$  de las muestras líquidas

Tabla V. **Gradiente de operación de HPLC**

Gradiente	
Tiempo (min)	Eluyente B (%)
3	20
20	35
37	68
40	68
43	20
45	Stop

Fuente: BENZIE, Iris y STRAIN, Sean. *El método de FRAP*. pp. 70-76

- Procedimiento
  - Se centrifugaron los sobrenadantes de las muestras utilizando las mismas condiciones de operación. El objetivo principal es evitar partículas en el sobrenadante que puedan afectar el funcionamiento de la columna cromatográfica.

- Para la solución madre se pesó 1 mg de CQA hemihidratado y se disolvió en 1 mL de agua destilada.

Tabla VI. **Preparación de soluciones estándar para HPLC**

Solución madre [ $\mu\text{L}$ ]	Agua destilada [ $\mu\text{L}$ ]	Concentración [ $\mu\text{g/mL}$ ]
10	990	10
25	975	25
50	950	50
75	925	75
100	900	100

Fuente: BENZIE, Iris y STRAIN, Sean. *El método de FRAP*. pp. 70-76

- La inyección fue 10  $\mu\text{L}$  de las muestras sólidas y 20  $\mu\text{L}$  de las muestras de agua residual.
- Para la preparación del equipo de HPLC se ingresaron los datos de las condiciones de operación antes mencionadas y se colocó la columna cromatográfica correspondiente.
- Se procedió a hacer la lectura de la absorbancia en el equipo de HPLC a la longitud de onda correspondiente para detección de CQA, FQA y sus respectivos isómeros ( $\lambda=325\text{ nm}$ ). El análisis de cada muestra tuvo una duración de 45 minutos como se puede observar en la tabla 3.

Cafeína fue determinada a una absorbancia de 280 nm. Las condiciones del HPLC fueron las mismas utilizadas para los principales compuestos fenólicos.

- Resultados

Los resultados fueron presentados en gramos por 100 gramos de muestra seca (g /100 g) para las muestras sólidas y miligramos por litro (mg/L) para las muestras líquidas.

### 3. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados individuales de cada medición obtenida en los parámetros determinados en cada una de las muestras.

Tabla VII. **Resultados de parámetros en el agua de fuente de abastecimiento**

Punto de muestreo: Fuente de abastecimiento				
Fecha y hora: 3 de febrero de 2020 a las 16:30		Tipo de muestra: Puntual		
Parámetro	Unidad	#1	Muestra #2	#3
<i>Parámetros in situ</i>				
Temperatura	°C	17	18	18
Potencial de hidrógeno	Unidad de pH	7,8	7,9	7,8
Conductividad eléctrica	µS/cm	268	280	367
Oxígeno disuelto	mg/L	6	5	5
Sólidos disueltos	mg/L	157	140	184
Potencial óxido reductor	mV	200	186	200
<i>Parámetros físico químicos</i>				
Sólidos sedimentables	cm <sup>3</sup> /L/h	2	0	1
Sólidos suspendidos	mg/L	6	1	4
DQO	mg/L	4	15	12
DBO <sub>5</sub>	mg/L	2	8	6
Fósforo Total	mg/L	11	1	1
Nitrógeno Total	mg/L	0	0	0

Fuente: elaboración propia.

**Tabla VIII. Resultados de parámetros en agua residual del proceso de despulpado**

Punto de muestreo: Despulpado				
Fecha y hora: 3 de febrero de 2020 a las 17:00			Tipo de muestra: Puntual	
Parámetro	Unidad	Muestra		
		#1	#2	#3
<b>Parámetros in situ</b>				
Temperatura	°C	18	18	18
Potencial de hidrógeno	Unidad de pH	3,5	3,6	3,5
Conductividad eléctrica	µS/cm	508	444	507
Oxígeno disuelto	mg/L	3	3	3
Sólidos disueltos	mg/L	255	254	253
Potencial óxido reductor	mV	178	169	169
<b>Parámetros físico químicos</b>				
Sólidos sedimentables	cm <sup>3</sup> /L/h	13	21	12
Sólidos suspendidos	mg/L	432	820	1240
DQO	mg/L	7680	7540	8190
DBO <sub>5</sub>	mg/L	3980	3856	4568
Fósforo Total	mg/L	150	100	100
Nitrógeno Total	mg/L	49	57	53

Fuente: elaboración propia.

**Tabla IX. Resultados de parámetros del agua residual de lavado**

Punto de muestreo: Correteos para lavado de café				
Fecha y hora: 4 de febrero de 2020 a las 13:23			Tipo de muestra: Puntual	
Parámetro	Unidad	Muestra		
		#1	#2	#3
<b>Parámetros <i>in situ</i></b>				
Temperatura	°C	22	22	22
Potencial de hidrógeno	Unidad de pH	4	4	4
Conductividad eléctrica	µS/cm	426	339	290
Oxígeno disuelto	mg/L	3	3	3
Sólidos disueltos	mg/L	213	170	146
Potencial óxido reductor	mV	200	204	194

Continuación de la tabla IX.

Parámetros físico químicos				
Sólidos sedimentables	cm <sup>3</sup> /L/h	90	100	30
Sólidos suspendidos	mg/L	44	100	56
DQO	mg/L	340	520	200
DBO <sub>5</sub>	mg/L	189	256	129
Fósforo Total	mg/L	0	0	0
Nitrógeno Total	mg/L	4	6	3

Fuente: elaboración propia.

**Tabla X. Resultados de parámetros de agua residual en procesos de lavado por recirculado**

Punto de muestreo: agua de recirculación (pH = 3,2 en laboratorio)				
Parámetro	Unidad	Muestra		
		#1	#2	
Sólidos sedimentables	cm <sup>3</sup> /L/h	34	12	
Sólidos suspendidos	mg/L	1 492	2 680	
DQO	mg/L	30 500	29 500	
DBO <sub>5</sub>	mg/L	15 566	17 333	
Fósforo Total	mg/L	3 255	3 360	
Nitrógeno Total	mg/L	14	9	

Fuente: elaboración propia.

**Tabla XI. Resultados de ORP y pH al inicio y final de la fermentación**

Parámetro	Fruto Amarillo		Fruto Rojo	
	Inicio de fermentación	Final de fermentación	Inicio de fermentación	Final de fermentación
ORP (mV)	200	221	192	239
pH	6,85	4,1	6,23	3,76

Fuente: elaboración propia.

**Tabla XII. Porcentaje de humedad de muestras de café del proceso de beneficiado húmedo**

Muestra	% Humedad	
	Caturra	Bourbon
Fruto	77,5461	65,8612
	72,0176	65,2245
	70,6796	67,3510
Pulpa	79,3576	73,8389
	85,9142	73,8404
	87,3940	78,2828
Grano despulpado	56,9766	14,7217
	58,0676	19,2277
	55,5518	17,1769
		16,3554
Grano lavado	29,3531	28,9012
	48,6495	29,8432
	47,9407	29,4620
Grano pergamino	6,0180	4,6953
	6,0757	4,8462
	5,8753	4,7126

Fuente: elaboración propia.

**Tabla XIII. Resultados de contenido de compuestos fenólicos totales en muestras sólidas de Bourbon**

Muestra	Bourbon		
	g GAE / 100 g	$\sigma$	% $\sigma$
Fruto	0,5237	0,0108	2%
Pulpa	0,1825	0,0121	7%
Grano despulpado	0,6979	0,0548	8%
Grano lavado	0,7501	0,0337	4%
Grano pergamino	0,6259	0,0248	4%

Fuente: elaboración propia.



