UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

TESIS DE LICENCIATURA

“CALIDAD DE AGUA PARA EL BENEFICIO HÚMEDO DEL CAFÉ EN LA SIERRA MADRE DE CHIAPAS”

PRESENTADO POR:

ÁNGEL ALEXEI BOLAÑOS IBARRA

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO 2024

UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MEXICO

RECTOR:

DR. EN C.A. CARLOS EDUARDO BARRERA DÍAZ

SECRETARIO DE DOCENCIA:

DR. EN C.C. JOSÉ RAYMUNDO MARCIAL ROMERO

FACULTAD DE QUÍMICA

DIRECTORA:

DRA. EN C.Q. MARÍA FERNANDA BALLESTEROS RIVAS

SUBDIRECTORA ACADÉMICA:

DRA. EN C.Q. DORA ALICIA SOLÍS CASADOS

JEFA DEL DEPARTAMENTO DE EVALUACIÓN PROFESIONAL:

E.S.P. JACQUELINE M. REYES DELGADO

COORDINADOR DE LA LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA:

MTRO. EDUARDO MARTÍN DEL CAMPO LÓPEZ

UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

LICENCIATURA EN INGENIERIA QUIMICA

CALIDAD DE AGUA PARA BENEFICIO HÚMEDO DEL CAFÉ EN LA SIERRA MADRE DE CHIAPAS

TESIS DE LICENCIATURA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR POR EL GRADO DE INGENIERO QUÍMICO, ELABORADA POR:

ÁNGEL ALEXEI BOLAÑOS IBARRA

ASESOR INTERNO:

DRA. EN C.Q. ROSA MARÍA GÓMEZ ESPINOSA

ASESOR EXTERNO:

M. EN C. LUZ MARÍA RAMÍREZ ARMAS

TRIBUNAL EXAMINADOR:

INDICE GENERAL

Dedicatoria ……4

Agradecimientos ……..…..5

Índice general ……..……...6

Índice de cuadros …….....9

Índice de figuras ……,,,….12

Resumen ……,,…..14

Abstract ……,…15

1. PLANTEAMIENTO, IMPORTANCIA Y ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

..……...16

2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS ……,,,,,..18

2.1. Objetivos ……..18

2.2. Hipótesis ……...…..…..18

3. MARCO TEÓRICO ……19

3.1. Importancia del café en México y Chiapas ……..….19

3.2. Beneficio del café ……22

3.3. Parámetros de calidad del agua a considerar ……..….26

3.4. Índices de calidad del agua ……...33

3.4.1. Índice de Horton ……..34

3.4.2. Índice de León ……..35

3.4.3. Índice Universal (UWQI) ……36

3.4.4. Índice Canadiense de calidad de agua (CCMEQWI) ……..….36

3.4.5. Índice NSF (National Sanitisation Foundation) ……..….37

3.4.6. Índice de Dinnius (DWQI) ……..……38

3.4.7. Índice de Oregon (OWQI) ……..……...…39

3.5. Sustancias o elementos derivados del beneficio húmedo ……..39

4. MATERIALES Y MÉTODOS ……..…...….40

4.1. Zona de Estudio ……..…...40

4.2. Toma de muestras de agua ……...…….42

4.3. Indicadores de calidad del agua ……..……54

4.3.1. Parámetros físico-químicos ……..……...54

4.3.2. Índice global de calidad del agua ……..55

5. RESULTADOS Y DISCUSION ……...….57

5.1. Límites permisibles de contaminantes (NOM-001-SEMARNAT-2021) ……...62

5.2. Calidad para consumo humano (NOM-127-SSAI-2021) ……..……63

5.3. Índice de calidad del agua para otros usos ……..…….64

6. CONCLUSIONES ……..…..68

7. RECOMENDACIONES ……..…....71

8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS ……..……..……..73

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Producción de café cereza en los municipios de la zona de estudio (SIAP 2022) ……..……21

Cuadro 2. Composición de la pulpa del café ……..…..….25

Cuadro 3. Composición química del mucílago del café ……25

Cuadro 4. Límites permitidos para agua potable (OMS 1995, NOM-127-SSA-1994, NOM-127-SSAI-2021) ……....32

Cuadro 5. Clasificación de los índices de calidad del agua (ICA) por su metodología de cálculo……....34

Cuadro 6. Rangos del ICA de León para uso potable y agrícola ……..36

Cuadro 7. Descripción general de las categorías del índice CCME ……..37

Cuadro 8. Analitos y pesos del ICA NSF ….……..38

Cuadro 9. Rangos de valor del índice NSF ……..38

Cuadro 10. Información de los sitios donde se tomaron las muestras de agua en la cooperativa Comon Yaj Noptic ……..……51

Cuadro 11. Información de los sitios donde se tomaron las muestras de agua en la cooperativa Finca Triunfo Verde ……53

Cuadro 12. Parámetros utilizados para el cálculo del índice de calidad de agua de Dinnius (1987) ……..55

Cuadro 13. Clasificación del índice de calidad de agua de Dinnius (1987) ……..56

Cuadro 14. Valores de los parámetros de calidad de agua, utilizados en el cálculo del ICA …...……..…..58

Cuadro 15. Comparativa de algunos parámetros medidos en el presente estudio y en otros estudios publicados de la caracterización de aguas mieles convencionales del beneficio húmedo (Torres-Valenzuela 2019, Jaulis 2022, López 2013, Bolaños 2024) ……. ……...……....60

Cuadro 16. Datos experimentales vs límites permisibles (NOM-001-SEMARNAT-2021) …… …….....62

Cuadro 17. Clasificación de las muestras de agua de acuerdo al índice de calidad del agua (ICA) ……...…65

Cuadro 18. Criterios generales de uso según el valor del índice de calidad del agua (ICA) ……..66

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Producción de café en México …….....20

Figura 2. Estructura del fruto del café y los tipos de procesamiento ……..…….23

Figura 3. Ubicación general de la zona de estudio y de los puntos de muestreo …….....41

Figura 4. Sistema agroforestal de café ……..42

Figura 5. Proceso de colecta de muestras de agua **……..**43

Figura 6. Despulpado mecánico de los granos recolectados en el sistema agroforestal ……45

Figura 7. Proceso de despulpado mecánico de café, en el que separa el grano de la pulpa y cascarilla …….46

Figura 8. Depósito de pulpa de café derivada del beneficio húmedo ……..…..……..47

Figura 9. Café despulpado iniciando el proceso de fermentación para posteriormente ser lavado …...……..48

Figura 10. Proceso de lavado …….49

Figura 11. Tubería para desagüe de las piletas de lavado ……...…….50

Figura 12. Fosas de descarga de aguas residuales del beneficio de café ……..51

Figura 13. Ubicación geográfica del beneficio de café y sitios de muestreo en la cooperativa Comon Yaj Noptic ……..52

Figura 14. Ubicación geográfica de los beneficios de café y sitios de muestreo en la cooperativa Finca Triunfo Verde ……...…….53

Figura 15. Procedimiento para determinar la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) ..... ……54

RESUMEN

El incremento del número de habitantes de nuestro país, que demandan un mayor volumen de agua para su consumo, producción de alimentos y diversas actividades, así con el crecimiento de la actividad industrial y económica, sumado a la baja eficiencia en su distribución y uso, han provocado que la disponibilidad de este bien vital sea cada vez más escasa en la cantidad y calidad requerida. Otros factores, como la terrible contaminación en la mayoría de las fuentes de abastecimiento (ríos, presas, lagos, lagunas o en el subsuelo) han disminuido severamente su calidad y, por lo tanto, su disponibilidad para ciertos usos. Además, en las últimas décadas, el cambio climático está provocando una mayor escasez de agua debido a la presencia de sequías más severas y largas; por ejemplo, la CONAGUA reportó el 15 de junio 2024 que el 87.8% de la superficie del país presentaba sequía anormal, mientras que el 37.7% presenta sequía extrema (CONAGUA, 2024). La escasez de agua, además de perjudicar el abastecimiento de la misma en las viviendas de las personas, afecta también al ciclo hidrológico causando repercusiones en el aumento de la temperatura y provocando un desequilibrio ambiental al disminuir la productividad de los ecosistemas. Debido a esto, el presente estudio busca contribuir en la búsqueda de soluciones a esta problemática global a través de la caracterización de la calidad de las aguas mieles provenientes del beneficio húmedo de café en las cooperativas Comon Yaj Noptic y Finca Triunfo Verde, lo que sería el primer paso para el tratamiento apropiado de las mismas, y que puedan ser reintroducidas a los cuerpos de agua naturales o, en su defecto, aprovecharlas en los usos para los que tengan la calidad requerida, como el lavado de superficies, uso en inodoros o riego de plantas, según el tratamiento que se les proporcione.

ABSTRACT

The increase in the number of inhabitants of our country, who demand a greater volume of water for their consumption, food production, and various activities, as well as the growth of industrial and economic activity, coupled with the low efficiency in its distribution and use, have caused the availability of this vital good to be increasingly scarce in the quantity and quality required. Other factors, like the terrible pollution of this resource on most of the sources of supply (rivers, dams, lakes, lagoons, or in the subsoil), have severely decreased its quality and, therefore, its availability for some uses. In addition, in the last decades, climate change is provoked a higher shortage of water because of the presence of more severe and longer droughts; for example, the CONAGUA reported on June 15th, 2024 that 87.8 % of the country's surface presented an abnormal drought, whereas the 37.7% presents extreme drought (CONAGUA 2024). The shortage of water, in addition to harming the supply of the same water in the people´s living rooms, also affects the hydrological cycle, causing repercussions on the temperature rise and, as a consequence, provoking an environmental imbalance affecting the productivity of the ecosystems. It's because of this that the present investigation looks to contribute to the solution of this problem through the characterization of the quality of the wastewater from coffee crops on the Comon Yaj Noptic and Finca Triunfo Verde cooperatives, which would be the first step toward their appropriate treatment, so that they can be reintroduced into natural bodies of water or, failing that, used for the purposes for which they have the required quality, such as washing surfaces, using them in toilets or watering plants, depending on the treatment they are given.

Calidad de agua para el beneficio húmedo del café en la Sierra Madre de Chiapas

1. PLANTEAMIENTO, IMPORTANCIA Y ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

Los sistemas agroforestales, como es el caso de la producción de café bajo sombra en México, proporcionan servicios hidrológicos (van Noordwijk, 2019) y contribuyen a la conservación de suelos (Muchane *et al*. 2020); con ello, mantienen la calidad del agua al reducir los caudales pico y evitar la erosión en las plantaciones. Sin embargo, durante su ciclo de vida, desde el vivero hasta la elaboración de la bebida, también pueden generar una cantidad importante de sustancias nocivas que se liberan al ambiente, principalmente a la atmósfera (gases de efecto invernadero como bióxido de carbono, metano y óxido nitroso), al suelo (pesticidas, metales pesados) y a las corrientes de agua superficiales y subterráneas (materia orgánica, cafeína, pesticidas, nutrientes inorgánicos eutrofizantes, entre otros). Particularmente, en la etapa poscosecha existen fuentes de contaminación importantes debido a que solo el 5% del peso del fruto fresco se aprovecha en la preparación de la bebida, el 95% restante corresponde a residuos (Fernández *et al*., 2020). Muchos de estos residuos, debido a un manejo inadecuado, contaminan el suelo, agua y aire, y se convierten en focos infecciosos para la salud de las personas (Jaulis, Juscamata, Villanueva, Gutiérrez y Dilas, 2022).

El proceso para obtener el café verde, previo a su tostado, se denomina beneficio. En éste se retiran las capas que cubren el grano, incluyendo la piel plateada, el pergamino, el mucílago, la pulpa y la cáscara, lo cual se puede realizar de tres maneras diferentes: húmedo, seco y semiseco (Bastian *et al*., 2021). El método húmedo es el más utilizado por la mayoría de productores del mundo, y de manera particular en México, debido a que, en general, garantiza una mayor calidad de los granos de café, pero es el que usa los mayores volúmenes de agua, con la eventual degradación de su calidad. Las aguas residuales de esta actividad generalmente se arrojan en las inmediaciones afectando las corrientes superficiales y subterráneas (Ashenafi *et al*., 2021).

El beneficio húmedo comprende los subprocesos de despulpado, fermentado, lavado y secado y, debido a que la cereza del café contiene un mucílago (miel) que durante el lavado origina un residuo líquido conocido como "agua miel", a las aguas residuales de este proceso se les denomina como aguas mieles (Jaulis *et al*., 2022). Estas se consideran como una de las mayores fuentes contaminantes de compuestos orgánicos en el sector cafetalero (Rugama y Save, 2013); y se caracterizan por su alta acidez y contenido de materia orgánica (Bisekwa *et al*., 2020; Jaulis *et al*.,

2022). En consecuencia, se genera un aumento considerable de la demanda bioquímica de oxígeno, carga de sólidos totales, temperatura del agua, cambios en el pH, altas concentraciones de fenoles y antioxidantes, entre otros (Navarro y Large, 2010; Guaranguay y Orozco, 2019).

Se estima que el beneficio húmedo de 1 kg de café genera una cantidad de agua y material contaminante equivalente a aquella producida por seis personas en un día (Navarro y Large, 2010). En México, Torres (2018) estimó que un litro de agua generada en un beneficio húmedo de café equivale a 125 L del agua residual doméstica que se genera en una casa habitación, lo que da una idea del impacto potencial de contaminación. La mayoría de beneficios de café en los países en vías de desarrollo no tratan sus aguas, por lo que eventualmente pueden alcanzar las corrientes superficiales provocando contaminación severa que afecta a la flora y fauna acuáticas, y que además impide el uso del agua por el hombre para fines domésticos, industriales o recreativos (Woldesenbet *et al*., 2014; Gómez *et al*., 2017).

En primera instancia, para evitar que los desechos del despulpado y lavado del café pueden llegar a las corrientes de agua y contaminarlos, es necesario conocer la carga y tipo de contaminantes generados en este proceso, lo que es el punto inicial para proponer alternativas que ayuden en la solución de esta problemática ambiental. Debido a ello, en la presente investigación se tomaron muestras de agua durante el periodo de la cosecha 2023, en beneficios de café ubicados en las cooperativas de café orgánico Comon Yag Noptic S.P.R. de R.L. y Finca Triunfo Verde S.C., ambas localizadas en la vertiente interior de la Sierra Madre de Chiapas. Estas cooperativas agrupan a pequeños productores de café arábiga orgánico de los municipios de La Concordia, Capitán Luis A. Vidal, Montecristo de Guerrero, Siltepec, Chicomuselo y Ángel Albino Corzo.

Debido a lo expuesto, se realizó la caracterización de los parámetros microbiológicos y físico-químicos del agua utilizada para el beneficio húmedo del café en ambas cooperativas, así como de las aguas mieles generadas por este proceso, lo que aporta información para su caracterización detallada para, posteriormente, proponer alternativas para reducir el potencial de contaminación de las corrientes y cuerpos de agua debido a la cafeticultura de esta región.

2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivos

General:

Evaluar la calidad del agua usada para el beneficio húmedo del café en las cooperativas Finca Triunfo Verde y Comon Yaj Noptic, así como de las aguas mieles derivadas del despulpe y lavado de café.

Específicos:

a) Caracterizar la calidad del agua para consumo humano usada (fuente de abastecimiento) para el beneficio húmedo de café.
b) Caracterizar la calidad de las aguas mieles derivadas del beneficio húmedo de café mediante parámetros físico-químicos y biológicos.
c) Estimar la degradación general del agua utilizada en el beneficio del café mediante un índice de calidad que indique su aptitud para consumo humano y otros usos.

2.2 Hipótesis

a) El agua utilizada para el despulpe y lavado de café (fuente de abastecimiento) en las cooperativas Finca Triunfo Verde y Comon Yaj Noptic está dentro de los límites permisibles de la calidad del agua de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana de calidad para uso y consumo humano (NOM-127-SSA1-2021).
b) Las aguas mieles derivadas de los procesos de despulpe y lavado de café superan las Norma Oficial Mexicana que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales (NOM-001-SEMARNAT-2021) para ser vertidas a corrientes naturales sin tratamiento previo.
c) El agua derivada de los procesos de despulpe y lavado de café no son aptas para consumo humano y otros usos, debido a la degradación general de su calidad.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Importancia del café en México y Chiapas

El café es una de las bebidas más populares del mundo debido a su sabor, aroma y efectos estimulantes (Acquaticci *et al*., 2023). Además, es el segundo producto más comercializado a nivel global después del petróleo. Se cultiva en alrededor de ochenta países, por lo que se vincula a grandes negocios a nivel mundial (Murthy y Madhava, 2012). Existen más de cien especies de plantas de café; sin embargo, solo dos de ellas, arábica (60%) y robusta (40%) dominan el mercado (Chandrasekhar *et al*., 2023). Estas dos especies de café presentan notables diferencias entre sí. El café arábico fue el primero en descubrirse y, aunque es más difícil su cultivo y menor su rendimiento, ofrece alta calidad, con un sabor y aroma más intenso; a diferencia de robusta, que se utiliza para la producción de cafés de calidad estándar, es más resistente a la variación en altitud y clima, y frecuentemente se utiliza para la elaboración de café instantáneo debido a su bajo costo y alta eficiencia de producción (Yılmaz *et al*., 2017).

