

Implementación de un sistema de monitoreo IoT aplicado a una piscicultura de trucha

Implementation of an IoT monitoring system applied to trout fish farming

Tito Manuel Piamba-Mamian¹
Leidy Estefanía Zambrano²
Luis Alexander Montaña-Ruales³
Francisco Arturo Rojas-González⁴

¹Corporación Universitaria Autónoma de Nariño (Colombia).
Correo electrónico: tito.piamba@aunar.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2396-2088>

²Corporación Universitaria Autónoma de Nariño (Colombia).
Correo electrónico: leidy.zambrano@aunar.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1971-8146>

³Integrante Grupo de Investigación INMECNAR (Colombia).
Correo electrónico: lucho961007@hotmail.com
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4431-3215>

⁴Estudiante Ingeniería Mecánica. Corporación Universitaria Autónoma de Nariño (Colombia).
Correo electrónico: rojasgonzalezfranciscoarturo@gmail.com
orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6452-4418>

Recibido: 08-07-2020 Aceptado: 06-10-2020

Cómo citar: Piamba-Mamian, Tito Manuel; Zambrano, Leidy Estefanía; Montaña-Ruales, Luis Alexander; Rojas-González, Francisco Arturo (2020). Implementación de un sistema de monitoreo IoT aplicado a una piscicultura de trucha. *Informador Técnico*, 85(1), 3-19.
<https://doi.org/10.23850/22565035.2937>

Resumen

La creciente producción de trucha arcoíris en Colombia requiere el aumento de sus procesos productivos. Por ello, se debe incrementar la obtención de ovas y alevinos en las pisciculturas para satisfacer así la demanda del producto final. El mercado actual se divide en la producción de carne y la venta de alevinos, de ahí, la necesidad de implementar un sistema de monitoreo en la etapa inicial de la producción (alevinos), debido a que esta involucra un alto grado de mortalidad ocasionada por su delicadeza y a factores que son desconocidos por el piscicultor, como el valor de pH, temperatura y oxígeno disuelto, entre otros, originando pérdidas económicas y hasta el cierre de sus negocios. Cuando se identifican procesos relacionados con tecnologías e Industria 4.0 “cuarta revolución industrial”, poniendo en marcha componentes de hardware y software, con el fin de fortalecer procesos productivos enfocados a mejorar las necesidades de usuarios, al hablar de tecnologías se generan ideas innovadoras concernientes a grandes fábricas y, por ende, elevados costos en proyectos. Sin embargo, a partir de la transformación digital se han plasmado escenarios en donde se da lugar a modestos propósitos, que aportan un alto retorno de la inversión en vía de optimización de la producción. Por lo anterior, la presente investigación tiene como objetivo principal establecer un modelo de sistema constructivo orientado en la utilización de técnicas *Internet of Things* (IoT), identificando variables en tiempo real como temperatura, oxígeno disuelto, pH que permitan disminuir la mortalidad de la trucha arcoíris en etapas tempranas (ovas, larvas y alevinos), beneficiando así a pequeños productores y satisfaciendo la demanda nacional e internacional.

Palabras clave: ovas; alevinos mortalidad; trucha arcoíris; control; Industria 4.0; plataforma IoT; trucha arcoíris.

Abstract

Colombia, due to the increasing production of rainbow trout sees the need to augment its production processes, therefore, it must improve the production of eggs and fingerlings in fish farms to meet the demand for the final product. The current market is divided into meat production and sale of fingerlings; therefore, it is necessary to implement a monitoring system in the initial stage of production (fingerlings) since this involves a high degree of mortality caused by its delicacy and factors. They are unknown to the fish farmer, causing economic losses and even the closure of their businesses. When processes related to technologies and Industry 4.0 are identified, the “fourth industrial revolution” putting hardware and software components in place to strengthen production processes focused on improving user needs and when talking about technologies, innovative ideas are developed concerning large factories, and therefore, costly economic projects. However, the digital transformation has been reflected in scenarios where specific modes are given, which provide a high return on investment by optimizing production. Because of that, the main objective of this research is to establish a construction system model oriented to the use of *Internet of Things* (IoT) techniques, identifying variables such as temperature, dissolved oxygen, pH, and real-time systems that allow rainbow trout mortality to be reduced in early stages (ova, larvae, and fingerlings), thus benefiting small producers, and satisfying the national and international demand.

Keywords: trout eggs; trout fry; mortality; rainbow trout; control; Industry 4.0; IoT Platform; rainbow trout.

1. Introducción

Según el Ministerio de agricultura, Colombia es considerado como el segundo exportador de trucha fresca y tilapia a Estados Unidos (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2016), siendo Huila el principal departamento en generar mayor producción acuícola con un 46 %, mientras que Nariño y Putumayo aportan menor producción con aproximadamente el 14 % (Ingeniería Asistida por Computador [IAC], 2018), sin embargo, se destacan por la calidad del producto. Esta actividad favorece la generación de nuevos empleos, emprendimiento y disminución de pobreza, debido a la comercialización a nivel mundial que se presenta (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2014). Además de identificar que los recursos pesqueros naturales son limitados y la demanda en acuicultura tendrá que suplir poblaciones a nivel mundial, según (Parra, 2019), la acuicultura está representada por la producción de tilapia, cachama, trucha y camarón, la cual ha tenido un desarrollo elevado. Para el caso de la piscicultura, Colombia ha desarrollado en los últimos años una producción cercana a las 120.230 toneladas en el 2017, con un crecimiento anual del 9 % y generación de empleo del 6 % anual, con 36.069 empleos directos y 108.207 indirectos (IAC, 2018). Sin embargo, cabe resaltar que en el proceso de producción de trucha se ven reflejadas pérdidas económicas, particularmente de la empresa de acuicultura Acuímayo, en donde oscilan entre 80.000 a 100.000 ovas y el promedio normal de pérdidas a través de las etapas corresponde al 30 %, lo que refleja una considerable pérdida económica. Por tanto, se considera importante disminuir el factor de incertidumbre pérdidas, y así aumentar las ganancias del productor.

Debido a la expansión del cultivo de trucha en zonas del departamento de Nariño y Putumayo, se requiere fortalecer las prácticas por medio de recursos técnicos, que permitan mejorar las actividades productivas e incluso ser capaces de relacionar dichas tecnologías, como es el IoT, que se define como el Internet de las cosas (*Internet of Things*) y hacen referencia a la interconexión de objetos cotidianos con internet, está conformado con tecnologías como sensores que permiten conectar el mundo físico con el digital, los datos obtenidos son procesados y convertidos en información (IAC, 2018), e implementarlas en ambientes artificiales, como estanques, que son ambientes de cultivo adecuados para la presente investigación.

La piscicultura Acuímayo Internacional es una microempresa ubicada en la localidad de Sibundoy, en el departamento del Putumayo, Colombia, que se dedica a la comercialización de carne de trucha a partir de

la adquisición de ovas para obtener trucha arcoíris o tipo salmón. En dicha locación, las labores se realizan de forma manual, lo cual genera un control poco eficiente en el manejo y en la pérdida en las etapas de crianza de los mismos. El proceso de levante de truchas inicia desde la etapa de ovas, seguido de larvas, alevinos y su desarrollo en truchas jóvenes y adultas, para terminar en la cosecha y venta al comercio, considerando como las etapas de mayor riesgo e incertidumbre por el alto índice de mortalidad, las ovas, las larvas y los alevinos (FAO, 2014). Esto debido a la sensibilidad a cambios de algunas variables críticas presente en el agua, tales como oxígeno disuelto, temperatura, turbidez y pH que ocasionan un índice de mortalidad mayor al 70 %. Es por ello que, la presente investigación tiene como objetivo implementar un sistema IoT y recolección de datos para el monitoreo de variables críticas, cumpliendo con el objeto de realizar un estudio y la implementación de tecnologías IoT, con el fin de hacer seguimiento a variables que influyen en la mortalidad en las etapas tempranas de crecimiento de esta especie. Además, contar con análisis de datos obtenidos a partir del cual se crea una herramienta de visualización (plataforma IoT) y un sistema de alarma que advierta sobre eventos en tiempo real. Por último, se establece un análisis que destaca las ventajas y desventajas en la implementación de la solución planteada y, de este modo, brinda resultados óptimos que benefician la producción de la empresa.

2. Estado del arte

El término Industria 4.0 surge en el 2011 en Alemania. El propósito de este término se relaciona con el descubrimiento de la fábrica inteligente, una visión de lograr una fabricación digitalizada obteniendo procesos interconectados por medio del Internet de las cosas (IoT). Por lo tanto, se conoce como el siguiente nivel de la revolución industrial, que se enfoca al Internet industrial de las cosas. La Industria 4.0 es la evolución de la industria, es la unión o fusión del proceso industrial con el internet mediante la implementación de componentes inteligentes con características o identidades digitales propias para facilitar su monitoreo, control y mantenimiento a distancia (Basco; Beliz; Coatz; Garnero, 2018). Las tecnologías que actualmente están impulsando esta industria, se basan en sistemas embebidos con características de código abierto y con dispositivos System on Chip (SoC) que es un componente que integra lo necesario para que un sistema funcione. Está compuesto por procesador, memoria RAM, almacenamiento y controladores de entrada y salida. Algunos ejemplos se basan en la integración de microcontroladores con SoC, como Arduino e interfaces Atheros (Arduino Yún) o periféricos, como esp8266 y esp32. Otros dispositivos usados incluyen módulos de procesamiento de señales digitales y gráficos con reducción de instrucciones (RISC) que incluyen un sistema operativo, como Raspberry. El uso de plataformas IoT se caracteriza por que los dispositivos estén interconectados, generando un ecosistema propio. Dicho de otra forma, es el software que conecta el hardware, punto de acceso y redes de datos que, en general, puede ser la interface de usuario (Cárdenas, 2016). A continuación, se indica la aplicación de tecnologías IoT en los procesos de piscicultura.

La comunidad mundial se enfrenta a crear alternativas de alimentación y nutrición a una población creciente con recursos finitos (Dussán; Vanegas; Chavarro; Molina, 2016). Dada esta situación, la Organización Mundial de la Salud (OMS), en la creación de estrategias orientadas a dichas necesidades, opta por recomendar el consumo de pescado como complemento alimenticio a la canasta familiar. A este respecto, Dussán; Vanegas; Chavarro; Molina (2016) en su proyecto de monitoreo de parámetros físico-químicos aplicado a cultivos de tilapia en su etapa de engorde, definen un sistema para determinar la mortalidad presente. Mediante su aplicación móvil concluyeron que la variable que más influyó en la mortalidad fue la variación de oxígeno. Por su parte, Basto; Pinzón (2016) desarrollan un sistema de monitoreo de cultivos de trucha arcoíris, el cual realiza vigilancia y corrección del estado en el hábitat de la especie. Las variables de medición son oxígeno disuelto, caudal y temperatura del agua. Además, para corrección, proponen un método de recirculación de agua. La transferencia de datos se realiza mediante un sistema Global para las telecomunicaciones móviles (GSM) hacia una plataforma web. Por otro lado, Navarro; Padilla; Prías (2013) con su sistema de instrumentación de medición de temperatura, pH y oxígeno aplicado a un estanque artificial, recoge datos en un archivo de texto (txt) para su posterior análisis. En el caso de Polania (2017) propone un sistema de automatización en medianos y pequeños acuicultores, cuyo propósito es analizar el comportamiento de las variables de oxígeno, pH y temperatura

para determinar la mortalidad en alevinos. Con los datos obtenidos y mediante un control fuzzy determina la modulación por ancho de pulso (PWM) que activa la bomba de oxígeno. En cuanto a Rocher; Parra, Taha; Lloret (2017) plantean una red de sensores para el registro de datos de turbidez, temperatura en varios tanques. Utilizando el nodo llamado Flyport que envía los datos a un servidor HTTP para visualizar y crear alertas como un mecanismo de seguridad o control.

La producción de carne de pescado se obtiene a partir de dos componentes: la pesca y la acuicultura. La primera hace referencia a la captura y en la segunda al cultivo. Básicamente, la acuicultura en Colombia está concentrada en cuatro especies. En la denominada continela principal es la tilapia o mojarra, como bien se conoce en el Huila, que es el principal productor nacional acuícola. Le siguen la trucha y la cachama, que de las tres esta última es la única especie nativa (AGRONEGOCIOS, 2015).

En Colombia, los principales departamentos productores son Antioquia, Boyacá y Cundinamarca, sin embargo, en los últimos años se ha extendido al Cauca, Huila, Nariño y Santander, departamentos que aportan menor producción, pero se destacan por su calidad. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2020), de la producción piscícola del país al menos el 15.35 % hace referencia a la trucha, entre tilapia roja y cachama. Con respecto a la piscicultura Acuímano se trabaja con ejemplares de trucha tipo francesa (mezcla de trucha arcoíris y salmo), desde el proceso inicial de cultivo con aproximadamente 500.000 ovas por mes, a través de sus fases de criado: larvas, alevinos, juveniles, de levante y engorde. En este proceso, se presenta la probabilidad estimada de mortalidad desde el 10 % hasta un 80 % reportadas por la empresa. La principal problemática identificada en este contexto es el clima, puesto que ello se refleja en el nivel y la turbidez del cauce que abastece el río San Jorge, de donde se provee este fluido en grandes volúmenes, por lo que, tanto en invierno como en verano se ve afectado el caudal del agua.

La producción de trucha arcoíris u *Oncorhynchus mykiss*, se divide en las siguientes etapas (Martinez, 2012):

Tabla 1.
Etapas de trucha

Etapas	Descripción	Imagen (esta investigación)
Ovas	Considerada la etapa más crítica. Estos huevos fértiles y su eclosión en condiciones normales pueden presentarse entre 10 a 15 días en incubación.	
Larvas	Se considera como la etapa en donde la larva sale del saco vitelino, a partir de aquí, inicia su crianza externa.	

Etapa	Descripción	Imagen (esta investigación)
Alevino	Los peces miden entre 3 a 10 cm, en esta etapa ya tienen características de adulto, son más activos y pueden atrapar sus presas.	 A photograph showing a large number of small, young trout (alevinos) swimming in a tank. A white ruler is placed diagonally in the water to provide a scale reference.
Juvenil	Los alevinos pesan en promedio entre 20 a 100 g y su tamaño oscila entre los 10 a 15 cm.	 A photograph showing a large number of juvenile trout swimming in a tank. A white ruler is placed horizontally in the water to provide a scale reference.
Engorde	Después de los 15 cm se considera apta para la cosecha.	 A photograph showing a single, larger trout swimming in a tank.

Fuente: Martinez (2012).

Dentro de la producción de trucha se identifican las siguiente variables físicas:

Tabla 2.

Variables físicas

Variable	Descripción
Temperatura	El rango óptimo recomendado para el levante debe estar entre los 10 a 17 °C. Valores inferiores afectan el desarrollo y superiores aumenta la propagación de enfermedades.
Oxígeno disuelto	El valor de concentración de oxígeno recomendado debe ser superior a 5.5 mg/L. Valores inferiores ocasionan efectos de estrés, afectando el crecimiento y causando la muerte del pez.

Variable	Descripción
pH	Se recomienda ambientes acuáticos con pH ligeramente alcalinos. El rango óptimo debe estar entre los 7,0 y 8,0. Valores superiores a 9,0 e inferiores a 6,0 pueden ocasionar enfermedades en las branquias que producen la muerte del pez.
Turbidez	Característica presentada en el agua cuando pierde su transparencia, debido a partículas en suspensión. Estas obstruyen el sistema respiratorio de los peces ocasionando enfermedades en las branquias y la muerte del pez.

Fuente: Instituto del Mar del Perú [IMARPE] (2015).

3. Metodología

Como todo proceso investigativo, según la necesidad, se debe seleccionar la ruta adecuada para encontrar posibles soluciones, por lo tanto, este proyecto está enfocado en investigación descriptiva y de campo. En el transcurso de esta investigación optada como descriptiva, se selecciona un caso de estudio que es la mortalidad en ovas y alevinos. A continuación, se especifica la empresa en donde se adecúa el contexto que permita realizar la investigación de campo. En este caso, la piscicultura Acuímayo facilitó sus instalaciones. Con la necesidad planteada, se procede a la recolección de datos basados en teoría, tales como libros, páginas web, artículos y revistas, entre otras, las cuales permiten identificar qué factores se asocian con el comportamiento y la mortalidad. Luego se clasifica la información y se definen las variables críticas en la crianza de trucha.

En la Figura 1 se presenta un diagrama para una posible solución. En ésta se indican bloques de sensores que captan las variaciones de las variables mencionadas. Las implementaciones de los sensores se realizan en los tanques 1 y 2. Los datos obtenidos pasan al módulo de procesamiento, para dicho caso un Arduino mega. Los datos obtenidos son transformados en información y son visualizados en campo mediante una Liquid Crystal Display (LCD). Para el caso de IoT se agrega el módulo con un SoC 8266 que utiliza protocolo WiFi. Éste se enlaza con Arduino y los datos o información obtenida es enviada a una plataforma IoT para luego ser visualizada por el operario mediante el uso de internet.

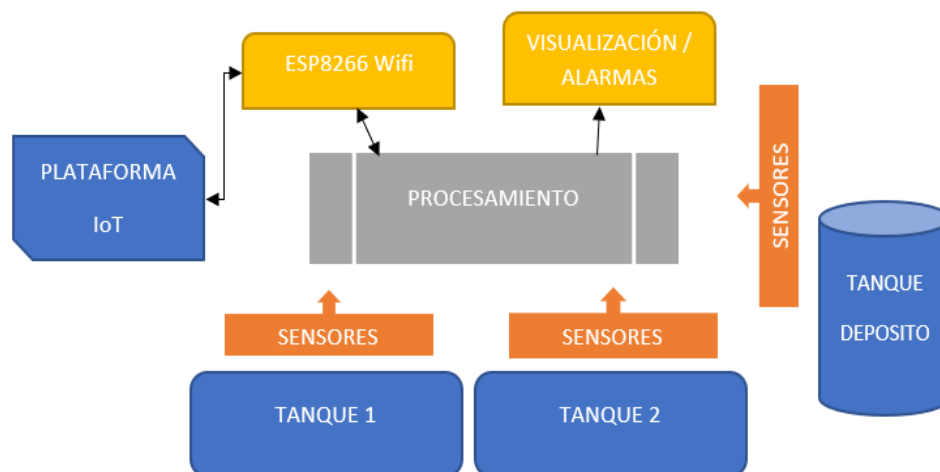


Figura 1. Arquitectura propuesta para la implementación del sistema

Fuente: elaboración propia.

A partir de dicha información, se obtuvo un sistema IoT para el monitoreo de variables de temperatura, oxígeno, pH y turbidez. En la selección de tecnologías para captar datos, visualización y procesamiento, se realizó una comparación de características, precios, facilidad de uso y robustez. Con respecto a la visualización se divide en: campo, donde se utiliza una pantalla LCD que indica el valor medido por los sensores y en el uso de una plataforma IoT. Para el desarrollo de la investigación, se seleccionó un tanque de prueba con alevines (Figura 2) cuya agua provenía directamente del río San Pedro.



Figura 2. Tanques de crianza, empresa Acuímayo
Fuente: elaboración propia.

Luego de determinar el área de trabajo y las variables, se procede a seleccionar los sensores que se describen a continuación.

Temperatura: para la selección de este sensor se define el rango de medición, que sea sumergible en agua y de fácil interpretación de los datos obtenidos, por lo tanto, se seleccionó un sensor digital tipo sonda con referencia 18b20 que se caracteriza por usar material en acero inoxidable. Su rango de medición es de -55 a 125 °C (Figura 3) (Maxim integrated, 2019).



Figura 3. Sensor de temperatura 18b20
Fuente: elaboración propia.

pH: se requiere un sensor con características de trabajo en bajas temperaturas y con aplicaciones en acuicultura y de fácil adquisición, por lo tanto, se selecciona un sensor análogo, con interfaz de calibración y con rango de medición de 0 a 14 (Figura 4) (DFROBOT, 2019a).



Figura 4. Sensor de pH
Fuente: elaboración propia.