Tabla XIV. **Resultados de contenido de compuestos fenólicos totales en muestras sólidas de Caturra**

Muestra	Caturra g GAE / 100 g	$\sigma$	% $\sigma$
Fruto	0,4244	0,0167	4%
Pulpa	0,2259	0,0099	4%
Grano despulpado	0,4406	0,0237	5%
Grano lavado	0,4832	0,0184	4%
Grano pergamino	0,4869	0,0242	5%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Resultados de contenido de compuestos fenólicos totales en muestras líquidas de Bourbon**

Muestra	Bourbon mg GAE / L	$\sigma$	% $\sigma$
Agua residual de despulpado	6,2647	0,9144	15%
Agua residual de fermentado	162,9559	2,2576	1%
Agua residual de lavado	1,8529	0,2941	16%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Resultados de capacidad antioxidante en muestras sólidas de Bourbon**

Muestra	Bourbon g FE / 100 g	$\sigma$	% $\sigma$
Fruto	0,8216	0,0427	5%
Pulpa	0,2967	0,0224	8%
Grano despulpado	1,3031	0,0761	6%
Grano lavado	1,6743	0,0640	4%
Grano pergamino	1,1283	0,0565	5%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Resultados de capacidad antioxidante en muestras sólidas de Caturra**

Muestra	Caturra g FE / 100 g	$\sigma$	% $\sigma$
Fruto	0,8615	0,0590	7%
Pulpa	0,5080	0,0338	7%
Grano despulpado	0,9540	0,0592	6%
Grano lavado	0,9496	0,0792	8%
Grano pergamino	0,8537	0,0721	8%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Resultados de capacidad antioxidante en muestras líquidas de Bourbon**

Muestra	Bourbon mg FE / L	$\sigma$	% $\sigma$
Agua residual de despulpado	19,5053	0,8630	4%
Agua residual de fermentado	104,6666	10,7159	10%
Agua residual de lavado	9,2683	1,0810	12%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Resultados de capacidad antioxidante en muestras líquidas de Caturra**

Muestra	Caturra mg FE / L	$\sigma$	% $\sigma$
Agua residual de despulpado	23,6148	2,0301	9%
Agua residual de fermentado	72,2312	5,0379	7%
Agua residual de lavado	8,9748	0,4849	5%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Principales compuestos fenólicos presentes en muestras sólidas de Caturra**

Muestra	5-CQA g/100 g	3-CQA g/100 g	4-CQA g/100 g	3-FQA g/100 g	4-FQA g/100 g	5-FQA g/100 g	3,4-di-CQA g/100 g	3,5-di-CQA g/100 g	4,5-di-CQA g/100 g
Fruto	1,751	0,095	0,095	0,010	0,014	0,164	0,049	0,337	0,028
Pulpa	0,014	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000
Grano despulpado	2,097	0,114	0,107	0,033	0,024	0,203	0,062	0,487	0,037
Grano lavado	2,609	0,139	0,137	0,023	0,018	0,235	0,078	0,538	0,046
Grano pergamino	2,000	0,140	0,108	0,007	0,030	0,204	0,049	0,292	0,070

Fuente: elaboración propia.

El único compuesto fenólico detectado en las muestras de agua residual de ambas variedades fue el 5-FQA.

Tabla XXI. **Contenido de 5-FQA en muestras líquidas**

Muestra	Caturra 5-FQA mg / L	Bourbon 5-FQA mg / L
Agua residual de despulpado	0	0
Agua residual de fermentado	2,7443	1,3521
Agua residual de lavado	0	0

Fuente: elaboración propia.

**Tabla XXII. Contenido de cafeína en muestras sólidas**

Muestra	Bourbon g / 100 g	Caturra g / 100 g
Fruto	0,7396	0,7261
Pulpa	0,5666	0,7036
Grano despulpado	0,8292	0,8273
Grano lavado	0,8773	0,8883
Grano pergamino	0,7904	0,5830

Fuente: elaboración propia.

**Tabla XXIII. Contenido de cafeína en muestras líquidas**

Muestra	Bourbon mg / L	Caturra mg / L
Agua residual de despulpado	12,0	26,7
Agua residual de fermentado	166,5	140,3
Agua residual de lavado	1,2	2,1

Fuente: elaboración propia.

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados fueron comparados con los valores recomendados en el capítulo V del Acuerdo Gubernativo 236-2006 del Ministerio de Ambiente de la República de Guatemala. A continuación se presenta una tabla donde se hace un resumen de los análisis en agua residual.

### 4.1. Tratamiento de aguas residuales

Deben observarse las siguientes tablas:

Tabla XXIV. **Comparación de resultados con respecto al acuerdo gubernativo 236-2006 para descargar a un cuerpo receptor**

Parámetro	Unidades	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Recirculado	Valor recomendado
Potencial de hidrógeno	Unidades de pH	7,83	3,53	4,00	3,20	6 a 9
Sólidos suspendidos	mg/L	3,67	830,67	66,67	2 086,00	400
DBO <sub>5</sub>	mg/L	5,33	4 134,60	191,33	16 449,50	450
Fósforo total	mg/L	4,33	116,67	0,00	3 307,50	15
Temperatura	°C	17,67	18,00	22,00	-	TCR +/- 7
Nitrógeno total	mg/L	0,00	53,00	4,33	11,50	25

Fuente: elaboración propia.

El agua residual generada durante el proceso de beneficiado de café húmedo no puede ser descargada directamente al cuerpo receptor. Para poder determinar el tipo de tratamiento se determinó la relación de biodegradabilidad:

Tabla XXV. **Análisis de biodegradabilidad de agua residual**

Punto de muestreo	Relación DBO <sub>5</sub> /DQO
Agua residual despulpado	0,53
Agua residual final de lavado	0,54
Agua residual de recirculación	0,55

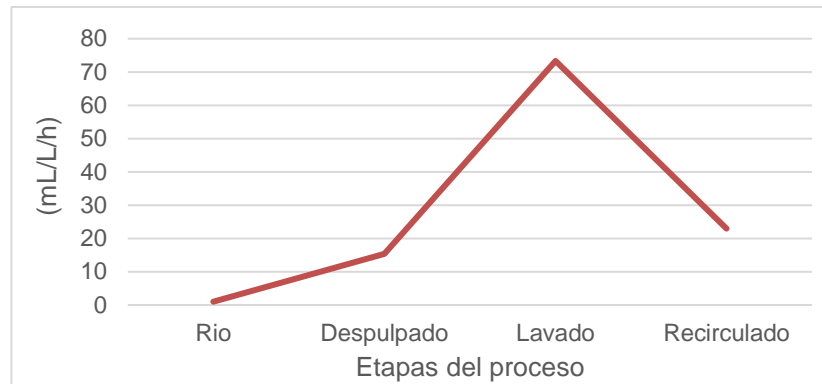
Fuente: elaboración propia.

En cada uno de los puntos analizados se obtuvieron valores de la relación de biodegradabilidad mayor a 0,5, por lo cual decimos que son poco biodegradables. Se puede implementar un método biológico para su tratamiento.

En el caso del agua residual generada en el proceso de lavado únicamente se le debe dar un tratamiento primario para estabilizar el potencial de hidrógeno y luego esta puede ser descargada directamente al cuerpo receptor de acuerdo a los resultados obtenidos. También se tomó en cuenta que se evaluaron los mismos parámetros en el cuerpo receptor, ya que da una mejor perspectiva de cómo afecta a este al descargar el agua residual en él sin ningún tratamiento previo.

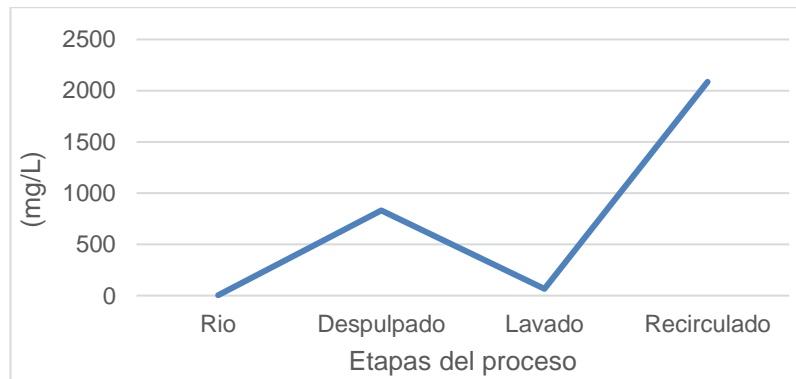
De acuerdo con el contenido de sólidos sedimentables (ver figura 21) el agua de lavado es la que tiene un mayor contenido de estos, en cambio el agua residual proveniente del proceso de lavado por recirculado es la que tiene mayor cantidad de sólidos suspendidos, pero no todos son sedimentables (ver figura 22).

Figura 21. **Sólidos sedimentables en agua residual del proceso de beneficiado de café húmedo**



Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Sólidos suspendidos en agua residual del proceso de beneficiado de café húmedo**

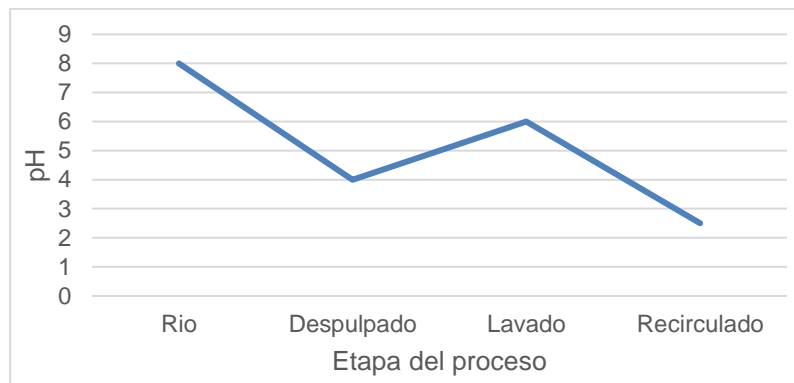


Fuente: elaboración propia.