La planta de café silvestre (*Coffea arabica*) es originaria de Etiopía, donde fue descubierta alrededor del año 850 d. C. Posteriormente se transportó a Yemen y, más tarde a otros países de Asia. A principios del siglo XVII llegó a Europa, desde donde se distribuyó a las colonias francesas, británicas y españolas (Herrera y Lambot, 2017). Actualmente el café se cultiva en amplias franjas del área delimitada por los trópicos de Capricornio y Cáncer, una región denominada ocasionalmente como "cinturón de café" (Chandrasekhar *et al*., 2023). De acuerdo a Yilmaz *et al*. (2017), su cultivo se restringe a climas tropicales debido a que requiere de condiciones específicas de temperatura (14-26 °C), precipitación (alrededor de 1500 mm), suelos (pH entre 5.3-6.0) y altitud (610 a 1830 m). De manera particular, en las regiones cafetaleras de México, América Central y los países andinos, la producción de café arábica es de alta calidad, ya que se cultiva a mayores elevaciones y climas más fríos (Harvey *et al*., 2021).

Durante la cosecha 2019/2020, la producción mundial del café alcanzó un volumen de 9,903,180 Mg. Brasil, Indonesia y Colombia fueron los principales productores, con más del 60% de la producción mundial. México fue el noveno productor, aportando el 2.41% del total mundial (ICO, 2023).

En relación a la producción de café verde en México, en la Figura 1 se muestra su evolución en los últimos 30 años con un promedio de 261,785 Mg. En el periodo de 2013 a 2016, se observa

una marcada disminución en la producción, atribuida a la aparición de la roya del café (*Hemileia vastatrix*) con alta severidad, que causó pérdidas importantes en Centroamérica, incluyendo Chiapas, durante el ciclo 2012/2013 (Barrera et al., 2013). En el ciclo 2015/2016, productores de Oaxaca y Guerrero reportaron pérdidas de hasta 95% debido a la roya, lo que provocó una cosecha históricamente baja (Libert y Paz, 2018). En los años posteriores, la producción se ha recuperado a niveles similares a los registrados entes de la plaga.

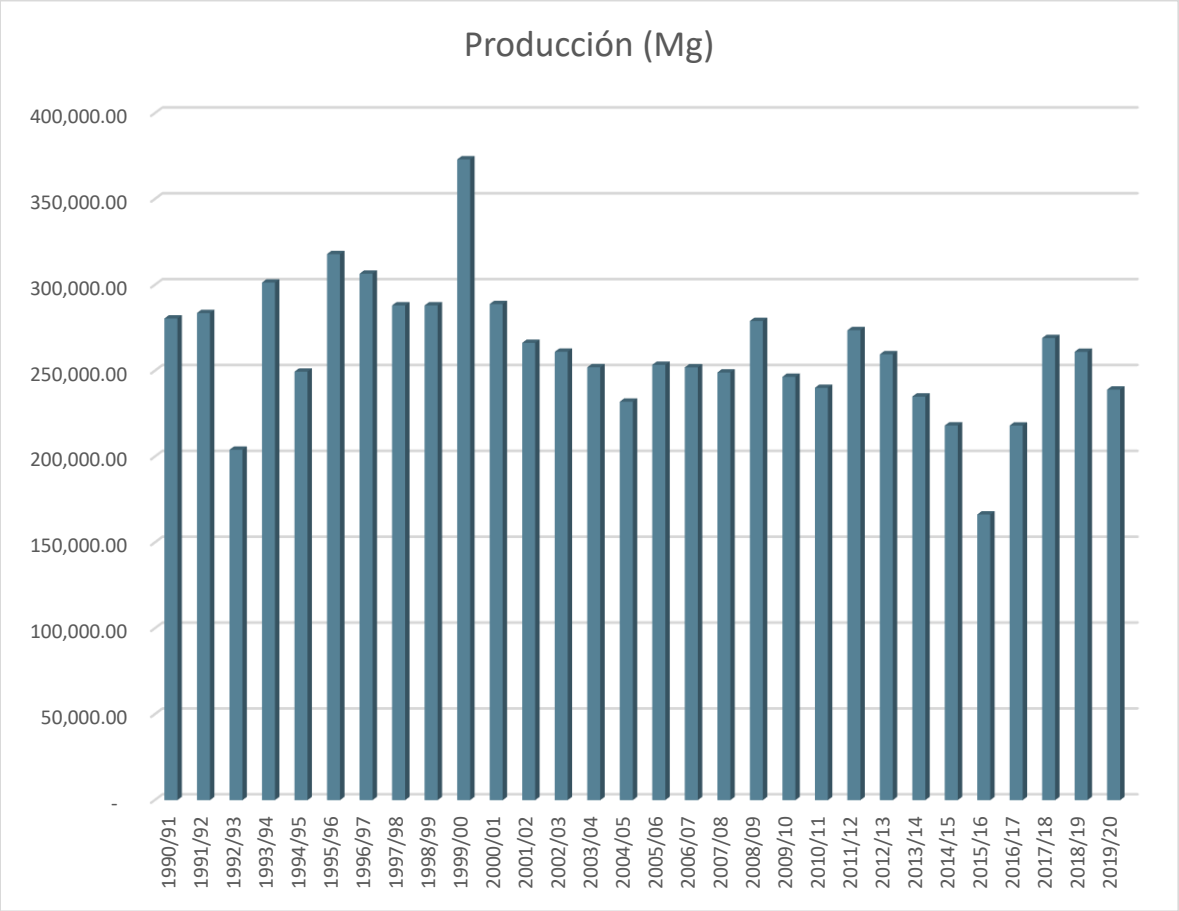


Figura 1. Producción de café en México. Fuente: Elaboración propia con datos de ICO (2023).

El café se cultiva en 15 estados de México, con una superficie establecida de 710,897 hectáreas. En función de la superficie sembrada, en orden de importancia, lo estados de Chiapas, Veracruz, Oaxaca y Puebla representan el 85 % de la superficie cultivada y el 88% del valor de la producción (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2023). En el país se cultivan dos especies: *Coffea arabica* (conocido como arábico o arábica) y *Coffea canephora* (también llamada robusta o

canéphora). Las variedades de café arábigo más comunes en México incluyen Bourbón, Caturra, Mundo Novo, Garnica, Typica, Catimor y Catuai (CEPF, 2001; Buendía et al., 2020).

México es uno de los principales exportadores internacionales de café y se ubica en la undécima posición como productor de este grano a nivel global, con una participación de 2.01% en la producción mundial. La cafeticultura mexicana se distingue como una actividad estratégica de gran importancia económica, social y ambiental, debido a que su producción involucra principalmente a pequeños productores de bajos ingresos y alrededor de 30 grupos indígenas, permitiendo la generación de divisas, empleo y la conservación de la biodiversidad al cultivarse bajo sombra (Juárez *et al*., 2021). Así, la producción de café en México se constituye como un medio de vida, ya que las regiones productoras de café se ubican en los sitios con los más altos índices de marginación y pobreza (Pérez *et al*., 2011).

De acuerdo a la información del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2022) en el año 2022, el estado de Chiapas cosechó una superficie de 239 737 ha con un rendimiento promedio de 1.61 Mg ha^{-1} de café cereza y un valor de la producción estatal de $2,044,023.

En relación a la zona de estudio, donde se ubican las cooperativas Finca Triunfo Verde y Comon Yaj Noptic, las estadísticas de producción de café cereza se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Producción de café cereza en los municipios de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia con datos del SIAP (2022).

Municipio	Superficie (ha)			Producción (Mg)	Rendimiento (Mg ha^{-1})	PMR ($ Mg^{-1})	Valor Producción (miles de $)
	Sembrada	Cosechada	Siniestrada				
Capitán Luis Ángel Vidal	2,757.00	2,747.00	-	6,318.10	2.30	4,905.83	30,995.52
Chicomuselo	3,236.00	3,220.00	-	4,701.20	1.46	5,955.07	27,995.98
La Concordia	8,130.50	8,130.50	-	7,805.28	0.96	7,534.70	58,810.44
Montecristo de Guerrero	3,917.00	3,917.00	-	3,525.30	0.90	7,539.61	26,579.39
Siltepec	6,593.50	6,573.50	-	17,377.49	2.64	5,186.89	90,135.08
Ángel Albino Corzo	5,985.50	5,985.50	-	5,686.00	0.95	7,447.64	42,347.28
Zona de estudio	**30,619.50**	**30,573.50**		**45,413.37**	**1.54**	**6,428.29**	**276,863.69**

3.2 Beneficio del café

Los granos de café son las semillas provenientes de frutos parecidos a cerezas cubiertas por una piel roja (el exocarpio) cuando maduran. Por debajo de la pulpa (el mesocarpio), se encuentran dos granos aplanados el uno contra el otro, cada una de ellos recubierto por una especie de pergamino (el endocarpio). Cuando el fruto está maduro, una capa delgada y viscosa de mucílago recubre el pergamino. Por debajo del pergamino los granos están recubiertos de otra membrana más delgada, una piel plateada (ICO, s.f.).

Posterior a la cosecha, se realiza el beneficio, que es el proceso por el cual se separa el grano de café del resto de partes del fruto (la cereza) hasta obtener el café verde (Zhang *et al*., 2019); siendo este el paso más importante durante el flujo productivo de café de calidad, ya que permite conservar o degradar los atributos sensoriales de la bebida (Juárez *et al*., 2021). El procesamiento generalmente implica la eliminación de las cinco capas (piel, pulpa, pergamino, mucílago y piel plateada) para liberar los granos de café, también definidos como granos de café verde (Figueroa *et al*., 2020). Estos granos de café verde tienen un contenido de humedad del 10 al 12 % para evitar una fermentación no deseada (Haile y Hee Kang, 2020); siendo más estables y adecuados para el proceso de almacenamiento, transporte y tueste (Bastian *et al*., 2021).

El procesamiento se realiza inmediatamente después de la cosecha para permitir que se produzca la fermentación espontánea o autóctona (Haile y Hee Kang, 2019). De acuerdo a Haile y Hee Kang (2019), Morales y Bolaños (2023) y Janne *et al*., (2023), entre otros, existen principalmente tres métodos tradicionales del procesamiento del café: lavado (húmedo), natural (seco) y honey (semiseco). En la Figura 2 se muestra la estructura del fruto del café y se representan los métodos de procesamiento postcosecha.

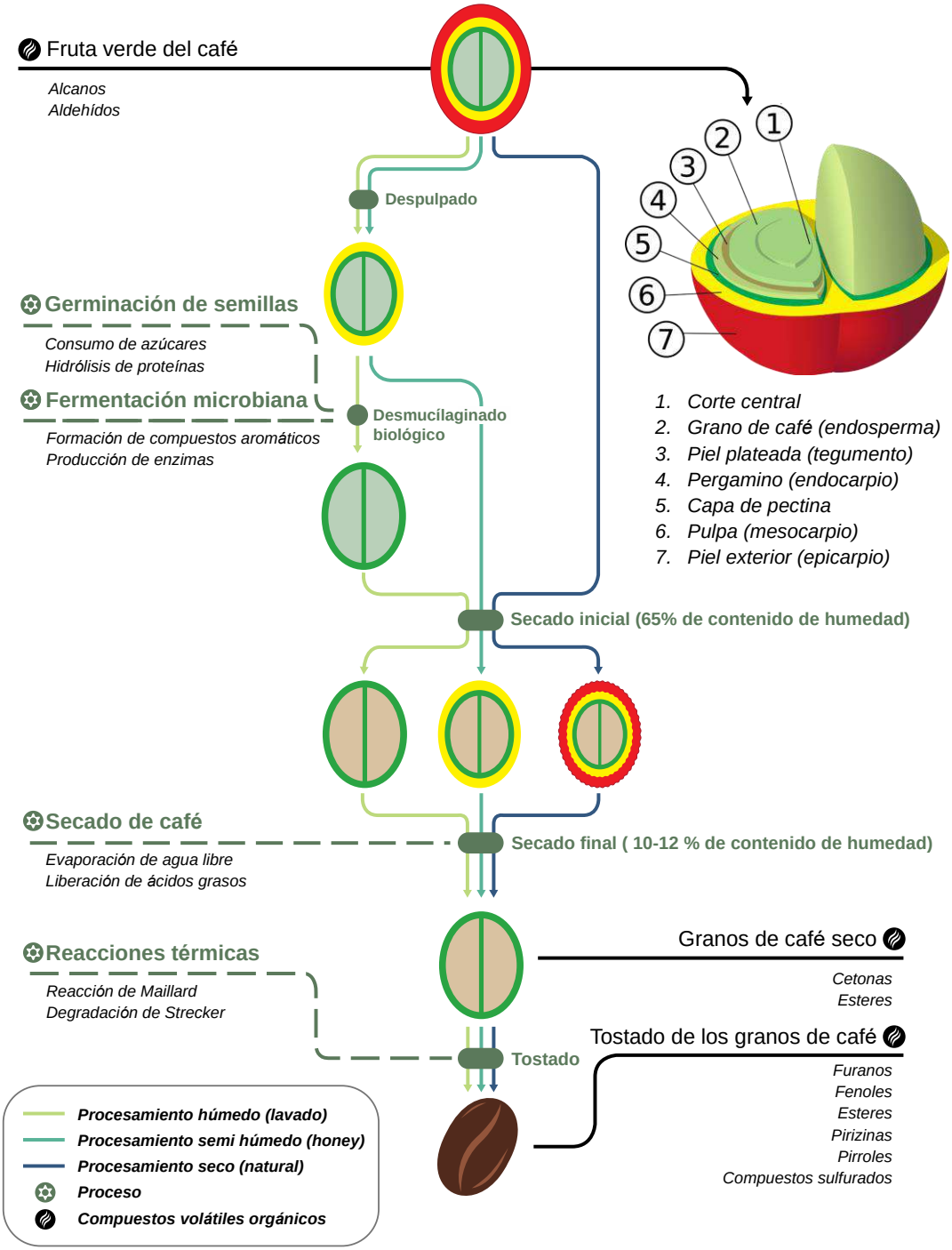


Figura 2. Estructura del fruto del café y los tipos de procesamiento. Fuente: Morales y Bolaños (2023).

El método seco consiste en secar la cereza del café justo después de la cosecha y luego proceder con el descascarado mecánico (Figueroa *et al*., 2020). El procesamiento semiseco combina etapas de métodos tanto secos como húmedos, donde los frutos de café se despulpan mecánicamente, se elimina completamente la pulpa de la fruta, pero se mantiene el grano cubierto con el mucílago, que se adhiere al grano durante el proceso de secado al sol o bajo techo (Pereira *et al*., 2017, Parra *et al*.,2020). El método húmedo se refiere al café despulpado que se somete a una fermentación en tanque bajo el agua; incluye el despulpado mecánico de las cerezas de café, lo que implica exprimir la mayor parte de la pulpa de la fruta (Janne *et al*., 2023). Es el método más complejo, ya que, además de la eliminación mecánica de la piel y la pulpa, incluye la degradación microbiana (fermentación) de la capa de mucílago y, finalmente, la eliminación del agua mediante el secado al sol (Bee *et al*., 2005).

El proceso húmedo se utiliza principalmente para el café arábica, y en éste, el agua, el tiempo y otras condiciones están más controladas para minimizar el crecimiento de microorganismos no deseados (Bastian *et al*., 2021). Este es el método más común, ya que se utiliza por muchos productores debido a que, en general, produce granos de café verde de mayor calidad y garantiza una protección óptima contra la oxidación (Figueroa *et al*., 2020). En México, el beneficio húmedo es el método más utilizado (CEPF, 2001; Vázquez, 2016). Sin embargo, este método ha generado daño ambiental generalizado en términos de uso y contaminación del agua y desecho de subproductos como la pulpa y el mucílago (Martinez *et al*., 2021). La pulpa de café representa alrededor del 43.58%, mientras que el mucílago el 11.8%, ambos en relación al peso del fruto fresco (Fernández *et al*., 2020).

La pulpa y el mucílago son ricos en nutrientes, sus composiciones químicas se presentan en los Cuadros 2 y 3.

Cuadro 2. Composición de la pulpa del café

Componentes	%
Extracto de éter	0.48
Extracto crudo	21.4
Proteína cruda	10.1
Ceniza	1.5
Extracto libre de nitrógeno	31.3
Taninos	7.8
Sustancia de pectina	6.5
Azúcares no reductores	2.0
Azúcares reductores	12.4
Ácido clorogénico	2.6
Cafeína	2.3
Ácido cafeico total	1.6

Fuente: Haile y Hee Kang (2020).

El mucílago de café es pegajoso debido a tiene sustancias de pectina (polisacáridos), lo que hace difícil eliminarlo solo con agua. Por ello, se utilizan productos químicos, en su mayoría enzimas, o procedimientos de fermentación natural (Haile y Hee Kang, 2020).

Cuadro 3. Composición química del mucílago del café

Componentes	**Composición g L^{-1}**
Glucosa	35.65
Galactosa	37.67
Lactosa	1.06
Proteínas	0.119
Siringaldehído	0.610
Minerales	**mg L^{-1}**
Azufre	30.19
Calcio	37.08
Potasio	239.8
Magnesio	10.05
Fósforo	41.55
Sodio	7.18
Hierro	0.65
Cobre	2.45
Zinc	0.14
Manganeso	0.07
Boro	0.16
Bario	0.02
Arsénico	0.47
Litio	0.01
Silicio	1.58
Estroncio	0.07

Fuente: Haile y Hee Kang (2020).

El beneficio húmedo del café demanda grandes cantidades de agua (Ruíz *et al*., 2021). El beneficiado húmedo tradicional utiliza hasta 75 litros de agua por kilogramo de pergamino seco o 94 L kg-1 de café oro o verde (CRS, 2021). De acuerdo al estudio de huella hídrica del café realizado por SCAA (s.f.), el beneficio húmedo ecológico (con transporte y remoción mecánica del mucílago) la cantidad de agua requerida se reduce notablemente, a 6 L kg^{-1}, y en el caso de beneficio semiseco (*honey*) y seco a 1 L kg^{-1}.