Turbidez: para la medición de esta variable, se requiere un sensor para trabajo en ríos, aguas residuales y acuicultura, con un rango de medición entre los 0 a 3000 NTU, donde Nephelometric Turbidity Unit (NTU) es la unidad que mide la turbidez en un fluido y se cuantifican en mg/L o PPM (partes por millón) (Engineering, 2019). Basado en las anteriores características, se selecciona el sensor del fabricante DFROBOT (Figura 5) (DFROBOT, 2019b).

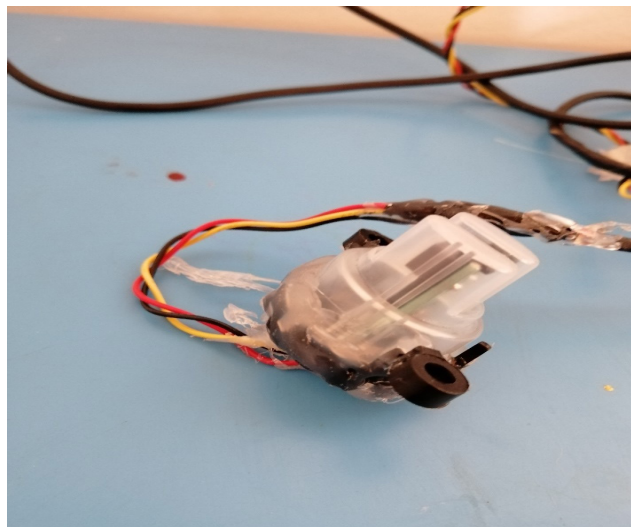


Figura 5. Sensor de turbidez analógico
Fuente: elaboración propia.

Oxígeno disuelto: para la selección del dispositivo de medición, se requiere un sensor que mida la cantidad disuelta de oxígeno y el porcentaje de saturación en el agua. Debe tener aplicaciones en hidroponía, acuicultura y monitoreo ambiental. El sensor que cumple las anteriores características, además de fácil adquisición, es de la empresa ATLASSCIENTIFIC. Su comunicación es de forma digital y su rango de medición es de 0 a 100mg/L y 0,1 a 400 % de saturación (Figura 6) (ATLASSCIENTIFIC, 2019).



Figura 6. Sensor de oxígeno disuelto
Fuente: elaboración propia.

3.1 Adquisición y adecuación de señales

Arduino es una plataforma electrónica de código abierto que se basa en dispositivos hardware y software. Son herramientas didácticas, de fácil uso y es usado en proyectos de investigación por su aplicabilidad. En sus dispositivos hardware, se diferencian en cantidades de pines de entradas y salidas, tipo de comunicaciones y velocidad de procesamiento, entre otras (Arduino, 2019). El módulo de procesamiento seleccionado es la board Mega 2560 (Figura 7). El propósito de esta selección es debido a la velocidad de procesamiento (16Mhz), a sus puertos de comunicación físicos UARTs (comunicación serial RS-232) dado que, en la selección de componentes, su conectividad a hardware requiere de esta comunicación y a sus 54 pines digitales (entrada/ salida). Además, Arduino facilita la obtención de librerías de los sensores y conexión con elementos hardware (Arduino, 2019).

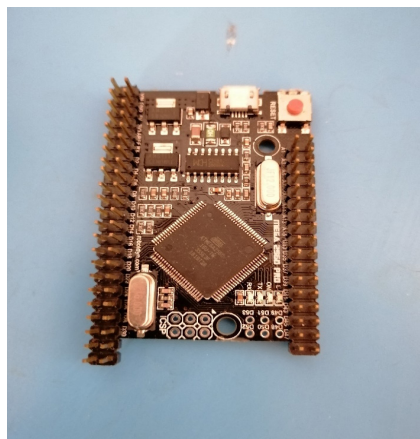


Figura 7. Arduino Mega 2560 en su versión mini
Fuente: elaboración propia.

4. Comunicaciones

Para el uso de IoT, la empresa Acuímayo cuenta con conexión de internet satelital. Además de un router WiFi, por lo tanto, se selecciona el protocolo de comunicación WiFi y este se debe vincular a la board Arduino. Para dicho enlace, se usa el módulo ESP8266 (Figura 8), el cual es un chip WiFi de bajo costo que funciona con el protocolo TCP/IP (Arduino, 2019).

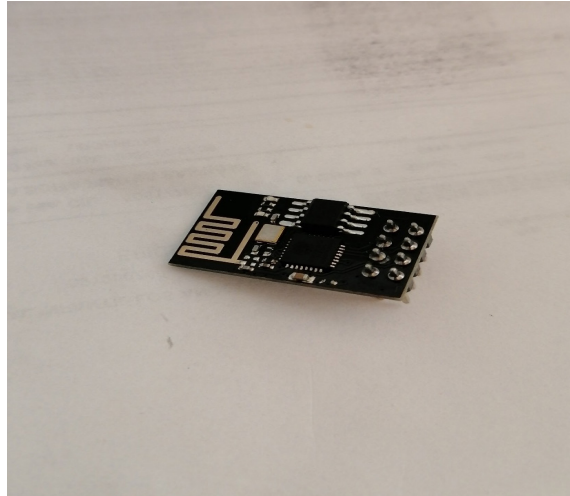


Figura 8. Módulo de comunicaciones WiFi ESP8266
Fuente: elaboración propia.

5. Visualización y plataforma IoT

El sistema utilizó dos métodos como medio de comunicación. El primero usado para la visualización en campo, se basa en el uso de una LCD de 3,5 pulgadas y con comunicación UART como se indica en la Figura 9.



Figura 9. Visualización de datos en campo
Fuente: elaboración propia.

El segundo método de visualización se basa en el uso de plataformas IoT. Para la selección de ésta, se tiene en cuenta la cantidad de dispositivos de conexión, tiempo de adquisición de datos, almacenamiento de datos, forma de visualización y facilidad de uso en su versión demo. La plataforma IoT seleccionada fue ThingsBoard, la cual es una plataforma de código abierto, de fácil uso, que permite un rápido desarrollo,

administración y escalado de proyectos de IoT (ThingsBoard, 2019). Esta plataforma, en su forma de demo, permite la conexión de seis dispositivos y el rango mínimo de recepción de datos es de un segundo. Además, su condición demo no tiene vencimiento en comparación a otras. En la Figura 10 se indica el diseño usado para el monitoreo de variables en la empresa Acuímayo.

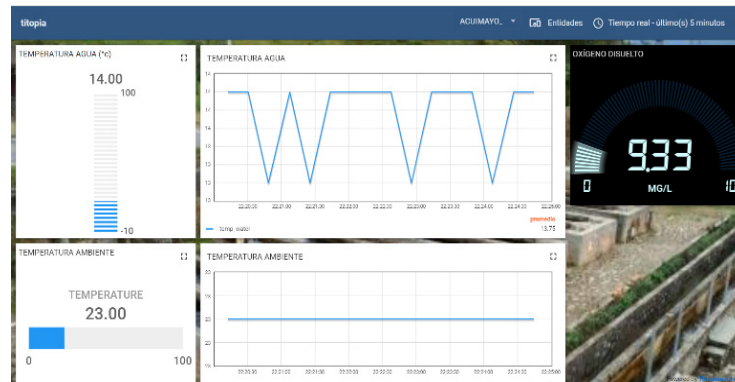


Figura 10. Dash board o plataforma IoT aplicada al monitoreo
Fuente: elaboración propia.

Además, cuenta con el servicio de creación de alarmas y de notificaciones usando Telegram, que es un sistema de mensajería instantánea semejante a WhatsApp. Telegram bot son cuentas de Telegram operadas mediante software y no personas, de las que algunas cuentan con características de inteligencia artificial. En sus funciones se encuentran enseñar, jugar, buscar y transmitir hasta integrarse con servicios o comandos de IoT. En la Figura 11 se indica el uso de Telegram bot como sistema de aviso de alarmas generadas por la plataforma.

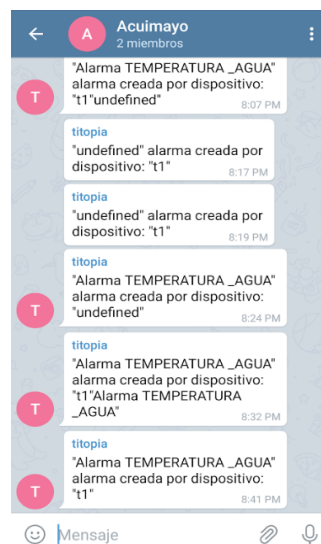


Figura 11. Alarmas mediante la aplicación Telegram
Fuente: elaboración propia.

6. Procesamiento adquisición y calibración

Después de obtener mediciones o datos a partir del uso de los sensores de temperatura, pH, turbidez, humedad y oxígeno disuelto, el paso siguiente es la calibración que consiste en eliminar datos erróneos y obtener datos válidos. Para esto se usa la información suministrada por los fabricantes y se realiza un muestreo de datos para eliminar datos (de valor más alto y bajo) y reducir el error de medición. Un ejemplo de estos es la adecuación del sensor de turbidez cuya interpretación se relaciona con unidades NTU y se cuantifica en mg/L o PPM, donde el rango está entre los 0 y 3000 NTU (de menor a mayor turbidez) (Engineering, 2019). La ecuación de segundo orden que representa las relaciones entre turbidez y voltaje (Ecuación 1 tomada de Engineering, 2019) es:

$$y = -1120.4x^2 + 5742.3x - 4352.9$$

Donde y corresponde al voltaje entregado por el sensor, y la variable x a unidades NTU (Figura 12).

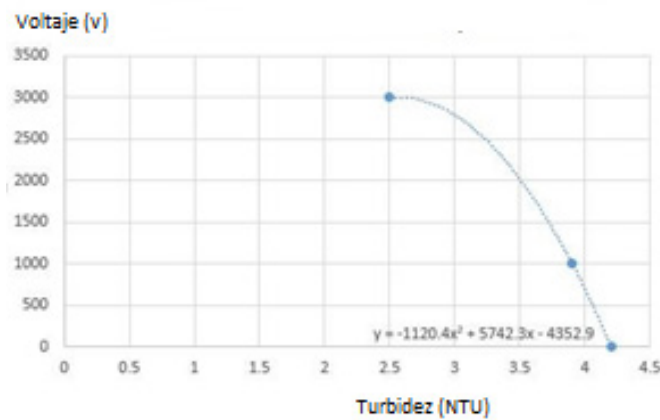


Figura 12. Relación entre turbidez y voltaje
Fuente: adaptado de DFROBOT.

7. Resultados

Al incursionar en el sector acuícola, en especial en la empresa Acuímayo, se da a conocer cómo tradicionalmente o de forma empírica tratan de mejorar sus procesos mediante el método de ensayo y error, el cual puede obtener beneficios a largo plazo y otras pérdidas parciales o totales de sus cultivos de trucha. Para solventar esta situación, se instala un sistema IoT que monitoree las variables de temperatura del agua y ambiente, humedad ambiente, oxígeno disuelto, turbidez y pH en la etapa de alevinos (Figura 13).



Figura 13. Sistema de monitoreo implementado en tanque de alevinos
Fuente: elaboración propia.

El sistema instalado presentó la siguiente información: la temperatura de agua no varía y se mantiene en el rango ideal para alevinos (11 a 13 °C). La turbidez del agua aumenta, debido a factores naturales ocasionados por lluvias o deslizamientos. Esto causa taponamiento de tuberías con lodo, por lo tanto, ocasiona muerte a alevinos por la obstrucción en sus branquias (suciedad), por la reducción de oxígeno o por la falta de alimentación, debido a que no pueden ver el alimento. Con el sensor de turbidez, se generan alarmas tempranas para reducir la mortalidad mediante un sistema de recirculación. En la Figura 14 se muestra el agua turbia que llega a los estanques de crianza.



Figura 14. Tanque de alevinos con aumento de turbidez en el agua
Fuente: elaboración propia.

Con el sensor de oxígeno, se monitorea la conservación de las condiciones ideales. La medición obtenida osciló entre los 8,0-9,5 mg/L. La población en promedio en cada tanque es de 100.000 alevinos, debido a factores como desbordamientos del río, la turbidez aumenta ocasionando una mortalidad entre un 20 % y 50 % (Figura 15).



Figura 15. Mortalidad de alevinos debido a la turbidez del agua
Fuente: elaboración propia.

El método de corte de agua principal en el caso de aumento de turbidez (cierre de válvulas), también ocasiona un porcentaje de mortalidad. Esta incertidumbre ha estado presente en la empresa, debido a que era una posible solución para evitar que el lodo ingresará a los estanques. Para determinar la posible causa,

se realizó la siguiente prueba: al iniciar la prueba se registra un valor inicial de 9,5mg/l de oxígeno, luego se suspende la fuente principal de agua en un estanque. Posteriormente, pasados 20 minutos la medida de oxígeno fue de 7,22 mg/L (límite mínimo recomendado), por lo cual se deduce que la falta de oxígeno ocasiona la mortalidad, debido a que Acuímayo corta la fuente de agua por más de 60 minutos (duración de la turbidez). La solución inmediata fue la implementación de un sistema (*blower*), que consiste en un soplador de aire que, mediante mangueras y difusores (Figura 16), se distribuye a cada tanque para crear burbujas de aire y aumentar el tiempo de oxigenación en el tanque. Al instalar este sistema se obtuvo que el oxígeno se restableció en niveles entre los 6.9 mg/L y 7.2 mg/L, lo cual disminuyó la mortalidad, garantizando que este sistema redujera la turbidez. Inicialmente la medida fue de 1965 NTU, pero con el sistema blower se redujo en 973 NTU.



Figura 16. Implementación de *blower* y membrana para producción de burbujas de aire
Fuente: elaboración propia.

El comportamiento de alevinos en estado inicial (9,5 mg/L), se distribuía en el tanque y era estacionario (Figura 17). Sin embargo, mientras el oxígeno se reducía, el comportamiento cambió y era más lineal (Figura 18). En próximos trabajos se pueden incluir métodos con visión artificial u otros procedimientos para detectar la ausencia de oxígeno.



Figura 17. Comportamiento de alevinos con 9,5 mg/L oxígeno
Fuente: elaboración propia.



Figura 18. Comportamiento de alevinos con 7,2 mg/L oxígeno
Fuente: elaboración propia.

Los datos obtenidos por los sensores (Figura 19), fueron almacenados en un servidor de la plataforma, con el propósito de crear un Bigdata y según el análisis obtenido, desarrollar la etapa de control del sistema.

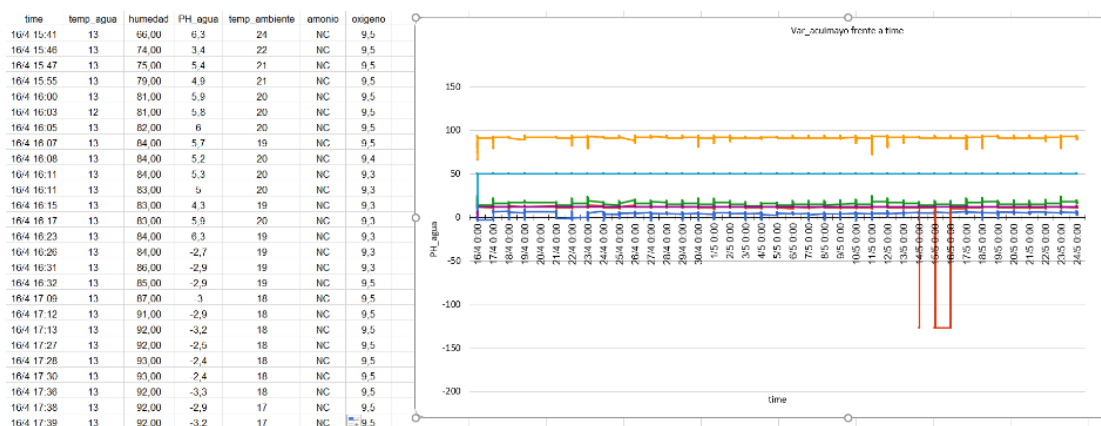


Figura 19. Datos de los sensores almacenados en la nube
Fuente: elaboración propia.

8. Conclusiones

La implementación de distintas estrategias para la toma y el análisis de variables que afectan el entorno y desarrollo acuícola, brindan la oportunidad de generar estabilidad dentro de las empresas en desarrollo. Además, permite contar con tecnología de última generación a un bajo costo, siendo los componentes que integran el sistema de fácil disponibilidad en el mercado actual. Los resultados obtenidos, a pesar de un costo inicial, y la introducción de nuevas tecnologías al proceso acuícola, hacen que esta inversión se vea compensada con la reducción en la mortalidad de truchas, disminuyendo los costos de producción y pérdidas económicas. Al implementar soluciones tecnológicas de cuarta revolución, se puede considerar que el factor de conectividad a internet es un inconveniente importante, como en el caso de la empresa Acuímayo que utiliza conexión satelital deficiente.

Según los resultados mostrados, y con el propósito de reducir la mortalidad y disminuir las pérdidas económicas en la empresa Acuímayo, surgen soluciones que permiten conocer, monitorear y mejorar los entornos

de desarrollo de la trucha arcoíris, con la finalidad de implementar sistemas de automatización, como el control de recirculación de agua mediante el monitoreo de turbidez, o el sistema de aireación mediante la activación del *blower*. La introducción de avances tecnológicos, como la monitorización remota mediante plataformas IoT, ha facilitado la vigilancia por parte de los encargados del cuidado de la trucha, incluso, en horario nocturno. Además, se logra observar que el comportamiento de los alevinos en los estanques varía de acuerdo a la cantidad de oxígeno presente. A mayor cantidad de oxígeno se distribuyen circularmente en el estanque, mientras que a menor cantidad de oxígeno su desplazamiento se presenta de forma lineal. Se considera en próximas etapas del estudio la implementación de estrategias para controlar las variables monitoreadas actualmente en dicha piscícola.