El potencial de hidrógeno disminuye en gran medida al reutilizar el agua de lavado (ver figura 23) comparado con agua de lavado sin recirculado. De acuerdo

a los resultados de pH todas deben recibir un tratamiento primario de neutralización.

Figura 23. **Potencial de hidrógeno en agua residual del proceso de beneficiado de café húmedo**

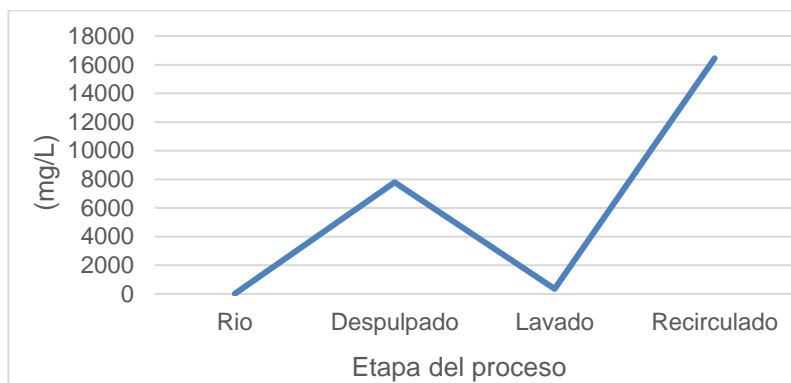


Fuente: elaboración propia.

La figura 24 muestra los valores de DBO<sub>5</sub> en el agua residual del proceso. En el proceso de lavado por recirculación la concentración es sumamente mayor al resto de las etapas. Muestra que el agua de despulpado y lavado por recirculado debe ser tratada debido a su contenido de materia orgánica.



Figura 24. **DBO<sub>5</sub> en agua residual del proceso de beneficiado de café húmedo**



Fuente: elaboración propia.

Con los valores brindados por el beneficio de café de consumo de agua por proceso y la concentración de DBO<sub>5</sub> obtenida, se observa en la tabla XXVI la carga contaminante que ingresa al río por kilogramo de café pergamino procesado.

Tabla XXVI. **Carga contaminante por kilogramo de café producido**

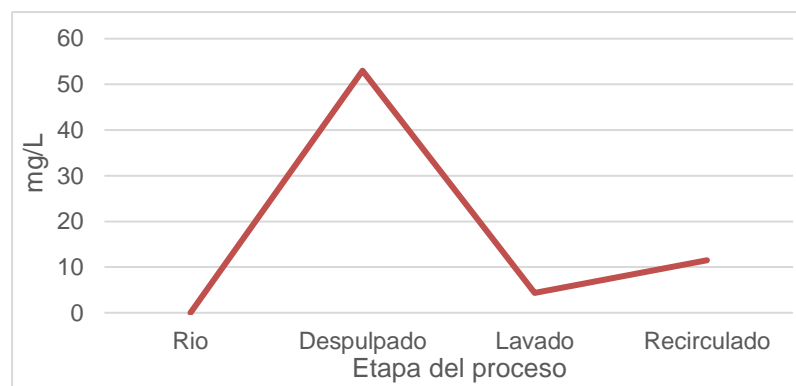
Etapa del proceso	Carga contaminante (Kg /Kg de café pergamino)
Punto 2	31,30
Recirculación	12,45

Fuente: elaboración propia.

El proceso de recirculado disminuye la carga contaminante descargada al cuerpo receptor en un 60 %. En las figuras 25 y 26 se observa que el agua residual del proceso de lavado por recirculado tiene un alto contenido de

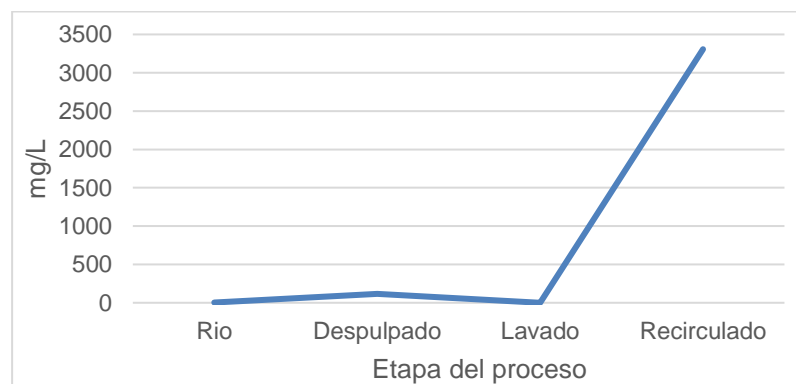
nitrógeno y fósforo total. El agua residual del proceso de despulpado tiene un alto contenido de nitrógeno total. De acuerdo al contenido de estos nutrientes pueden ser aprovechadas para fertilización de suelos y riego de cultivos.

**Figura 25. Nitrógeno total en agua residual del proceso de beneficiado de café húmedo**



Fuente: elaboración propia.

**Figura 26. Fósforo total en agua residual del proceso de beneficiado de café húmedo**



Fuente: elaboración propia.

- Propuestas de tratamiento previo a la descarga de aguas residuales

Según los resultados obtenidos es necesario realizar un tratamiento de neutralización de pH en toda el agua residual generada en el proceso de beneficiado de café húmedo. Para tratar el resto de los parámetros se muestran en la tabla propuestas de tratamiento de acuerdo con el análisis de los datos mostrados anteriormente.

Tabla XXVII. **Tratamiento de aguas residuales**

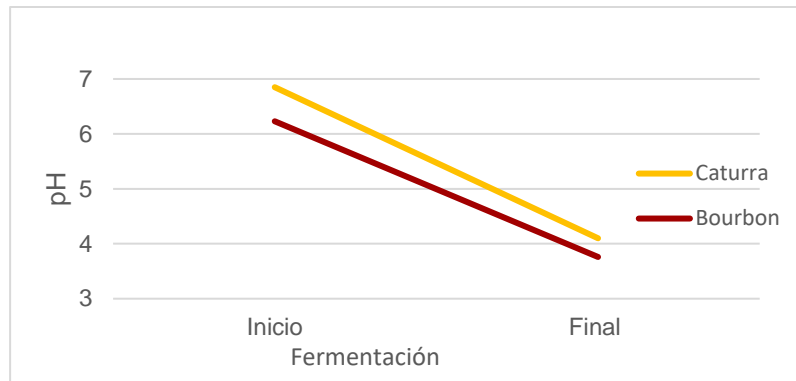
Parámetro	Tratamiento propuesto	
	Punto 2	Recirculado
Sólidos suspendidos	Sedimentación	Sedimentación y floculación
DBO5/DQO	Biológico	Biológico
Fósforo total	Reuso	Reuso
Nitrógeno total	Reuso	Reuso

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2. Reúso de residuos sólidos

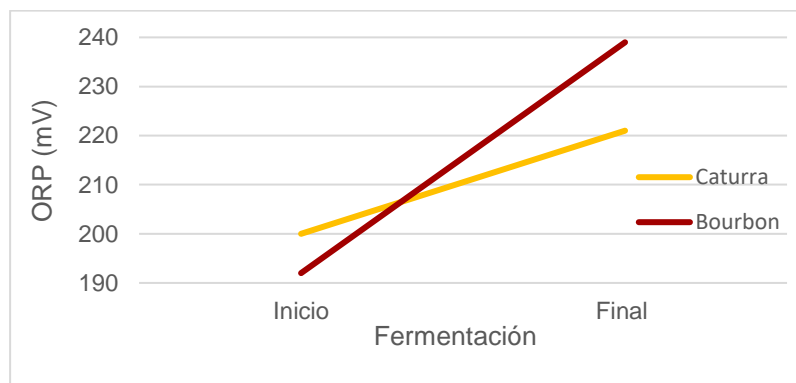
El café Bourbon tiene valores de pH y ORP más bajas que para el Caturra, ya sea al inicio o al final del proceso de fermentación. El comportamiento del potencial de hidrógeno disminuye en ambas variedades de café luego del proceso de fermentación. En cambio, para el potencial óxido reductor es inversamente proporcional (ver figura 27 y figura 28).

Figura 27. **Potencial de hidrógeno al inicio y final de la fermentación en café**



Fuente: elaboración propia.