Adicionalmente, el procesamiento húmedo genera grandes cantidades de mucílago y pulpa, compuestos de varias proteínas y azúcares en forma de pectinas, que se fermentan por la acción de las enzimas que contienen las bacterias localizadas en el fruto del café, formando otros compuestos (Ruíz *et al*., 2021); los que posteriormente puede llegar a los cuerpos de agua y afectar de manera adversa su disponibilidad y calidad (SCAA, s.f.). Debido al alto contenido de contaminantes de las aguas mieles, su disposición sin tratamiento en cuerpos de agua se ha vuelto indeseable por el peligro que esto representa para los mismos y para la salud humana (Dadi *et al*., 218). La producción cafetalera no cuenta, en general, con la disposición controlada de sus aguas residuales, las cuales afectan negativamente a los cuerpos receptores de agua y, además, conduce a muchos problemas de salud graves en las áreas cercanas, tales como irradiación de los oídos y la piel, dolor de estómago, náuseas, problemas respiratorios y eutrofización de la zona de agua dulce (Getahun *et al*., 2023).

3.3 Parámetros de la calidad del agua a considerar

De acuerdo con Jiménez (2012) los principales parámetros para caracterizar el agua se pueden clasificar en 4 grupos; los cuales son: físicos, químicos, biológicos y radioactivos, siendo los primeros 3 más relevantes al caracterizar las aguas mieles provenientes del beneficio de café.

Para el presente estudio, se seleccionaron los parámetros siguientes: Oxígeno disuelto, pH, Temperatura del agua, Conductividad eléctrica, Nitratos, Color, Coliformes totales y Coliformes fecales, Dureza ($CaCO_3$), Alcalinidad, Cloruros y Demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), dado el registro que se tiene de materia orgánica e inorgánica contenida en las aguas mieles resultantes del beneficiado. Estos parámetros se describen brevemente a continuación (Jiménez 2012):

a) *Oxígeno Disuelto*: Este indicador es conocido como la capacidad de un cuerpo receptor para sostener la vida acuática, sirve como indicador del efecto producido por contaminantes oxidables y de la capacidad autodepuradora del cuerpo mismo. Su ausencia en aguas residuales genera olores desagradables debido a la descomposición anaerobia de la materia orgánica. Sin embargo, en aguas de abastecimiento su exceso provoca corrosión. Comúnmente su medición en laboratorio se realiza mediante método electroquímico, en el cuál, al introducir directamente la sonda de un oxímetro en la muestra, proporciona el contenido del mismo en una presión y temperatura dadas. También puede conocerse su valor al efectuar una titulación del permanganato de potasio con la sal de Mohr (sulfato de ferroso amoniacal). En ambos casos se recomienda realizar el análisis *in situ.* El oxígeno disuelto disminuye al aumentar la salinidad, la temperatura (50 % entre 0 y 35 °C) y la altitud con respecto al nivel del mar (7 % cada 60 m).

b) *pH*: Se define como el cologaritmo de la concentración de los iones hidronio, es decir ([-1] x log [H^+]) y su escala varía entre 0 y 14, siendo el valor de 7 el de la neutralidad (la solución no es ácida ni alcalina). La evaluación del pH se emplea para caracterizar un agua, dar seguimiento a un proceso, o bien, para controlar las condiciones de operación (precipitación, floculación, sistemas biológico anaerobios, desinfección), ya que la velocidad de las reacciones depende de él. Existen varias formas de cuantificar el pH, como los indicadores ácido-base, que cambian de color según el tipo de solución en la que se sumerjan (fenolftaleína, papel tornasol, anaranjado de metilo, azul de bromotimol, entre otros). Aunque estos métodos no son muy precisos y generalmente solo permiten determinar si se trata de una solución básica, alcalina, neutra o ácida (exceptuando el papel tornasol), el potenciómetro, que es un equipo electrónico, proporciona una medición del pH con mayor exactitud. El pH aceptable para agua potable varía entre 6.5 a 8.5.

c) *Temperatura del agua:* Influye sobre las tasas de crecimiento biológico, las reacciones químicas, la solubilidad de los contaminantes o compuestos requeridos (sólidos líquidos o gases, principalmente O_2) y en el desarrollo de la vida. Una mayor temperatura (alrededor de 40 °C) favorece el desarrollo de microorganismos y acrecienta los problemas de sabor, olor, color y corrosión. Conocer el valor de la temperatura es

necesario para determinar un gran número de parámetros o propiedades del agua, tales como alcalinidad, índice de saturación, conductividad, etc. Las mediciones se efectúan con un termómetro capilar de mercurio con precisiones de 0.1 °C e intervalo de -10 a 110 °C. Es importante recordar que, en un líquido, a mayor temperatura, aumenta la solubilidad de un sólido, pero disminuye la de un gas; por esta razón, la contaminación térmica elimina la vida aeróbica de un cuerpo de agua al reducir el oxígeno disuelto en el líquido.

d) *Conductividad Eléctrica*: Representa la capacidad de una solución para transmitir una corriente eléctrica. Su valor depende del tipo de iones involucrados, concentraciones, estado de oxidación de los mismos, así como la concentración relativa de cada uno y la temperatura. En general, las soluciones de ácidos, bases y sales son buenas conductoras eléctricas, mientras que las de los compuestos orgánicos lo son en menor medida o casi nada. Para cuantificar la conductividad eléctrica, se mide la resistencia al paso de la corriente en ohmios (ohm) en el laboratorio. Esta resistencia es inversamente proporcional al área transversal y directamente proporcional a la longitud. En consecuencia, la resistencia depende de las características de la celda empleada para medirla, por lo que los aparatos efectúan este ajuste (ohmímetro). Conociendo el valor de este parámetro se puede evaluar el contenido de sólidos disueltos si se conoce el factor de conversión (0.55 a 0.9 para agua potable).

e) *Nitratos*: Son aniones (NO_3^-) compuestos de oxígeno y nitrógeno que en presencia de otros compuestos orgánicos forman sales u otros compuestos. Naturalmente proceden de la descomposición de proteínas animales o vegetales, mientras que artificialmente se encuentran en compuestos químicos presentes en fertilizantes, herbicidas y plaguicidas, entre otros. Los nitratos se disuelven fácilmente en el agua y llegan al consumo humano sin conferir ningún olor o sabor a las aguas. El método estandarizado para su cuantificación es el de reducción cadmio-cobre, que utiliza una columna de vidrio para filtrar la muestra a analizar a través de gránulos de cadmio tratados con sulfato de cobre, provocando que el nitrato se reduzca a nitrito y este se determina por diazotación con sulfanilamida y diclorhidrato de N-(1-naftil)-etilendiamina, la cual es fácilmente cuantificable en un espectrofotómetro Uv-vis.

f) *Color*: Se define como el color producido por sustancias disueltas en el agua potable. El método que se utiliza con mayor frecuencia para evaluarlo es el de la escala Pt-Co (platino-cobalto). El color en el agua potable puede dar una indicación rápida de su calidad, además, junto con el olor determina la aceptación por parte del consumidor y afecta la efectividad del proceso de desinfección con cloro. En aguas residuales el color se debe principalmente a procesos industriales como es el caso del beneficio húmedo en el café. La coagulación, seguida por sedimentación, es el método más apropiado para la remoción del color aparente. La dosificación del coagulante depende de la concentración inicial del color y del pH (generalmente ácido).

g) *Coliformes Totales*: Son bacterias que se pueden encontrar en el ambiente, aunque su presencia no necesariamente indica contaminación fecal, sino general. Se definen como bacterias gram negativas, con forma de bastón, no formadoras de esporas, que pueden fermentar la lactosa con producción de ácido y gas cuando se incuba a 35-37 °C. El método más empleado para la determinación de coliformes totales es la técnica por diluciones en tubo múltiple, que se fundamenta en la fermentación de lactosa por conducto de las bacterias coliformes incubadas a una temperatura de 35 °C en un periodo de tiempo de 24 a 48 h.

h) *Coliformes Fecales*: Se definen como aquellos bacilos aerobios y anaerobios facultativos, gram negativos, no esporulados capaces de producir aldehídos a partir de la fermentación de la lactosa con producción de ácido y gas en 24 h a 45 °C. Son componentes de la flora y la fauna del intestino humano, donde se encuentran en grandes cantidades, ya que la mayoría no son patógenos. Constituyen aproximadamente el 90 % de los coliformes totales en las excretas humanas. Se les consideran microorganismos indicadores dado que su presencia revela la contaminación del agua con heces fecales y por lo tanto la posible existencia de patógenos. Existen dos técnicas para su determinación en el laboratorio: la de filtro de membrana y la de tubos múltiples, siendo la primera la más empleada en la que se seleccionan bacterias por medios específicos de cultivo e incubación durante 24 a 48 h con temperatura de 44.5 °C. El 95 % de los coliformes fecales resultan positivos a la

prueba de temperatura y los procedimientos en laboratorio para su cuantificación son relativamente sencillos.

i) *Dureza ($CaCO_3$)*: Representa la concentración de cationes metálicos multivalentes presentes en el agua y se clasifica en carbonatada y no carbonatada, la primera es sensible al calor, precipita en altas temperaturas y se denomina temporal (equivalente a la alcalinidad). La dureza más común es la de calcio y magnesio, razón por la cual solo se toman en cuenta estos elementos para determinarla en el laboratorio y la precipitación de los mismos es el método más usado para el ablandamiento de agua.

j) *Alcalinidad*: Expresa la capacidad que tiene un agua de mantener su pH a pesar de recibir una solución ácida o alcalina. Corresponde, principalmente, a los hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de los iones Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, NH_4^{+}; siendo los de calcio y magnesio los más comunes. La alcalinidad se determina mediante la titulación con un ácido (H_2SO_4, 0.02 N) y el resultado se expresa como mg $CaCo_3$ L^{-1}. Concentraciones elevadas de alcalinidad pueden tener efecto negativo en cultivos, según sea su composición química. El agua residual doméstica tiene, por lo general, alcalinidad menor o ligeramente superior a la del abastecimiento; es del orden de 50 a 200 mg $CaCO_3$ L^{-1}. El principal efecto de la alcalinidad es la reacción de esta a ciertos cationes en el agua, lo que conduce a la formación de precipitados.

k) *Cloruros*: Indican la capacidad del agua para evitar contaminación microbiológica. La cloración de agua de abastecimiento o tratada, tiene por objeto destruir o desactivar microorganismos patógenos y mejorar la calidad global. El cloro libre se determina por la formación de un compuesto amarillo con ortotoluidina, el cual se mide de 435 a 490 nm en un espectrofotómetro. Para medir cloro residual en forma aproximada existen dispositivos sencillos, tales como los empleados en albercas, que ayudan a controlar el contenido de cloro en el agua (de 0.2 a 0.5 mg L^{-1} para asegurar un nivel de desinfección aceptable).

l) Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5): Se define como la medida de la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para degradar la materia orgánica en el agua

por 5 días a 20 °C. Evalúa la fracción carbonada, la de los sulfuros y del ion ferroso, excluyendo la fracción nitrogenada. Existen varios métodos para detectar la DBO, desde el de diluciones hasta los de técnicas respirométricas. El agua de calidad potable tiene una DBO promedio mensual de 0.75 a 1.5 mg O_2 L^{-1}; el agua residual doméstica oscila entre 200 a 300 mg O_2 L^{-1} y algunos efluentes industriales pueden alcanzar hasta 20 g L^{-1}. La DBO es una reacción de primer orden que representa la cantidad de materia orgánica utilizada por los organismos y puede expresarse como: $\frac{dL_t}{dt} = -kL_t$; donde L_t representa el oxígeno equivalente a la materia orgánica en el tiempo (t) y k es la tasa de consumo de oxígeno (específica para cada tipo de sustrato). Los resultados se utilizan para: determinar la cantidad de O_2 requerida para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente, medir la eficiencia de algunos procesos de tratamiento y también en el diseño de las instalaciones de tratamiento de agua residual.

En México, para consumo humano, la NOM-127-SSA1-1994 fue la normatividad vigente para definir los límites permisibles de la calidad del agua potable por muchos años, pero el pasado 2 de mayo se publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) la norma NOM-127-SSA1-2021. Una comparativa de los parámetros y límites permitidos en ambas normas y la de la Organización Mundial de la Salud (OMS) se muestran en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Límites permitidos para agua potable. Fuente: La contaminación ambiental en México (Jiménez, 2012).

Parámetro	Nivel de acción		
	OMS, 1995 (mg/L)	NOM 127-SSA-1994 (mg/L)	NOM-127-SSAI-2021 (mg/L)
Aluminio	-	0.2	0.2
Arsénico	0.01	0.05	0.025
Bario	0.70	0.70	1.3
Cadmio	0.003	0.005	0.005
Cianuros (CN^-)	0.07	0.07	0.07
Cloro residual libre		0.2 - 1.50	0.2 – 1.50
Cloruros (Cl^-)	250	250	
Cobre	2.0	2.0	2.0
Cromo total	0.05	0.05	0.05
Dureza total (como $CaCO_3$)	-	500.0	500.00
Coliformes fecales	No detectable en 100mL	No detectable en 100mL	No detectable en 100mL
Fenoles	0.20	0.1	
Fluoruros (F)	1.50	1.50	1.50
Hierro	-	0.30	0.30
Manganeso	0.50	0.15	0.15
Mercurio	0.001	0.001	0.006
Nitratos (como N)	11.3	10.00	11.0
Nitritos (como N)	0.9	0.05	0.90
Nitrógeno amoniacal (como N)	-	0.50	0.50
pH	6.5 a 8.5	6.5 – 8.6	6.5 – 8-6
Plaguicidas en µg /L			
Aldrín y dieldrín (Separados o combinados)	0.03 0.20	0.03 0.30	0.03
Clordano (total de isómeros)	2.00	1.00	0.20
DDT (total de isómeros)	2.00	2.00	1.0
Gamma-HCN (lindano)	1.00	0.01	2.0
Hexaclorobenceno	0.03	0.03	
Heptacloro y epóxido de heptacloro	20.00 30.00	20.00 50.00	20.0 30.0
Metoxicloro			
2,4-D			
Plomo	0.01	0.025	0.01
Sabor	No desagradable	Agradable	
Selenio	0.01	-	0.04
Sodio	200	200.0	
Sólidos disueltos totales	1,000.00	1000.00	1000.00
Sulfatos	250	400.0	400.0
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	-	0.50	0.50
Trihalometanos totales	0.1 a 1.0	0.20	
Zinc	-	5.00	

3.4 Índices de calidad del agua

El índice de calidad del agua (ICA) proporciona un número único que expresa la calidad general del agua, en un lugar y momento determinados, en función de varios parámetros de calidad del agua, con el objetivo de hacer más comprensible la información (Olubukola, Edet & Godwin, 2021). Por lo tanto, el ICA se considera una herramienta matemática que minimiza significativamente los complejos conjuntos de datos sobre la calidad del agua y proporciona un valor de clasificación único que describe el estado de su calidad o el grado de contaminación (Akhtar, 2021). De esta forma, los ICA son herramientas para comunicar la calidad del agua a una audiencia no especializada (Puente, Valenzuela & Alarcón, 2023).

El ICA es un sistema estimativo que permite hacer comparaciones de niveles de contaminación en diferentes áreas y se define como el grado de contaminación existente en el agua a la fecha de un muestreo, expresado como un porcentaje de agua pura. El agua altamente contaminada tendrá un ICA cercano o igual a 0% y de 100% para el agua en excelentes condiciones (SEMARNAT 2011). La calidad del agua de un sitio que va a ser destinado a diferentes usos se mide a través de este índice, el cual es el resultado de la conjunción matemática de los parámetros físicos, químicos y biológicos. El valor final del mismo facilita su comunicación y comprensión a las comunidades (CONAGUA 2000).

La organización Mundial de la Salud (OMS 2022) estima que 829 000 personas mueren cada año por enfermedades relacionadas con la insalubridad del agua o una mala higiene. Por ello, es de alta importancia determinar la calidad microbiológica del agua en las fuentes de abastecimiento y dar a conocer los riesgos a la salud en las comunidades a través de los ICA (Puente, Valenzuela, Alarcón 2023). Esto es relevante, ya que permite a los integrantes de estas comunidades entender de manera rápida la calidad del agua que consumen de acuerdo al uso que le dan, identificar zonas de riesgo, y resaltar la importancia de mantener la calidad dentro de los límites permisibles e identificar las acciones requeridas para ello.

De acuerdo a Chidiac, El Najjar & Ouaini (2023), los ICA se basan en factores físicos, químicos y biológicos que se combinan en un solo valor que varía de 0 a 100 e involucra 4 procesos: (1) selección de parámetros, (2) transformación de los datos sin procesar a una escala común, (3) ponderacióny (4) agregación de valores de subíndice. Existen diferentes metodologías de cálculo

para los ICA, las cuales pueden clasificarse de acuerdo con distintos criterios (Puente *et al.*, 2023); como se muestra en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Clasificación de los índices de calidad del agua (ICA) por su metodología de cálculo. Fuente: elaboración propia con datos tomados de Puente, Valenzuela, Alarcón (2023) y Castro, Almeida, Ferrer, Díaz (2014).