Referencias

- AGRONEGOCIOS (2015). *Piscicultura en Colombia crece a un promedio anual de 7 %*. Recuperado de: <https://www.agronegocios.co/ganaderia/piscicultura-crece-a-un-promedio-anual-de-7-2621457>
- ATLASSCIENTIFIC (2019). *Dissolved Oxygen Kit*. Recuperado de: https://www.atlas-scientific.com/product_pages/kits/do_kit.html
- Arduino (2019). *ARDUINO MEGA 2560*. Recuperado de: <http://arduino.cl/arduino-mega-2560/>
- Basco, Ana; Beliz, Gustavo; Coatz, Diego; Garnero, Paula (2018). *Industria 4.0: Fabricando el Futuro*. Buenos Aires, Argentina: Inter-American Development Bank. <http://dx.doi.org/10.18235/0001229>
- Basto, Ana; Pinzón, Julian (2016). *Sistema de control para un hábitat estable de truchas arcoíris* (tesis de pregrado). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Cárdenas, Álvaro (2016). *¿Qué es una plataforma IoT?* Recuperado de: <https://secmoti.com/plataforma-iot/>
- DFROBOT (2019). *Analog pH Sensor*. Recuperado de: <https://www.dfrobot.com/product-1110.html?search=pH&page=2>
- DFROBOT (2019b). *Analog Turbidity Sensor for Arduino*. Recuperado de: <https://www.dfrobot.com/product-1394.html?search=turbi>
- Dussán, Sergio; Vanegas, Oscar; Chavarro, Adrián; Molina, Johan (2016). Diseño e implementación de un prototipo electrónico para monitoreo de parámetros físico-químicos en cultivo de tilapia a través de una aplicación móvil. *Informador Técnico*, 80(1) 49-60. <https://doi.org/10.23850/22565035.32>
- Engineering (2019). *¿Qué es la NTU?* Recuperado de: <https://www.tecnconverting.es/articulos-tecnicos/que-es-la-ntu/>
- FAO (2014). *Manual práctico para el cultivo de la trucha arcoíris*. FAO: Guatemala.
- FAO (2020). *National Aquaculture Sector Overview. Visión general del sector acuícola nacional*. Colombia. Recuperado de: http://www.fao.org/fishery/countrysector/naso_colombia/es
- IAC (2018). *¿Qué es IoT?* Recuperado de: <https://www.iac.com.co/que-es-iot/>

- Instituto del Mar del Perú (2015). Guía para la incubación y alevinaje de trucha arcoíris *Oncorhynchus mykiss*. *Serie de Divulgación Científica*, 1(3). 1-73. Martínez, Antonio (2012). *Evaluación de cría, levante y engorde de trucha arcoíris*. Recuperado de:
<https://www.monografias.com/trabajos96/evaluacion-cria-levante-y-engorde-trucha-arcoiris-colombia/evaluacion-cria-levante-y-engorde-trucha-arcoiris-colombia.shtml>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2016). *Colombia se afianza como el segundo exportador de trucha y tilapia a Estados Unidos*. Recuperado de:
<https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/colombia-se-afianza-como-exportador-de-trucha-y-tilapia.aspx>
- Maxim integrated (2019). *Sensors*. Recuperado de:
<https://www.maximintegrated.com/en/products/sensors.html>
- Navarro, Álvaro; Padilla, José; Prías, Jhon (2013). Construcción de un Sistema de Instrumentación para la Medición de la Temperatura, pH y Oxígeno Disuelto presentes en la Piscicultura bajo Condiciones de Estanque Artificial. *Scientia et Technica*, 18(2), 401-408.
<https://doi.org/10.22517/issn.2344-7214>
- Parra, Jair (2019). *En noviembre Llegará a Islandia la primera Exportación de Tilapia Colombiana*. Recuperado de:
<https://sioc.minagricultura.gov.co/Acuicultura/Pages/default.aspx>
- Polania, Néstor (2017). *Propuesta de automatización para proceso piscícola*. Recuperado de:
<http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/6435/1/PolaniaVargasNestorEduardo2017.pdf>
- Rocher, Javier; Parra, Lorena; Taha, Miran; Lloret, Jaime (2017). Diseño de una red de sensores para monitorizar una instalación acuícola. *XIII Jornadas de Ingeniería Telemática - JITEL2017* (pp. 48-54). Valencia, Spain.
<http://doi.org/10.4995/JITEL2017.2017.6623>
- ThingsBoard (2019). *ThingsBoard Documentation*. Recuperado de:
<https://thingsboard.io/docs/getting-started-guides/what-is-thingsboard/>

Uso de residuos de construcción y demolición como material cementicio suplementario y agregado grueso reciclado en concretos autocompactantes

Use of construction and demolition waste as supplementary cementitious material and recycled coarse aggregate in self-compacting concrete

Yimmy Silva-Urrego¹
Silvio Delvasto-Arjona²

¹ Universidad del Valle (Colombia). Correo electrónico: yimmy.silva@correounivalle.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3888-457X>

² Universidad del Valle (Colombia). Correo electrónico: silvio.delvasto@correounivalle.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9443-8238>

Recibido: 08-11-2019 Aceptado: 28-10-2020

Cómo citar: Silva-Urrego, Yimmy; Delvasto-Arjona, Silvio (2020). Uso de residuos de construcción y demolición como material cementicio suplementario y agregado grueso reciclado en concretos autocompactantes. *Informador Técnico*, 85(1), 20-33.
<https://doi.org/10.23850/22565035.2502>

Resumen

En los últimos años, el uso del concreto autocompactante (CAC) ha ido aumentando desde su inicio, debido a la capacidad que tiene para llenar encofrados con alta densidad de aceros, por lo que el empleo de este tipo de concreto en la elaboración de muros delgados armados sería una solución al llenado incompleto de este tipo de elementos prefabricados. Por otra parte, el empleo de residuo de mampostería (RM) y agregado grueso reciclado de concreto (AGR) proveniente de residuos de construcción y demolición (RCD) como reemplazo del cemento (20 % en volumen) y del agregado grueso, respectivamente, daría un enfoque sostenible al concreto autocompactante. El objetivo de este estudio fue evaluar la influencia de los RCD en las propiedades en estado fresco (flujo de asentamiento, embudo en V y caja en L) y estado endurecido (resistencia a la compresión, tracción indirecta y compresión diagonal de muretes) de concretos autocompactantes. Las mezclas de CAC propuestas muestran que cuando se sustituye el cemento Portland y el agregado natural por RM y AGR, respectivamente, los concretos pueden satisfacer los requerimientos de las directrices europeas de *European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete* (EFNARC por sus siglas en inglés). En estado endurecido, los CAC con RCD lograron un desempeño aceptable en comparación con la mezcla de referencia (CAC-referencia). Todas las mezclas lograron una resistencia a la compresión superior a los 21 MPa (28 días), adecuada para muros divisorios de casas, de acuerdo al Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR 10).

Palabras clave: concreto autocompactante; residuo de mampostería; agregado grueso reciclado, resistencia a la compresión; muretes.

Abstract

In the last year, the use of self-compacting concrete (SCC) has been increasing since its start due to the capacity it has to fill formwork with a high density of steels, so the use of this type of concrete in the elaboration of reinforced thin walls would be a solution to incomplete filling of this type of prefabricated elements. On the other hand, the use of masonry residue (RM) and recycled coarse concrete aggregate (AGR) from construction and demolition waste (CDW) as a replacement for cement and coarse aggregate respectively would give a sustainable approach to self-compacting concrete. This study aimed to evaluate the influence of CDW on the properties in the fresh state (slump flow, V-funnel, and L-box) and hardened state in cylindrical specimens (compressive strength and splitting tensile strength) and in walls (diagonal tension strength). The mixtures of CAC show that when Portland cement and natural aggregate are replaced by RM and AGR respectively, the concrete can meet the requirements of the European guidelines of the European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete (EFNARC). In the hardened state, CACs with CDW achieved acceptable performance compared to the reference mixture (CAC-reference). All mixtures achieved compressive strength greater than 21 MPa suitable for house walls according to (NSR 10).

Keywords: self-compacting concrete; masonry residue; recycled coarse aggregates; compressive strength; walls.

1. Introducción

Actualmente, en la construcción de edificios e infraestructura civil se ha vuelto muy común el uso de elementos prefabricados de concreto y uso del concreto autocompactante (CAC), debido a las diferentes ventajas que su uso promueve, como lo son la reducción del tiempo en obra y un mayor control de calidad (Wang; Kim; Cheng; Sohn, 2016; Han; Song; Liu; Huang 2019; Duan; Singh; Xiao; Hou 2020). Sin embargo, el uso de residuos de construcción y demolición (RCD) en los elementos prefabricados o en la elaboración de estructuras de concreto se ha vuelto esencial (Nibhanupudi; Rahul, 2020), ya que el uso de RCD permite reducir el impacto de estos residuos al ambiente y a la salud, así como mejorar la eficiencia de los recursos naturales disponibles (González; Gayarre; Pérez; Ros; López, 2017). Se estima que se producen más de 25 mil millones de toneladas de concreto en el mundo, lo que equivale en promedio a 1 m³ por persona (Amer; Ezziane; Bougara; Adjoudj, 2016), y al mismo tiempo se producen 10 mil millones de toneladas de RCD en todo el planeta, de las cuales Estados Unidos aporta aproximadamente 700 millones de toneladas, China aporta alrededor de 2.300 millones de toneladas y la Unión Europea más de 800 millones de toneladas (Wu; Zuo; Zillante; Wang; Yuan, 2019).

Una alternativa de solución a la problemática generada por los residuos de construcción y demolición y la alta demanda de recursos naturales es el empleo de estos residuos como agregados en la producción de concreto (Andal; Shehata; Zacarias, 2016; Ahmed; Tiznobaik; Huda; Islam; Alam, 2020; de Brito-Prado Vieira; de Figueiredo; John, 2020). El concreto endurecido se tritura y se procesa para producir agregado reciclado de concreto (ARC). En la actualidad, los ARC se emplean como material para base y subbase, relleno granular y para la elaboración de concreto y asfalto (Butler; West; Tighe, 2012; Tam; Soomro; Evangelista, 2018; Maduabuchukwu; Yap; Onn; Yuen; Ibrahim, 2020). El empleo de ARC ayuda a mitigar la deposición de los RCD, lo que contribuye a la preservación del ambiente, además de reducir los costos en la construcción, ya que cuando se utilizan estos directamente en la obra, ayuda a disminuir al mínimo los gastos de transporte, ahorro de su disposición final en vertederos, recuperación de tierras, reducción de la deforestación y extracción de agregados naturales de lechos de ríos, lagos y otras fuentes que generan problemas ambientales (Boudali; Kerdal; Ayed; Abdulsalam; Soliman, 2016; Asutkar; Shinde; Patel, 2017; Ahmed *et al.*, 2020). El uso de agregado reciclado ha venido aumentando, debido a la importancia de un desarrollo sostenible del sector de la construcción. Numerosas investigaciones se han llevado a cabo sobre el uso potencial de los agregados reciclados en la elaboración de concreto, encontrando resultados satisfactorios (Poon; Chan, 2007; Kou; Poon; Wan, 2012; Xiao; Ma; Ding, 2016; Silva; Robayo; Matthey; Delvasto, 2016; Wang *et al.*, 2017).

Los residuos de construcción y demolición presentan una composición variada de componentes, que en su gran mayoría está constituido por concreto (alrededor del 40 %) y cerámicos (alrededor del 30 %) (Oikonomou, 2005; Ozal; Yilmaz; Kara; Kaya; Şahin, 2016). Entre los materiales cerámicos se encuentran los residuos de ladrillo de arcilla cocida que generalmente están mezclados con mortero de pega basado en cemento Portland (residuo de mampostería-RM); este tipo de residuo se genera en grandes cantidades y su reutilización es posible como un *filler* o como material cementicio suplementario si presenta actividad puzolánica. El uso del RM o polvo híbrido proveniente de los RCD se ha estudiado muy poco. Sin embargo, se han obtenido resultados satisfactorios (Silva; Robayo; Matthey; Delvasto, 2015; Zhu; Mao; Qu; Li; John, 2016; Li; Lin; Chen; Kwan, 2020). El empleo de este material como suplementario del cemento Portland es una gran alternativa y más cuando se utiliza en la elaboración de concretos autocompactantes (CAC), ya que este tipo de material compuesto permite el empleo de grandes cantidades de *filler* o adiciones.

El CAC se desarrolló en Japón a finales de 1980, debido a los problemas que se presentaban en estructuras altamente reforzadas, además de los problemas en el vaciado de los concretos cuando se vibraban por operarios sin experiencia y generaban inconvenientes en la mezcla. Los CAC tienen ventajas, como menores tiempos en obra, mayor libertad de diseño, fácil llenado en elementos o estructuras densamente reforzadas sin vibración, mejora el ambiente de trabajo y presenta excelente acabado superficial (Khayat; Hu; Monty, 1999; Sun; Chen; Xiao; Liu, 2020; Surya; Venkateswara, 2020).

Este trabajo de investigación pretende facilitar el uso integral del residuo de mampostería y agregado reciclado proveniente de los RCD. La trabajabilidad del concreto autocompactante es de gran importancia, por lo que se evaluó la fluidez, capacidad de llenado y capacidad de paso mediante las pruebas de flujo de asentamiento con cono de Abrams, el ensayo del embudo en V y caja en L, respectivamente. En estado endurecido se evaluó propiedades mecánicas, como resistencia a la compresión, tracción indirecta en cilindros y compresión diagonal en muretes para determinar su desempeño mecánico y posibles aplicaciones en viviendas de los CAC desarrollados.

2. Programa experimental

2.2. Materiales

Cemento Portland Argos® de uso general, arena de río, grava triturada natural, residuo de mampostería (RM) proveniente de la demolición de muros y agregado grueso reciclado de concreto (AGR) proveniente de remodelaciones de la Universidad del Valle (Figura 1) fueron empleados para la elaboración de los CAC. El agregado grueso natural (AGN) y reciclado (AGR) se adecuaron con un tamaño máximo de 12,7 mm para su empleo. El residuo de mampostería se sometió a un proceso de molturación en dos etapas. En primera instancia, el RM se realizó una reducción de tamaño mediante una trituradora de mandíbula y luego en un molino de bolas, donde se obtuvo un tamaño medio de partícula de 26,6 μm . También, se evaluó el índice de actividad de resistencia (IAR) de acuerdo con la ASTM C618, donde el RM presentó un valor de 82,6 %, siendo adecuado mecánicamente como material puzolánico, ya que superó el límite establecido (75 %). Para el AGR se realizó una trituración manual mediante el empleo de una porra y posterior a ello se pasó por una trituradora de mandíbula con una abertura adecuada para obtener un tamaño máximo de 12,7 mm y así cumplir con uno de los requerimientos expuestos en la EFNARC para la producción de CAC (EFNARC, 2002). Se empleó un superplastificante (SP) SikaPlast MO de última generación para lograr una adecuada trabajabilidad. La composición química del cemento Portland y el RM se muestran en la Tabla 1.



Figura 1. (a) Residuo de mampostería y (b) Residuo de concreto
Fuente: elaboración propia.

Tabla 1.

Análisis de FRX del cemento Portland (OPC) y residuo de mampostería (RM)

Oxido/elemento	OPC (% en masa)	RM (% en masa)
SiO ₂	19,13	54,09
TiO ₂	0,26	0,88
Al ₂ O ₃	4,42	15,51
Fe ₂ O ₃	4,32	9,84
Mn ₃ O ₄	0,03	-
MgO	1,6	3,50
CaO	57,7	8,73
Na ₂ O	N.D	1,93
K ₂ O	0,28	1,30
P ₂ O ₅	0,17	0,20
SO ₃	2,32	-
LOI	9,78	3,47

N.D: No determinado. LOI: Pérdida al fuego

Fuente: elaboración propia.

La distribución del tamaño de partícula de los agregados se evidencia en la Figura 2. La arena presenta un módulo de finura de 2,55 mientras que los agregados gruesos (AGN y AGR), un tamaño máximo de 12,7 mm. En la Figura 2, también se puede observar que el AGR presenta una mayor finura que el AGN, lo que significaría una mayor demanda de agua, debido a una mayor área superficial. Por otra parte, en la Tabla 2 se muestra que el AGR presenta una absorción de 7,28 % debido al mortero adherido que le confiere una mayor porosidad, la cual es mayor que la presentada por el AGN. La pérdida de trabajabilidad por la mayor demanda de agua en los CAC con AGR se corrigió mediante el uso de una mayor dosis de superplastificante (SP), con la finalidad de mantener la relación agua/cementante constante. El Coeficiente de Los Ángeles presentado por los agregados gruesos fue de 16,39 % y 33,65 % para el AGN y AGR, respectivamente, lo que indica que son aceptables para la elaboración de concretos, ya que el Coeficiente de Los Ángeles no excedió el 50 % (ASTM C33).

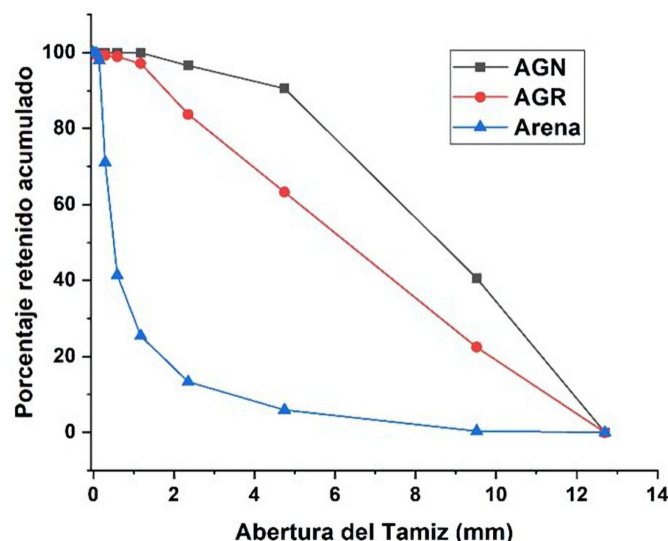


Figura 2. Distribución de tamaño de partícula de agregados para las mezclas de CAC
Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.

Características de los agregados usados para las mezclas de CAC

Ensayo	Norma	Arena	AGN	AGR
Densidad Aparente (Bulk)	NTC 237	2,57 g/cm ³	2,54 g/cm ³	2,26 g/cm ³
Absorción	NTC 237/176	1,97 %	2,01 %	7,28 %
Masa Unitaria Suelta	NTC 92	1,59 g/cm ³	1,47 g/cm ³	1,26 g/cm ³
Masa Unitaria Compacta	NTC 92	1,69 g/cm ³	1,49 g/cm ³	1,46 g/cm ³
Módulo de finura	NTC 77	2,55	6,38	5,65
Impurezas orgánicas	NTC 127	Color No. 3	-	-
Tamaño máximo	NTC 77	-	12,7 mm	12,7 mm
Coefficiente de Los Ángeles	ASTM C131	-	16,39 %	33,65 %

Fuente: elaboración propia.

2.3. Proporciones de mezcla

El diseño de mezclas de todos los CAC de este estudio se presenta en la Tabla 3. El contenido de agua se mantuvo constante en 225 kg/m³ al igual que el volumen de cementante (finos) en 16,1 %, y a todas las mezclas antes del proceso de mezclado se efectuó la corrección de humedad de los agregados. Una mezcla de control con 100 % OPC (CAC-referencia) y agregados naturales, y tres mezclas de CAC con material proveniente de RCD como reemplazo parcial del OPC y/o del AGN, fueron producidas. EL CAC con un reemplazo de 20 % de OPC por RM se denominó CAC-20 % RM, y la mezcla que presentaban reemplazó en volumen del 10 % y 59 % de AGR por AGN (la selección de este último porcentaje de AGR se realizó de acuerdo con una investigación previa de Silva; de Brito; Dhir (2015) y (Silva *et al.*, 2016), se denominaron CAC-20 % RM-10 % AGR y CAC-20 % RM-59 % AGR, respectivamente. Con el fin de satisfacer los requerimientos de trabajabilidad de *European Project Group* (EPG, 2005) para la producción de los CAC, la cantidad de SP se ajustó en un rango de 4,99-5,79 kg/m³.

Tabla 3.

Proporciones de las mezclas de CAC

	CAC	CAC-20 %	CAC-20 % RM-10 %	CAC-20 % RM-59 %
	Referencia	RM	AGR	AGR
MATERIAL	Proporciones (kg/m ³)	Proporciones (kg/m ³)	Proporciones (kg/m ³)	Proporciones (kg/m ³)
Cemento (OPC)	500	400	400	400
RM	-	83,5	83,5	83,5
AGN	623,52	623,52	561,18	252,54
AGR	-	-	55,48	323,46
Arena	946,34	946,34	946,34	946,34
Agua	225	225	225	225
Relación a/c	0,45	0,45	0,45	0,45
Aditivo SP	4,99	5,37	5,39	5,79

Fuente: elaboración propia.

2.4. Trabajabilidad

Las pruebas en estado fresco se realizaron de acuerdo con las especificaciones y directrices europeas para concretos autocompactantes (EFNARC 2002). Los resultados de las pruebas se compararon con la EPG (2005). Las pruebas que se llevaron a cabo para medir la trabajabilidad de los concretos fueron: el ensayo de flujo de asentamiento con cono de Abrams, la resistencia a la segregación por medio del ensayo de embudo en V y la capacidad de paso mediante la caja en L. Todas las pruebas se realizaron 8 minutos después de iniciar la mezcla para evitar cualquier pérdida de trabajabilidad.

2.5. Ensayos en estado endurecido

La resistencia a la compresión se realizó en probetas cilíndricas de 76,2 mm de diámetro y 152,4 mm de alto a diferentes edades de curado (28, 60 y 90 días) siguiendo la norma ASTM C39, y utilizando una prensa hidráulica ELE internacional de 1000 KN de capacidad.

La resistencia a la tracción indirecta se midió en cilindros de 76,2 mm de diámetro y 152,4 mm de alto, después de 28, 60 y 90 días de curado, de acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM C496.

El ensayo de compresión diagonal se realizó en muretes de 400 mm x 400 mm x 90 mm, de acuerdo con los lineamientos establecidos en la norma ASTM E519. Los elementos se curaron bajo agua durante un periodo de 28 días, tiempo en el cual se evaluó la resistencia. Antes de la prueba, los muretes se giraron 45 grados para que descansaran sobre la esquina inferior y se pudiera aplicar la carga vertical en la esquina superior (opuesta).