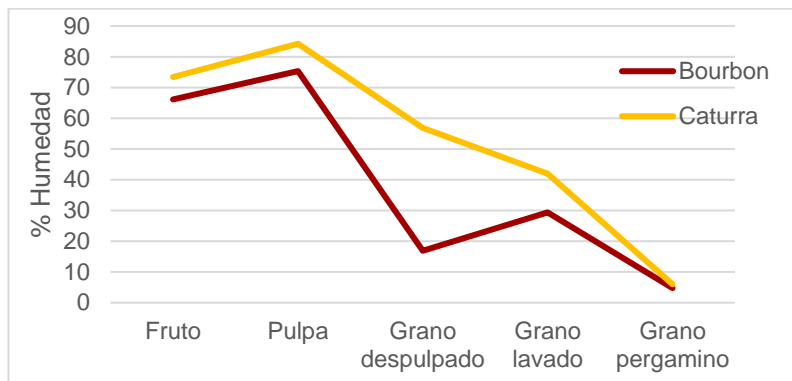
Figura 28. **Potencial óxido reductor al inicio y final de la fermentación en café**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 29 se observa que las muestras de café Caturra tenían mayor porcentaje de humedad. También tenemos que en ambas variedades de café la pulpa es la que tiene mayor porcentaje de humedad.

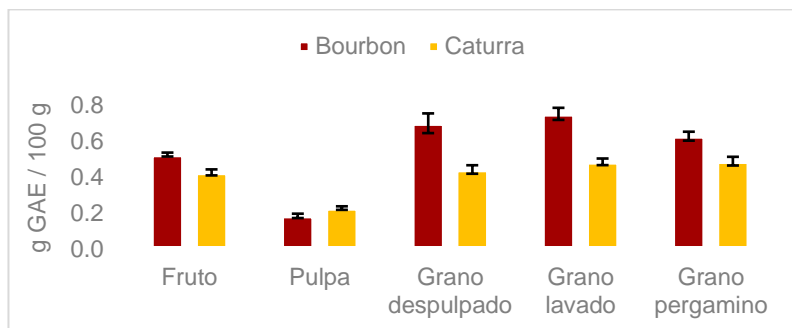
**Figura 29. Porcentaje de humedad de muestras de café**



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos por el método de FC para la determinación de compuestos fenólicos totales en las muestras sólidas tomadas del proceso de beneficiado de café húmedo (ver figura 20), la variedad Bourbon tiene mayor contenido de estos en todas las muestras, con excepción de la pulpa de café.

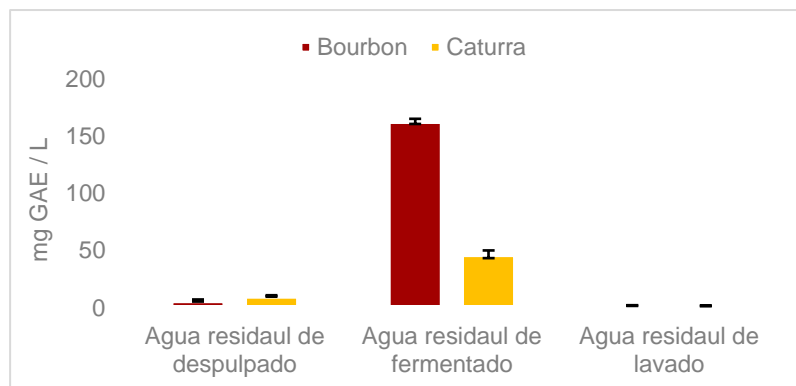
**Figura 30. Contenido de compuestos fenólicos totales en muestras sólidas de procesos de beneficiado de café húmedo**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 31 se muestra que el contenido de compuestos fenólicos totales en las muestras de agua residual se encuentra presente de manera significativa en el agua proveniente del proceso de fermentado.

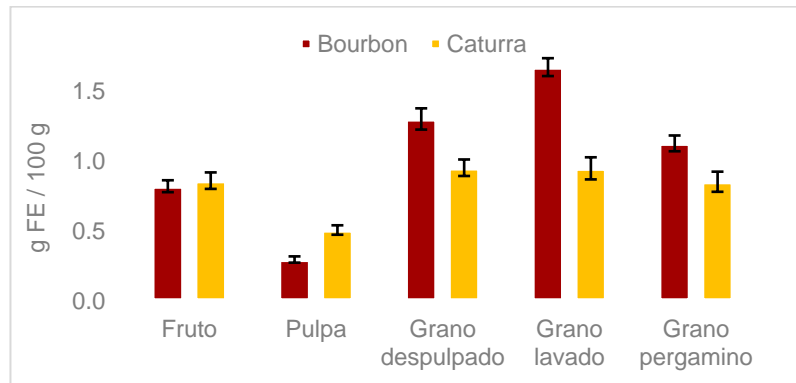
Figura 31. **Contenido de compuestos fenólicos totales en muestras de agua residual**



Fuente: elaboración propia.

El contenido de compuestos fenólicos totales es mayor en la variedad Bourbon en los subproductos provenientes del proceso de beneficiado de café húmedo. La capacidad antioxidante es mayor en la variedad Bourbon en todas las muestras de granos de café, pero en las muestras de fruto y pulpa la capacidad antioxidante es mayor en la variedad Caturra. Ver en la figura 32 que en ambas variedades el grano lavado de café posee la mayor capacidad antioxidante.

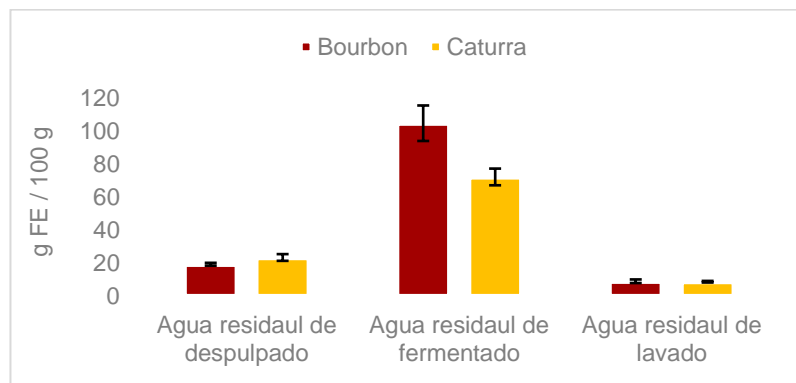
Figura 32. **Capacidad antioxidante de muestras sólidas de proceso de beneficiado de café húmedo**



Fuente: elaboración propia.

Para las muestras de agua residual se observa en la figura 33 que el agua procedente del proceso de fermentación es la que posee mayor capacidad antioxidante. Al comparar entre variedades, el agua residual del proceso de fermentado de la variedad Bourbon tiene mayor capacidad antioxidante que Caturra, pero en las otras dos etapas es mayor en las muestras de Caturra.

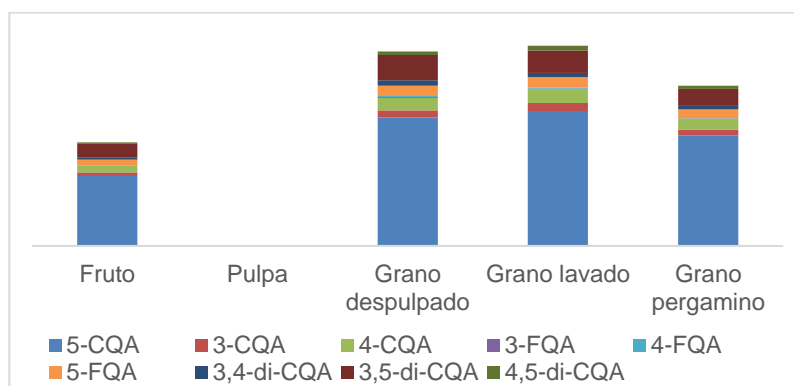
Figura 33. **Capacidad antioxidante de muestras de agua residual**



Fuente: elaboración propia.

En las muestras analizadas de café Bourbon se observa en la figura 34 que los principales compuestos fenólicos que se presentan con un contenido mayor son el 5-CQA y 3,5-di-CQA. Para el caso de la pulpa de café su contenido apreciable de los compuestos fenólicos identificados es muy bajo.

**Figura 34. Contenido de principales compuestos fenólicos en muestras de café Bourbon**

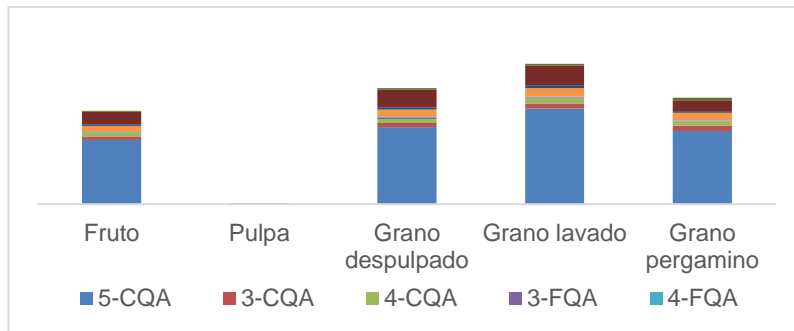


Fuente: elaboración propia.