Tipo de Estructura	Índice de Calidad del Agua (ICA)	Método de Agregación	Número de Variables
Fórmulas	Horton	Promedio geométrico ponderado	10
	León	Promedio geométrico ponderado	Depende de la muestra a caracterizar
	Canadian Council of Ministers of the Environment	Suma cuadrada armónica	Hasta 47
Diagramas	National Sanitation Foundation	Promedio geométrico ponderado	9
Ecuaciones	Dinnius	Promedio geométrico ponderado	12
	Oregon	Media cuadrada armónica no ponderada	8
	Universal	Ecuaciones Lineales	23

A continuación, se describen los ICA presentados en el *Cuadro 5*, así como sus métodos de cálculo y rasgos característicos:

3.4.1 Índice de Horton

Horton propone el uso del ICA para estimar patrones o condiciones de contaminación acuática y es pionero en la implementación de una metodología para su cálculo, en la que utilizó 10 variables, incluyendo las comúnmente monitoreadas como oxígeno disuelto, pH, coliformes, conductancia específica, alcalinidad, contenido de cloruro y temperatura (Castro, Almeida, Ferrer, Díaz 2014). El método para su cálculo es el del promedio geométrico ponderado.

3.4.2 Índice de León

Fue de los primeros índices desarrollados en México para interpretar la calidad de los diferentes cuerpos de agua. La fórmula de cálculo desarrollada por León es la siguiente:

$$ICA = \prod_{i=1}^{n} Qi^{wi}$$

Donde:

n = es el número de parámetros elegidos,

wi = son los pesos específicos asignados a cada parámetro (i) y ponderados entre 0 y 1 de tal forma que se cumpla que la sumatoria sea igual a uno

Qi = representa la calidad del parámetro (i), en función de su concentración y cuya calificación oscila entre 0 y 100

El ICA de León se lleva a una escala adimensional de 0 a 100, siendo 0 la calidad más baja y 100 la más alta, dividiéndose en 6 rangos (Cuadro 6). Dicha escala fue establecida de acuerdo con un análisis de expertos en cada tipo de contaminante lo cual implica la consideración de estudios toxicológicos para definir los pesos ponderados para cada parámetro en el índice (Puente, Valenzuela, Alarcón 2023).

Cuadro 6. Rangos del ICA de León para uso potable y agrícola. Fuente: Miranda, Valenzuela, Alarcón 2023.

Uso			
Fuente de agua potable		Agricultura	
90-100 E	No requiere tratamiento para consumo humano (Desinfección)	90-100 E	No requiere tratamiento para riego
80-90 A	Tratamiento primario y desinfección	70-90 A	Purificación menor para cultivos que requieran alta calidad de agua
70-80 LC	Tratamiento secundario y desinfección	50-70 LC	Utilizable en la mayoría de cultivos (algodón, soya, trigo)
50-70 C	Tratamiento terciario y desinfección	30-50 C	Tratamiento requerido para la mayoría de los cultivos
40-50 FC	Dudoso incluso con tratamiento	20-30 FC	Uso sólo en cultivos muy resistentes
0-40 EC	Inaceptable para consumo	0-20 EC	Inaceptable para riego

3.4.3 Índice de Universal (UWQI)

El UWQI refleja la idoneidad del agua para uso específico. Se basa en las normas nacionales de un país en particular (España) y su aplicación está limitada en el interior del mismo. Tiene en cuenta un total de 12 parámetros: coliformes totales, cadmio, cianuro, mercurio, selenio, arsénico, fluoruros, nitratos, oxígeno disuelto, pH, DBO y fósforo total (Castro, Almeida, Ferrer, Díaz 2014).

3.4.4 Índice Canadiense de Calidad de Agua (CCMEQWI)

Considera como criterio el número de veces que se exceden los límites máximos permisibles establecidos por normas para un determinado uso. La fórmula para su cálculo es la siguiente:

$$\text{CCMEQWI} = 100 - \left(\frac{\sqrt{F1^2+F2^2+F3^2}}{1.732}\right)$$

En donde:

F1: (Alcance) es el porcentaje de parámetros que excedan la norma

F2: (Frecuencia) es el porcentaje de pruebas individuales de cada parámetro que excede la norma

F3: (Amplitud) representa la magnitud en la que excede la norma cada parámetro que no cumple.

De acuerdo con el CCMEQWI (2017), es necesario utilizar al menos 4 fechas de muestreo dentro de un mismo periodo para su cálculo y de acuerdo con el valor obtenido se categoriza el agua de la muestra (Puente, Valenzuela, Alarcón 2023), como se puede observar en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Descripción general de las categorías del índice CCME. Fuente: Puente, Valenzuela, Alarcón 2023.

Categoría	Valor	Descripción
Excelente	95-100	La calidad del agua tiene condiciones muy cercanas a niveles naturales o deseables.
Buena	80-94	La calidad del agua se encuentra con un grado menor de deterioro, las condiciones rara vez se apartan de los niveles naturales o deseables.
Aceptable	65-79	La calidad del agua en ocasiones se ve amenazada o deteriorada; las condiciones a veces se apartan de los niveles naturales o deseables.
Marginal	45-64	La calidad del agua se ve frecuentemente amenazada o deteriorada; las condiciones a menudo se apartan de los niveles naturales o deseables.
Pobre	0-44	La calidad del agua casi siempre se ve amenazada o deteriorada; las condiciones generalmente se apartan de los niveles naturales o deseables.

3.4.5 Índice NSF (National Sanitisation Foundation)

Basado en el trabajo de Horton, la Fundación Nacional de Saneamiento (NSF) creó una variable del ICA algunos años más tarde. La clasificación detalló las características necesarias que debe cumplir la fuente de captación para su destino al consumo humano (Castro, Almeida, Ferrer, Díaz 2014). Su metodología de cálculo es la del promedio geométrico ponderado, pero a diferencia de Horton, solo se consideraron 9 variables, a las cuales se les asignaron distintos pesos a través de un análisis estadístico realizado con ayuda de un grupo de 142 expertos en gestión de calidad de agua, cuyos resultados se muestran en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Analitos y pesos del ICA NSF. Fuente: Castro, Almeida, Ferrer, Díaz 2014

Analito	Peso ICA
Oxígeno Disuelto	0.17
Coliformes Fecales	0.15
pH	0.12
DBO_5	0.10
Nitratos	0.10
Fósforos Totales	0.10
Diferencia de Temperatura de Equilibrio (°C)	0.10
Turbiedad	0.8
Solidos Totales	0.8

El NSF estableció 5 rangos distintos para categorizar la calidad del agua (Cuadro 9), de acuerdo al valor obtenido al calcular el ICA de una muestra, los cuales son:

Cuadro 9. Rangos de valor del Índice de Calidad NSF. Fuente: Castro, Almeida, Ferrer, Díaz 2014.

Palabra descriptora	Rango numérico
Muy mala	0-25
Mala	26-50
Media	51-70
Buena	71-90
Excelente	91-100

3.4.6 Índice de Dinnius (DWQI)

Dinnius hizo un intento por diseñar un sistema de contabilidad social rudimentaria que midiera los costos e impacto de los esfuerzos de control de la contaminación y se aplica ese índice a título ilustrativo a los datos de varios arroyos en Alabama, EE.UU. Este indicador, a diferencia del ICA NSF, cuya clasificación está orientada a aguas destinadas a ser empleadas como fuente de captación para consumo humano, considera 5 usos del recurso: consumo humano, agricultura, pesca y vida acuática, industrial y recreación. Dinnius examinó la calidad del agua descrita por diversas autoridades y diferentes niveles de variables contaminantes, y a partir de esta información genera 11 ecuaciones subíndice (Castro, Almeida, Ferrer, Díaz 2014). La metodología de cálculo correspondiente al DWQI es la del promedio geométrico ponderado al igual que el de Horton y el NSF, sin embargo, a diferencia de estos, Dinnius considera 12 variables en la ecuación.

3.4.7 Índice de Oregon (OWQI)

Fue introducido en 1970, considera 8 variables y se calcula por el método de la media cuadrada aritmética no ponderada. Las variables de calidad de agua incluidas en este índice son: temperatura, oxígeno disuelto (porcentaje de saturación y concentración), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), pH, solidos totales, amonio y nitratos, fosforo total y coliformes fecales. El OWQI mejora la comprensión y comunicación de cuestiones generales de calidad de agua e ilustra la necesidad y la eficacia de prácticas de protección (Castro, Almeida, Ferrer, Díaz 2014).

3.5 Sustancias o elementos derivados del beneficio húmedo

Puerta (2010 y 2012) menciona que durante la fermentación natural del café ocurren diferentes procesos bioquímicos, en los cuales las enzimas producidas por las levaduras y bacterias fermentan y degradan azúcares, lípidos, proteínas y ácidos, y los convierten en otras sustancias con características y composición diferentes. En este proceso, de manera más específica, se genera energía Adenosín Trifosfato (ATP), etanol, ácido láctico, ácido acético, dióxido de carbono, propanol, butanol, ácido succínico, fórmico, butírico y substancias olorosas como aldehídos, cetonas, ésteres (Puerta, 2012). De acuerdo a González y Martínez (2022) estos residuos líquidos contaminantes afectan principalmente los valores de acidez (pH ácido), sólidos sedimentables (SS) y Demanda Química de oxígeno (DQO).

En México se ha estimado que el beneficiado húmedo del café genera volúmenes de agua residual menores, de 100 hasta 800 litros de agua por quintal de café cereza procesado (Torres, 2018). El uso ineficiente del agua en la mayoría de los beneficios húmedos desvía grandes volúmenes de agua de los arroyos y luego devuelve las aguas residuales, generalmente sin tratar, a los arroyos, ríos y lagos (SCAA, s.f.). Torres (2018) encontró en los efluentes un alto contenido de materia orgánica en términos de DQO (demanda química de oxígeno) de 50,000 mg/L y de DBO (demanda bioquímica de oxígeno) de 20,000 mg/L, un pH ácido inferior a 4.4, presentaron un color superior a 2,000 unidades de Pt-Co, además de la presencia de compuestos fenólicos, taninos y alcaloides (cafeína). Por su parte, Dadi *et al*. (2018), reportó que en Etiopía el contenido orgánico de los efluentes medidos en los puntos de descarga a once ríos fue considerablemente alto, con valores máximos de 7200 mg L^{-1} y 871 mg L^{-1} para DQO y DBO_5, respectivamente.

Adicionalmente, en un estudio en siete departamentos cafetaleros de Colombia, Puerta (2015) mostró que el 73% de las muestras de agua se encontraron coliformes fecales, en el 40% encontraron apariencia u olor inaceptables y, de éstas, el 26% tuvieron niveles superiores a los aceptables de fosfato. Dadi *et al*. (218) mencionan que el alto contenido orgánico en los efluentes agotó el contenido de oxígeno a un nivel de 0.25 mg L^{-1} y la carga orgánica y la presencia de nutrientes representan un riesgo alto de eutrofización. Derivado de los cambios en los parámetros de calidad del agua provocado por los efluentes del beneficio húmedo tradicional del café, los cuerpos de agua y los ecosistemas ubicados aguas abajo de las plantas de procesamiento corren un riesgo alto de daño ambiental y para la salud de la población (Puerta, 2015; Dadi *et al*., 2018; Torres, 2018).

4. MATERIALES Y MÉTODOS.

4.1. Zona de estudio.

Las cooperativas Comon Yaj Noptic (CYN) y Finca Triunfo Verde (FTV) se ubican en la vertiente interior de la Sierra Madre de Chiapas, y son reconocidas por su trabajo en favor de la producción de café de calidad bajo sombra, orgánico y trabajan para mejorar la calidad de vida de las y los pequeños productores, a través de prácticas productivas que procuran conservar la biodiversidad y los servicios ambientales que los cafetales proveen. Estas cooperativas agrupan a un total de aproximadamente 600 socias y socios, en los municipios de Ángel Albino Corzo, Capitán Luis A. Vidal, La Concordia, Chicomuselo, Montecristo de Guerrero y Siltepec. De acuerdo a la información proporcionada por los directivos de ambas cooperativas, su producción de café cereza por ciclo de cultivo es de 1,050,000 kg para CYN y 3,450,000 kg para FTV, y se utiliza, en promedio, 40 L de agua para el beneficio de 1 kg de café pergamino.

La Sierra Madre de Chiapas constituye una ecorregión que fue designada como "Corredor Biológico Sierra Madre del Sur, Chiapas" por parte del gobierno federal, y que es importante en la producción de café arábica, donde el manejo "tradicional en agrobosques de café con complejos doseles de sombra" suministra importantes servicios ambientales (Libert y Paz, 2018). Muchas de las parcelas cafetaleras se encuentran en la zona de amortiguamiento de la Reserva de la Biosfera El Triunfo, como se muestra en la Figura 3, por lo que su conservación tiene alta importancia desde el punto de vista ambiental.

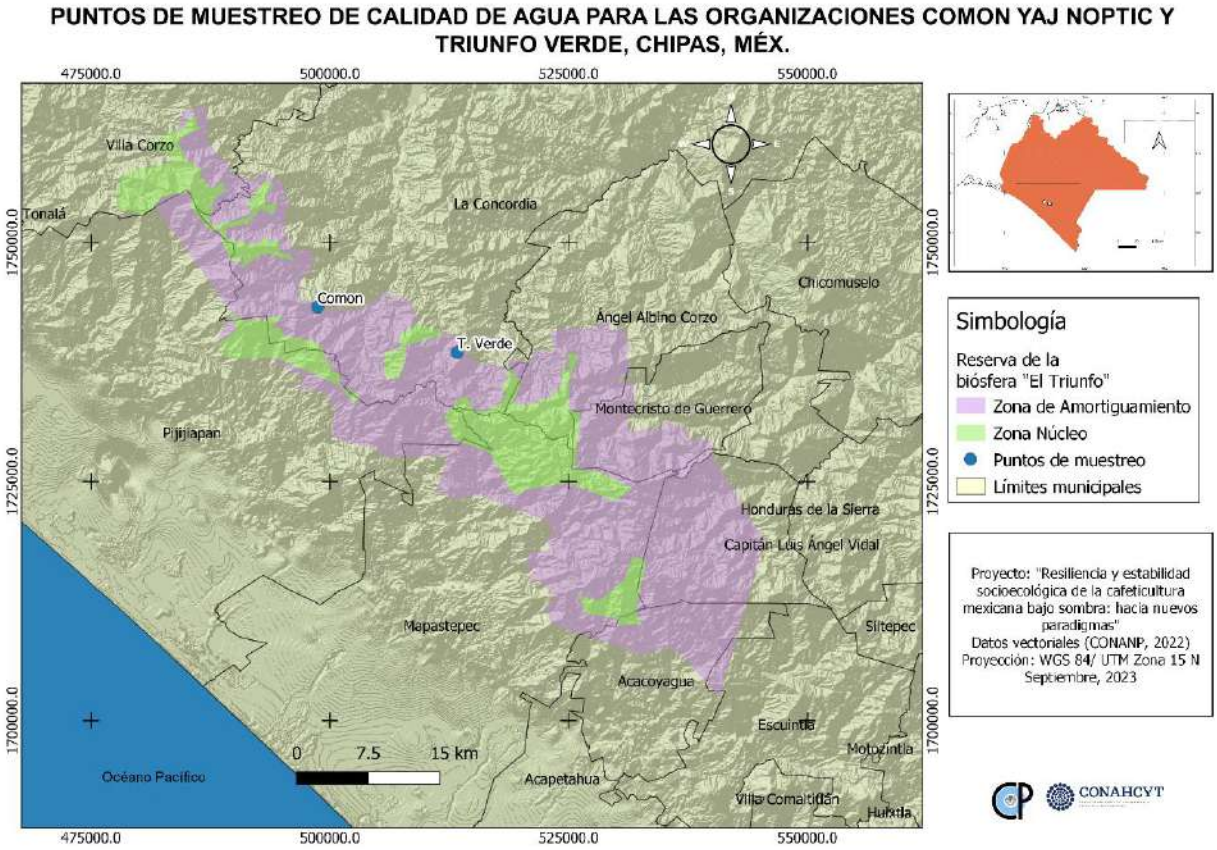


Figura 3. Ubicación general de la zona de estudio y de los puntos de muestreo. Fuente: proyecto "Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafeticultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas".

En la Figura 4 se muestra un ejemplo del sistema de producción de café bajo sombra en la Sierra Madre de Chiapas, en la que se aprecia la biodiversidad y la estructura de la vegetación, compuesta por diversos estratos, desde los más altos que corresponden a la vegetación arbórea (sombra), el intermedio que se compone de arbustos, principalmente de café, y el herbáceo.



Figura 4. Sistema agroforestal de café.

4.2. Toma de muestras de agua

Durante los días 8 y 9 de marzo del 2023 se tomaron muestras de agua en cinco beneficios de café húmedo ubicados en el municipio de La Concordia Chiapas, cuatro de los cuales pertenecen a las cooperativas Comon Yaj Noptic y Finca Triunfo Verde. Los sitios y procesos para tomar las muestras se seleccionaron en función del conocimiento de carga de contaminantes en muestras de agua derivada de los diferentes subprocesos reportados en trabajos previos, y se nombraron como se indica a continuación:

- Vertiente: muestra de agua tomada directamente en la fuente de abastecimiento para los procesos de despulpado y lavado. Presumiblemente es agua limpia.
- Cerezo: muestra de agua proveniente del despulpado.
- Lavado: muestra de agua proveniente del primer lavado del café, que contiene mayor carga de sedimentos respecto a los siguientes lavados.
- Fosas: muestra de agua tomada en las fosas de descarga de aguas residuales, depósito que recibe el agua derivada de los procesos de despulpado y los diferentes lavados.