3. Resultados y discusiones

3.1. Trabajabilidad

La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos de las diferentes mezclas en estado fresco. El flujo de asentamiento (SF) de todos los CAC supera el límite inferior (550 mm) establecido por la EPG (EPG, 2005). Cuando mayor es el flujo de asentamiento, mayor es la deformabilidad del material, indicando la capacidad que tiene la mezcla

para alcanzar un área distante desde el punto de introducción del concreto (Manzi; Mazzotti; Bignozzi, 2017). Las mezclas con AGR mostraron valores de SF mayores que el CAC de referencia, esto se atribuye a la ligera cantidad mayor de superplastificante (SP) utilizada en estas dos mezclas. El CAC de referencia con 10 % y 59 % de AGR de acuerdo con esta prueba (flujo de asentamiento), se clasifica como SF1, apropiado para estructuras no reforzadas o ligeramente reforzadas y fundiciones mediante bombas y secciones pequeñas donde el flujo horizontal no es prolongado. Por otro lado, el CAC con 20 % de RM se clasifica como SF2, apropiado para diversas aplicaciones como paredes y columnas (EPG, 2005).

La prueba de embudo en V permite evaluar la viscosidad y la capacidad de llenado, encontrando que la presencia de RM y una mayor dosis de SP en el CAC generó un menor tiempo de flujo, sin embargo, cuando al CAC con RM presentó en su dosificación AGR, el tiempo de flujo en el embudo en V aumentó, esto atribuido a la mayor rugosidad y angularidad (Santos; da Silva; de Brito, 2019). Las mezclas se clasifican de acuerdo a esta prueba como VF1, indicando que todos los CAC presentan una buena capacidad de llenado (EPG, 2005). La prueba de caja en L evalúa la habilidad que tiene el concreto para pasar a través de armaduras y refuerzos. Se encontró que el índice de capacidad de paso ($H2/H1$), el cual es la relación de alturas de la sección horizontal ($H2$) y vertical ($H1$), disminuye a medida que aumenta el contenido de AGR. Sin embargo, se obtuvieron valores dentro del rango de aceptabilidad ($\geq 0,80$), de acuerdo con la EPG y se clasifican como PA2 (EPG, 2005). Las mezclas mostraron un buen desempeño en estado fresco.

Tabla 4.

Resultados de los ensayos de trabajabilidad de las mezclas de CAC

Prueba	CAC Referencia	CAC-20 % RM	SCC-20 % RM-10 % AGR	SCC-20 %-59 % AGR
Flujo de asentamiento (mm)	600	660	640	630
Caja en L ($H2/H1$)	0,80	0,85	0,83	0,82
Embudo en V (s)	3,84	3,31	3,63	3,52

Fuente: elaboración propia.

3.2. Resistencia a la compresión

Los resultados de resistencia a la compresión de las mezclas de CAC se presentan en la Figura 3. En general, las mezclas en las diferentes edades de curado que contenían RCD en su composición presentaron una disminución de la resistencia a la compresión. Una disminución del orden del 12,3 % en la resistencia a la compresión a los 28 días de curado se observó cuando se reemplazó el 20 % de OPC por RM en ese mismo periodo, siendo congruente con el IAR presentado por el RM a los 28 días, donde la resistencia a la compresión del mortero con RM disminuye en comparación al mortero de referencia. A los 90 días de curado, la disminución fue de 10,2 % para la mezcla con RM en comparación con el CAC de referencia, esta reducción se atribuye al moderado efecto puzolánico que presenta el residuo de mampostería, siendo similar al comportamiento reportado por otros autores (Malhotra; Mehta, 1996; Schackow; Stringari; Senff; Correia; Segadães, 2015). Es probable que el CAC 20 % RM llegue a desarrollar una resistencia similar al CAC referencia a edades más prolongadas de curado, esto atribuido a la fijación de la portlandita (hidróxido de calcio) y la fase activa del RM. Por lo tanto, la caída de la resistencia a tempranas edades puede ser compensada por la actividad puzolánica del RM que se verá mejorada a edades largas de curado (Naceri; Hamina, 2009).

Por otra parte, los CAC-20 % RM con reemplazos de 10 % y 59 % de AGR por AGN presentaron una reducción de la resistencia a la compresión del 14,3 % y 34,9 %, respectivamente, esto se atribuye al mortero adherido al agregado reciclado que presenta una estructura porosa débil que afecta el modo de falla del concreto,

además de la pobre adherencia entre el mortero adherido y el agregado reciclado (Behera; Bhattacharyya; Minocha; Deoliya; Maiti, 2014). Por otra parte, la influencia del AGR respecto a la acción mecánica también depende del nivel de reemplazo (Ajdukiewicz; Kliszczewicz, 2002; McNeil; Kang, 2013), como se puede observar el menor desempeño lo presentó el CAC con 59 % de AGR, con relación al CAC que tenía en su composición un 10 % de AGR. Otro factor que influencia en la resistencia a la compresión es la zona de transición interfacial (ZTI), ya que la vieja ZTI gobierna la resistencia del concreto cuando la mezcla presenta baja relación agua/cementante. Además, la ZTI es una de las zonas más débiles del concreto y cuando se emplea AGR, el nuevo concreto presentará una zona de interfaz vieja y una nueva zona de interfaz (Figura 4).

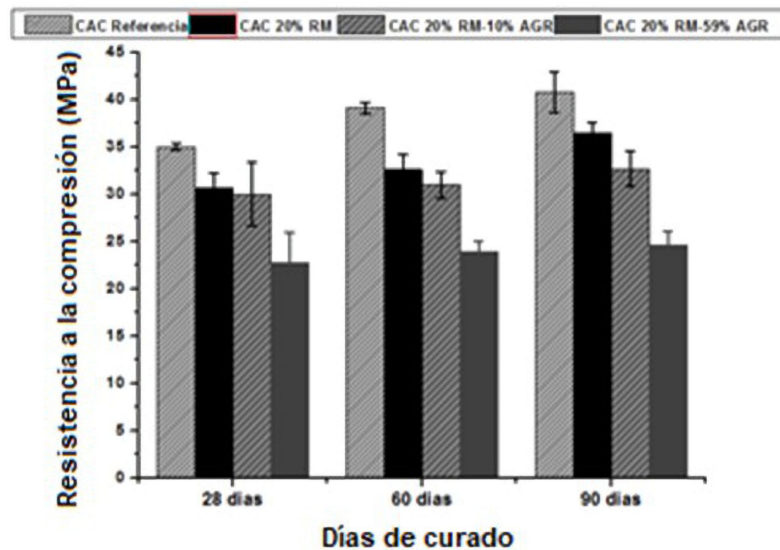


Figura 3. Resistencia a la compresión de las mezclas de CAC
Figura: elaboración propia.



Figura 4. Vista de sección de la vieja y nueva ZTI del CAC 20 % RM con AGR
Figura: elaboración propia.

3.3. Resistencia a la tracción indirecta

La resistencia a la compresión y tracción son propiedades del concreto que se deben de conocer para el diseño de estructuras. En algunas aplicaciones prácticas, como estructuras de concreto no reforzado, estructuras bajo carga sísmica, pavimentos y losas, el valor de la resistencia a la tracción es aún más importante que la resistencia a la compresión (Zain; Mahmud; Ilham; Faizal, 2002). De acuerdo con la información disponible, la resistencia a la tracción indirecta es otra propiedad que se ve afectada por la presencia de agregado reciclado (Khoshkenari; Shafigh; Moghimi; Mahmud, 2015; Silva *et al.*, 2015). La Figura 5 muestra la resistencia a la tracción indirecta de los CAC a 28, 60 y 90 días de curado. Todas las mezclas con RCD presentaron una menor resistencia a la tracción indirecta en comparación con el CAC de referencia, la cual, es más notable en la mezcla con mayor cantidad de AGR (CAC 20 % RM-59 % AGR), donde hay una reducción del 25,2 % de esta propiedad a los 28 días de curado. Este comportamiento se atribuye a la presencia de una mayor porosidad y menor resistencia de los AGR. Además, McNeil; Kang (2003) mencionan en su investigación de revisión que el mortero adherido en el agregado reciclado es responsable de la disminución de la resistencia a la tracción indirecta (McNeil; Kang, 2013).

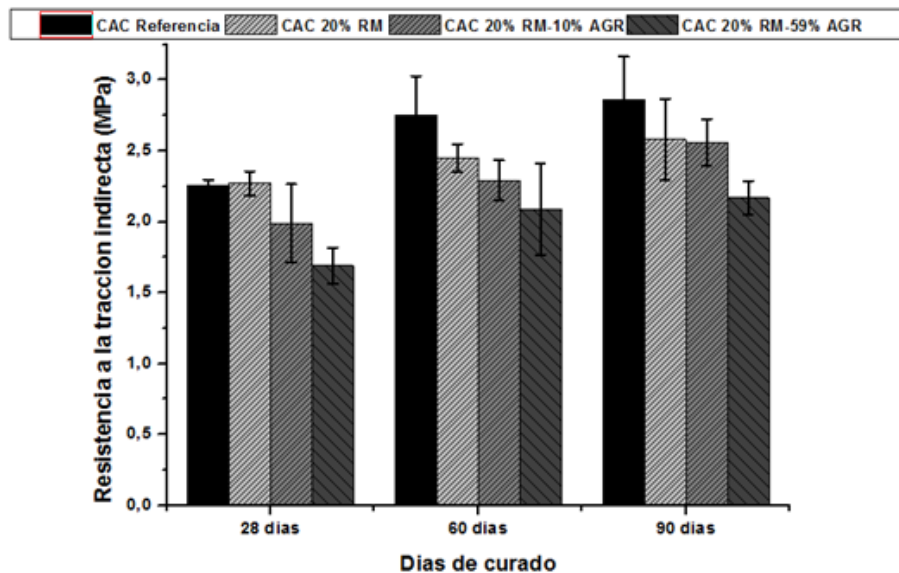


Figura 5. Resistencia a la tracción indirecta de las mezclas de CAC
Fuente: elaboración propia.

3.4. Resistencia a compresión diagonal de muretes

La determinación de la resistencia a compresión diagonal de los muretes se realizó a los 28 días de curado, en el cual se emplearon tres muestras por cada tipo de mezcla. En la Figura 6 se muestra el montaje realizado para la ejecución del ensayo. En la Figura 7 se presentan los valores de carga máxima aplicada de cada una de las mezclas de CAC. Respecto al desempeño de los muretes, la falla típica asociada es causada por la pérdida de estabilidad geométrica del murete debido a presión ejercida, generando deformaciones excesivas en el estado último (Golondrino; Bonilla; Gaviria; Giraldo, 2008). Al igual que la resistencia a la compresión y tracción indirecta, esta resistencia se ve afectada por la presencia de RCD, ya sea como reemplazo de OPC o del agregado natural, presentando una disminución en el desempeño. El CAC 20 % RM presentó una pérdida de resistencia de 4,53 % y los CAC con 10 % y 59 de AGR mostraron un desempeño menor de 6,05 % y 15,41 %, respectivamente, en comparación con el murete de referencia.

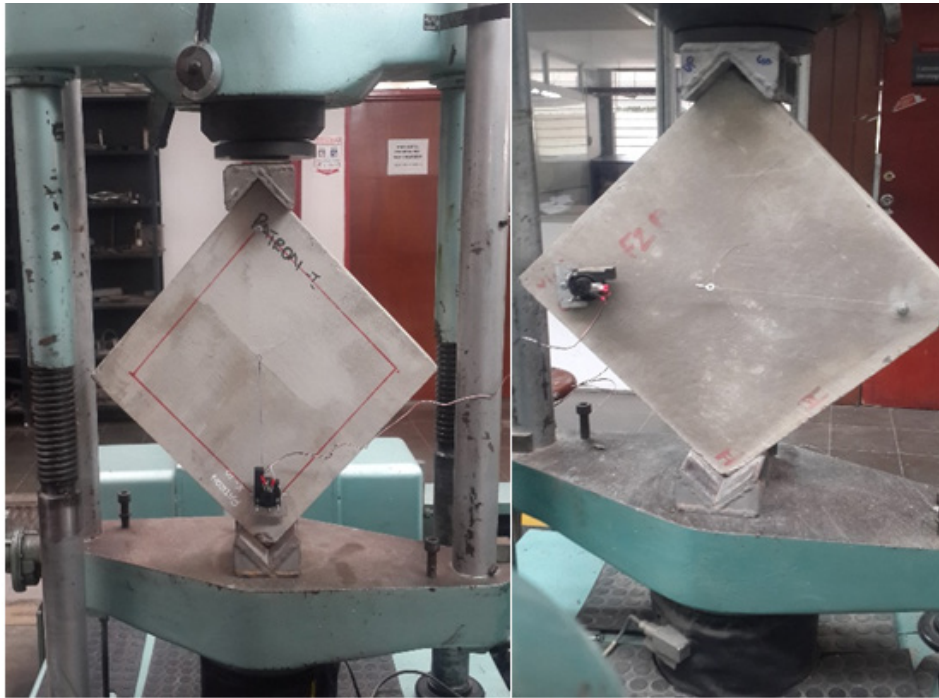


Figura 6. Ensayo realizado a muretes de CAC
Fuente: elaboración propia.

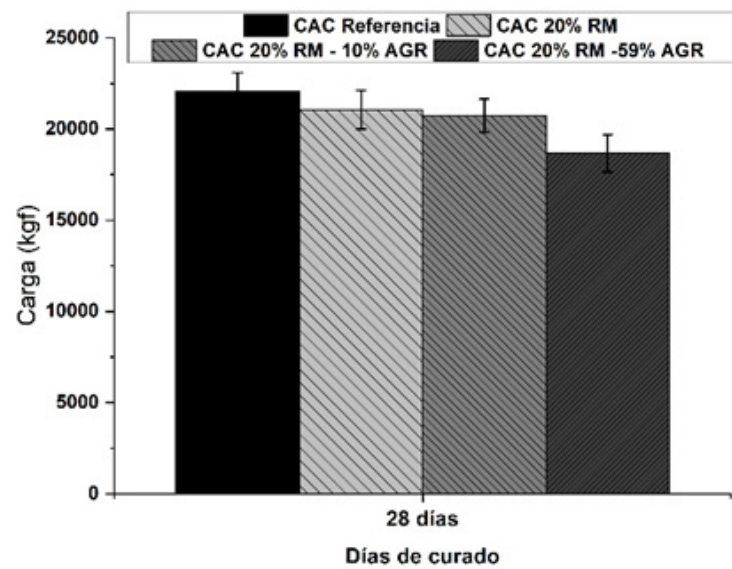


Figura 7. Carga máxima aplicada a muretes de CAC
Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

Basado en los resultados de las propiedades en estado fresco y endurecido de los CAC con RM como material cementicio suplementario y AGR como AGN, se consideran las siguientes conclusiones:

La utilización del residuo de mampostería en la producción de concretos autocompactantes como sustituto parcial del cemento es técnicamente viable, debido a que los CAC donde había presencia de RM cumplieron con los requerimientos de trabajabilidad, como son una fluidez adecuada, buena capacidad de llenado y de paso. Además, en estado endurecido, los CAC con RM mostraron aceptables propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión, la cual superó la resistencia mínima (21 MPa), según la NSR-10 Título C para estructuras de concreto con capacidad DMO y DES.

A edades de curado prolongadas (90 días), el CAC con RM generó una mayor ganancia de resistencia en comparación al CAC de referencia.

El empleo de agregado grueso reciclado afecta la trabajabilidad del concreto autocompactante, debido a su morfología y mayor capacidad de absorción, por lo cual se debe hacer un mayor uso de aditivo superplastificante para contrarrestar este efecto sobre las propiedades en estado fresco.

La resistencia a la compresión, tracción indirecta y a la compresión diagonal de muretes se ve afectada por el empleo de residuos de construcción y demolición cuando se utiliza como adición (RM) y/o como agregado natural el agregado grueso reciclado (AGR), presentándose una mayor pérdida de esta propiedad cuando la cantidad de AGR es mayor.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad del Valle, especialmente a la Escuela de Ingeniería de los Materiales y al Grupo Materiales Compuestos (GMC). A Colciencias-Minciencias y al proyecto 21060 "Aerogeles silíceas obtenidas de la cascarilla de arroz mediante un proceso químico sostenible para aplicaciones en súper aislamiento térmico de edificaciones".

Referencias

- Ajdukiewicz, Andrzej; Kliszczewicz, Alina (2002). Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and Concrete Composites*, 24 (2), 269–279.
[https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00012-9)
- Ahmed, Humera; Tiznobaik, Mohammed; Huda, Sumaiya; Islam, Shahidul; Alam, Shahria (2020). Recycled aggregate concrete from large-scale production to sustainable field application. *Construction and Building Materials*, 262, 119979.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119979>
- Amer, Adem; Ezziane, Karim; Bougara, Abdelkader; Adjoudj, M'Hamed (2016). Rheological and mechanical behavior of concrete made with pre-saturated and dried recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 123, 300–308.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.107>

- Andal, Jonathan; Shehata, Medhat; Zacarias, Philip (2016). Properties of concrete containing recycled concrete aggregate of preserved quality. *Construction and Building Materials*, 125, 842–855.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.110>
- Asutkar, Priyanka; Shinde, S.; Patel, Rakesh (2017). Study on the behavior of rubber aggregates concrete beams using analytical approach. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20 (1), 151-159.
<https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.07.007>
- Behera, Monalisa; Bhattacharyya, S.; Minocha, A.; Deoliya, R.; Maiti, S. (2014). Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials*, 68, 501-516.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003>
- Boudali, S.; Kerdal, D.; Ayed, K.; Abdulsalam, B.; Soliman, A. (2016). Performance of self-compacting concrete incorporating recycled concrete fines and aggregate exposed to sulphate attack. *Construction and Building Materials*, 124, 705–713.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.058>
- Butler, Liam; West, Jeffrey; Tighe, Susan (2012). Effect of recycled concrete aggregate properties on mixture proportions of structural concrete. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2290 (1), 105–114.
<https://doi.org/10.3141/2290-14>
- de Brito-Prado, Luiz; de Figueiredo, Antonio; John, Vanderley (2020). Evaluation of the use of crushed returned concrete as recycled aggregate in ready-mix concrete plant. *Journal of Building Engineering*, 31, 101408.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101408>
- Duan, Zhenhua; Singh, Amardeep; Xiao, Jianzhuang; Hou, Shaodan (2020). Combined use of recycled powder and recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 254, 119323.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119323>
- EFNARC (2002). *Especificaciones y directrices para el Hormigón autocompactable – HAC*. Recuperado de:
<http://www.efnarc.org/pdf/SandGforSCCSpanish.pdf>
- EPG (2005). *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use*. Recuperado de: https://www.theconcreteinitiative.eu/images/ECP_Documents/EuropeanGuidelinesSelfCompactingConcrete.pdf
- Golondrino, José; Bonilla, Diego; Gaviria, John; Giraldo, John (2008). Ensayos a compresión y tensión diagonal sobre muretes hechos a base de papel periódico reciclado y engrudo de almidón de yuca. *Revista Ingeniería de Construcción*, 23(3), 145-154.
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732008000300002>
- González, Jesús; Gayarre, Fernando; Pérez, Carlos; Ros, Pedro; López, Miguel (2017). Influence of recycled brick aggregates on properties of structural concrete for manufacturing precast prestressed beams. *Construction and Building Materials*, 149, 507-514.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.147>
- Han, Fanghui; Song, Shaomin; Liu, Juanhong; Huang, Shun (2019). Properties of steam-cured precast concrete containing iron tailing powder. *Powder Technology*, 345, 292–299.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.01.007>