En la variedad Caturra los compuestos fenólicos presentes en mayor concentración son el 5-CQA y 3,5-di-CQA. Pero la concentración de estos es menor en la variedad Caturra. En ambas variedades el contenido de compuestos fenólicos es mayor en el grano de café lavado y en la muestra de pulpa el contenido de estos es casi cero (ver figuras 34 y 35).



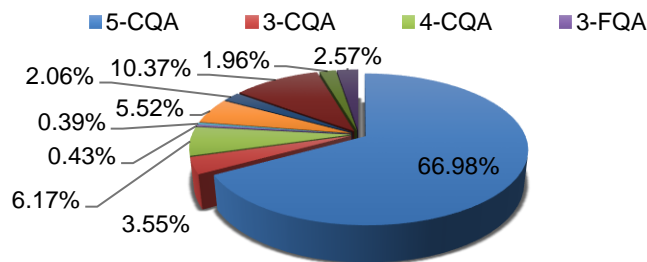
Figura 35. **Contenido de principales compuestos fenólicos en muestras de café Caturra**



Fuente: elaboración propia.

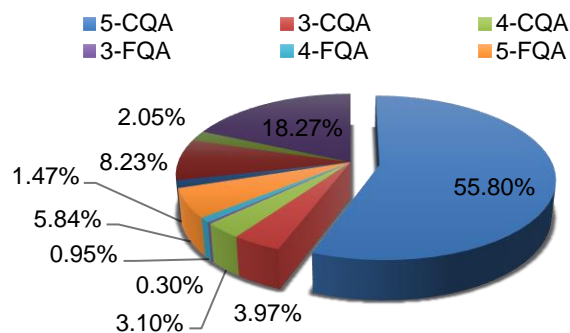
Las figuras 36 y 37 muestran que el contenido de compuestos fenólicos desconocidos en la variedad Caturra es mucho mayor que en la Bourbon. Los compuestos fenólicos identificados se encuentran en mayor porcentaje en la variedad Bourbon para el caso de 5-CQA, 3-CQA, 4-CQA, 3-FQA, 3,4-di-CQA y 3,5-di-CQA. Únicamente en el caso del isómero 4-FQA, 5-FQA y 4,5-CQA el contenido es mayor en la variedad Caturra.

Figura 36. **Contenido % de compuestos fenólicos en café pergamino Bourbon**



Fuente: elaboración propia.

Figura 37. **Contenido % de compuestos fenólicos en café pergamino Caturra**



Fuente: elaboración propia.

En las muestras de agua residual el único compuesto fenólico identificado fue el 5-FQA y únicamente detectado en las muestras provenientes del proceso de fermentación. La figura 38 muestra que el contenido del isómero 5-FQA es mayor en la variedad Caturra.

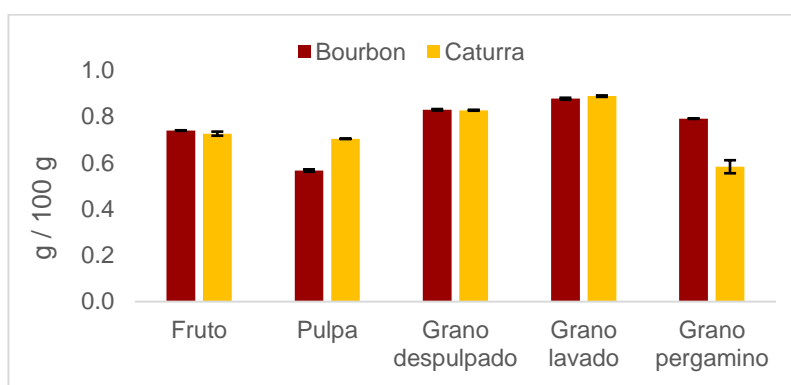
Figura 38. **Contenido de 5-FQA en el agua residual del proceso de fermentación**



Fuente: elaboración propia.

El contenido de cafeína en los frutos de ambas variedades de café es el mismo. En el caso de la pulpa la variedad Caturra posee una mayor cantidad, en cambio en el caso del grano pergamino es mayor el contenido de esta en la variedad Bourbon (ver figura 39).

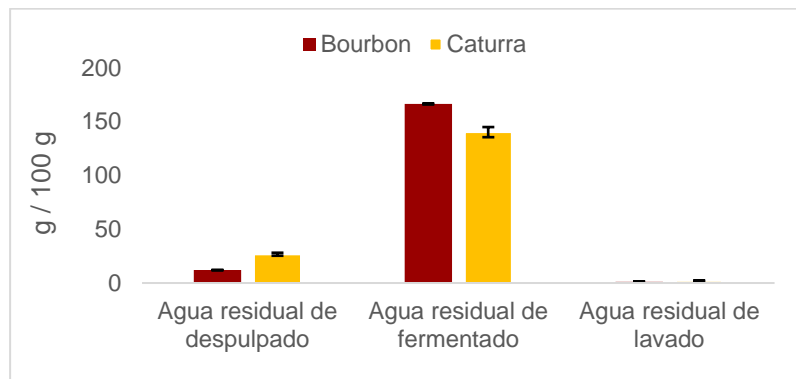
Figura 39. **Contenido de cafeína en muestras de café**



Fuente: elaboración propia.

El contenido de cafeína en las muestras de agua residual es significativo en las muestras del proceso de fermentado. La figura 40 muestra que el contenido de cafeína es mayor en las variedades Bourbon para el agua residual del proceso de fermentación. Para el caso del agua residual del proceso de despulpado se presenta mayor contenido en la variedad Caturra.

Figura 40. **Contenido de cafeína en muestras de agua residual**



Fuente: elaboración propia.

### 4.3. Condiciones y medidas sanitarias

De acuerdo a todos los resultados obtenidos se hizo un análisis de las condiciones y medidas sanitarias que deben ser tomadas en cuenta para poder hacer reuso de los subproductos del proceso de beneficiado húmedo y poder ser utilizado como un producto alimenticio.

La pulpa de café posee en promedio de contenido compuestos fenólicos para ambas variedades de 0,2 g GAE / 100 g de muestras seca, una capacidad antioxidante de 0,4 g FE / 100 g de muestra seca y un contenido de cafeína de 0,63 g / 100 g de muestra seca, por lo que puede llevar a cabo el proceso de ensilaje para la estabilización de la materia orgánica y luego poder ser utilizada como alimento animal.

El ensilaje consiste en una fermentación anaeróbica con la cual se pretende evitar la degradación de la pulpa y descomponer sustancias presentes antinutricionales para los animales como la cafeína en la misma. Para llevar a

cabo este proceso la pulpa debe ser almacenada seca o húmeda (esto dependerá de las facilidades que cuente el beneficio).

Se debe designar un área exclusiva para llevar a cabo el proceso donde no quede a la intemperie expuesta a lluvias o corrientes de aire. También se debe mantener en condiciones anaeróbicas a un pH de 4.2 para evitar la aparición de patógenos.<sup>33</sup> El periodo de tiempo de ensilaje máximo puede ser de hasta 18 meses.<sup>34</sup> Se debe tomar en cuenta que en el proceso de ensilaje se generan 150 litros de lixiviados con un DQO de 96000 mg/L y un pH de 4.<sup>35</sup> Para esto proceso deben tomarse las medidas sanitarias necesarias para su correcto tratamiento.

Para determinar las dimensiones de la fosa de ensilaje se recomienda el uso de la siguiente ecuación:

$$V = \frac{1}{3}(\text{Altura} * (\text{Base Mayor} + \text{Base menor}) + \sqrt{\text{Base Mayor} * \text{Base Menor}})^{36}$$

---

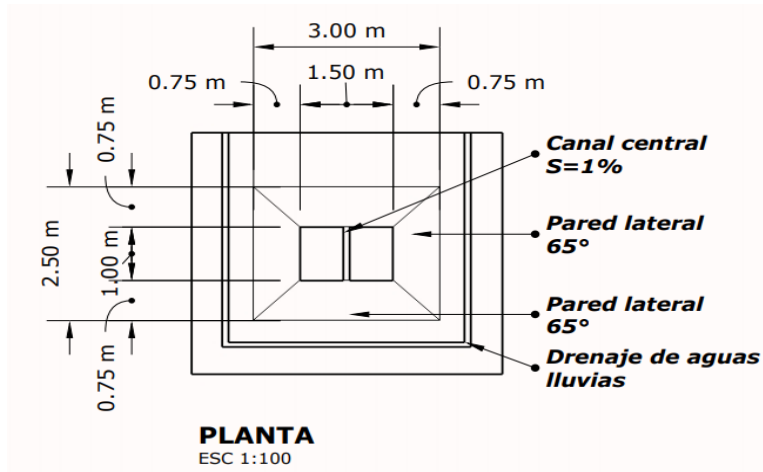
<sup>33</sup> KIEHNE, Andrea. *Estudios sobre polifenoles en té y café mediante HPLC y HPLC-MS termospray*. p. 50.