El método de colecta de agua (Figura 5), tanto en la vertiente, tanque de lavado y fosa, correspondiente a cada muestreo fue el siguiente:

- Se usaron guantes estériles para manipular los frascos que contendría las muestras, los cuales se introdujeron en su totalidad en el agua con la tapa abierta para rellanarlos con las muestras respectivas.
- Al estar llenos los frascos, fueron sellados manteniéndolos inmersos en el medio.
- Posteriormente se rotularon con el nombre de la parcela de donde proviene el café procesado y el tipo de muestra.
- Además, se registraron sus datos de ubicación (coordenadas geográficas) y nombre del propietario de las parcelas.
- Las muestras de agua fueron congeladas y aisladas térmicamente para su trasporte al laboratorio.

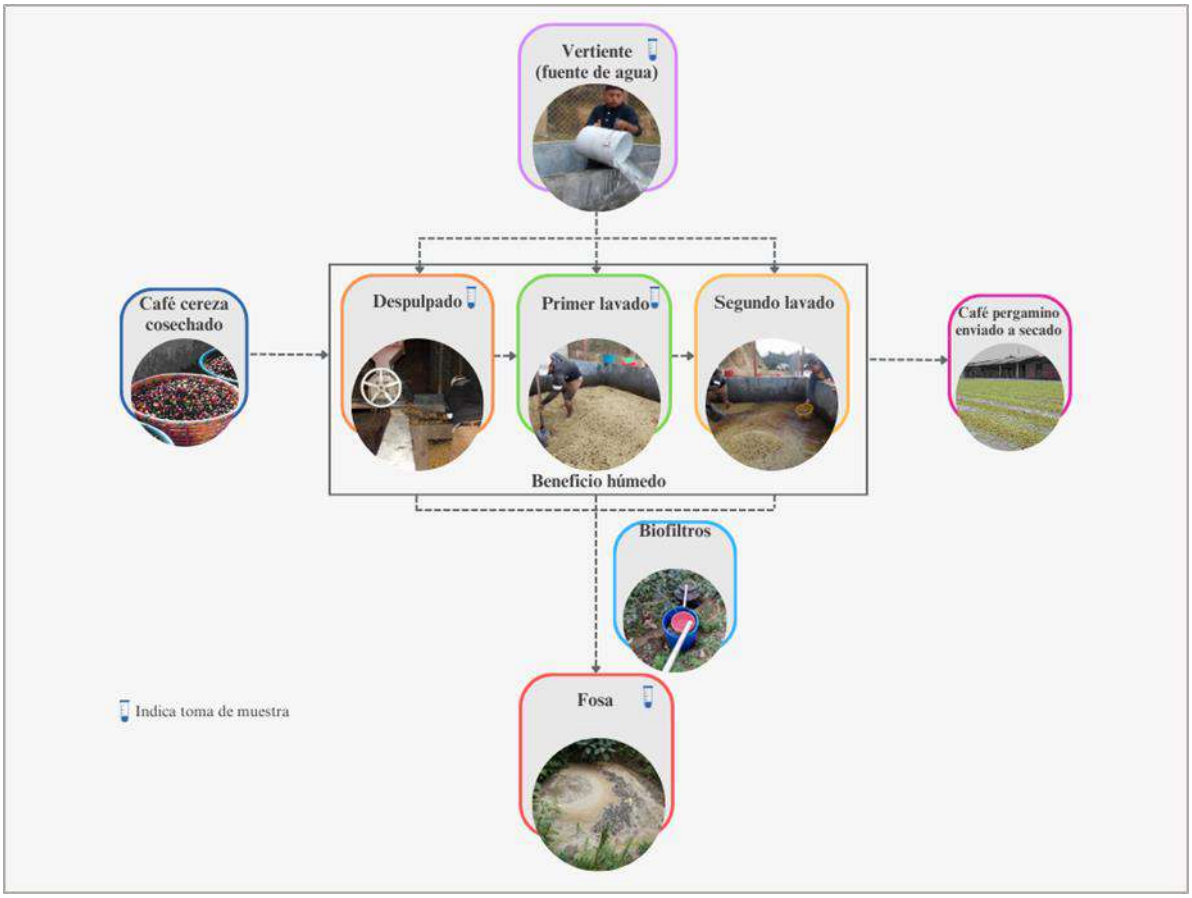


Figura 5. Proceso de colecta de muestras de agua. Fuente: proyecto "Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafeticultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas".

El tipo de vegetación circundante a los sitios de muestreo (beneficio húmedo) correspondió a bosque mesófilo de montaña; sin embargo, este presentó diferentes niveles de degradación. En cambio, en lo que corresponde a los sitios de muestreo en las fuentes de abastecimiento de agua (posas, vertientes y cascadas), el bosque mesófilo se encontró más conservado (niveles de perturbación bajos). Las fuentes se encontraron rodeadas de mangueras, mallas mosquiteras, botellas de plástico y alambres. También fue evidente la presencia de macroinvertebrados, insectos, anfibios y aves. Asimismo, los pequeños cuerpos de agua se encontraron colmados de sedimentos, hojarasca, piedras y arenas.

El entorno del sitio en el cual se tomaron las muestras del primer lavado de liga estaba rodeado por plantaciones de café, pero también se observaron mangueras usadas, restos de basura, botellas de pet, latas de aluminio, bolsas negras, trozos de costales y alambres, elementos que

pueden ser fuente de contaminación. Todos los tanques de lavado de liga estaban construidos con concreto.

En cuanto a las fosas, estas se encontraron en los extremos de los cafetales, tenían una profundidad de 3 metros, y se encontraron rodeados de herbáceas, restos de basura como botellas de pet, cartón, pañales y latas de aluminio. Así mismo, se notó la presencia de perros, aves, insectos, y restos de pulpa ácida de café con diferentes grados fermentación.

La recolección de los granos maduros de café en los sistemas agroforestales para su procesamiento es el primer paso del mismo, para posteriormente trasladarlos al lugar donde se realiza el beneficio.

Para el despulpado de café cereza se utiliza una máquina despulpadora de motor eléctrico a la cual se le agrega agua para facilitar la separación del grano, como se muestra en las Figuras 6 y 7.



Figura 6. Despulpado mecánico de los granos recolectados en el sistema agroforestal y colecta de pulpa y cascarilla para su disposición final.



Figura 7. Proceso de despulpado mecánico de café, en el que separa el grano de la pulpa y cascarilla.

La pulpa sobrante es almacenada en un depósito al terminar la primera etapa de separación (despulpado), usualmente al aire libre (Figura 8), sin un tratamiento adecuado o aprovechamiento, como abono de los propios cafetales, por ejemplo.



Figura 8. Depósito de pulpa de café derivada del beneficio húmedo.

Por otra parte, los granos de café se envían en otra dirección, hacia tanques con agua limpia (Figura 9), mediante el cual los microorganismos realizan un proceso de fermentación del mucilago, para que esta sustancia pegajosa pueda ser retirada posteriormente mediante lavados (Figura 10).



Figura 9. Café despulpado iniciando el proceso de fermentación para posteriormente ser lavado.



Figura 10. Proceso de lavado.

Regularmente se realizan 3 lavados. Una vez realizado el despulpado y los diferentes lavados del café pergamino, el agua se direcciona a las fosas de depósito para aguas residuales a través de una tubería de PVC (Figuras 11 y 12).



Figura 11. Tubería para desagüe de las piletas de lavado.



Figura 12. Fosas de descarga de aguas residuales del beneficiado de café

Dentro de las fosas de aguas residuales, el agua es contenida y filtrada de manera natural hacia el subsuelo. Una vez que las fosas están llenas a toda su capacidad, el agua se desborda y sigue un curso natural extendiéndose en el sentido de la pendiente.

En el Cuadro 10 se reportan las muestras tomadas en la cooperativa Comon Yaj Noptic y en la Figura 13 se puede observar la ubicación del beneficio húmedo de café y los sitios de toma de muestras de agua.

Cuadro 10. Información de los sitios donde se tomaron las muestras de agua en la cooperativa Comon Yaj Noptic. Fuente: Elaboración propia.

No. De muestra	Productor	Tipo de muestra	Localidad	Fecha	Latitud	Longitud	Elevación (m)
13	David	vertiente	Emiliano Zapata	8/3/2023	15.767444	-93.012215	1464
14	David	cerezo	Emiliano Zapata	8/3/2023	15.767572	-93.012319	1464
15	David	lavado	Emiliano Zapata	8/3/2023	15.767560	-93.012467	1464
16	David	fosas	Emiliano Zapata	8/3/2023	15.768165	-93.011744	1451

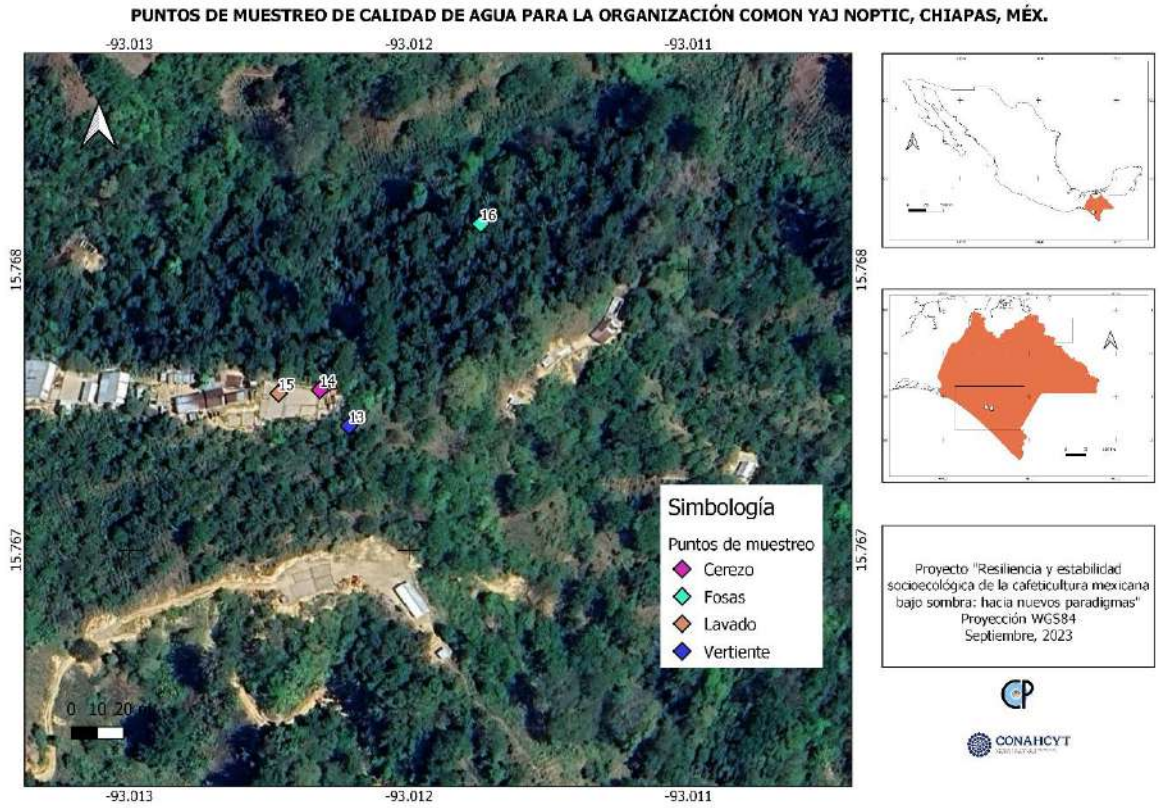


Figura 13. Ubicación geográfica del beneficio de café y sitios de muestreo en la cooperativa Comon Yaj Noptic. Fuente: proyecto "Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafeticultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas".

En el Cuadro 11 se reportan las muestras tomadas en la cooperativa Finca Triunfo Verde y en la Figura 14 se puede observar la ubicación del beneficio húmedo de café y los sitios de toma de muestras de agua.

Cuadro 11. Información de los sitios donde se tomaron las muestras de agua en la cooperativa Finca Triunfo Verde. Fuente: Elaboración propia.

No. De muestra	Productor	Tipo de muestra	Localidad	Fecha	Latitud	Longitud	Elevación (m)
1	Venancio	vertiente	Monterrey	9/3/2023	15.725123	-92.87571	1600
3	Venancio	lavado	Monterrey	9/3/2023	15.728042	-92.878786	1600
4	Venancio	fosas	Monterrey	9/3/2023	15.727965	-92.87876	1600
5	Morales	vertiente	Monterrey	9/3/2023	15.718936	-92.86856	1300
6	Morales	lavado	Monterrey	9/3/2023	15.720836	-92.865105	1300
17	Guillermo	vertiente	Monterrey	9/3/2023	15.721261	-92.880413	1600
9	Guillermo	lavado	Monterrey	9/3/2023	15.722994	-92.881383	1600
10	Guillermo	fosas	Monterrey	9/3/2023	15.723064	-92.881516	1600
11	Aladino	vertiente	Monterrey	9/3/2023	15.731368	-92.872099	1630
12	Aladino	lavado	Monterrey	9/3/2023	15.732824	-92.875034	1630

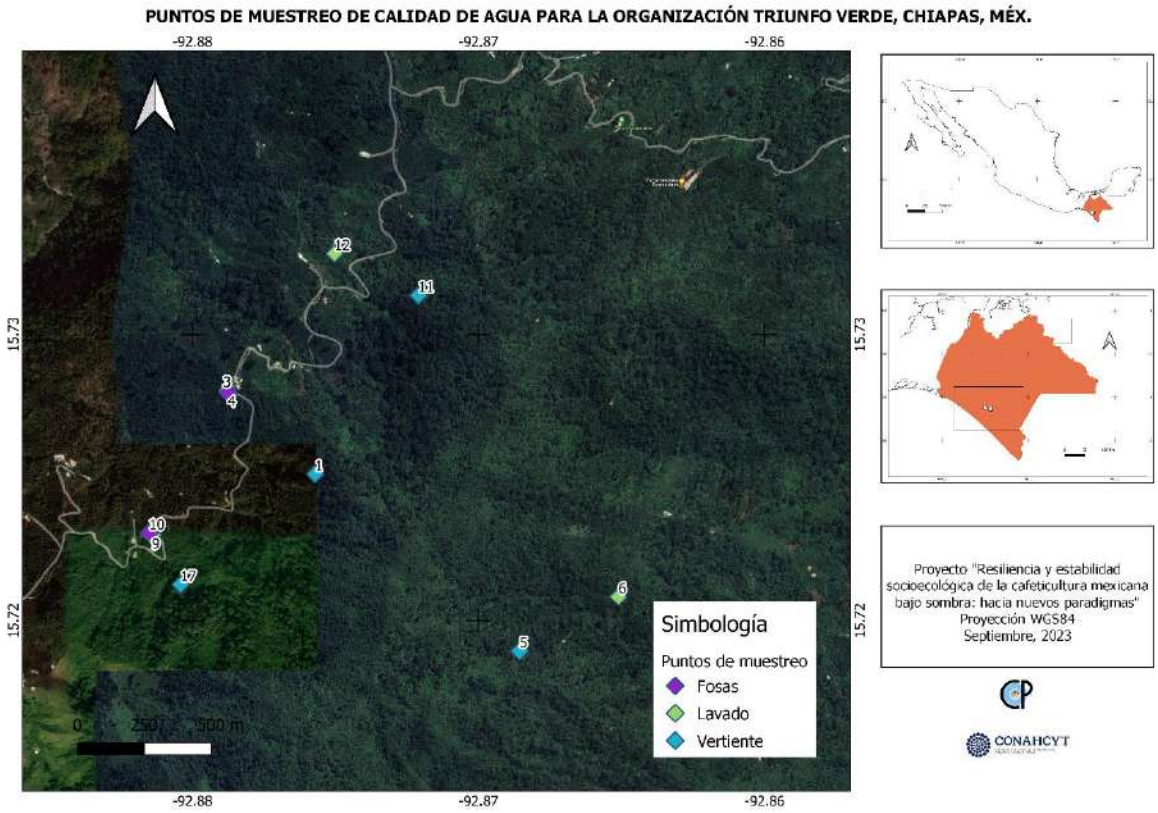


Figura 14. Ubicación geográfica de los beneficios de café y sitios de muestreo en la cooperativa Finca Triunfo Verde. Fuente: proyecto "Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafeticultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas".

4.3 Indicadores de calidad del agua

4.3.1 Parámetros físico-químicos

Las muestras de agua se procesaron mediante técnicas de laboratorio para determinar: Oxígeno disuelto (OD % Saturación), pH, Temperatura del agua (°C), Conductividad (ms cm^{-1}), Nitratos (NO3 mg L^{-1}), color (unidades de Pt-Co) empleando un espectrofotómetro HACH® DLR3900, Coliformes totales y Coliformes fecales (NMP/100 ml) por las técnicas de APHA (2005), Dureza ($CaCO_3$ mg L^{-1}) por titulación, Alcalinidad ($CaCO_3$ mg L^{-1}), Cloruros (Cl mg L^{-1}), y Demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5 mg L^{-1}) (Cuadro 14).