- Khayat, K.; Hu, C.; Monty, H. (1999). Stability of Self consolidating concrete, advantages, and Potential applications. In: A. Skarendahl, Ö Petersson (Eds.). *RILEM international conference on self-compacting concrete* (pp. 143–52). Stockholm, Sweden.
- Khoshkenari, Adel; Shafigh, Payam; Moghimi, Mahmoud; Mahmud, Hilmi (2014). The role of 0-2 mm fine recycled concrete aggregate on the compressive and splitting tensile strengths of recycled concrete aggregate concrete. *Materials and Desing*, 64, 345-354.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.048>
- Kou, Shi-Cong; Poon, Chi-Sun; Wan, Hui-Wen (2012). Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 36, 881-889.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.060>
- Surya, Gabbiti; Venkateswara, A. (2020). A detailed report on various behavioral aspects of self-compacting concrete. *Materials Today: Proceedings*.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.273>
- Li, L.; Lin, Z.; Chen, G.; Kwan, A. (2020). Reutilizing clay brick dust as paste substitution to produce environment-friendly durable mortar. *Journal of Cleaner Production*, 274, 122787.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122787>
- Maduabuchukwu, Chidozie; Yap, Soon; Onn, Chiu; Yuen, Choon; Ibrahim, Hussein (2020). Utilisation of recycled concrete aggregates for sustainable highway pavement applications; a review. *Construction and Building Materials*, 235, 117444.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117444>
- Malhotra, V.; Mehta, P. (1996). *Pozzolanic and Cementitious Materials*. Amsterdam, The Netherlands: Gordon and Breach.
- Manzi, Stefania; Mazzotti, Claudio; Bignozzi, Maria (2017). Self-compacting concrete with recycled concrete aggregate: Study of the long-term properties. *Construction and Building Materials*, 157, 582–590.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.129>
- McNeil, Katrina; Kang, Thomas (2013). Recycled concrete aggregates: a review. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 7 (1), 61–69.
<https://doi.org/10.1007/s40069-013-0032-5>
- Naceri, Abdelghani; Hamina, Makhoulfi (2009). Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar. *Waste Management*, 29 (8), 2378–2384.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.03.026>
- Nibhanupudi, Pratyusha; Rahul, Gnana (2020). Comparative study on use of precast framed structure and precast load bearing wall structure. *Materials Today: Proceedings*.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.219>
- Oikonomou, Nik (2005). Recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 27(2), 315-318.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.020>
- Ozal, Fatih; Yilmaz, Halit; Kara, Mustafa; Kaya, Omer; Sahin, Aylin (2016). Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving Stone, kerb and concrete pipes. *Construction and Building Materials*, 110, 17-23.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.030>
- Poon, Chi-Sun; Chan, Dixon (2007). The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. *Resources, Conservation and Recycling*, 50 (3), 293-305.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.06.005>

- Santos, S.; da Silva, P.; de Brito, J. (2019). Self-compacting concrete with recycled aggregates – A literature review. *Journal of Building Engineering*, 22, 349–371.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.01.001>
- Schackow, A.; Stringari, D.; Senff, L.; Correia, S.; Segadães A. (2015). Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars. *Cement & Concrete Composites*, 62, 82–89.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.019>
- Silva, R.; de Brito, J.; Dhir, R. (2015). Tensile Strength Behaviour of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 83, 108–118.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.034>
- Silva, Yimmy; Robayo, Rafael; Matthey, Pedro; Delvasto, Silvio (2015). Obtención de concretos autocompactantes empleando residuos de demolición. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 35 (1), 86–94.
- Silva, Yimmy; Robayo, Rafael; Matthey, Pedro; Delvasto, Silvio (2016). Properties of self-compacting concrete on fresh and hardened with residue of masonry and recycled concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 639–644.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.057>
- Sun, Chang; Chen, Qiuyi; Xiao, Jianzhuang; Liu, Weidong (2020). Utilization of waste concrete recycling materials in self-compacting concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104930.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104930>
- Tam, Vivian; Soomro, Mahfooz; Evangelista, Ana (2018). A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017), *Construction and Building Materials*, 172, 272–292,
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240>
- Wang, Jianyun; Vandecyvery, Brecht; Vanhessche, Sam; Schoon, Joris; Boon, Nico; De Belie, Nele (2017). Microbial carbonate precipitation for the improvement of quality of recycled aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 156, 355–366.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.051>
- Wang, Qian; Kim, Min-Koo; Cheng, Jack; Sonh Hoon (2016). Automated quality assessment of precast concrete elements with geometry irregularities using terrestrial laser scanning. *Automation in Construction*, 68, 170–182.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.03.014>
- Wu, Huanyu; Zuo, Jian; Zillante, George; Wang, Jiayuan; Yuan, Hongping (2019). Status quo and future directions of construction and demolition waste research: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 240, 118163.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118163>
- Xiao, Jianzhuang; Ma, Zhiming; Ding, Tao (2016). Reclamation chain of waste concrete: A case study of Shanghai. *Waste Management*, 48, 334–343.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.018>
- Zain, M.; Mahmud, H.; Ihram, Ade; Faizal, M. (2002). Prediction of splitting tensile strength of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 32(8), 1251–1258.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00768-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00768-8)
- Zhu, Peng; Mao, Xinqi; Qu, Wenjun; Li, Zongyang; John, Zhongguo (2016). Investigation of using recycled powder from waste of clay bricks and cement solids in reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*, 113, 246–254.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.040>

Diseño de una máquina de termoconformados para la fabricación de filamento ABS Y PLA

Design of a thermoforming machine for the manufacture of ABS and PLA filament

Ricardo Andrés García-León¹
Breiner Argotta-Hernandez²
Wilder Quintero-Quintero³

¹ Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, (Colombia). Correo electrónico: ragarcial@ufpso.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2734-1425>

² Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, (Colombia). Correo electrónico: bargottai@ufpso.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1403-6533>

³ Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, (Colombia). Correo electrónico: wquinteroq@ufpso.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3260-6923>

Recibido: 31-05-2020 Aceptado: 28-10-2020

Cómo citar: García-León, Ricardo Andrés; Argotta-Hernandez, Breiner; Quintero-Quintero, Wilder (2020). Diseño de una máquina de termoconformados para la fabricación de filamento ABS Y PLA. *Informador Técnico*, 85(1), 34-51.
<https://doi.org/10.23850/22565035.2865>

Resumen

Durante el proceso de impresión 3D, alrededor del 15 % del material utilizado es desperdiciado, debido a los soportes y bases para generar los prototipos, atribuyendo un problema para el ambiente y la economía de los usuarios. Actualmente, no existe una máquina de bajo costo con la que se pueda reciclar el filamento de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y ácido poliláctico o poliácido láctico (PLA) de las impresoras 3D, y así lograr disminuir los costos de operación de este tipo de máquinas que son de gran uso en sectores industriales para la fabricación de prototipos. Para el diseño de la máquina de termoconformados de material reciclado de ABS y PLA, se utilizaron teorías de diseño mecánico, transferencia de calor y análisis numérico para calcular y analizar los elementos más importantes. Teniendo en cuenta lo anterior, las industrias que utilizan este tipo de polímeros podrán reciclar y fabricar el material de impresión, optimizando, además, el proceso productivo, reduciendo los tiempos de entrega y los costos de impresión mediante el uso de esta máquina. Finalmente, se podrán incrementar las propiedades mecánicas y térmicas de nuevos materiales a través de la adición de otros similares.

Palabras clave: ABS; PLA; termoconformado; temperatura; reciclaje; plástico.

Abstract

During the 3D printing process, around 15 % of the material used is wasted due to the supports and bases to generate the prototypes, attributing a problem for the environment and the economy of the users. Currently, do not exist a machine of low cost with can recycle the ABS and PLA filament of 3D printers and, in this way, reduce the operating costs of this type of machine, which is widely used in different industrial sectors for the manufacture of prototypes. Theories of mechanical design, heat transfer, and numerical analysis were used to calculate and analyze the most important elements to design the thermoforming machine made of recycled ABS and PLA material. Taking this into account, the machine will reduce printing costs, benefiting industries that use this type of material, with which they will be able to recycle and manufacture the printing material,

reducing delivery times and costs, thus optimizing the production process. Finally, the mechanical and thermal properties of new materials will be increased through the addition of similar ones.

Keywords: ABS; PLA; thermoformed; temperature; recycling; plastic.

1. Introducción

La extrusión es el proceso más utilizado en la industria para el procesamiento de plásticos, teniendo en cuenta que alrededor del 60 % del total de polímeros transformados en Colombia han pasado por algún proceso de extrusión (García-León; Bohorquez-Niño; Barbosa-Paredes, 2019). Asimismo, el desarrollo de prototipos de máquinas extrusoras ha dado ciertos pasos para la optimización de recursos y procesos (Cifuentes, 2001; Gómez y Gutiérrez, 2007; Morales y Castillo, 2006; Muñoz, 2008; Paredes, 2017; Urrego y Escobar, 2008; Vargas, Santiago y Patiño, 2008). La extrusión tiene sus primeros indicios en 1797, cuando Joseph Bramah registró el primer proceso de extrusión para fabricar tubos de plomo; el cual consistió en el precalentamiento del metal que luego pasó a través de un troquel con un émbolo a mano. Luego, en 1894, Alexander Dick llevó a cabo el proceso de extrusión para aleaciones de cobre y bronce (García-León *et al.*, 2019). En 1935 Paul Troster construyó la primera extrusora de termoplástico en Alemania (Ortiz, Acuña, 2018). Pero hasta el 2010, la fabricación de filamentos de polímeros fundidos fue utilizada para obtener sistemas de prototipos rápidos y de bajo costo. Por lo tanto, la extrusión es el proceso idóneo para la fabricación de filamento de impresión 3D (Fajardo; Cobos, 2011; Woern; McCaslin; Pringle; Pearce, 2018; Poudel, 2015).

La tecnología de impresión 3D permite una rápida y económica producción de dispositivos sin mecanizado ni herramientas, haciendo uso del diseño asistido por computadora (CAD) (Cruz; Boudaoud; Camargo; Pearce, 2020). El crecimiento de esta tecnología se ha acelerado debido a una mejora en las tecnologías de fabricación aditiva y las velocidades de producción, por lo cual, la cantidad de polímeros impresos en 3D seguirá aumentando (Lanzotti *et al.*, 2019) y, consecuentemente, aumentarán los desechos generados por la impresión, lo que afectará al ambiente y los costos de fabricación. Las impresoras 3D son fabricadas, en su mayoría, para trabajar con filamentos de material acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) o poliláctico o ácido poliláctico (PLA) debido a sus propiedades mecánicas y físicas, los cuales se manufacturan principalmente en dos diámetros estándares: 1,75 y 3,0 mm, que pueden ser transportados y empujados por la boquilla para ser extruidos con facilidad (Luna; Valadez, 2016).

Por otra parte, el ABS es un termoplástico que presenta una estructura molecular amorfa con alta resistencia a sustancias químicas, abrasivos e impactos, siendo muy utilizado en la industria automovilística y en electrodomésticos para el hogar, aunque no es un material ecológico, puede reciclarse y reprocesarse, además, es fácil de moldear (Mirón; Ferrándiz; Juárez; Mengual, 2017; Salim; Termiti; Saad, 2019). El PLA es un poliéster alifático termoplástico y biodegradable que es derivado de fuentes renovables ricas en almidón, como el maíz, la tapioca y la caña de azúcar, siendo un material amigable con el ambiente (Montealegre; González, 2015; Salim *et al.*, 2019).

Actualmente, varios trabajos han enfocado sus estudios en el reciclaje de termoplásticos como ABS y PLA; también, la adición de otro tipo de elementos o componentes para mejorar sus propiedades mecánicas, físicas y estructurales (Cisneros-López *et al.*, 2020; Cruz *et al.*, 2020). Rigoussen; Raquez; Dubois; Verge (2019) reforzaron las propiedades mecánicas del PLA y el ABS utilizando el cardanol como compatibilizador, haciendo uso del proceso de extrusión. Los resultados demuestran que los materiales tuvieron buena compatibilidad y lograron mejorar la resistencia al impacto en un 172 %. Lanzotti *et al.* (2019) realizaron experimentos sobre el PLA virgen y reciclado para comprobar la diferencia de las propiedades mecánicas a través de tres diferentes procesos de reciclaje. Por su parte, Goutham, Veena y Prasad (2018) caracterizaron y optimizaron parámetros, como la densidad de relleno y el material de construcción del ABS, mezclado con material reciclado. Realizaron pruebas de flexión y flexión en tres puntos para determinar las propiedades mecánicas de la muestra obtenida por impresión 3D.

En el presente trabajo de investigación se muestran los principales cálculos de diseño mecánico y transferencia de calor, para establecer un prototipo de máquina de termoconformado para el reciclaje de material ABS y PLA de bajo costo, derivado de residuos generados durante el proceso de impresión 3D, con lo que se logrará una optimización de los desperdicios producidos por este material y de los recursos financieros de las empresas que utilizan esta clase de sistemas para generar prototipos. Además, se podrán realizar pruebas de diseño de experimentos con mezclas, para optimizar las propiedades mecánicas y estructurales de este tipo de materiales.

2. Materiales y métodos

El diseño de esta investigación es documental, porque que se relacionan diversos fenómenos físicos para lograr un diseño basado en los requisitos del cliente, utilizando fundamentos teóricos y un enfoque de investigación cuantitativo, de esta forma, se tendrán en cuenta datos y valores aplicables a la realidad para una futura construcción de la máquina de termoconformado. Además, se tuvo en cuenta la metodología del proceso de diseño mecánico para establecer las especificaciones y requisitos de los posibles clientes, y, de esta manera, lograr la idoneidad y la confiabilidad de la máquina para la extrusión de plástico basados en las teorías, simulaciones y referencias similares (Ullman, 2003). La Figura 1 muestra la metodología aplicada en el análisis de diseño numérico de la máquina de termoconformado.

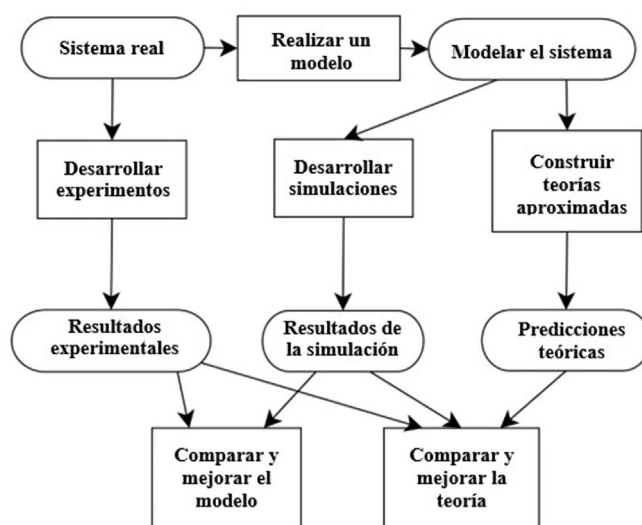


Figura 1. Metodología aplicada

Fuente: elaboración propia.

El proceso de extrusión inicia cuando los pellets son alimentados a la cámara donde gira el tornillo extrusor. El giro del tornillo hace que el material se mezcle y avance a lo largo de la cámara que se encuentra caliente; el calor de la cámara junto con el avance del tornillo hace que el material logre fundirse uniformemente, para convertirse en un flujo de material maleable que finalmente, pasa a través de la boquilla para adquirir la sección transversal deseada. El material extruido requiere un proceso de enfriamiento para solidificar la pieza y obtener el perfil deseado al final del proceso de termoconformado (Mena, 2018). Para realizar el análisis numérico en los elementos que soportan la mayor cantidad de esfuerzos, se utilizó *SolidWorks Flow Simulation*, debido a que resuelve las ecuaciones de NavierStokes, que son formulaciones de las leyes de conservación de la masa, la cantidad de movimiento y la energía (Sobachkin; Dumnov; 2014; Thuresson, 2014).

La Figura 2 muestra las etapas del proceso de extrusión:

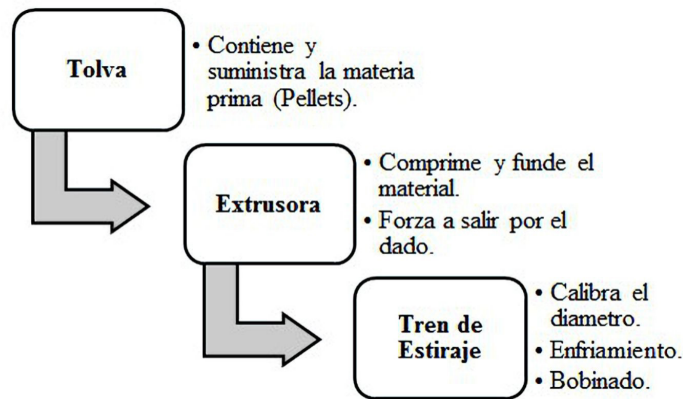


Figura 2. Etapas del proceso de extrusión
Fuente: elaboración propia.

Los componentes principales de una extrusora para la fabricación de filamento de impresión 3D son: tolva, tornillo extrusor, cilindro, sistema de calentamiento, dado y sistema de potencia (Montealegre; González, 2015). Para estos cálculos, se utilizarán teorías de diseño de máquinas teniendo en cuenta el libro *Shigley* (Budynas; Nisbett, 2017). Por otra parte, para el cálculo de la resistencia se requiere un análisis térmico, se utilizaron teorías de transferencia de calor haciendo uso del libro (Cengel, 2007).

3. Análisis y discusión

Para dar inicio con el proceso de diseño, se llevó a cabo la matriz de decisión de los dos modelos de husillos para seleccionar un diseño ganador acorde a los requisitos del mercado, las necesidades, especificaciones de los clientes y los investigadores, para lo cual se aplicó una calificación de 0 a 10 como se muestra en la Tabla 1.

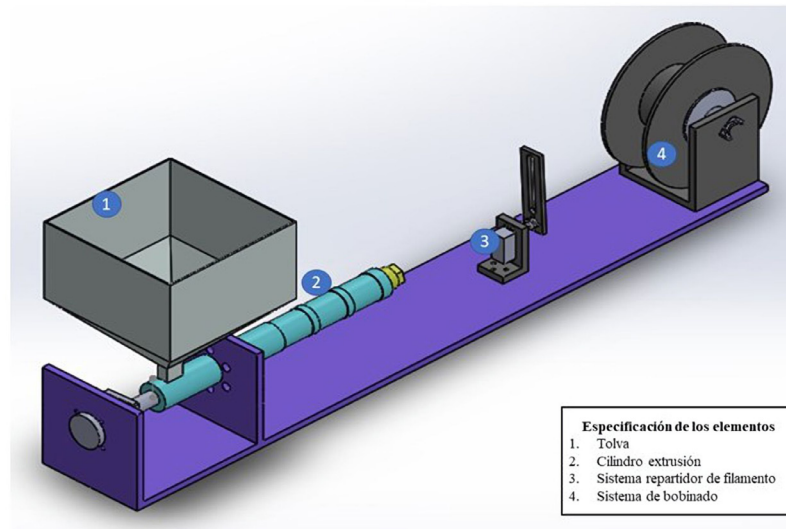
Tabla 1.

Matriz de decisión

Criterio	Porcentaje de importancia (%)	Máquina extrusora			
		Mono-Husillo		Doble-Husillo	
		Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación
Menor peso y tamaño	50	8	4	4	2
Menor costo de fabricación	40	6	2.4	2	0.8
Facilidad de fabricación	20	8	1.6	7	1.4
Menor tiempo de fabricación	30	9	2.7	5	1.5
Mejor desempeño en materiales compuestos	50	5	2.5	8	4
Facilidad de acoplamiento	20	6	1.2	4	0.8
TOTAL	-	-	14.4	-	10.5

Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta lo anterior, la Figura 3 muestra el diseño ganador de la máquina de termoconformado con cada uno de los elementos que lo conforman.



3.1. Diseño de elementos

Teniendo en cuenta el diseño ganador, se procedió a calcular cada uno de los elementos que conforman la máquina como se detalla a continuación:

3.1.1. Tolva

Para mantener las dimensiones de la máquina, la tolva tiene forma piramidal con las siguientes dimensiones: alto 25 cm, un área superior de 20×20 cm y un área inferior de 1.5×2.5 cm como se muestra en la Figura 4, la cual podrá soportar un volumen total de 6286.19 cm³. Adicionalmente, la capacidad de la tolva se determinó con el peso de cada hojuela de ABS o PLA. El material de la tolva es un acero inoxidable grado AISI 304, con un espesor de 2.0 mm para garantizar la resistencia al calor y la deformación durante el proceso de termoconformado.

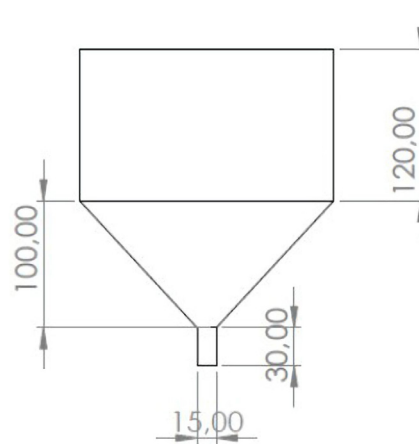


Figura 4. Diseño de la tolva

Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, se tuvo en cuenta el volumen promedio de las hojuelas de 0.075 cm^3 y, de esta forma, obtener un valor aproximado del peso de las hojuelas. Posteriormente, se asume que una hojuela medirá 0,5 cm de largo, 0,75 cm de ancho y 0,2 mm de espesor, obteniendo que la capacidad de la tolva es de 7,6 kg. Como recomendación de uso, la tolva no se debe llenar más del 70 %, es decir, la capacidad nominal de la tolva es de 5,3 kg (Paredes, 2017) (Argotta-Hernandez, 2019).