<sup>34</sup> NORIEGA, Adrianyela; SILVA, Ramón; GARCÍA, Moraimal. *Utilización de la pulpa de café en la alimentación animal*. p. 4

<sup>35</sup> FLÓREZ, Dixon y ROSALES, Enrique. *Uso del ensilaje de pulpa de café en alimento animal*. pp. 73-82

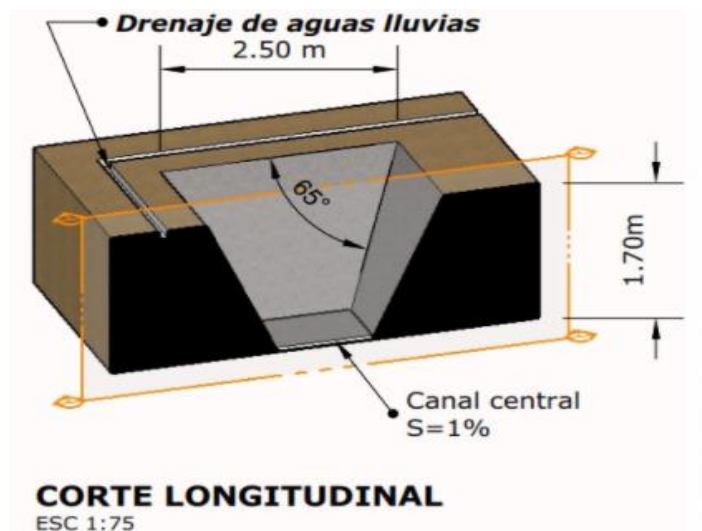
<sup>36</sup> FLÓREZ, Dixon y ROSALES, Enrique. *Uso del ensilaje de pulpa de café en alimento animal*. pp. 73-82

Figura 41. Vista superior de fosa de ensilaje



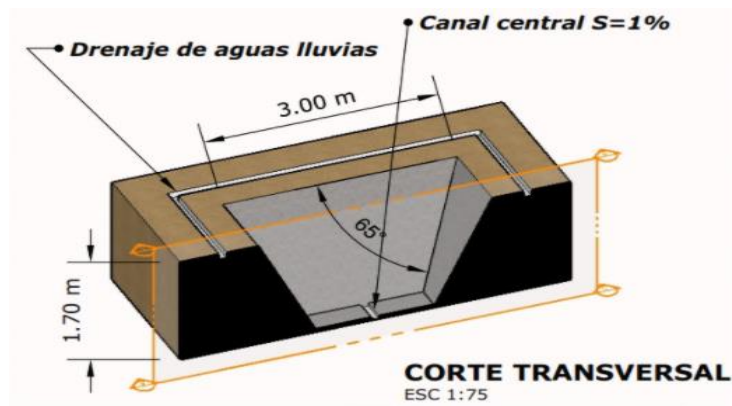
Fuente: FLÓREZ, Dixon y ROSALES, Enrique. *Uso del ensilaje de pulpa de café en alimento animal*. pp. 73-82

Figura 42. Corte longitudinal de fosa de ensilaje



Fuente: FLÓREZ, Dixon y ROSALES, Enrique. *Uso del ensilaje de pulpa de café en alimento animal*. pp. 73-82

Figura 43. Corte transversal de fosa de ensilaje



Fuente: FLÓREZ, Dixon y ROSALES, Enrique. *Uso del ensilaje de pulpa de café en alimento animal*. pp. 73-82

Desde el punto de vista nutricional el agua residual del proceso de fermentado es la que tiene un valor agregado para poder ser considerada para un posible reuso. Posee en promedio para ambas variedades 105 mg GAE / L, 85 mg FE / L y 153 mg / L de cafeína. Como medidas sanitarias para esta se debería hacer un análisis bacteriológico de ella y dar un tratamiento previo y luego poder ser considerada para elaboración de bebidas para consumo humano.

- Métodos de reuso de pulpa de café de acuerdo a los resultados obtenidos y las medidas sanitarias propuestas para implementarlo
  - Suplemento alimenticio animal

Para poder utilizarlo como suplemento alimenticio se debe realizar el proceso de ensilaje antes de utilizarlo. Dependiendo de la especie a que se le desea dar el alimento se debe mezclar con los siguientes porcentajes:

Tabla XXVIII. **Porcentajes de pulpa utilizado en suplemento alimenticio animal**

	% Utilizado de pulpa luego del ensilaje
Vacas lecheras	20
Novillos	20 - 30
Ovinos	15
Peces	30
Aves	15
Conejos	85
Porcinos	20

Fuente: RODRÍGUEZ, Nelson. *Ensilaje de pulpa de café*. p. 8.

- Producción de hongos comestibles

Para llevar a cabo este proceso se debe usar la pulpa luego del ensilaje. Se recomienda colocar 25 kg/costal y fermentar bajo agua por 10 días. El uso de pulpa ensilada para este proceso aumenta el rendimiento de producción de hongos en un 10 %.<sup>37</sup>

- Infusiones

Por otra parte, si se toma en cuenta el contenido que esta posee de cafeína, capacidades antioxidantes y compuestos fenólicos, podría ser secada y molida para luego ser utilizada para realizar infusiones para consumo humano. Con un valor agregado se ha demostrado que el consumo de polifenoles previene enfermedades degenerativas.<sup>38</sup>

---

<sup>37</sup> FLÓREZ, Dixon y ROSALES, Enrique. *Uso del ensilaje de pulpa de café en alimento animal*. pp. 73-82

<sup>38</sup> NORIEGA, Adrianyela; SILVA, Ramón y GARCÍA, Moraimal. *Utilización de la pulpa de café en la alimentación animal*. p. 4.



## CONCLUSIONES

1. Se determinó que sí es posible dar un reuso a los subproductos tanto líquidos como sólidos generados en el proceso de beneficiado húmedo.
2. De acuerdo con los resultados de la caracterización de los subproductos del procesamiento de beneficiado de café húmedo se determinó que poseen un valor agregado para ser reutilizados desde productos alimenticios en el caso de los subproductos sólidos, y en el caso de las aguas residuales pueden ser aprovechados en riego de cultivos o fertilización de la tierra por su alto contenido de nutrientes.
3. En el proceso de beneficiado de café húmedo se debe realizar un proceso de neutralización de las aguas residuales generadas. Luego de esta etapa se debe dar un tratamiento primario de sedimentación para eliminación de sólidos suspendidos. Para la degradación de la materia orgánica presente se debe implementar un tratamiento biológico de acuerdo a su relación de biodegradabilidad, para finalmente ser reutilizada de acuerdo a su contenido de nutrientes.
4. Se concluyó que los compuestos fenólicos, capacidad antioxidante y cafeína presente en las muestras de café y agua residual cambian a lo largo de todo el proceso de beneficiado de café húmedo. La capacidad antioxidante es directamente proporcional al contenido de compuestos fenólicos. Se lograron identificar nueve compuestos fenólicos, los cuales son 5-CQA 3-CQA, 4-CQA, 4-FQA, 5-FQA, 3,4-di-CQA, 3,5-di-CQA y 4,5-di-CQA. El que se encuentra en mayor concentración en todas las muestras

es el 5-CQA. Para el caso del agua residual generada la única que posee un contenido apreciable de compuestos fenólicos, capacidad antioxidante y cafeína, es la de fermentado.

5. Al comparar los resultados de los análisis en ambas variedades se concluyó que el fruto de la variedad de café Bourbon posee mayor contenido de compuestos fenólicos que la Caturra, sin embargo, el fruto de la variedad Caturra tiene una mayor capacidad antioxidante. El contenido de cafeína en el café pergamino es mayor en la variedad Bourbon que en el Caturra, a pesar que el contenido de cafeína en el fruto de ambas variedades es el mismo. La pulpa de café en ambas variedades posee una mayor capacidad antioxidante, contenido de cafeína y compuestos fenólicos en la variedad Caturra. Sin embargo, en el caso del agua residual la proveniente del procesado de la variedad Bourbon posee mayor capacidad antioxidante y mayor contenido de cafeína y compuestos fenólicos.
  
6. De acuerdo con los resultados obtenidos de los análisis de capacidad antioxidante, contenido de compuestos fenólicos y cafeína en los subproductos del proceso de beneficiado de café, se concluye que la pulpa puede ser reutilizada como suplemento alimenticio animal, tomando las medidas sanitarias de acondicionamiento y almacenamiento de esta mediante el proceso de ensilaje. También puede ser utilizada para elaboración de infusiones y crecimiento de hongos comestibles para los humanos, teniendo en cuenta las medidas sanitarias de almacenamiento y acondicionamiento del área de secado.