La DBO_5 mediante el método Winkler, con modificación de la azida de sodio (NaN_3) (APHA, AWWA y WEF, 2005). El agua analizada fue tratada con una solución de sulfato manganoso ($MnSO_4H_2O$), solución de álcali-yoduro-azida, y acidificada con ácido sulfúrico (H_2SO_4), y se tituló con una solución de tiosulfato de sodio ($Na_2S_2O_35H_2O$) 0.0281 N. El proceso se describe en la Figura 15:

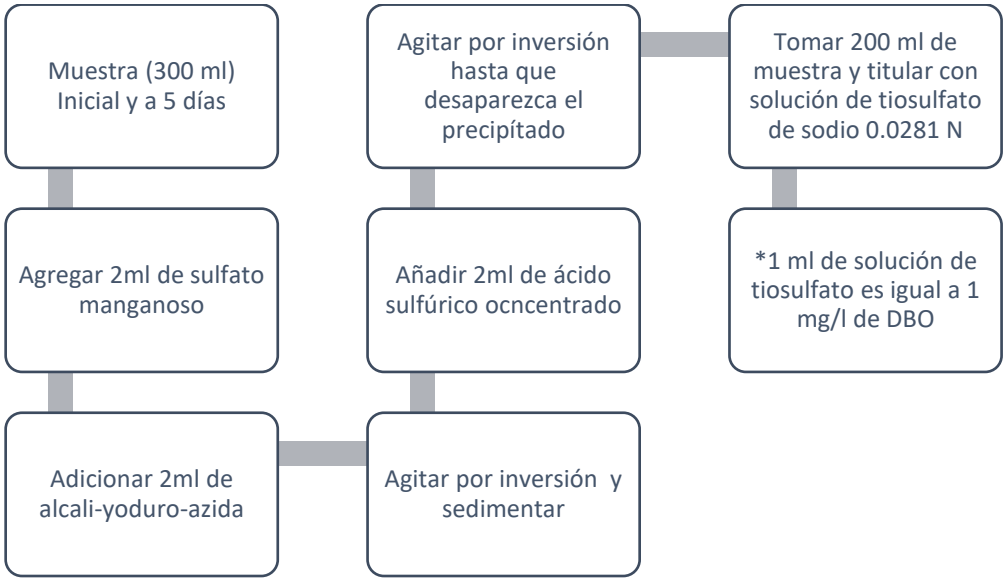


Figura 15. Procedimiento para determinar la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5). Fuente: proyecto "Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafeticultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas".

En este caso también se consideraron algunas variables físicas del lugar de muestreo, como son: Altitud (msnm), Velocidad del viento (km h^{-1}) y Temperatura (° C).

4.3.2 Índice global de calidad del agua

Como se observa en el Cuadro 5, el ICA es calculado por el método del promedio geométrico ponderado que considera un mayor número de variables fijas es el de Dinnius (1987). Es decir, es un método simple de calcular y que considera la mayor cantidad de parámetros, así como calidades de agua para cinco usos potenciales de las mismas, por lo que se decidió utilizarlo para caracterizar numéricamente las aguas mieles provenientes de la Sierra Madre de Chiapas en el estudio de investigación presente.

El ICA propuesto por Dinius (1987) se basa en cuatro pasos (Chidiac y Najjar, 2023):

1) Selección de parámetros.
2) Transformación o normalización de parámetros de diferentes unidades a una escala común (obtención de subíndices de calidad).
3) Ponderación de los parámetros seleccionados.
4) Agregación de valores de subíndices para obtener el ICA final

Utiliza un índice multiplicativo para reunir los contaminantes en un solo sistema (Ec. 1). Además, integra 12 variables contaminantes: Oxígeno Disuelto (OD), Demanda Biológica de Oxígeno a 5 días (DBO_5), Coliformes totales (Col. T.), Coliformes fecales (Col. F.), pH, Alcalinidad, Dureza, Cloruros (Cl^-), Conductividad específica, Temperatura, Turbidez y Nitratos (NO_3).

$$\boldsymbol{DWQI} = \sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{n}} \boldsymbol{I_i}^{\boldsymbol{W_i}} \qquad (1)$$

dónde, $DWQI$ es el índice de la calidad del agua de Dinius, I_i es la función del subíndice del parámetro contaminante, W_i es el peso específico del parámetro contaminante cuyo valor oscila entre 0-1 y n es el número de parámetros de contaminantes. Los elementos utilizados para calcular el ICA de Dinius se muestran en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Parámetros utilizados para el cálculo del índice de calidad de agua. Fuente: Dinius (1987).

Número	Parámetro	Unidades	Peso específico (Wi)
1	OD	% Sat	10.9
2	Coliformes fecales	NMP/100 mL	11.6
3	pH	Unidades de pH	7.7
4	DBO_5	mg/l	9.7
5	Nitratos	mg/l	9
6	Temperatura	°C	7.7
7	Dureza	$CaCO_3$ mg/l	6.5
8	Conductividad	ms/cm	7.9
9	Color	Unidades de Pt-Co	6.3
10	Cloruros	mg/l	7.4
11	Coliformes totales	NMP/100 mL	9
12	Alcalinidad	mg/l	6.3

Este ICA tiene una escala de categoría decreciente de 100 a 0, donde 0 se asigna a muy mala calidad mientras que 100 desafía la calidad excelente del agua (Rana y Ganguly, 2020). Además, se clasifican de acuerdo con cinco usos del agua: Uso humano, Agricultura, Pesca, Industria y Recreación (León, 1991). Para la interpretación de resultados, se definen como criterio general de evaluación de la calidad seis rangos (Dinius, 1987): Excelente (90-100), Aceptable (80-90), Levemente contaminada (70-80), Contaminada (50-70), Fuertemente contaminada (40-50) y Excesivamente contaminada (0-40).

Torres *et al*. (2009) define en función de los rangos de clasificación las limitaciones para consumo humano (Cuadro 13).

Cuadro 13. Clasificación del índice de calidad de agua. Fuente: Dinius (1987)

Código	**Rango**	**Clasificación**
1	0-40	Inaceptable su consumo
2	40-50	Dudoso para consumo
3	50-70	Tratamiento de potabilización necesario
4	70-80	Dudoso consumo sin tratamiento
5	80-90	Tratamiento menor requerido
6	90-100	No requiere tratamiento para su consumo

Este índice se ha utilizado como referencia en la construcción de índices adicionales de calidad de agua, ya que toma en cuenta aspectos sociales y económicos; por ello este índice es considerado como el primer índice rudimentario de contabilidad social.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 14 se observan los resultados obtenidos para los parámetros analizados.

Cuadro 14. Valores de los parámetros de calidad del agua, utilizados en el cálculo del ICA. Fuente: Elaboración propia.

Muestra	OD %	DBO_5 mg/l	NO3 mg/l	Dureza mg/l	Color UNT	Col. T NMP	Col. F NMP	Alc. mg/l	Cl- mg/l	Conduc. ms/cm	T. Agua °C	T. Aire °C	Δ T °C	pH	Altitud msnm
1 V	6.25	2.50	0.30	0.67	28.00	<2	<2	75.50	54.98	35	18.00	26.73	8.73	6.8	1600
3 L	3.25	250.00	29.25	7.90	162.00	<2	<2	76.50	1244.61	445	19.00	27.31	8.31	4.5	1600
4 F	2.00	250.00	17.80	0.12	124.00	<2	<2	96.00	1244.61	655	19.50	28.97	9.47	4.6	1600
5 V	7.00	3.37	0.30	0.18	2.00	43	23	93.50	27.49	60	18.50	30.93	12.43	6.7	1300
6 L	2.75	250.00	16.90	5.70	31.00	<2	<2	41.00	1244.61	515	19.50	31.35	11.85	4.3	1300
17 V	7.00	3.71	0.20	0.21	5.50	15	<2	121.50	22.49	65	18.00	31.14	13.14	9.2	1600
9 L	2.00	100.00	26.70	6.20	132.00	<2	<2	352.00	1244.61	720	19.50	30.15	10.65	4.5	1600
10 F	1.25	250.00	20.65	0.13	244.00	<2	<2	181.00	1244.61	840	20.00	30.15	10.15	4.8	1600
11 V	7.75	4.84	0.25	0.21	9.00	21	23	223.00	19.99	70	18.00	26.60	8.60	7.0	1630
12 L	1.25	250.00	95.70	0.30	1274.00	<2	<2	134.50	1244.61	2575	18.50	25.90	7.40	4.6	1630
13 V	7.75	3.00	0.30	0.50	7.00	<2	<2	80.00	24.99	50	19.00	22.46	3.46	7.0	1464
14 C	1.75	250.00	53.30	0.18	258.00	<2	<2	50.00	1244.61	1030	19.50	21.99	2.49	4.5	1464
15 L	0.85	250.00	96.55	0.21	430.00	<2	<2	72.50	1244.61	1400	20.00	20.94	0.94	4.5	1464
16 F	0.25	250.00	58.65	0.18	1576.00	<2	<2	56.00	1244.61	1090	20.50	25.75	5.25	4.4	1451

De acuerdo con los datos observados en el Cuadro 14, el valor promedio de oxígeno disuelto en las muestras correspondientes a la vertiente (fuente) fue de 7.15 mg/L, que está por arriba del límite mínimo de concentración permitido de acuerdo a los criterios ecológicos de calidad del agua (CE-CCA, 1989) de 5 mg/L, establecido para la protección de la vida acuática en agua dulce y marina. Por su parte López (2013), al realizarle pruebas al agua de la fuente previo al procesamiento del grano de café, obtuvo un valor de 7.80 mg/L, lo que es muy cercano al promedio de las 5 muestras correspondientes a la fuente del presente estudio (1, 5, 17, 11 y 13). En ese mismo estudio, se obtuvieron valores de oxígeno disuelto al realizar pruebas al agua residual proveniente del lavado y despulpado de 2.20 mg/L y 1.20 mg/L, respectivamente; mientras que en el presente estudio el porcentaje promedio de OD para el agua residual del lavado fue de 2.02 mg/L y para la del despulpado fue de 1.75 mg/L; los cuales también son valores muy similares a los reportados por López en el 2013. Por otro lado, Jaulis, Juscamata, Villanueva, Gutiérrez, Dilas (2022) encontraron valores de 1.3, 2.8 y 2.0 mg/L de OD para la suma de las aguas residuales del procesamiento de café en 3 diferentes miniplantas de tratamiento (fosa), que a través de pruebas caracterizaron dichas aguas mieles. Si se comparan estos valores con los del presente estudio, vemos que son ligeramente menores, con un promedio de 1.16 mg/L.

En cuanto a la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) y sus valores reportados en el Cuadro 14, se observa que todos superan los 100 mg/L, exceptuando las muestras pertenecientes a la vertiente. Esto se debe probablemente a la presencia de microorganismos en las aguas mieles, los cuales requieren de una mayor cantidad de oxígeno para degradar la materia orgánica contenida en las muestras de agua provenientes del lavado, despulpado y fosa, lo que incrementa el valor de este parámetro, como lo explica Jiménez *et al*. (2012). Por su parte, López *et al*. (2013) obtuvieron un promedio de 4.4 mg/L al realizar pruebas en el agua de la fuente (vertiente), de 1,235 mg/L en el agua residual proveniente del lavado y de 1,651 mg/L en el agua residual proveniente del despulpado. Si se comparan estos valores con los obtenidos en el presente estudio (mostrados en el Cuadro 15), se observa una similitud en que, en la entrada (vertiente), la DBO_5 es baja. Sin embargo, después del procesamiento en cualquiera de los 3 muestreos restantes, se incrementa considerablemente. Aunque existe una notoria diferencia entre los valores de ambos

estudios, la tendencia es la misma: en el presente estudio se alcanzó un máximo de 250 mg/L.

Lo explicado en el párrafo anterior, sucede igualmente en la mayoría de los parámetros cuantificados y que se consideran para el cálculo del índice de Dinius, a excepción de los valores correspondientes a coliformes fecales y totales, que resultaron mayores en las muestras correspondientes a las vertientes. Esto puede deberse a la fauna que habita en los puntos de muestreo correspondientes a las fuentes de abastecimiento (vertiente) y las diversas maneras en las que estos microorganismos se desarrollan y propagan (Jiménez, 2012). Esta misma autora menciona que dichos microorganismos pueden estar ausentes si la contaminación no es de origen fecal. Por otro lado, la disminución de los coliformes en las muestras de agua residual podría deberse a que el pH óptimo de crecimiento de coliformes fecales es de 7 a 7.5 con un pH mínimo de crecimiento de 4 y máximo de 8.5 (Micro de Alimentos, 2008), además de requerir un periodo de incubación de 24 a 48 horas con temperatura de 44.5 °C para poder identificarlos a través de diferentes pruebas de cuantificación (Jiménez 2012). Y como se puede observar en el Cuadro 14, los valores de pH para las aguas mieles varían entre 4.4 a 4.8, mientras que los de la temperatura lo hacen entre 19 y 20.5, por lo tanto, no se cumple ninguna de estas condiciones.

En cuanto al resto de parámetros, la tendencia es la misma. Así, antes de utilizar el agua para el procesamiento de café, los valores de prácticamente todos los parámetros son menores (vertiente) y posterior al beneficio estos se incrementan. La tendencia observada es un indicio de que la toma de muestras y su posterior manejo fue adecuado; además, se realizaron los análisis de laboratorio para cuantificar estos parámetros de manera correcta. Asimismo, al comparar los resultados obtenidos con los publicados en estudios similares, como el de López (2013), quien compartió los obtenidos al caracterizar aguas residuales provenientes de beneficios húmedos convencionales de café previamente publicados por el Centro de Investigaciones Ecológicas del Sureste (CIES) (1994); o Torres-Valenzuela (2019) en su estudio "Caracterización fisicoquímica y microbiológica de aguas mieles del beneficio de café", donde realizó pruebas fisicoquímicas a dichas aguas; y de igual manera, Jaulis, Juscamata, Villanueva, Gutiérrez, Dilas (2022), quienes publicaron los resultados de

medición obtenidos de las aguas mieles antes y después del tratamiento con polímeros naturales orgánicos, para obtener una idea de la eficiencia del mismo.

En el Cuadro 15 se muestra una comparativa de los promedios obtenidos de estos parámetros y los diferentes valores obtenidos por los ya mencionados estudios publicados.

Cuadro 15. Comparativa de algunos parámetros medidos en el presente estudio con otros estudios publicados sobre caracterización de aguas mieles convencionales del beneficio húmedo. Fuente: Elaboración propia con datos tomados de Torres-Valenzuela (2019), Jaulis *et al.* (2022) y López (2013) y propios.

Parámetro	Torres-Valenzuela (2019)	Jaulis *et al.* (2022)	López (2013)	Bolaños (2024)
Vertiente (fuente o entrada)				
OD (mg / L)			7.80	7.15
DBO_5 (mg / L)			4.40	3.484
pH (UpH)			6.4	7.34
T (°C)			19.7	18.3
Lavado				
OD (mg / L)			2.20	2.02
DBO_5 (mg / L)			2,211	250
pH (UpH)			5.5	4.48
T (°C)			19.5	19.5
Despulpado				
OD (mg / L)			1.20	1.75
DBO_5 (mg / L)			275	250
pH (UpH)			5.3	4.5
T (°C)			21.6	19.5
Fosa				
OD (mg / L)	1.25	2.0		1.1666
DBO_5 (mg / L)		45166		250
pH (UpH)	4.025	3.41		4.6
T (°C)		20		20
Conductividad (ms/cm)	3035	3180		861.66
NO3 (mg/L)		4648		32.36

5.1 Límites permisibles de contaminantes (NOM-001-SEMARNAT-2021)

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana (NOM-001-SEMARNAT-2021) que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores (ríos, arroyos, canales, embalses, lagos y lagunas, zonas marinas mexicanas, riego

de áreas verdes, infiltraciones, etc.) el valor inmediato del pH debe oscilar entre 6-9 UpH (Unidades de pH) previo a la descarga. Así mismo, el límite máximo permisible de Temperatura en el agua es el equivalente a 35 °C. En el Cuadro 16 se muestra una comparativa entre los límites establecidos por la norma y los datos reales obtenidos experimentalmente con respecto a las muestras de agua en las cooperativas Finca Triunfo Verde y Comon Yaj Noptic.

Cuadro 16. Datos experimentales vs límites permisibles. Fuente: Elaboración propia.

Muestra	1	3	4	5	6	17	9	10	11	12	13	14	15	16
pH (UpH)	6.8	**4.5**	**4.6**	6.7	**4.3**	9.2	**4.5**	**4.8**	7.0	4.6	7.0	**4.5**	**4.5**	**4.4**
T (°C)	18.0	19.0	19.5	18.5	19.5	18.0	19.5	20.0	18.0	18.5	19.0	19.5	20.0	20.5

En fuente roja y negritas los valores medidos que están fuera del rango permisible.

Como se aprecia en el Cuadro 16, los valores de pH medidos en las muestras de agua que corresponden a vertiente (derivadas de las fuentes, antes de ingresar al beneficio) se encuentran dentro del rango permisible, excepto la muestra 17, que excede este rango y es ligeramente alcalina. Después de ser utilizadas para el despulpado y lavado, todas las muestras, incluidas las que ya se encuentran en las fosas, presentan una notable disminución en su pH, resultando en un pH ácido en todos los casos.

Respecto a la Temperatura, en todos los casos los valores medidos en las muestras se mantuvieron debajo del límite permisible por la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Según Torres-Valenzuela *et al.* (2019) el pH de las aguas residuales de las aguas mieles del beneficio húmedo del café oscilan entre 3.995 a 4.025. Por su parte, Cerrato (2014) encontró un pH medio de 4.68 unidades en las aguas residuales, producto del beneficiado húmedo, al ser descargadas en cuerpos receptores, lo que concuerda con los valores encontrados en este estudio. La marcada reducción del pH del agua posiblemente se debe a los procesos de fermentación del mucílago, que producen ácidos orgánicos al descomponer el mucílago del café (Orozco *et al.*, 2005; de Carvalho *et al.*, 2017).

5.2 Calidad para consumo humano (NOM-127-SSA1-2021)

El término pH es usado universalmente para determinar si una solución es ácida o básica. El pH óptimo de las aguas debe estar entre 6.5 y 8.5 según la NOM-127-SSA1-2021, por lo que las aguas de pH menor de 6.5 se consideran corrosivas debido a compuestos ácidos o sales ácidas que tienen en disolución.