3.1.2. Cabezal de extrusión

El cabezal de extrusión consta del plato rompedor, filtros y la matriz o dado. El plato rompedor tiene como función mezclar el material y romper el patrón de flujo en espiral que genera el husillo. En este elemento, se ubican los filtros al final del tornillo extrusor, los cuales atrapan las impurezas que pueden afectar el proceso, los filtros se sitúan de manera que la malla gruesa esté más cerca al plato rompedor (Mena, 2018). La selección de plato rompedor se realizó teniendo en cuenta el catálogo virtual SFR *tooling*, para lo cual, solo se requirió el diámetro interno de la camisa del cabezal. De esta forma, se determinó que el área abierta del plato es de $0,13 \text{ pulg}^2 = 83,87 \text{ mm}^2$. Para la selección de la malla se utilizaron las especificaciones de mallas de acero inoxidable de la empresa AmbicaGroup, donde se seleccionaron las mallas de denominación 60×60, 80×80 y 120×120. A este respecto, la matriz de extrusión es un elemento intercambiable en la máquina. En este caso, se diseñó una matriz para extruir filamento de 1,75 mm y otro para 3 mm, además, se debe revisar el índice de contracción del material, ya que este influye en el diámetro final del perfil a extruir (Mexpolimeros, 2019).

3.1.3. Husillo

Es la pieza fundamental de la máquina extrusora, de este depende la producción, aplicación de la extrusora, velocidad de giro y diseño del cabezal de extrusión (Brito, 2017).

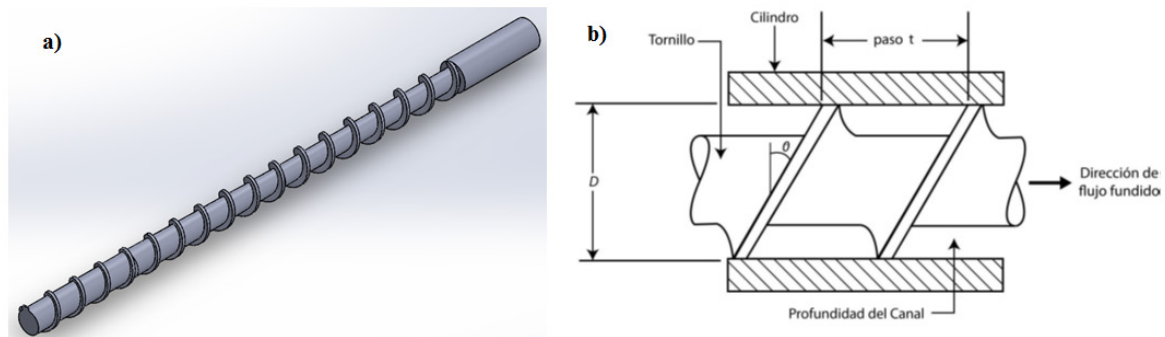


Figura 5. a) Diseño geométrico del husillo y b) Partes del husillo

Fuente: elaboración propia.

La elección de los parámetros del husillo depende de los materiales a trabajar (ABS y/o PLA). De esta manera, se seleccionó un tornillo para uso general como se muestra en la Figura 5a, es decir, que permita trabajar ambos materiales sin perder eficiencia. Para ello, se definen tres zonas en el husillo (alimentación, compresión y dosificación), y se contará con un (1) solo canal, con paso constante y profundidad variable para cada zona.

La relación del largo (L) y el diámetro (D) del husillo es de gran importancia, porque cuando aumenta la longitud del husillo, mejora el efecto del calor sobre el material, la velocidad de giro y la producción. Una relación típica (L/D) para la extrusión de polímeros termoplásticos varía entre 20:1 y 30:1. Los husillos largos tienen amplio uso para la fabricación de películas, fibras, entre otros. Para la fabricación de perfiles continuos, se recomiendan los husillos cortos (Brito, 2017). Para la extrusión de cables o filamentos, se requiere una presión de extrusión mayor, entonces el grado de compresión utilizado debe ser bajo, asimismo, se recomienda una profundidad menor en el canal helicoidal en la zona de dosificación cuando se fabrican filamentos. Teniendo en cuenta lo anterior, se elige un grado de compresión de 2, con esto se tiene una profundidad pequeña en la zona de dosificación y una profundidad mayor en la zona de alimentación, obteniendo así un gradiente de presión (Brito, 2017).

Los parámetros seleccionados para el husillo están basados en las medidas finales de la máquina y se mantienen los parámetros anteriormente mencionados acorde con la Figura 5b. Por lo tanto, se establecieron los siguientes parámetros para la máquina: largo total del husillo (L_t) = 400 mm; largo del husillo (L) = 340 mm; largo del vástago del husillo (l_e) = 60 mm; diámetro del husillo (D) = 20 mm; relación L/D = 17; número de filetes = 17 y el grado de compresión (i) = 2. Teniendo en cuenta teorías de diseño, se llevaron a cabo los siguientes cálculos adicionales: paso del husillo (t) = 20 mm; ancho del filete (e) = 2 mm; profundidad del canal en la zona de alimentación (h_1) = 4 mm; profundidad del canal en la zona de dosificación (h_3) = 2 mm; el diámetro del alma (d) = 12 mm; ángulo de la hélice (φ) = 17,6°; longitud de la zona de alimentación (L_a) = 140 mm; longitud de la zona de compresión (L_c) = 120 mm y la longitud de la zona de dosificación (L_d) = 80 mm.

3.1.4. Boquilla

La Figura 6 muestra la geometría interna de la boquilla, la cual tiene una sección cónica que se encarga de reducir el diámetro del cilindro al diámetro a obtener. Para la parte exterior, se requiere conocer el material de fabricación, de manera que, se pueda calcular el espesor mínimo de pared. La boquilla será fabricada con latón 360, debido a que es un material fácil de maquinar y con buena conductividad térmica, con esfuerzo admisible de 310 MPa.

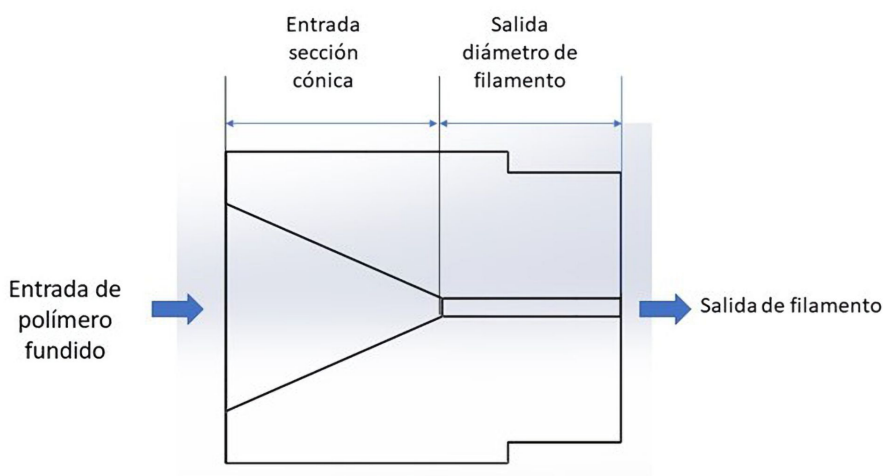


Figura 6. Geometría de la boquilla
Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se definió mediante teorías de diseño un espesor de 5 mm, con lo cual se tiene un factor de seguridad de 1,45, estableciendo las siguientes medidas de diseño: diámetro interno de entrada = 20 mm, diámetro interno de salida = 2 mm, diámetro exterior = 30 mm, largo de la sección cónica 20 mm y el largo de la sección de salida = 15 mm.

La Figura 7 muestra el cálculo de la producción, por lo cual, se registraron varias velocidades para encontrar la que mejor se ajuste a los dos materiales y a las diferentes boquillas.

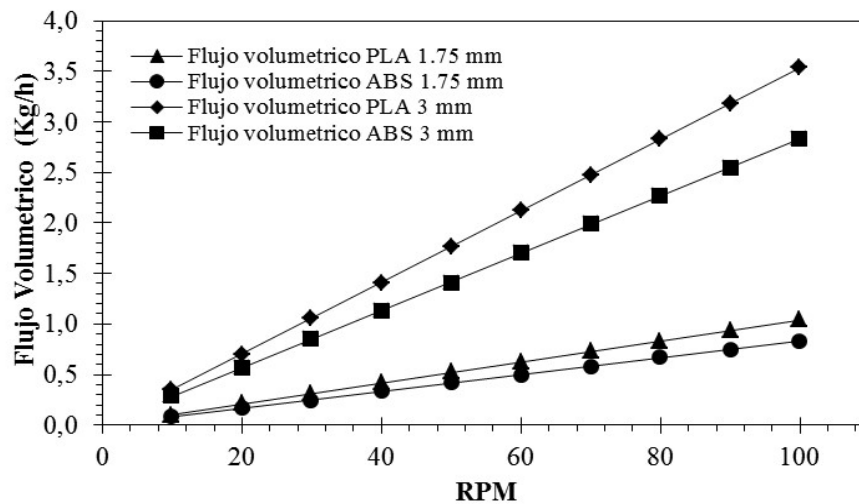


Figura 7. Pendiente de crecimiento del flujo de las boquillas
Fuente: elaboración propia.

La viscosidad efectiva es determinada en función de la velocidad de cortadura por medio de diagramas de diseño para diferentes materiales en función de la temperatura de trabajo. La velocidad de cortadura dependerá de la forma geométrica del canal del husillo (Paredes, 2017), para lo cual se obtuvo un valor de $\gamma=836$ [1/s]. De acuerdo con la velocidad de cortadura, es necesario obtener la viscosidad efectiva de cada material a trabajar (ABS o PLA). De esta manera, se usó la viscosidad efectiva de mayor magnitud para obtener la presión máxima de trabajo que puede presentarse en la extrusora. Para el caso del PLA, la temperatura de trabajo será de 160 a 230 °C, por lo que la viscosidad efectiva se evaluará en el promedio de la temperatura de trabajo, aproximadamente a 190 °C. Para el ABS, la temperatura de trabajo será de 215 a 250 °C, por lo que la viscosidad efectiva se evaluará en el promedio de la temperatura de trabajo, aproximadamente a 230 °C, de acuerdo con (Altinkaynak; Gupta; Spalding; Crabtree, 2011), bajo las siguientes condiciones: velocidad de cortadura igual a 836 [1/s] y viscosidad efectiva de 400 MPa.

Por otra parte, la presión máxima en el husillo se genera cuando no se registra movimiento de caudal en el interior del cilindro, obteniendo un valor de 181,3 MPa. Asimismo, la presión en la boquilla es de 106,43 MPa. La potencia de trabajo del husillo debe ser necesaria para girar el husillo a las revoluciones por minuto (rpm) requeridas para extrusión del material, la cual depende de la potencia necesaria para desplazar el material y la energía consumida por la holgura del cilindro, según los resultados obtenidos por (Brito, 2017), obteniendo un valor de 253.53 W = 0,34 HP. A partir del dimensionamiento del husillo, se seleccionó un motor que cumple con los criterios y brinde cierto margen de seguridad. El motor seleccionado fue un motorreductor de alto torque que trabaja a 12 V Direct Current. (DC) y entrega una velocidad de 100 rpm. Para este elemento, se seleccionó el acero AISI 4140 como material, por su composición química de cromo y molibdeno que le confiere al material alta dureza y resistencia a la corrosión a temperaturas de más de 540 °C, sin perder sus propiedades mecánicas.

3.1.5. Cilindro

Para el diseño del cilindro se consideró la holgura entre el filete helicoidal y el barril, y el diámetro del husillo. Primero se realizó el cálculo del diámetro interior del cilindro deseado. Este cilindro debe cubrir la zona útil del husillo, por lo que tendrá un largo mínimo de 340 mm como se muestra en la Figura 8. El espesor mínimo

que debe tener el cilindro para soportar las presiones requiere conocer el material del cilindro, por lo tanto, se seleccionó un acero AISI 1020 CD, con un esfuerzo admisible de 390 MPa. Este material se eligió teniendo en cuenta los siguientes parámetros: temperaturas de trabajo, disponibilidad, fabricación, resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión y costo. El cilindro tendrá un espesor final de 10 mm y un espesor de 8,5 mm en la parte de roscada. Este espesor depende del tipo de rosca, en este caso es una rosca fina que se obtiene así, mediante un factor de seguridad con los siguientes valores: $F_{Scilin} = 2,13$ y $F_{Spf} = 1,81$. Para la fabricación del husillo, se usará una barra de 42 mm de diámetro por un largo de 500 mm, lo que equivale aproximadamente en barras comerciales en el país a un diámetro de 1-5/8".

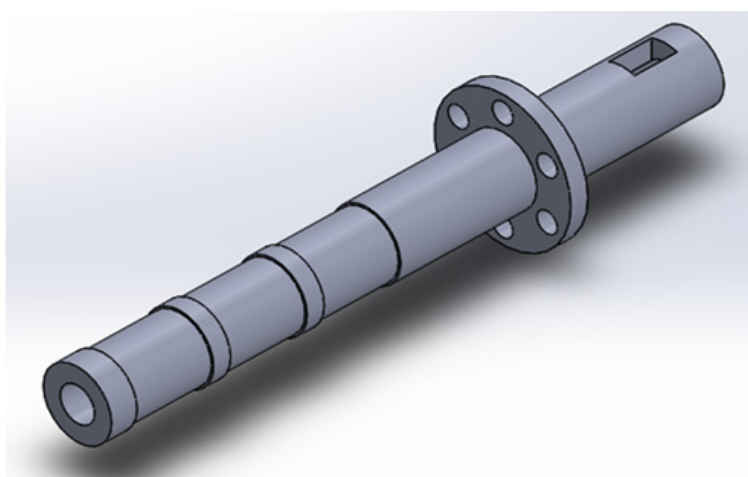


Figura 8. Diseño conceptual del cilindro
Fuente: elaboración propia.

3.1.6. Sistema de calefacción

La potencia requerida para las resistencias eléctricas se calculó teniendo en cuenta que la potencia es función del calor necesario generado por las resistencias, transferido al cilindro y al husillo. Para el diseño se tomó que el flujo de calor es unidimensional, con régimen estacionario, como se muestra en la Figura 9:

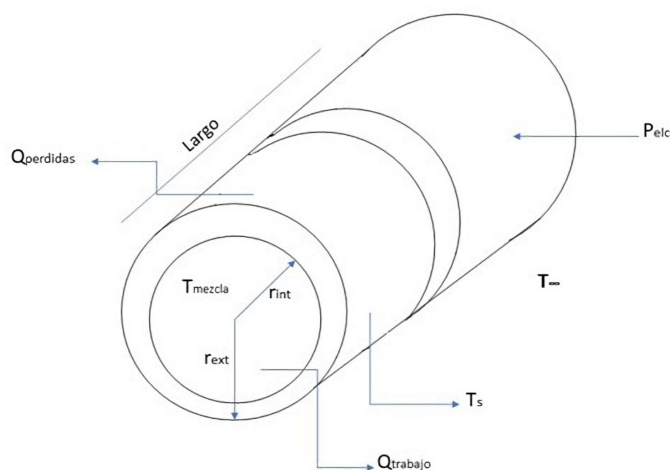


Figura 9. Modelo del cilindro y sistema de calefacción
Fuente: elaboración propia.

La Figura 10 muestra el bosquejo del sistema de calefacción, además, se aclara la analogía eléctrica para el cálculo de la potencia requerida para fundir la mezcla (de trabajo), más las pérdidas que existen en el ambiente (conducción, convección y radiación), la cual debe ser igual a la potencia eléctrica que debe entregar el calentador.

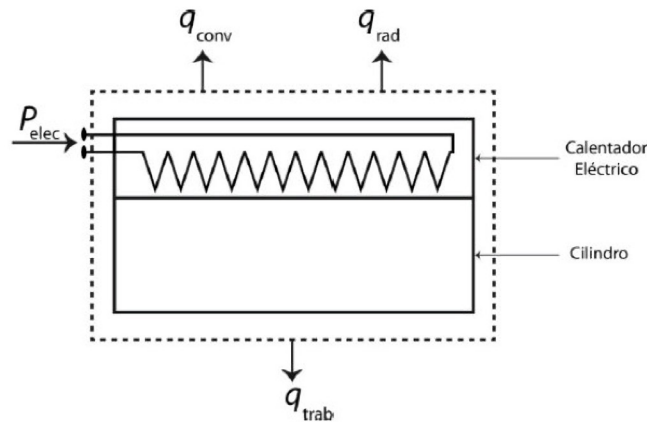


Figura 10. Bosquejo del sistema de calefacción
Fuente: elaboración propia.

Definiendo la ecuación general para la potencia requerida tenemos como resultado la Ecuación 1:

$$q_{elec} = q_{trabajo} + (q_{conv} + q_{rad}) = q_{trabajo} + q_{perd} \quad (1)$$

Dónde: q_{elec} es la potencia que entrega el calentador eléctrico [W], q_{conv} es la potencia perdida hacia el ambiente mediante convección [W], q_{rad} es la potencia perdida hacia el ambiente mediante radiación [W], $q_{trabajo}$ es la potencia necesaria para llevar la mezcla a la temperatura de trabajo [W], y q_{perd} es la potencia perdida hacia el ambiente [W]. Al calcular la potencia de trabajo, se necesita conocer las temperaturas de operación, y como se pretenden emplear dos materiales, se tienen dos temperaturas diferentes de operación, para el ABS será de 230 °C y para el PLA de 190 °C. Para ambos la temperatura ambiente es de 22 °C. Dado que los polímeros son amorfos (Brito, 2017), no se presenta una zona de calor latente de fusión, por lo cual no es necesaria energía adicional para el cambio de fase. Se utiliza la Ecuación 2 para calcular el calor de trabajo:

$$q_{trabajo} = \dot{m} * C_p * (T_m - T_i) \quad (2)$$

Dónde: $\dot{m}$ es el flujo másico de material [kg/s], C_p es el calor específico del material [J/kg°C], T_m es la temperatura de la mezcla [°C] y T_i es la temperatura ambiente [°C], obteniendo los resultados que se evidencian en la Tabla 2:

Tabla 2.

Resultado de calor de trabajo para diferentes boquillas

Variable	Descripción	Valor	Unidad
qtABS - 1.75	Calor de trabajo ABS con boquilla de 1,75 mm	87,84	W
qtPLA - 1.75	Calor de trabajo PLA con boquilla de 1,75 mm	60,45	W
qtABS - 3	Calor de trabajo ABS con boquilla de 3 mm	298,99	W
qtPLA - 3	Calor de trabajo PLA con boquilla de 3 mm	205,84	W

Fuente: elaboración propia.

Para calcular las pérdidas al ambiente, se necesita calcular la resistencia térmica del sistema (Brito, 2017). Dicha resistencia dependerá del intercambio de calor del cilindro con el ambiente, a través del fenómeno de convección y radiación. Para ello, se utilizan las Ecuaciones 3 y 4.

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{h \times A_s} \quad (3)$$

$$R_{\text{rad}} = \frac{1}{A_s \times \varepsilon \times \sigma \times (T_s^2 + T_i^2) \times (T_s + T_i)} \quad (4)$$

Dónde: h es el coeficiente de transferencia de calor en convección natural [$\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$], A_s es el área de la superficie expuesta a convección [m^2], ε es la emisividad del material (0,865 para el AISI 1020 CD) [-], σ es la constante de Stefan-Boltzmann = $5,6710^{-8}$ [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$], T_s es la temperatura absoluta de la superficie [K] y T_i es la temperatura absoluta del ambiente [K].

Reemplazando en las ecuaciones, se tiene que: $R_{\text{conv}} = 2.43 - R_{\text{rad-ABS}} = 1.83 - R_{\text{rad-PLA}} = 2.1$

La Tabla 3 muestra los cálculos de las pérdidas de calor por convección y radiación.