## RECOMENDACIONES

1. Para reutilizar o descargar el agua residual generada en el proceso de beneficiado de café húmedo se puede utilizar carbonato de calcio o bicarbonato para estabilizar el potencial de hidrógeno.
2. Evaluar la realización de lavado de café por el método de recirculado de agua, debido a que esto disminuye la cantidad de agua consumida diez veces, pero aumenta cien veces la DBO<sub>5</sub>, y esto requiere procesos de tratamiento del agua residual más complejos y unidades de tratamiento de mayor tamaño.
3. Hacer una caracterización del contenido de coliformes fecales y totales en las aguas residuales, debido que la parte bacteriológica es de suma importancia para la salud.
4. Debido al contenido de compuestos desconocidos presentes en la variedad Caturra, se recomienda hacer análisis de espectrometría de masas para poder determinar qué compuestos antioxidantes no lograron ser identificados.



## BIBLIOGRAFÍA

1. ABDELFATAH, M. *Effect of interaction of food proteins with secondary plant metabolites - consequences on structural and functional properties*. Alemania: Universidad de Potsdam, 2013. 137p.
2. ACUÑA, V. y FERNÁNDEZ, J. *Historia del itsmo centroamericano. Volumen 1*. EE.UU.: Coordinación Educativa y Cultural Centroamericana, 2008. 500p.
3. ANACAFE. *Guía de variedades de café*. Guatemala: ANACAFE, 2020. 49p.
4. \_\_\_\_\_. *Innovación y tecnología al servicio del café*. Guatemala: ANACAFE, 2020. 162p.
5. ARDILA, A.; REYES, J. y ARRIOLA, E. Remoción fotocatalítica de DQO, DQO y COT de efluentes de la industria farmacéutica. España, 2020. *Revista Politécnica* (15), pp. 9-17.
6. BANEGAS, K. *Identificación de las fuentes de variación que tienen efecto sobre la calidad de café (Coffea arabica) en los municipios de El Paraíso y Turrialba*. Costa Rica: CATIE, 2009. 74p
7. BENZIE, I. y STRAIN, J. El método de FRAP. Reino Unido, 1996. *Bioquímica Analítica* (239), pp. 70-76.

8. BOVERI, A. Antioxidantes: efectos biológicos y sobre el envejecimiento. Perú, 1999. *Folia Dermatológica Peruana* (10), 4p.
9. CERRATO, C. *Neutralización del potencial de hidrógeno del agua miel de un beneficio húmedo tecnificado de café*. Guatemala: ERIS, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2013. 149p.
10. CHÁVEZ, C. y ESQUIVEL, P. Ácidos clorogénicos presentes en el café: capacidad antimicrobina y antioxidante. Costa Rica, 2019. *AGROMSO* (30), 13p.
11. CIC. *Informe del mercado de café*. [en línea] <<http://www.ico.org/es/Council-17-18-c.asp>>. [Consulta: 11 de octubre de 2019].
12. CORONADA, M.; VEGA, S.; GUTIÉRREZ, R.; VÁZQUEZ, M. y RADILLA, C. Antioxidantes: perspectiva actual para la salud humana. México, 2015. *Revista Chil Nutricional* (42), pp. 206-212.
13. DELGADO, L.; BETANZOS, G. y SUMAYA, T. Importancia de los antioxidantes dietarios en la disminución del estrés oxidativo. México, 2010. *Investigación y Ciencia* (50), pp. 10-15.
14. ESQUIVEL, P. y JIMÉNEZ, V. *Functional properties of coffee and coffee by-products*. Costa Rica, 2011. *Food Res* (46), pp. 488 - 495.
15. FLÓREZ, D. y ROSALES, E. Uso del ensilaje de pulpa de café en alimento animal. España, 2018. *Mundo Fesc* (8), pp. 73-82.

16. GARCÍA, E.; FERNÁNDEZ, I. y FUENTES, A. *Determinación de polifenoles totales por el método de Folin-Ciocalteu*. [en línea] <<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/52056/?jsessionid=908DA24DA1F922834445DC1FE681CE1D?sequence=1#:~:text=El%20ensayo%20Folin%2DCiocalteu%20se,determinada%20espectrofotom%C3%A9tricamente%20a%20765%20nm>>. [Consulta: 30 de marzo de 2020].
17. GIMENO, E. Compuestos fenólicos. Un análisis de sus beneficios para la salud. España, 2004. *Offarm: farmacia y sociedad* (23), pp. 80-84.
18. IDEAM. *Toma de muestras de aguas residuales*. [en línea] <[http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma\\_Muestras\\_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428](http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38158/Toma_Muestras_AguasResiduales.pdf/f5baddf0-7d86-4598-bebd-0e123479d428)>. [Consulta: 10 de septiembre de 2019].
19. KIENHE, A. *Estudios sobre polifenoles en té y café mediante HPLC y HPLC-MS termopray*. Braunschweig, Alemania: Universidad Técnica de Braunschweig, 1997. 50p.
20. LONDOÑO, J. *Antioxidantes: importancia biológica y métodos para medir su actividad. Desarrollo y transversalidad*. Colombia: In L. F. G. Giraldo, 2011. 162p.
21. METCALF y EDDY. *Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización*. 3era ed. España: McGraw Hill, 1995. 103p.
22. MUCH, Zenón. *Manual de Química y Microbiología Sanitaria*. Guatemala: ERIS, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2018. 45p.

23. NORIEGA, A.; SILVA, R. y GARCÍA, M. Utilización de la pulpa de café en la alimentación animal. Venezuela, 2008. *Zootecnia Tropical* (26), 4p.
24. PARDO, R.; ÁLVAREZ, Y.; BARRAL, D. y FARRÉ, M. Cafeína: un nutriente, un fármaco, o una droga de abuso. España, 2007. *Revista Adicciones* (19), pp. 225-238.
25. PLOU, F. y TORRES, P. *Cromatografía líquida de alta resolución (HPLC)*. [en línea]  
<[http://www.icp.csic.es/abgroup/web3/documentos/Tecnicas\\_Analisis\\_baja%20sin%20ind%20analitico\\_0789.pdf](http://www.icp.csic.es/abgroup/web3/documentos/Tecnicas_Analisis_baja%20sin%20ind%20analitico_0789.pdf)>. [Consulta: 15 de junio de 2020].
26. PORRA, A. y LÓPEZ, A. *Importancia de los grupos fenólicos en los alimentos. Temas selectos de ingeniería de alimentos*. Colombia, 2009. *Revista de Ciencia y Educacion* (10), pp. 121-134.
27. RODRÍGUEZ, N. *Ensilaje de pulpa de café*. Colombia: Cenicafé, 2003. 8p.
28. ROMERO, J. *Tratamiento de aguas residuales*. 3era. ed. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2010. 113p.
29. SADEGHIAN, S. *Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia*. Colombia: CENICAFE, 2008. 45p.
30. SÁNCHEZ, D. y ANZOLA, C. Caracterización química de la película plateada del café (*Coffea arábica*) en variedades Colombia y Caturra. Colombia, 2012. *Revista Colombiana de Química* (41), pp. 211-226

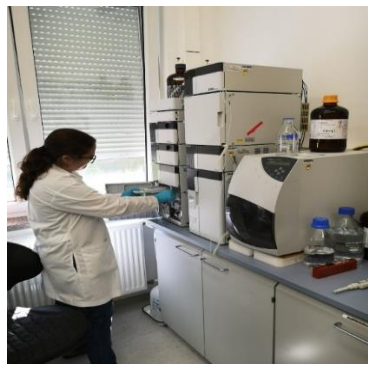


31. SCHULZE, E. y MOONEY, H. *Biodiversity and Ecosystem Function (Ecological Studies, Vol 99)*. Alemania: Springer Verlag, 1994. 524p.
32. SERNA, J.; TORRES, L.; MARTÍNEZ, K. y HERNÁNDEZ, M. Aprovechamiento de la pulpa de café como alternativa de valorización de subproductos. Colombia, 2018. *Revista Ion* (3), pp. 37-42.
33. SILVA, J.; TORRES, P. y MADERA, C. Reuso de aguas residuales domésticas en agricultura. Colombia, 2008. *Agronomía Colombiana* (26), pp. 347-359.
34. SINGLETON, V. y ROSSI, J. Colorimetría de fenoles totales con reactivo de ácido fosfomolibdico-fosfotúngstico. EE. UU., 1965. *Revista Estadounidense de Enología y Viticultura* (16), pp. 144-153.
35. SOTO C. *Guía técnica para el beneficiado de café protegido bajo una indicación geográfica o denominación de origen*. Guatemala: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2010. 212p.
36. UNICEF. *Desnutrición crónica*. [en línea] <<https://www.unicef.es/noticia/en-guatemala-el-498-de-los-ninos-sufre-desnutricion-cronica-maria-claudia-santizo-oficial>>. [Consulta: 30 de octubre de 2019].
37. VÁZQUEZ, L. Especies y variedades de café. Costa Rica, 1939. *Revista de Agricultura* (1), pp. 18 - 23.
38. WCR. *Las variedades de café de Mesoamérica y el Caribe*. [en línea] <<https://worldcoffeeresearch.org/>>. [Consulta: 15 de febrero de 2016].