El color del agua puede ser alterado por la presencia de partículas suspendidas y disueltas de gases, líquidos y sólidos tanto orgánicos como inorgánicos. El límite máximo recomendado por la NOM-127-SSA1-2021 para el agua de consumo humano de 15 UNT (unidades nefelométricas de turbidez), el cual tiene un alto índice de dispersión; según esta información, solo las muestras de la vertiente cumplen con estos valores.

La presencia de Coliformes en el agua es un indicio de que pueden estar contaminado con aguas negras u otro tipo de desechos en descomposición. Generalmente, las bacterias coliformes se encuentran en mayor abundancia en la capa superficial del agua o en los sedimentos del fondo. De acuerdo a lo observado, las muestras 5 y 11superan los límites permisibles (<2 NMP) en la NOM-127-SSA1-2021; lo cual indica que posiblemente no hay un buen manejo de desinfección y de limpieza de los reservorios o hay filtraciones difusas de aguas contaminadas. Tampoco se descarta una posible contaminación debido al manejo y procesamiento de las muestras.

Una vez que se integraron todos los parámetros analizados en el índice de calidad de agua, los resultados indican que el agua en las fuentes de origen (vertiente) se clasificó con una ICA excelente, pero como contaminada después de usar el agua para el beneficio de café, como se muestra en el Cuadro 17. En el caso de posibles usos del agua para agricultura, pesca e industria, el ICA se clasificó con calidad excelente en las fuentes de origen y, en el resto de los casos disminuyó su calidad después de usarse en el beneficio, a contaminación leve. En el caso de uso para la recreación, las muestras se clasificaron con calidad aceptable después de su uso en el beneficio (Cuadro 17).

5.3 Índice de calidad del agua para otros usos

Los resultados encontrados en el presente estudio manifiestan que todas las muestras de agua tomadas de las fuentes de abastecimiento (vertiente) resultaron con calidad excelente para consumo humano, como se observa en el Cuadro 17 en el caso de las muestras 1, 5, 11, 13 y 17, por lo que no se requiere tratamiento para su consumo. En el mismo sentido, estas muestras resultaron tener una calidad excelente para usos en la agricultura, pesca, industria y recreación.

Cuadro 17. Clasificación de las muestras de agua de acuerdo al índice de calidad del agua (ICA). Fuente: Elaboración propia.

muestra	ICA	Consumo humano	Agricultura	Pesca	Industria	Recreación
1	93	calidad excelente	calidad excelente	calidad excelente	calidad excelente	calidad excelente
3	54	contaminada	contaminación leve	contaminación leve	contaminación leve	calidad aceptable
4	59	contaminada	contaminación leve	contaminación leve	contaminación leve	calidad aceptable
5	100	calidad excelente	calidad excelente	calidad excelente	calidad excelente	calidad excelente
6	54	contaminada	contaminación leve	contaminación leve	contaminación leve	calidad aceptable
17	99	calidad excelente	calidad excelente	calidad excelente	calidad excelente	calidad excelente
9	52	contaminada	contaminación leve	contaminación leve	contaminación leve	calidad aceptable
10	56	contaminada	contaminación leve	contaminación leve	contaminación leve	calidad aceptable
11	100	calidad excelente	calidad excelente	calidad excelente	calidad excelente	calidad excelente
12	50	contaminada	contaminación leve	contaminación leve	contaminación leve	calidad aceptable
13	91	calidad excelente	calidad excelente	calidad excelente	calidad excelente	calidad excelente
14	58	contaminada	contaminación leve	contaminación leve	contaminación leve	calidad aceptable
15	54	contaminada	contaminación leve	contaminación leve	contaminación leve	calidad aceptable
16	50	contaminada	contaminación leve	contaminación leve	contaminación leve	calidad aceptable

Las muestras de aguas residuales tomadas en los diferentes procesos del beneficio húmedo de café (cerezo, lavado o fosa) disminuyeron claramente su calidad respecto a las muestras de las fuentes. En estos casos, y de acuerdo al ICA utilizado, todas las muestras se clasificaron como contaminadas para consumo humano, por lo que el tratamiento de potabilización es indispensable antes de su consumo. Asimismo, resultaron con

contaminación leve para usos agrícola, pesca e industria, y con calidad aceptable para uso recreativo.

Los criterios generales para el uso del agua, basados en los rangos de valores del ICA calculado y su clasificación reportada en el Cuadro 17, se fundamentaron en el trabajo de León (1991), tal como se muestra en el Cuadro 18.

Cuadro 18. Criterios generales de uso según el valor del índice de calidad del agua (ICA).

Muestra	C. humano	Agricultura	Pesca	Industria	Recreación
1	No requiere purificación para su consumo	No requiere tratamiento para riego	Pesca y vida acuática abundante	No se requiere purificación	Cualquier tipo de deporte acuático
3	Tratamiento de potabilización indispensable	Utilizable en la mayoría de los cultivos	Dudosa la pesca sin riesgos de salud	No requiere tratamiento para la mayoría de industrias de operación normal	Restringir los deportes de inmersión, precaución si se ingiere dada la posibilidad de presencia de bacterias
4	Tratamiento de potabilización indispensable	Utilizable en la mayoría de los cultivos	Dudosa la pesca sin riesgos de salud	No requiere tratamiento para la mayoría de industrias de operación normal	Restringir los deportes de inmersión, precaución si se ingiere dada la posibilidad de presencia de bacterias
5	No requiere purificación para su consumo	No requiere tratamiento para riego	Pesca y vida acuática abundante	No se requiere purificación	Cualquier tipo de deporte acuático
6	Tratamiento de potabilización indispensable	Utilizable en la mayoría de los cultivos	Dudosa la pesca sin riesgos de salud	No requiere tratamiento para la mayoría de industrias de operación normal	Restringir los deportes de inmersión, precaución si se ingiere dada la posibilidad de presencia de bacterias
17	No requiere purificación para su consumo	No requiere tratamiento para riego	Pesca y vida acuática abundante	No se requiere purificación	Cualquier tipo de deporte acuático
9	Tratamiento de potabilización indispensable	Utilizable en la mayoría de los cultivos	Dudosa la pesca sin riesgos de salud	No requiere tratamiento para la mayoría de industrias de operación normal	Restringir los deportes de inmersión, precaución si se ingiere dada la posibilidad de presencia de bacterias
10	Tratamiento de potabilización indispensable	Utilizable en la mayoría de los cultivos	Dudosa la pesca sin riesgos de salud	No requiere tratamiento para la mayoría de industrias de operación normal	Restringir los deportes de inmersión, precaución si se ingiere dada la

					posibilidad de presencia de bacterias
11	No requiere purificación para su consumo	No requiere tratamiento para riego	Pesca y vida acuática abundante	No se requiere purificación	Cualquier tipo de deporte acuático
12	Tratamiento de potabilización indispensable	Utilizable en la mayoría de los cultivos	Dudosa la pesca sin riesgos de salud	No requiere tratamiento para la mayoría de industrias de operación normal	Restringir los deportes de inmersión, precaución si se ingiere dada la posibilidad de presencia de bacterias
13	No requiere purificación para su consumo	No requiere tratamiento para riego	Pesca y vida acuática abundante	No se requiere purificación	Cualquier tipo de deporte acuático
14	Tratamiento de potabilización indispensable	Utilizable en la mayoría de los cultivos	Dudosa la pesca sin riesgos de salud	No requiere tratamiento para la mayoría de industrias de operación normal	Restringir los deportes de inmersión, precaución si se ingiere dada la posibilidad de presencia de bacterias
15	Tratamiento de potabilización indispensable	Utilizable en la mayoría de los cultivos	Dudosa la pesca sin riesgos de salud	No requiere tratamiento para la mayoría de industrias de operación normal	CALIDAD ACEPTABLE
16	Tratamiento de potabilización indispensable	Utilizable en la mayoría de los cultivos	Dudosa la pesca sin riesgos de salud	No requiere tratamiento para la mayoría de industrias de operación normal	Restringir los deportes de inmersión, precaución si se ingiere dada la posibilidad de presencia de bacterias

El acceso al agua de calidad es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades relacionadas con su consumo y uso, así como para mantener los ecosistemas sanos. La importancia de caracterizar las aguas mieles provenientes del beneficio húmedo del cultivo de café radica en conocer detalladamente la carga de las mismas por tipo de contaminante, para implementar los métodos de tratamiento más adecuados según el contenido de ésta. Además, es crucial evaluar la calidad del agua utilizada en el beneficio del café para garantizar la inocuidad del producto y su idoneidad para el consumo humano. Asimismo, se debe considerar la necesidad de restringir su uso para preservar los ecosistemas naturales y la fauna nativa en las zonas cafetaleras, asegurando así el equilibrio y la sostenibilidad de esta actividad.

6. CONCLUSIONES

1.- Todos los objetivos previamente establecidos en el presente estudio fueron alcanzados a través de los procedimientos correspondientes. Se caracterizó adecuadamente la calidad de las aguas de las que fueron tomadas las muestras, detallando el tipo y carga de contaminantes de éstas. Lo anterior es de alta relevancia para proponer o idear uno o varios tratamientos de las aguas residuales, y que puedan ser reutilizadas o reintroducidas a los cuerpos de agua de los que fueron tomadas sin afectar a la flora y fauna de los ecosistemas, asegurando el equilibrio ecológico y la sustentabilidad del mismo.

2.- Como se hipotetizó en un inicio, el agua proveniente de las fuentes de abastecimiento se encontró dentro de los límites de calidad establecidos por la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSAI-2021) para uso y consumo humano.

3.- Las aguas mieles provenientes de los procesos de despulpe y lavado de café de las Cooperativas Comon Yaj Noptic y Finca Triunfo Verde superaron el límite permisible de contaminantes en las descargas de aguas residuales establecidos por la Norma Oficial Mexicana (NOM-001-SEMARNAT-2021) para el parámetro de pH, lo que es un indicador del daño que le pueden generar al ecosistema y habitantes de la región. Esto implica que debe haber un tratamiento para las aguas mieles antes de ser reincorporadas a las corrientes naturales. En el mismo sentido estas aguas no son aptas para uso o consumo humano ya que contienen una carga residual alta debida al procesamiento del café.

4.- La cuantificación de los parámetros que conforman el Índice de Calidad de Dinnius resultó coherente en comparación con los resultados de otros estudios publicados en relación a la caracterización de aguas residuales provenientes del beneficio húmedo del café. En general, los valores de las muestras tomadas en la vertiente fueron bajos. Sin embargo, las muestras tomadas en los puntos de muestreo posteriores al proceso de beneficio (lavado, despulpe y fosa) mostraron valores elevados en todos los casos, excepto para las coliformes, donde se invirtió esta tendencia. Esto podría deberse a que la disminución del pH, provocada por los procesos de fermentación del mucílago, hace que este parámetro se salga del rango óptimo para crecimiento de coliformes, provocando su disminución.

5.- De acuerdo con el índice general de calidad de agua utilizado, el agua proveniente de las fuentes de abastecimiento (vertiente) resultó excelente para todos los usos, incluido el

consumo humano. En cambio, las muestras de agua provenientes derivadas del beneficio húmedo del café tuvieron un índice general de calidad clasificado como contaminada para consumo humano, por lo que se requiere de tratamiento de manera indispensable.

6.- Las muestras de las aguas residuales resultaron en todos los casos con contaminación leve para usos en la agricultura (utilizable en la mayoría de los cultivos), pesca (dudosa la pesca sin riesgos de salud) e industria (no requiere tratamiento para la mayoría de industrias de operación normal), y aceptable para fines recreativos (restringida solo para los deportes de inmersión).

7.- La importancia del presente estudio radica en que sienta las bases para proponer las medidas más adecuadas que garanticen en un futuro inmediato la sustentabilidad de los ecosistemas, implementando un manejo adecuado de los residuos generados en el procesamiento de café y sus aguas residuales. Así mismo, se espera que los resultados obtenidos sean tomados en cuenta por los socios de las cooperativas para garantizar el agua de calidad para uso y consumo humano, evitando la propagación de enfermedades y cuidando la salud de los habitantes de estas zonas cafetaleras, así como la inocuidad del café para su venta y consumo.

8.- Las cooperativas Comon Yaj Noptic (CYN) y Finca Triunfo Verde (FTV) benefician un total de 4,500,000 kg de café cereza en el ciclo de cultivo, para lo cual utilizan aproximadamente 45,531,200 L de agua que, como resultado de este proceso, resultaron contaminados. Dados los problemas actuales de escasez en cantidad y calidad de este recurso en México, esta es una de las problemáticas a las que se les debe dar prioridad de seguimiento y atención para asegurar su sostenibilidad.

9.- Adicionalmente, se producen aproximadamente 2,263,500 kg de residuos sólidos (cascarilla y pulpa), de la que muchas veces no se tiene un manejo adecuado, provocando contaminación en el suelo, agua y aire. Estos residuos posteriormente se convierten en focos infecciosos para la salud de las personas y deterioran la calidad ambiental de la región. Además, emiten gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera, contribuyendo al calentamiento global y contaminación de los cuerpos de agua mediante sus lixiviados. En este sentido, otra problemática indirecta a resolver, derivada del beneficio húmedo del café,

es encontrar opciones de uso a estos residuos, para reducir o erradicar los daños ambientales y a la salud de las personas causados por dicha contaminación.

7. RECOMENDACIONES

Dados los problemas de escasez del agua en México, tanto en cantidad como en calidad, en primera instancia se recomienda llevar a cabo estudios similares al presente en otras zonas cafetaleras del país, para conocer los tipos de procesos que se realizan, así como las cantidades de agua utilizadas para el beneficio del café y, sobre todo, medir detalladamente la carga de sus aguas mieles. Lo anterior se debe a que los factores que determinan la composición nutricional de las partes del fruto de café son diversos, como la variedad de la planta, tipo de cultivado, altitud, nivel de maduración, condiciones de almacenamiento y algunos otros; por lo que la carga y contenido es diferente para cada caso. Este conocimiento mostraría un panorama mucho más amplio en relación al tamaño del problema y, en consecuencia, las acciones que se requieren para solucionarlo.

Como ya se ha mencionó, según la carga y tipo de contaminantes se debe seleccionar el tratamiento que se considere más adecuado para reacondicionar, reciclar y reutilizar las aguas mieles provenientes del procesamiento del café, lo que podría sin duda hacer una diferencia en la sostenibilidad de esta actividad económica en beneficio de miles de pequeños productores de México. Tomar medidas que solucionen el tema de escasez de agua, podría beneficiar al país de varias formas, desde equilibrio ambiental en los ecosistemas y acceso al agua de calidad para consumo humano, hasta contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, por lo que es una medida de mitigación del calentamiento global.

Existen diferentes maneras de tratar las aguas residuales, las cuales se clasifican principalmente en tres grupos según su mecanismo de acción: físicos (clarificación, aireación, filtración, etc.), químicos (cloración, ozonización, adsorción, intercambio iónico, etc.) y biológicos (estanques de oxidación, lodo activado, digestión aeróbica y anaeróbica, membranas, etc.). Normalmente se implementa al menos un tratamiento de cada tipo para asegurar que la calidad final del agua sea la más alta posible. En el caso de las aguas mieles provenientes del beneficiado húmedo del café algunos métodos que han tenido una mayor eficacia en reducción de los valores correspondientes a demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno y pH (3 de los principales parámetros a cuantificar en los estudios de calidad de aguas) fueron por filtración natural con semillas de moringa y a través

de la implementación de carbón de semilla de aguacate en aguas residuales. Se logró una reducción de 99% en ambos casos para DQO y DBO según los resultados reportados. De acuerdo a los resultados obtenido en este estudio, se recomienda implementar algunas de estas metodologías de tratamiento que han probado su eficiencia en condiciones similares, pero también podrían implementarse otros métodos o incluso alguna combinación. Por ejemplo, como primer tratamiento para las aguas mieles se podría implementar la filtración por tamizado, que ayudaría a separar la mayor parte de la materia insoluble, posteriormente podría continuar el reacondicionamiento con alguno de los dos métodos de los que se conoce su efectividad: filtración natural con semillas de moringa o con carbón de semilla de aguacate en aguas residuales, cuya selección final estaría en función del costo y la facilidad de contar con los materiales requeridos.

Para seleccionar el método adecuado de tratamiento se debe tomar en cuenta la eficiencia de los métodos, el costo económico que implica y el daño ambiental que podría causar. Una práctica común es tratar las aguas residuales con cloro para limpiarlas, si bien es cierto que, en comparación con otros métodos, éste es muy efectivo y no muy costoso, pero la presencia de cloro afectaría a la flora y fauna del ecosistema, por lo que no es recomendable la reintroducción a las corrientes naturales; aunque podrían tener un segundo uso más viable para las actividades humanas, como el lavado de superficies, uso en inodoros o riego de plantas.

Como última recomendación, una de las principales razones por las que no se tratan usualmente las aguas mieles de café es porque implica un gasto adicional para las cooperativas, pero si las instituciones gubernamentales ofrecieran apoyo en especie (proveyendo los sistemas de tratamiento) o a través de proyectos dirigidos a esta tarea de manera específica, las cooperativas podrían darle prioridad al tratamiento de sus aguas residuales. También resulta importante que las instituciones académicas se vinculen con los productores, informando de los resultados de investigación en el tema y de las tecnologías disponibles para el tratamiento de las aguas residuales.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acquaticci, L., Angeloni, S., Cela, N., Galgano, F., Vittori, S., Caprioli, G., & Condelli, N. (2023). Impact of coffee species, post-harvesting treatments and roasting conditions on coffee quality and safety related compounds. *Food Control*, 149, 109714. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109714

Akhtar, N. (2021, April 08). Water Quality Index. In Encyclopedia. https://encyclopedia.pub/entry/8538

APHA, AWWA & WEF. (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater. Health Association, 21th ed., Washington D.C., USA. 1200 pp.