Tabla 3.

Cálculo de las pérdidas por convección y radiación

Variable	Descripción	Valor	Unidad
qPer - ABS - conv	Pérdidas de calor por convección para el ABS	81,48	W
qPer - PLA - conv	Pérdidas de calor por convección para el PLA	69,14	W
qPer - ABS - Rad	Pérdidas de calor por radiación para el ABS	1082	W
qPer - PLA - Rad	Pérdidas de calor por radiación para el PLA	80	W

Fuente: elaboración propia.

La potencia total que debe entregar la banda es la potencia de trabajo más las pérdidas y los datos son resumidos en la Tabla 4:

Tabla 4.

Potencia total requerida

Variable	Descripción	Valor	Unidad
qElc-ABS-D1.75	Potencia total para el ABS con boquilla de 1,75 [mm]	277,52	W
qElc-PLA-D1.7	Potencia total para el PLA con boquilla de 1,75 [mm]	209,59	W
qElc-ABS-D3	Potencia total para el ABS con boquilla de 3 [mm]	488,67	W
qElc-PLA-D3	Potencia total para el PLA con boquilla de 3 [mm]	354,98	W

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la tabla anterior, el valor máximo de potencia requerido es de 488,67 W correspondiente a la boquilla de 3 mm cuando se utiliza ABS. Este valor será el de referencia para la selección de las resistencias. Para este sistema, se emplearán tres resistencias calefactoras distribuidas en el cilindro para mantener una temperatura uniforme, cabe destacar que las resistencias se ubicarán en las secciones correspondientes a la transición y dosificación para evitar atascamientos en la zona de alimentación. Las resistencias tendrán potencias diferentes distribuidas de la siguiente manera: a la salida del cilindro se ubicará una resistencia de 500 W seguida de una de 250 W y, por último, una de 150 W.

3.1.7. Sistema de ventilación

Este sistema utilizará un ventilador para el enfriamiento mediante la convección forzada. Su función es disminuir la temperatura del filamento en la salida de la boquilla, con eso se logra evitar la dilatación del filamento, logrando disminuir variaciones en el diámetro final y tener mayor calidad del filamento. En esta etapa se desea alcanzar una temperatura superior a la temperatura de transición vítrea del material, debido a que por debajo de ella el polímero es rígido y quebradizo, y por encima es blando y flexible, brindando la característica necesaria para que el sistema de bobinado de la extrusora funcione correctamente. Para el cálculo de este sistema se debe preseleccionar un ventilador, en este caso, un ventilador de 80×80×10 mm con una velocidad angular de 3000 rpm, haciendo uso de la Ecuación 5.

$$T = T_{\infty} + (T_0 + T_{\infty})e^{-\frac{4hx}{\rho V_e D C_p}} \quad (5)$$

Donde: T_{∞} es la temperatura ambiente [22 °C], T_0 es la temperatura de salida del filamento [°C], h es el coeficiente de convección [W/m²K], ρ es la densidad del material [kg/m³], V_e es la velocidad de salida del filamento de la boquilla [m/s], D es el diámetro filamento [m], C_p es el calor específico material [J/kg°C], y x es la posición a evaluar. Los resultados son resumidos en la Tabla 5:

Tabla 5.

Temperatura a la salida de la boquilla

Variable	Descripción	Valor	Unidad
$T_{D1.75-ABS}$	Temperatura a los 24 [cm] al salir de la boquilla de 1,75 [mm] para el ABS	131,1	°C
T_{D3-ABS}	Temperatura a los 24 [cm] al salir de la boquilla de 3 [mm] para el ABS	179,2	°C
$T_{D1.75-PLA}$	Temperatura a los 24 [cm] al salir de la boquilla de 1.75 [mm] para el PLA	126,2	°C
T_{D3-PLA}	Temperatura a los 24 [cm] al salir de la boquilla de 3 [mm] para el PLA	161,6	°C

Fuente: elaboración propia.

De los resultados se observa que, el filamento al pasar por el ventilador reduce su temperatura, pero la mantiene arriba de la temperatura de transición vítrea del ABS y PLA (115 °C y 60 °C, respectivamente) en ambas boquillas, presentando mejor eficiencia para la boquilla de 1,75 mm. Sin embargo, el filamento en los dos casos será más estable evitando variaciones de diámetro y se podrá trabajar en óptimas condiciones en el sistema de bobinado de la extrusora. A partir de los cálculos realizados anteriormente, se tiene que el sistema contará con tres ventiladores en serie. Se eligió: un ventilador de la marca QG de 80×80×25 mm, el cual tiene un alto rendimiento entregando 47 CFM de flujo a 3000 rpm y funcionando a corriente continua de 12 V.

3.1.8. Selección del repartidor de filamento

Para seleccionar el repartidor se tomó un tiempo promedio de 377 s por cada pasada. A partir de este resultado, se seleccionó un servomotor *feetech* FS5115M. Se trata de un motor de corriente continua de 6 V y gran torque con rotación de 180°.

3.2. Análisis numérico de los principales elementos de la máquina

3.2.1. Husillo

Para el análisis estático del husillo se consideró su peso, con respecto al análisis térmico el husillo estará sometido al calor que se le transfiere del polímero fundido en un estado transitorio, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6.

Características del husillo para el análisis numérico

Nombre	Husillo para extrusión	Unidades
Material	AISI 4140	
Peso	0.59	kg
Límite elástico	4.7×10^{-8}	N/m ²
Límite de tracción	7.45×10^8	N/m ²
Módulo elástico	2.05×10^{11}	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.285	-
Densidad	7850	kg/m ³
Módulo cortante	8×10^{10}	N/m ²
Coefficiente de dilatación térmica	1.23×10^{-5}	K
Tipo de malla	Malla sólida	-
Número de nodos	49032	-

Nombre del modelo: husillo bien
Nombre de estudio: Análisis estático husillo (Predeterminado)
Tipo de resultado: Desplazamiento estático Desplazamiento1
Escala de deformación: 1:1.04

Min: 0.00205
Max: 0.2647

URES (mm)

0.2647
0.2426
0.2205
0.1985
0.1764
0.1544
0.1323
0.1103
0.0882
0.0661
0.0441
0.0220
1e-30

Min: 0.00205
Max: 0.2647

Resultados del análisis estático del husillo

Fuente: elaboración propia.

La Tabla 6 evidencia que la deformación es muy baja, con un valor de 0,26 mm similares a diferentes estudios reportados en la literatura. Esta holgura se verá reducida con la ayuda de los rodamientos y la rotación del husillo, ajustándose a la holgura existente entre el husillo y el cilindro de extrusión. Además, el polímero fundido actuará como barrera entre ambos elementos (Flórez; García-León; Escobar, 2017; García-León; Suárez-Castrillón, 2016).

La Figura 11 muestra el análisis térmico en el husillo, considerando el factor de multiplicación de la potencia de las resistencias, debido a que influye la presión y fricción del plástico con las paredes y los álabes del husillo; donde se puede evidenciar que la temperatura se aproxima lo suficiente a la temperatura deseada en la punta del husillo, la cual corresponde a 10 grados Celsius por debajo que la temperatura determinada en las condiciones de diseño.

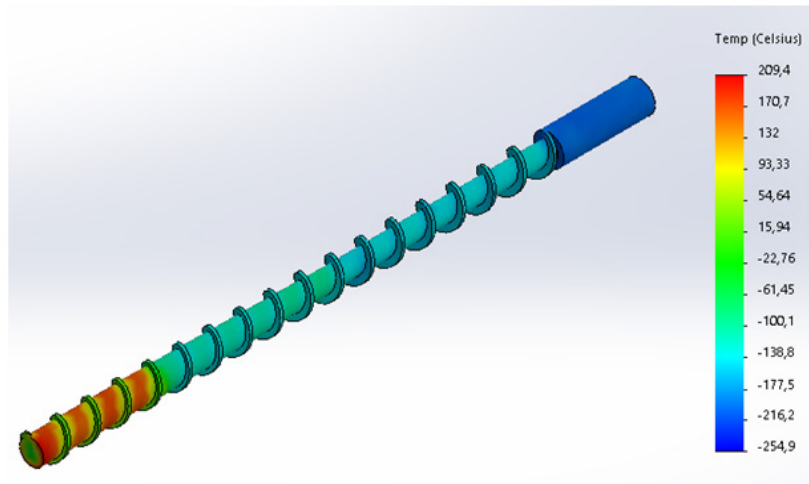


Figura 11. Resultados del análisis térmico del husillo
Fuente: elaboración propia.

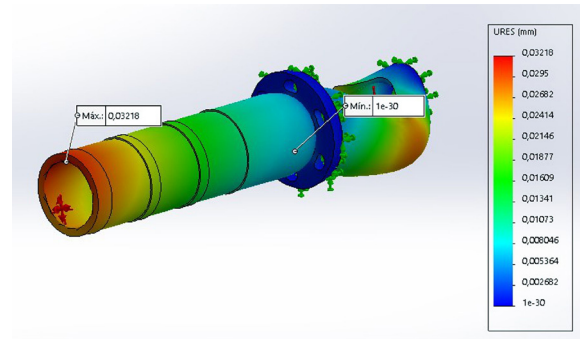
3.2.2. Cilindro

Para el análisis estático del cilindro se sometió solo a la presión que se ejerce desde las diferencias de temperatura y la compresión del fluido en un estado transitorio. Las características del cilindro se muestran en la Tabla 7:

Tabla 7.

Características del cilindro de extrusión

Nombre	Detalle	Unidades
Material	AISI 1020 CD	-
Criterio de error predeterminado	Tensión de von Mises máx.	-
Límite elástico	3.51×10^8	N/m ²
Límite de tracción	4.21×10^8	N/m ²
Módulo elástico	2×10^{11}	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.29	-
Densidad	7900	kg/m ³
Módulo cortante	7.7×10^{10}	N/m ²
Coefficiente de dilatación térmica	1.77×10^5	xxxK
Tipo de malla	Malla sólida	-
Número de nodos	30535	-



Resultados del análisis estático del husillo

Fuente: elaboración propia.

La Tabla 7 muestra que la deformación es muy baja, con un valor de 0,003 mm similares a diferentes estudios reportados en la literatura. El análisis numérico confirmó que la presión máxima “s” presenta en la punta del cilindro (Flórez *et al.*, 2017). Debido a que en esa sección es donde el polímero se comprime y la temperatura promedio de esa última sección es más elevada que las otras, la deformación que se pueda presentar es muy pequeña, por lo cual, se concluye que el material y el espesor seleccionado para el cilindro fue el adecuado, cumpliendo con las especificaciones de diseño (Flórez-Solano; García-León; Sánchez-Ortiz, 2017).

La Figura 12 muestra el análisis térmico en el cilindro. En este análisis térmico se puede observar el calor que se transfiere al cilindro desde las resistencias calefactoras directamente y el calor que se transfiere del aire, fue aplicado un flujo de calor por convección con una temperatura ambiente de 22 °C; como es un estado transitorio, se estableció como temperatura inicial (García-León; Pérez, 2017).

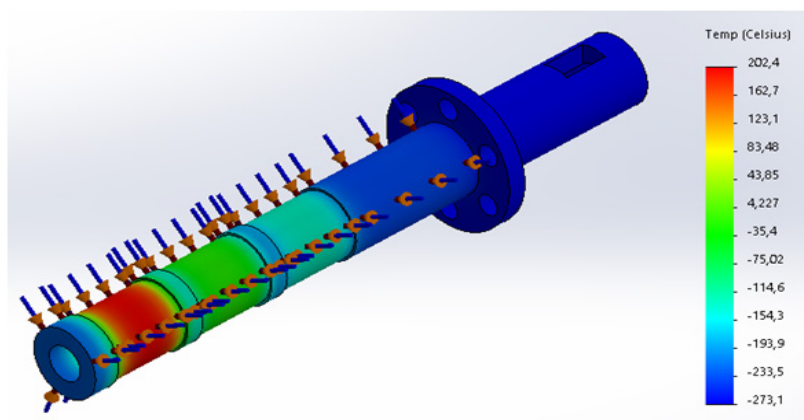


Figura 12. Resultados del análisis térmico del cilindro

Fuente: elaboración propia.

En la punta del cilindro se evidencia la mayor temperatura con un valor aproximado de 202 °C, obteniendo una respuesta positiva sobre el comportamiento de transferencia de calor para el diseño seleccionado (García-León; Flórez-Solano; Pérez-Rojas, 2015).

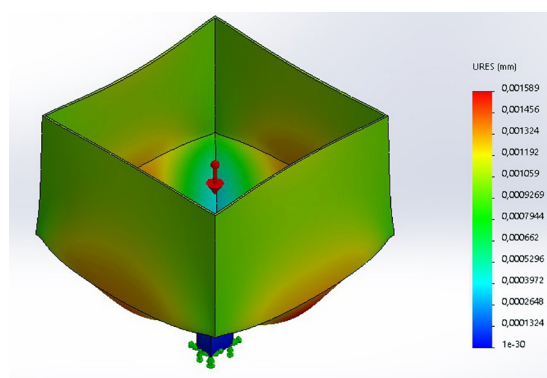
3.2.3. Tolva

A la tolva se le realizó un análisis estático para corroborar los esfuerzos que se pueden generar, en este caso, los provocados por el peso de los pellets de plástico, teniendo en cuenta las características de la Tabla 8:

Tabla 8.

Características de la tolva de alimentación

Nombre	Detalle	Unidades
Material	AISI 304 CD	-
Criterio de error predeterminado	Tensión de von Mises máx.	-
Límite elástico	2.07×10^8	N/m ²
Límite de tracción	5.17×10^8	N/m ²
Módulo elástico	1.9×10^{11}	N/m ²
Coeficiente de Poisson	0.29	-
Densidad	7900	kg/m ³
Módulo cortante	7.7×10^{10}	N/m ²
Coeficiente de dilatación térmica	1.8×10^{-5}	Kelvin
Tipo de malla	Malla sólida	-
Número de nodos	52592	-



Resultados del análisis estático de la tolva

Fuente: elaboración propia.

El análisis estático de la tolva mostró que el material elegido para su fabricación cumple correctamente con las especificaciones de diseño, debido a que, en esfuerzos, su límite elástico está por encima de los esfuerzos calculados por el software y en las deformaciones, con un valor mínimo de 0,00012 mm, como se muestra en la Tabla 8.

4. Conclusiones

Se realizó un diseño que planteó dos tipos de material a extruir (ABS y PLA), además de permitir el acople de diferentes boquillas, en este caso, una de 1,75 mm y una de 3 mm, dimensiones correspondientes a los diámetros de filamento más comerciales en la industria de impresión 3D. En el diseño de los elementos que conforman la máquina extrusora, se aseguró que el factor de seguridad fuese superior o igual a 1,2, con el propósito de garantizar un óptimo diseño.

Para la instalación del cabezal de extrusión, se debe tener en cuenta el orden de 60/80/120, para la verificación de cambio se debe tener en cuenta un límite de presión del 25 % superior a la presión de trabajo normal, cuando esto ocurra, se debe realizar el desmontaje del filtro y limpieza o de ser necesario cambiarlo.

Con el software SolidWorks se modeló cada pieza de la máquina y, a su vez, se realizó el ensamble de la misma. El ensamble permitió asegurar un correcto diseño y las medidas precisas y necesarias para su posterior construcción. Además, se implementó el análisis de elementos finitos, aplicando análisis estático y térmico a los elementos de mayor esfuerzo en la máquina. Estos elementos fueron el husillo, el cilindro y la tolva, y, de esta manera, se corroboró un correcto diseño de los elementos y materiales seleccionados.

5. Referencias

- Altinkaynak, A.; Gupta, M.; Spalding, M.; Crabtree, S. (2011). Melting in a single screw extruder: Experiments and 3D finite element simulations. *International Polymer Processing*, 26(2), 182–196.
<https://doi.org/10.3139/217.2419>
- Argotta-Hernandez, Breiner (2019). *Diseño de una máquina de materiales termoconformados para la fabricación de filamento ABS y PLA para impresoras 3D* (tesis de pregrado). Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Colombia.
- Brito, Nicolás (2017). *Diseño de extrusora de filamento para impresión 3D a partir de plásticos reciclados* (tesis de pregrado). Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.
- Budynas; Richard; Nisbett, Keith (2017). *Mechanical Engineering Design de Shigley* (9a Edition). EE.UU.: McGraw-Hill.
- Cengel, Yunus (2007). *Transferencia de calor y masa* (3ª Edición). México: McGraw-Hill.
- Cifuentes, Roosevelt (2011). *Diseño de una máquina extrusora para la empresa Plastik de Occidente* (tesis de pregrado). Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- Cisneros-López, Erick; Pal, Akhilesh; Rodríguez, Arturo; Wu, Feng; Misra, Manju; Mielewski, Deborah; Kiziltas, Alper; Mohanty, Amar (2020). Recycled poly (lactic acid)-based 3D printed sustainable biocomposites: a comparative study with injection molding. *Materials Today Sustainability*, 7–8, 100027.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2019.100027>

- Cruz, Fabio; Boudaoud, Hakim; Camargo, Mauricio; Pearce, Joshua (2020). Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121602.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121602>
- Mirón, V.; Ferrándiz, Santiago; Juárez, David; Mengual, Ana. (2017). Manufacturing and characterization of 3D printer filament using tailoring materials. *Procedia Manufacturing*, 13, 888–894.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.151>
- Flórez-Solano, Eder; García-León, Ricardo; Sánchez-Ortiz, Edgar (2017). Diseño de un sistema alimentador para un horno rotatorio en la producción de fosfato en Norte de Santander. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 1(29), 70–80.
<https://doi.org/10.24054/16927257.v29.n29.2017.2489>
- Flórez, Eder; García-León, Ricardo; Escobar, Marlon (2017). Modelo de equipo de prensado tipo palanca, para mejorar la producción de queso en la provincia de Ocaña. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2(28), 140–149.
<https://doi.org/10.24054/16927257.v28.n28.2016.2477>
- García-León, Ricardo; Bohórquez-Niño, A.; Barbosa-Paredes, J. (2019). Design of an extrusion machine for the manufacture of plastic tubes. *Journal of Physics: Conference Series*, 1257, 12006.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1257/1/012006>
- García-León, Ricardo; Flórez-Solano, Eder; Pérez-Rojas, Eduar (2015). Diseño de una máquina amasadora y laminadora automática de masa para pan. *Revista Ingenio UFPSO*, 8(1), 59–71.
- García-León, Ricardo; Pérez, Eduar (2017). Analysis of the amount of heat flow between cooling channels in three vented brake discs. *Ingeniería y Universidad*, 21(1), 71–96.
<https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu21-1.aahf>
- García-León, Ricardo; Suárez-Castrillón, Sir (2016). Diseño de un prototipo de sembradora mecánica de granos, alternativa agrícola. *Ingenio UFPSO*, 12(2011–642X), 33–40.
- Gómez, Jimmy; Gutiérrez, Jorge (2007). *Diseño de una extrusora para plásticos* (tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de Pereira, Risaralda, Colombia.
- Goutham, R.; Veena, T.; Prasad, K. (2018). Study on mechanical properties of recycled Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) blended with virgin Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) using Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*, 5(11), 24836–24845.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.282>
- Lanzotti, Antonio; Martorelli, Massimo; Maietta, Saverio; Gerbino, Salvatore; Penta, Francesco; Gloria, Antonio (2019). A comparison between mechanical properties of specimens 3D printed with virgin and recycled PLA. *Procedia CIRP*, 79, 143–146.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.030>
- Luna, Manuel; Valadez, Brenda (2016). Elaboración de filamentos de PLA, In: *Memorias del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals en Tecnologías Estratégicas Colima* (pp. 17–21). Villa de Álvarez, Colima, México.
- Fajardo, Jorge; Cobos, Cristian (2011). *Diseño de un sistema de extrusión-peletizado para el procesamiento de residuos plásticos para la empresa municipal de la ciudad de Cuenca EMAC*. Recuperado de: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/11164/1/Diseno%20de%20un%20sistema%20de%20extrusion%20peletizado%20para%20el%20procesamiento%20de%20los%20residuos%20plasticos%20para%20la%20Empresa%20Municipal%20de%20Aseo%20de%20Cuenca%20EMAC.pdf>