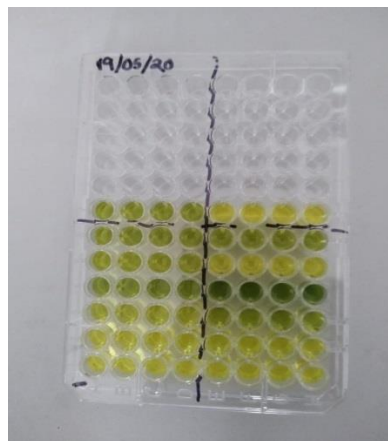
## APÉNDICES

### Apéndice 1. Equipo de HPLC Shimadzu en el Instituto IGV para el procesamiento de granos



Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 2. Placa de microtitulación del método FC



Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 3. Toma de muestra de agua residual de fermentación



Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 4. Inicio de proceso de fermentación



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 5. **Muestras de agua residual**



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 6. **Muestras sólidas en tubos falcón**



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 7. Muestras sólidas liofilizadas



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 8. Patios de secado



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 9. Lavado en correteos



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 10. Espectrofotómetro iMark Bio-Rad



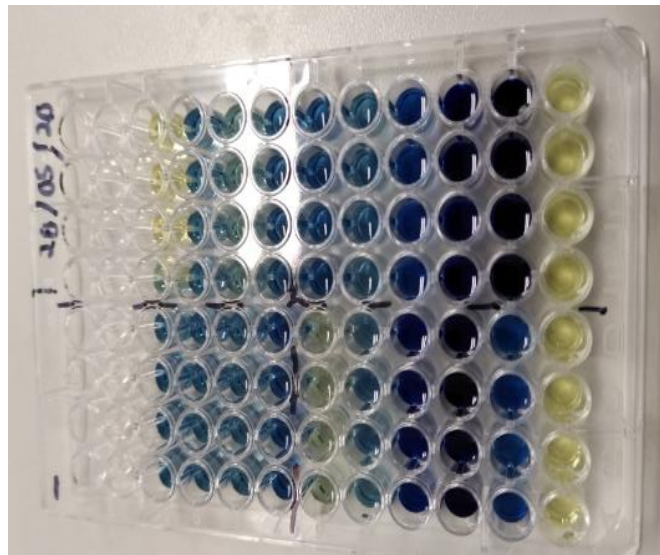
Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 11. Muestra luego de centrifugado**



Fuente: elaboración propia.

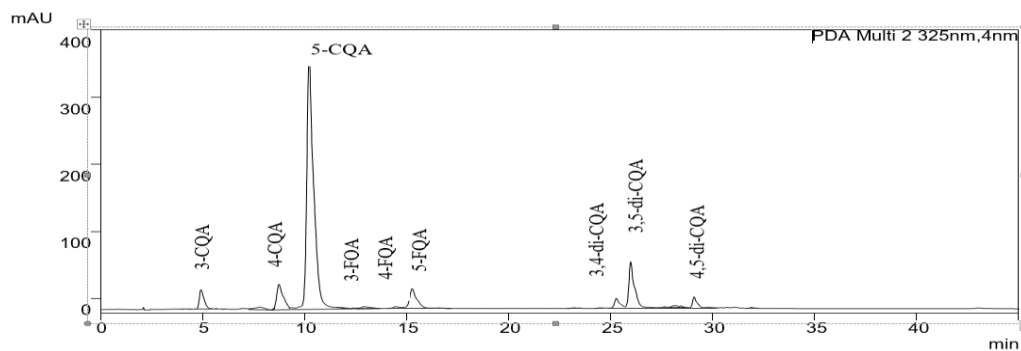
**Apéndice 12. Placa de microtitulación método de FRAP**



Fuente: elaboración propia.

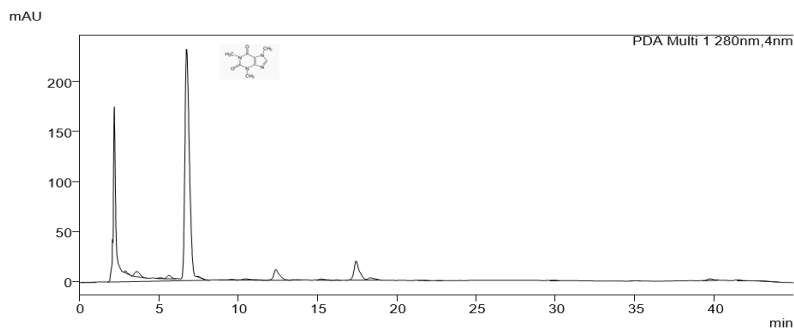


### Apéndice 13. Cromatograma de principales compuestos fenólicos presentes en el café pergamino Bourbon



Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 14. Cromatograma de contenido de cafeína en agua residual



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. **Lista de equipo de laboratorio utilizado**

Nombre	Modelo	Compañía	País
Espectrofotómetro	iMark Hercules microplate reader	Bio-Rad	EE. UU.
Balanza analítica digital	CP224S	Sartorius	Alemania
Triturador	AR1105	Moulinex	Francia
Liofilizador	Home Freeze Dryers	Harvest Right	EE. UU.
Agitador rotatorio	neoLab Rotator with Vortex 7-0045	neoLab	Alemania
Centrifugadora	Heraeus Biofuge Primo R	Thermo Scientific	EE. UU.
Balanza analítica digital	Basic 317007	Sartorius	Alemania
Bomba de vacío			
Espectrofotómetro	DR 1900	HACH	EE. UU.
Termo reactor	TR 300	Merck	Alemania
Electrodo multiparamétrica	HI 98194	Hanna	Italia
Electrodo pH/ORP	HI 991002	Hanna	Italia
Centrifugadora	5415 R	Eppendorf	Alemania
Horno	OV-500 stabil-therm laboratory	BLUE M	EE. UU.
Encubadora	Oxipox box BSB para DBO	WTW	Alemania
Multímetro	HQ 40d	HACH	EE. UU.
Mezclador	Vortex-Genie® 2	Scientific industries	EE. UU.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. **Lista de reactivos químicos utilizados**

Nombre	Compañía	País
2,4,6-Tris (2-piridil) -s-triazina (TPTZ)	Sigma	EE. UU.
Ácido Acético	Carl Roth	Alemania
Ácido Clorhídrico		

Continuación del apéndice 16.

Ácido Clorogénico hemihidratado (CQA)	Sigma-Aldrich	Alemania
Ácido Gálico monohidratado	Carl Roth	Alemania
Ácido Trifluoroacético (TFA)	ACROS Organics	EE. UU.
BUFFER Nutrientes DBO, 300 ML	HACH	EE. UU.
Carbonato de Sodio	Carl Roth	Alemania
Cloruro de hierro	Kepets	Alemania
Folin-Ciocalteu	Sigma	EE. UU.
L(+)-Ácido Ascórbico	Carl Roth	Alemania
Metanol	VWR Chemicals	EE. UU.
Metanol	Carl Roth	Alemania
NaOH		
RR DQO Viales de digestión, HR+ PK	HACH	EE. UU.
SET TNT HR Nitrógeno Total	HACH	EE. UU.
TNT KIT Fósforo Total HR	HACH	EE. UU.

Fuente: elaboración propia.

#### Apéndice 17. Lista de partes de equipo HPLC

Instrumento	Descripción	Compañía/Ciudad/País
Auto inyector	SIL 10A	Shimadzu, Kyoto Japan
Controlador	CBM-10A	Shimadzu, Kyoto Japan
Desgasificador	DG 1310	Knaur Berlin Germany
Detector	UV-Vis Detector SPD-10 AVP	Shimadzu Kyoto Japan
Horno	Bio-Rad columna de calentamiento	Bio-Rad Laboratorio; Inc., Hercules, California, USA
Bomba	LC 10AS	Shimadzu Kyoto Japan
Columna	Prontosil 120-3-C18 ACE-EPS	BISCHOFF Analysentechnik und – geräte GmbH
	150 x 4,6 mm; 3 µm conectada una pre columna de C18 (Nr. 23)	Leonberg Germany

Fuente: elaboración propia.