Ashenafi Hailemariam, F., Velmurugan, P., & Selvaraj, S. K. (2021). Treatment of wastewater from coffee (coffea arebica) industries using mixed culture Pseudomonas florescence and Escherichia coli bacteria. *Materials Today: Proceedings*, 46, 7396-7401. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.1124

Barrera, J., Avelino, J., Huerta, G., Herrera, J., & Gómez, J. (2013). La roya del café: crónica de una devastación anunciada. *Ecofronteras*, 49: 22-25. Recuperado el 17 de julio de 2023, de https://revistas.ecosur.mx/ecofronteras/index.php/eco/article/view/378

Bastian, F., Hutabarat, O. S., Dirpan, A., Nainu, F., Harapan, H., Emran, T. B., & Simal-Gandara, J. (2021). From Plantation to Cup: Changes in Bioactive Compounds during Coffee Processing. *Foods*, 10(11), 2827. MDPI AG. Retrieved from http://dx.doi.org/10.3390/foods10112827

Bee, S., Brando, C. H. J., Brumen, G., Carvalhes, N., Kölling-Speer, I., Speer, K., ... Vitzthum, O. G. (2005). *The raw bean*. In A. Illy, & R. Viani (Eds.). Espresso coffee: The science of quality (pp. 87–178). London, UK: Elsevier Academic Press.

Bisekwa, E., Njogu, P.M. and Kufa-Obso, T. (2020) Effluent Quality of Wet Process Coffee Processing Factories in Coffee Growing Ecological Zones in Burundi. *International Journal of*

Water and Wastewater Treatment, 6, 1-7. https://sciforschenonline.org/journals/water-and-waste/IJWWT176.php

Buendía-Espinoza, J. C., Maldonado-Torres, R., Amador-Atlahua, L., & Álvarez-Sánchez, M. E. (2020). Identificación de elementos discriminatorios para caracterizar el Coffea arabica L. empleando componentes principales. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, 11(1), 1–12. https://doi.org/10.29312/remexca.v11i1.2207.

Castro M., Almeida J., Ferrer J., Díaz D., (2014). Indicadores de la calidad del agua: evolución y tendencias a nivel global, pp 4-7, Recuperado el 8 de mayo de 2024, de ICA historia y evolución Castro et al 2014-Ok.pdf

CEPF-Centro de Estudios de las Finanzas Públicas de la Cámara de Diputados. (2001). *El mercado del café en México*. Recuperado el 15 de julio de 2023, de https://www.cefp.gob.mx/intr/edocumentos/pdf/cefp/cefp0542001.pdf

Cerrato Espinal, C. (2014). Neutralización del potencial de hidrógeno del agua miel de un beneficio húmedo tecnificado de café utilizando hidróxido de calcio y bicarbonato de sodio. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 9(1), 36–42. https://doi.org/10.36829/08ASA.v9i1.1463

Chandrasekhar, A., Graham, F., & Viglione, G. (2023). *Commodity Profile: Coffee*. Carbon Brief Ltd. Recuperado el 18 de julio de 2023 de https://interactive.carbonbrief.org/commodity-profile-coffee/

Chidiac, S., El Najjar, P., Ouaini, N. et al. (2023). A comprehensive review of water quality indices (WQIs): history, models, attempts and perspectives. *Rev Environ Sci Biotechnol* 22, 349–395. https://doi.org/10.1007/s11157-023-09650-7

CRS. (2021). *¿Cómo reducir la contaminación del agua en el beneficiado húmedo de café?* Recuperado el 28 de mayo de 2023, de https://asa.crs.org/2021/07/reducir-contaminacion-agua-en-beneficiado-cafe/

Dadi, D., Mengistie, E., Terefe, G., Getahun, T., Haddis, A., Birke, W., Beyene, A., Luis, P., & Van der Bruggen, B. (2018). Assessment of the effluent quality of wet coffee processing

wastewater and its influence on downstream water quality. Ecohydrology & Hydrobiology, 18(2), 201-211. https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2017.10.007

de Carvalho NDP, de Melo PG, Tanobe V, Thomaz SV, da Silva BG, Rodrigues C, Soccol C. (2017). Yeast diversity and physicochemical characteristics associated with coffee bean fermentation from the Brazilian Cerrado Mineiro region. *Fermentation* 3 (1): 11. https://doi.org/10.3390/fermentation3010011

Dinius's Second Index, S.H., (1987). Design of an index of water quality. *Water Resources Bulletin* 23 (5), 833e843.

Fernández-Cortés, Yessica, Sotto-Rodríguez, Karla Daniela, & Vargas-Marín, Luis Alberto. (2020). Impactos ambientales de la producción del café, y el aprovechamiento sustentable de los residuos generados. *Producción + Limpia*, 15(1), 93-110. Epub November 20, 2020.https://doi.org/10.22507/pml.v15n1a7

Figueroa Campos, G. A., Sagu, S. T., Saravia Celis, P., & Rawel, H. M. (2020). Comparison of Batch and Continuous Wet-Processing of Coffee: Changes in the Main Compounds in Beans, By-Products and Wastewater. Foods, 9(8), 1135. MDPI AG. Retrieved from http://dx.doi.org/10.3390/foods9081135

Figueroa Campos, G. A., Sagu, S. T., Saravia Celis, P., & Rawel, H. M. (2020). Comparison of Batch and Continuous Wet-Processing of Coffee: Changes in the Main Compounds in Beans, By-Products and Wastewater. *Foods*, 9(8), 1135. https://doi.org/10.3390/foods9081135

Getahun, M., Asaithambi, P., Befekadu, A., & Alemayehu, E. (2023). Optimization of indigenous natural coagulants process for nitrate and phosphate removal from wet coffee processing wastewater using response surface methodology: In the case of Jimma Zone Mana district. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8, 100370. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100370

Gómez-Anaya, José Antonio, Novelo-Gutiérrez, Rodolfo, & Astudillo-Aldana, Manuel Ricardo. (2017). Efecto de las descargas domésticas y de beneficio de café sobre la calidad

del agua y la diversidad de larvas de Odonata (Insecta) en un arroyo de bosque mesófilo de montaña en Veracruz, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 88(2), 372-380. https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.03.004

González-Freire, Adianni, & Martínez-Hernández, Carlos M. (2022). Mejoramiento y uso de los efluentes para el beneficio del café. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 31*(2), e08. Epub 13 de mayo de 2022. Recuperado el 28 de mayo de 2023, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542022000200008&lng=es&tlng=es

Guaranguay, A., & Orozco, D. (2019). *Evaluación de la eficiencia de remoción de DBO, DQO y SST en aguas residuales provenientes del beneficio húmedo del café a través de una columna de adsorción con borra de café*. Tesis de Licenciatura. Cooperación Universitaria Autónoma del Cauca. Popayán, Cauca, Colombia. Recuperado el 16 de julio de 2023 de https://repositorio.uniautonoma.edu.co/bitstream/handle/123456789/321/T%20IA-M%20080%202019.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Haile, M., & Hee Kang, W. (2019). The Role of Microbes in Coffee Fermentation and Their Impact on Coffee Quality. *Journal of Food Quality*, 4836709. https://doi.org/10.1155/2019/4836709

Haile, M., & Hee Kang, W. (2020). The Harvest and Post-Harvest Management Practices' Impact on Coffee Quality. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.89224

Harvey, C.A., Pritts, A.A., Zwetsloot, M.J. et al. (2021). Transformation of coffee-growing landscapes across Latin America. A review. *Agronomy for Sustainable Development,* 41, 62. https://doi.org/10.1007/s13593-021-00712-0

Herrera, J. C., & Lambot, C. (2017). The Coffee Tree—Genetic Diversity and Origin. *The Craft and Science of Coffee*, 1-16. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803520-7.00001-3

International Coffee Organization (ICO). S.f. Procesamiento de campo. Consultado 05 de junio de 2023 en http://www.ico.org/ES/field_processingc.asp

International Coffee Organization (ICO). (2023). Historical Data on the Global Coffee Trade. Consultado 16 de julio de 2023 en https://www.ico.org/new_historical.asp

Janne Carvalho Ferreira, L., de Souza Gomes, M., Maciel de Oliveira, L., & Diniz Santos, L. (2023). Coffee fermentation process: A review. *Food Research International*, 169, 112793. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112793

Jaulis Cancho, J. C., Juscamaita Morales, J. G., Villanueva Santos, E., Gutiérrez Collao, J. E., & Dilas-Jiménez, J. O. (2022). Limpieza del agua miel proveniente del beneficiado húmedo del café mediante polímeros naturales orgánicos. Alpha Centauri, 3(3), 02–10. https://doi.org/10.47422/ac.v3i3.84

Jiménez Cisneros Blanca Elena (2012). *La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*. Editorial Limusa.

Juárez González, Tiburcio, Maldonado Astudillo, Yanik I., González Mateos, Ricardo, Ramírez Sucre, Manuel Octavio, Álvarez Fitz, Patricia, & Salazar, Ricardo. (2021). Caracterización fisicoquímica y sensorial de café de la montaña de Guerrero. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(6), 1057-1069. Epub 21 de marzo de 2022.https://doi.org/10.29312/remexca.v12i6.2773

León Vizcaíno, L. (1991). *Índices de calidad del agua, forma de estimarlos y aplicación en la cuenca Lerma-Chapala*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, Mex. Disponible en línea en: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6147/1/ICA%20Forma%20de%20estimarlos.pdf

Libert-Amico, Antoine, & Paz-Pellat, Fernando. (2018). Del papel a la acción en la mitigación y adaptación al cambio climático: la roya del cafeto en Chiapas. *Madera y bosques*, 24(spe), e2401914. https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401914

López Blanco, C., (2013) "Optimización del uso de agua en el lavado del café en los tanques de fermentación". Recuperado el 6 de Julio del 2024, en: Eficiencia del uso del agua en el lavado de café (umsa.bo)

Martinez Castro, V. M., Rodríguez Valenzuela, J. J., & Roa Ramos, J. D. (2022). Evaluación del proceso de beneficio semiseco (Honey) en las variedades de Café (Coffee arábica) Castillo, Colombia y Caturra y su efecto en la calidad en taza. *Ingeniería Y Región*, 27, 6–11. https://doi.org/10.25054/22161325.3148

Morales, E. & Bolaños, M. (2023). *Manual de manejo poscosecha y fermentaciones del fruto del café*. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México. Recuperado el 04 de febrero de 2023, de https://www.grupoexploradores.com/tienda/p/manual-de-manejo-poscosecha-y-fermentaciones-del-fruto-del-caf-dra-itzel-morales

Muchane, M. N., Sileshi, G. W., Gripenberg, S., Jonsson, M., Pumariño, L., & Barrios, E. (2020). Agroforestry boosts soil health in the humid and sub-humid tropics: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 295*, 106899. https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106899

Murthy, P. S., & Madhava Naidu, M. (2012). Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review. *Resources, Conservation and Recycling*, *66*, 45-58. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.005

Navarro, C. I. & Large, P. J. (2010). Evaluación de los efectos de las aguas mieles generadas por actividades cafeteras sobre la calidad fisicoquímica del agua de la microcuenca la Eugenia sector San Pedro, Sierra Nevada de Santa Marta. Magdalena - Colombia. Tesis de Licenciatura. Universidad del Magdalena. Santa Marta, Colombia. Recuperado el 19 de noviembre de 2023, de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://core.ac.uk/download/pdf/270126394.pdf

Olubukola Ajoke Adelagun, R., Edet Etim, E., & Emmanuel Godwin, O. (2021). Application of Water Quality Index for the Assessment of Water from Different Sources in Nigeria. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.98696

Orozco, C., Barrientos, H., Lopezlena, A., Cruz, J., Selvas, C., Osorio, EL., Osorio, ED. y cols. (2005). Evaluación de una planta piloto de aguas residuales del café *Hig. Sanid. Ambient.* 5: 123-131.

Pereira, G. V. M., Soccol, V. T., Brar, S. K., Neto, E., & Soccol, C. R. (2017). Microbial ecology and starter culture technology in coffee processing. Critical Reviews in *Food Science and Nutrition*, 57, 2775–2788.

Pérez, P. E., S. Bonilla C., Hernández J., & Partida J. (2011). Estrategia de mejoramiento de la producción cafetalera de la organización Campesinos Ecológicos de la Sierra Madre de Chiapas: caracterización de la bebida de café. *Revista de Geografía Agrícola* 46-47:7-18. Recuperado el 18 de julio de 2023, de https://www.redalyc.org/pdf/757/75729625002.pdf

Puente Miranda, D. G., Valenzuela Garcia, L. I. ., & Alarcón Herrera, M. T. (2023). Determinación histórica de índices de calidad del agua en observatorios participativos en el norte de México. Revista Internacional De Contaminación Ambiental, 39, 127–137. Determinación histórica de índices de calidad del agua en observatorios participativos en el norte de México (scielo.org.mx)

Rana, R., Ganguly, R. (2020). Water quality indices: challenges and applications—an overview. *Arabian Journal Geosciences* 13, 1190. https://doi.org/10.1007/s12517-020-06135-7

Rugama Espinoza, M. I., & Save Monserrat, R. (2016). Efecto vertido aguas mieles en calidad físico-química del agua microcuenca Rio Cuspire Yalí, Nicaragua. *Revista Científica De FAREM-Estelí*, (7), 43–53. https://doi.org/10.5377/farem.v0i7.2631

Ruiz-Nájera, R. E., Medina-Meléndez, J. A., Carmona-de la Torre, J., Rincón-Enríquez, G., Sánchez-Yáñez, J. M. y Raj-Aryal, D. (2021). Efecto de la disposición de los residuos resultantes del beneficiado húmedo del café sobre las características físicas y química del

agua de corriente natural. Terra Latinoamericana, 39, 1-11. e884. https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.884

SCAA (Specialty Coffee Association of America). (s.f.). A blueprint for water security in the coffeelands. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.scaa.org/PDF/scaa-wp-water-security.pdf (Consulta: 07 de agosto de 2022).

Sedue (1989). CE-CCA-001/89. CE-CCA-001/89: Criterios Ecológicos de Calidad del Agua. Diario Oficial de la Federación. México, DF: Estados Unidos Mexicanos, Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología.

Semarnat, Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua, octubre 2005.
Semarnat, Comisión Nacional del Agua, Estadísticas del Agua en México, 1a edición, CNA, México, 2011. SEMARNAT

SIAP. 2022. *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Cierre de la producción agrícola por estado. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, México. https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/ (Consulta: septiembre 21, 2022).

SIAP. 2023. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON). Fecha de consulta: junio de 2023.

Torres, Patricia, Cruz, Camilo Hernán, & Patiño, Paola Janeth. (2009). Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano: Una revisión crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15, Suppl. 1), 79-94. Retrieved February 09, 2024, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-33242009000300009&lng=en&tlng=es.

Torres Valenzuela L., Sanín Villarea A., Arango Ramírez A., Serna Jiménez J. (2019). Caracterización fisicoquímica y microbiológica de aguas mieles del beneficio de café. Rev.Ion.

32(2) 59-66. Vista de Caracterización fisicoquímica y microbiológica de aguas mieles del beneficio del café | Revista ION (uis.edu.co)

Torres, Y. (2018). Desarrollos tecnológicos: proceso integral de café. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C. Fecha de consulta: 15 de julio de 2023 en https://ciatej.mx/el-ciatej/comunicacion/Noticias/Desarrollos-tecnologicos--proceso-integral-de-cafe/76

van Noordwijk, M. (ed.). (2019). *Sustainable Development Through Trees on Farms: Agroforestry in its Fifth Decade*. World Agroforestry (ICRAF). Bogor, Indonesia. https://apps.worldagroforestry.org/downloads/Publications/PDFS/B19029.pdf

van Rikxoort, H., Schroth, G., Läderach, P., & Rodríguez, B. (2014). Carbon footprints and carbon stocks reveal climate-friendly coffee production. *Agronomy for Sustainable Development, 34*, 887-897. https://doi.org/10.1007/s13593-014-0223-8

Vázquez, G. (2016). *Efectos del proceso beneficio húmedo de café sobre la sostenibilidad hídrica de la microcuenca La Suiza, Chiapas*. Tesis de Maestría. El Colegio de la Frontera Norte. Monterrey, Nuevo León. México. Recuperado el 15 de julio de 2023, de https://www.colef.mx/posgrado/wp-content/uploads/2018/01/TESIS-V%C3%A1zquez-Gonz%C3%A1lez-Guiyer-Euselmar.pdf

Woldesenbet, A. G., Woldeyes, B. y Chandravanshi, B. S. (2014). Characteristics of wet coffee processing waste and its environmental impact in Ethiopia. *International Journal of Research in Engineering and Science*, 2, 1–5. Recuperado el 16 de julio de 2023, de https://ijres.org/papers/Volume%202/v2-i4/A0240105.pdf

Yılmaz, B., Acar-Tek, N., & Sözlü, S. (2017). Turkish cultural heritage: A cup of coffee. *Journal of Ethnic Foods*, 4(4), 213-220. https://doi.org/10.1016/j.jef.2017.11.003

Zhang, S. J., Bruyn, F. D., Pothakos, V., Torres, J., Falconi, C., Moccand, C., Weckx, S., & Vuyst, L. D. (2019). Following Coffee Production from Cherries to Cup: Microbiological and

Metabolomic Analysis of Wet Processing of Coffea arabica. *Applied and Environmental Microbiology*, 85(6). https://doi.org/10.1128/AEM.02635-18