- Mena, Adrián (2018). *Diseño de una máquina extrusora de filamento termoplástico alimentada por desechos plásticos* (tesis de pregrado). Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
- Montealegre, Cristóbal; González, Luis (2015). *Diseño de una extrusora para filamento de impresión 3D* (tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Morales, Paola; Castillo, Jimmy (2006). *Metodología para el diseño de tornillos de máquinas extrusoras monohusillo*. Colombia: Universidad Autónoma de Colombia.
- Muñoz, J. (2008). *Diseño y automatización de máquina extrusora para reciclaje plástico* (tesis de pregrado). Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, Colombia.
- Ortiz, Cristian, Acuña, Fausto (2018). *Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica* (tesis de pregrado). Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Ecuador.
- Paredes, Jhon (2017). *Diseño de una máquina extrusora de plástico para los productores de manguera de Ocaña*. (tesis de pregrado). Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Colombia.
- Poudel, Bijaya (2015). *How to make Portable Homemade Filament Extruder* (tesis de pregrado). Arcada.
- Rigoussen, Alan; Raquez, Jean-Marie; Dubois, Philippe; Verge, Pierre (2019). A dual approach to compatibilize PLA/ABS immiscible blends with epoxidized cardanol derivatives. *European Polymer Journal*, 114, 118–126. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.02.017>
- Mexpolimeros (2019). *Producción, importación, distribución y comercialización de polímeros termoplásticos y elastómeros*. Recuperado de: <https://www.mexpolimeros.com/contracci%C3%B3n.html>
- Salim, Mohd; Termiti, Zarif; Saad, Adzni (2019). Mechanical Properties on ABS/PLA Materials for Geospatial Imaging Printed Product using 3D Printer Technology. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11357-8>
- Sobachkin, A.; Dumnov, G. (2014). *Base numérica de CFD integrada en CAD. Informe Técnico*. https://www.solidworks.es/sw/docs/Flow_Basis_of_CAD_Embedded_CFD_Whitepaper_ESP.pdf
- Thuresson, Adrian (2014). *CFD and Design Analysis of Brake Disc* (tesis de maestría). University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- Ullman, D. (2003). *The Mechanical Design Process*. México: McGraw Hill.
- Urrego, Juan; Escobar, Luis (2008). *Modelación paramétrica y manufactura de mezcladores para extrusión de termoplásticos utilizando sistemas CAD-CAM* (tesis de pregrado). Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.
- Vargas, Rubiel; Santiago, Roció; Patiño, M. (2008). Diseño y Construcción de un Controlador de Temperatura Programable para una Máquina Extrusora. *Revista Colombiana de Física*, 40(2), 385-387.
- Woern, Aubrey; McCaslin, Joseph; Pringle, Adam; Pearce, Joshua (2018). RepRapable Recyclebot: Open source 3-D printable extruder for converting plastic to 3-D printing filament. *HardwareX*, 4, e00026. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2018.e00026>

Evaluación de sustratos bajo un sistema hidropónico en un cultivo de fresa con variables de calidad

Evaluation of substrates under a hydroponic system in a strawberry crop with quality variables

Elizabeth Marcela Guerrero-Guerrero^{1*}

¹ Servicio Nacional de Aprendizaje SENA (Colombia). Correo electrónico: marcelitag2@yahoo.es
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3248-9456>

Recibido: 25-07-2020 Aceptado: 09-11-2020

Cómo citar: Guerrero-Guerrero, Elizabeth Marcela; (2020). Evaluación de sustratos bajo un sistema hidropónico en un cultivo de fresa con variables de calidad. *Informador Técnico*, 85(1), 52-63.
<https://doi.org/10.23850/22565035.2922>

Resumen

Este proyecto se realizó en el Centro Internacional de Producción Limpia Lope del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Regional Nariño, para evaluar dos tipos de sustratos como alternativas que mejoren la calidad de la fresa (*Fragaria ananassa* Duch) variedad Albión, bajo un sistema hidropónico abierto. Se utilizaron sustratos fibra de coco, cascarilla de arroz, solos y en mezcla (70 % - 30 %, 50 % - 50 %, 30 % - 70 %), comparados con un testigo en suelo, con cobertura plástica. Se evaluaron las variables físicas y químicas del fruto, como peso, diámetro, longitud, contenido de sólidos solubles, acidez titulable y firmeza. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar (BCA) con 6 tratamientos y 4 repeticiones. Las mezclas de los sustratos obtuvieron mejor respuesta para la variable firmeza que el tratamiento suelo, además, el tratamiento 100 % cascarilla de arroz obtuvo una respuesta superior en las variables grados Brix y acidez titulable, permitiendo generar una propuesta innovadora y competitiva para la producción de fresa en áreas reducidas en Nariño.

Palabras clave: calidad; grados Brix; agricultura urbana; *Fragaria ananassa* Duch.

Abstract

This project was carried out at the Centro Internacional de Producción Limpia Lope of Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Regional Nariño, to evaluate two types of substrates as alternatives that improve the quality of the strawberry (*Fragaria ananassa* Duch) variety Albión under an open hydroponic system. Coconut fiber and rice husk substrates were used, alone and in a mixture (70 % - 30 %, 50 % - 50 %, 30 % - 70 %), compared with a control in soil with plastic cover. The physical and chemical variables of the fruit such as weight, diameter, length, soluble solids content, titratable acidity, and firmness were evaluated. A Random Complete Blocks design with 6 treatments and 4 repetitions was used. The mixtures of the substrates obtained a better response for the firmness variable than the soil treatment, also, the 100 % rice husk treatment obtained a superior response in the variables of Brix degrees and titratable acidity, allowing the generation of an innovative and competitive proposal for strawberry production in reduced areas in Nariño.

Keywords: Quality; Brix grades; urban agriculture; *Fragaria ananassa* Duch.

1. Introducción

Los principales departamentos productores de fresa en Colombia son Cundinamarca, Antioquia, Cauca, Norte de Santander, Boyacá y Nariño. El mayor productor es Cundinamarca con rendimientos de 58,14 t.ha⁻¹ y un área sembrada de 1.144 ha, en comparación con Nariño que produce 5,2 t.ha⁻¹, con un área sembrada de 70 ha (Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario Colombiano [AGRONET], 2017); teniendo en cuenta que la horticultura y fruticultura constituyen un fuerte renglón económico y fundamental en la producción agrícola del departamento de Nariño, es de imperiosa necesidad mejorar la manera tradicional de cultivar, mediante nuevas alternativas de producción que lo conviertan en un departamento competitivo a nivel nacional con productos de buena calidad.

Actualmente, Nariño no es competitivo en comparación con otros departamentos, razón por la cual se busca implementar tecnologías innovadoras que permitan producir en áreas reducidas. En Colombia la fresa ha tomado gran importancia debido a sus propiedades nutricionales y organolépticas, además, se considera una fruta exótica, por lo anterior, para el sector agrícola se convierte en una alternativa en el mercado nacional e internacional (Flórez; Mora, 2010). La variedad Albión se caracteriza especialmente por su alta calidad de fruto tanto en tamaño como en sabor, firmeza, muy productiva y resistente a enfermedades como antracnosis (Ávila, 2015). La firmeza es uno de los principales atributos que se debe considerar, ya que la alteración de la textura (suavizamiento excesivo) puede hacer perder su calidad.

Por lo anterior, resulta importante mejorar las condiciones de firmeza del fruto, pues según Szczesniak y Smith (1969) este es uno de los aspectos más importantes durante el manejo poscosecha de la fresa, dado que la pérdida de calidad por la alteración de su textura (suavizamiento excesivo), se debe al adelgazamiento de las paredes celulares y la degradación de las pectinas. La textura está regida por los polisacáridos estructurales (sustancias pécticas), por ello, la firmeza es el principal factor que determina la calidad de la fresa y la vida útil en poscosecha. La composición de carbohidratos, la estructura celular y las propiedades físicas del tejido es compleja por el incremento celular durante el proceso de la maduración (Montero; Mollá; Esteban; López-Andréu, 1996).

Actualmente, se busca innovar en el modo de producción para obtener alimentos más sanos que contribuyan a la seguridad alimentaria, mejorar la calidad del fruto y garantizar mayor durabilidad, por lo anterior, se evaluó el efecto de los sustratos fibra de coco, cascarilla de arroz y sus mezclas, bajo condiciones hidropónicas en un cultivo de fresa en una zona del municipio de Pasto, a través de los componentes de calidad del fruto.

2. Metodología

La investigación se realizó en el Centro Internacional de Producción Limpia Lope SENA ubicada en el oriente de la ciudad de Pasto, coordenadas N 01° 12' 48", W 0.77° 15' 12.9", a una altitud de 2.630 msnm, con una temperatura promedio de 12 °C y una precipitación de 800 mm por año. Para cultivar las fresas se construyeron soportes en forma piramidal, sobre la cual, se colocaron a cada lado 5 tubos de PVC de 4 in con un largo de 2 m cada uno, se ubicaron con una pendiente para facilitar el drenaje y se perforaron cada 20 cm, para un total de 10 plantas por cada tubo.

Se utilizaron los sustratos fibra de coco y cascarilla de arroz, los cuales fueron preparados como se describen a continuación: se obtuvo la fibra mediante un productor comercial y posteriormente fue lavada para retirar el sodio, cloruros e impurezas. Se colocó abundante agua en un recipiente, luego se extendió sobre un plástico y se tapó. Después de este procedimiento, el sustrato se sometió a solarización durante un periodo de 8 días para su desinfección y utilización, respecto a la cascarilla de arroz, para su utilización se realizó un lavado con agua para eliminar taninos y quitar algunas impurezas, con 15 días de anticipación al trasplante.

Posteriormente, se colocó la cascarilla en un recipiente donde se mantuvo húmeda, se regó con abundante agua hasta saturación y se revolvió dos veces para eliminar subproductos. Este proceso se realizó durante 10 días, luego se colocó la cascarilla al aire sobre un plástico para que se oxigenara y eliminara el agua retenida.

Los estolones se obtuvieron de plantas madre de fresa variedad Albión, que se trasplantaron de un mes y medio de edad en los tubos de PVC. Cada estolón fue desinfectado con fungicida Carbendazim (i.a Metil bencimidazol-2-ilcarbamato) en dosis 1 cc/L de agua antes de la siembra.

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar (BCA) con seis tratamientos y 4 repeticiones. En las dos estructuras se colocaron 5 tubos por cada lado y se dispuso de una cama en suelo para el tratamiento 6. Para el procesamiento de datos se utilizó el paquete estadístico Stadistical Analysis Sistem (SAS).

Modelo estadístico:

$$Y_{ij} = \mu + \beta_i + T_j + E_{ij}$$

En donde,

Y_{ij} = Variable de respuesta

μ = Media general

β_i = Efecto de los bloques

T_j = Efecto de los tratamientos

E_{ij} = Error experimental

Los tratamientos evaluados en el presente trabajo, se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1.

Tratamientos cultivo de fresa (Fragaria ananassa Duch) bajo un sistema hidropónico

TRATAMIENTO	SUSTRATOS
T1	Cascarilla de arroz 100 %
T2	Cascarilla de arroz 70 % - Fibra de coco 30 %
T3	Cascarilla de arroz 50 % - Fibra de coco 50 %
T4	Cascarilla de arroz 30 % - Fibra de coco 70 %
T5	Fibra de coco 100 %
T6	Testigo en suelo con cobertura plástica

Fuente: elaboración propia.

En el tratamiento 6, que correspondió al testigo en suelo con cobertura plástica se ubicó junto a la estructura hidropónica, las plantas fueron sembradas en dos hileras separadas a 30 cm donde el riego se realizó con manguera de goteo. La preparación de la solución se realizó de acuerdo con el ciclo fenológico del cultivo de la fresa y a su estado de desarrollo, con sales solubles comerciales: Irricol inicio, Irricol vegetativo y Irricol producción.

Con base en la demanda nutrimental de la variedad Albión planteada por Aguilar (2011), como se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2.

Absorción de nutrimentos fresa variedad Albión

	(g. planta ⁻¹)	(g. planta ⁻¹)	(g. planta ⁻¹)	(g. planta ⁻¹)	(mg. planta ⁻¹)
	Nitrógeno	Fósforo	Potasio	Calcio	Boro
30 dds	0,15	0,03	0,3	0,1	2
60 dds	0,2	0,05	0,4	0,15	4
90 dds	0,18	0,04	0,3	0,1	3
120 dds	0,3	0,09	0,5	0,13	5
150 dds	0,6	0,3	1,6	0,45	20

dds: Días después de la siembra

Fuente: Aguilar (2011).

Antes de la aplicación de cada solución, se midió, con ayuda de un multiparamétrico (*Hanna portátil HI 1288*), la conductividad, pH y temperatura. El sistema que se utilizó en este ensayo fue un sistema hidropónico abierto (Tüzeli; Tunali; Tüzeli; Öztekin, 2009; Van-Os, 2009; Massa *et al.*, 2010). Se realizó un manejo integrado de enfermedades y plagas, de acuerdo con las necesidades del cultivo, teniendo en cuenta las Buenas Prácticas Agrícolas en Colombia (Instituto Colombiano Agropecuario [ICA], 2009).

3. Resultados

A continuación, se presenta la prueba de comparación de promedios de Tukey (Tabla 3), correspondiente a las variables número de peso de fruto (PF), diámetro de fruto (DF) y longitud de fruto (LF), correspondientes a los promedios de los datos de las lecturas realizadas durante el experimento.

Tabla 3.

Prueba de Comparación de Promedios de Tukey para las variables PF, DF y LF bajo un sistema hidropónico

TRAT	Peso Fresco/fruto (g)	Diámetro/Fruto (cm)	Longitud/Fruto (cm)
T1	24,130 b	4,2400 b	3,8100 ab
T2	25,103 ab	4,3775 ab	4,0125 ab
T3	26,458 ab	4,4050 ab	4,1150 ab
T4	22,513 b	4,2025 b	3,7975 ab
T5	26,573 ab	4,3050 b	3,7275 b
T6	30,820 a	4,8125 a	4,2200 a
DMS	6,4756	0,5058	0,447

Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$). Cada valor es el promedio de xx repeticiones

C; Cascarilla de arroz, F; Fibra de coco

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo al peso del fruto, el tratamiento T4 y T1 mostraron valores inferiores con respecto al T6; según los resultados que se muestran en la Tabla 4, el valor final de C.E alcanzado en el T4 fue de $2834 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, lo que coincide con D'Anna, Incalcaterra, Moncada y Miceli (2003), ya que el peso del fruto es afectado por conductividades eléctricas superiores a $2500 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ lo cual reduce el tamaño y peso del fruto.

Tabla 4.

Propiedades fisicoquímicas de los sustratos etapa inicial y etapa final conductividad eléctrica (CE)

TRAT	CE 1	CE 2
	($\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$)	($\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$)
T1	295,1	1852
T2	511,5	2278
T3	972,5	1300
T4	1387,5	2834
T5	1246	1907
T6	670,5	2010

Fuente: elaboración propia.

El diámetro es un indicador importante de la calidad de la fruta. Los tratamientos T6, T3 y T2 con diámetro de fruto de 4,8 cm, 4,4 cm y 4,3 cm, respectivamente, fueron los que obtuvieron el mayor diámetro de frutos. El T6 mostró diferencias significativas cuando se comparó con los tratamientos T4, T1 y T5 que muestran diámetro de fruto de 4,20 cm, 4,24 cm y 4,30 cm, respectivamente. La Tabla 5 muestra la calificación según el diámetro y peso del fruto de fresa Chandler, donde los valores obtenidos en este trabajo se pueden catalogar como frutos calibre A, con valores mayores a 3,4 cm y un peso promedio de 21,8 g.

Tabla 5.

Calibres de la fresa variedad Chandler

DIÁMETRO (cm)	CALIBRE	PESO PROMEDIO (g)
> 3.4	A	21.8
3.3-3.0	B	16.1
2.9-2.5	C	11.7
2.4-2.1	D	8.0
<2.0	E	5.3

Fuente: NTC 4103 (1997).

Para la variable longitud de fruto (LF), el T6 obtuvo un valor de 4,22 cm, el cual mostró diferencias significativas con respecto al T5, con un valor de 3,72 cm. Para los tratamientos T1, T2, T3 y T4, con valores promedios de 3,81 cm, 4,01 cm, 4,11 cm y 3,79 cm, respectivamente, son iguales a los tratamientos T5 y T6, con valores de 3,72 cm y 4,22 cm, respectivamente.

El peso, longitud y diámetro de los frutos cultivados en este experimento, se vieron posiblemente afectados por el contenido de sales de los sustratos, como afirman Casierra-Posada y García (2005) que el diámetro longitudinal y ecuatorial de los frutos de las plantas de fresa, se reduce al ser sometidos a salinidad por NaCl y que las plantas tratadas con concentraciones mayores de sal producen frutos de menor diámetro. También afirman que encontraron diferencias altamente significativas para las variables, diámetro longitudinal y diámetro transversal de frutos, con respecto a los factores concentración de NaCl en el sustrato. En trabajos similares, donde se evaluó longitud de fruto de fresa cultivada en suelo con tres láminas de riego diferentes (alta, media y baja), no se presentaron diferencias estadísticas, según lo reportado por Chaves y Lasso (2012). Igualmente, Delgado (2014) mostró que en la fresa variedad Camino Real, en suelo no tuvo diferencias significativas para las variables diámetro de fruto y longitud de fruto, al ser evaluado el efecto de las líneas de riego y aplicación de silicio en el cultivo.

A continuación, se presentan en la Tabla 6 los resultados para las variables grados Brix, firmeza y acidez titulable.

Para la variable grados °Bx, la Prueba de Comparación de Promedios de Tukey (Tabla 6), mostró que el tratamiento T1, con un valor de 9.51 °Bx, obtuvo un valor superior con respecto a los tratamientos T3 Y T6, lo cual indica que las propiedades físicas y químicas de la cascarilla de arroz, son favorables para el desarrollo radicular, crecimiento y calidad de fruto (Rodríguez-Delfín; Chang; Hoyos; Falcón, 2005). Por otra parte, valores inferiores fueron obtenidos por el T6 y T3, con 7.78 y 7.26 °Bx, respectivamente.

Tabla 6.

Prueba de Comparación de Promedios de Tukey para las variables BX, F y AT bajo un sistema hidropónico

TRAT	BX (°Bx)	F(Kgf.cm ²)	AT (%Ácido cítrico)
T1	9,5125 a	3,4225 a	1,29250 bc
T2	9,0975 ab	3,5325 a	1,51500 a
T3	7,2650 c	3,5300 a	1,36500 b
T4	8,2100 abc	3,9900 a	1,21750 cd
T5	8,2625 abc	3,9250 a	1,39750 ab
T6	7,7800 bc	2,2775 b	1,13500 d
DMS	1,559	1,0736	0,1326
Letras distintas indican diferencias significativas (p < 0,05), C; Cascarilla de arroz, F; Fibra de coco			

Fuente: elaboración propia.

El tratamiento T2 presentó diferencias significativas con respecto al tratamiento T3. Por otro lado, los tratamientos T2, T4, T5 y T6, con valores de 9,09, 8,21, 8,26 y 7,78 °Bx, respectivamente, son similares, del mismo modo el tratamiento T3, con un valor de 7,26 °Bx, es similar a los tratamientos T4, T5 y T6, con valores de 8,21, 8,26 y 7,78 °Bx, respectivamente.

La Norma Técnica Colombiana [NTC 4103] (1997) determinó las cantidades de los Sólidos Solubles Totales en fresa con valores mínimos inferiores a los encontrados en el presente trabajo, a excepción de los encontrados en el T3, con 7,26 °Bx.

Así mismo, los valores de °Bx obtenidos en este experimento fueron superiores a los presentados por González y Ferrucho (2013), quienes reportaron 6,7 °Bx en un experimento realizado a campo abierto utilizando la variedad Albión y Monterrey. En el presente experimento, los mayores valores fueron 9,51 y 9,09 °Bx en los sustratos con alto contenido de cascarilla de arroz y 8,26 y 8,21 °Bx para los frutos que se cultivaron en sustratos con alto contenido de fibra de coco, lo cual es comparable con lo reportado por Rivera (1993), ya que para la variedad Camarosa se presentó un valor de 9,6 °Bx, en comparación con la variedad Chandler con 9,0 °Bx.

Por otro lado, Martínez-Soto, Mercado-Flores, López-Orozco y Prieto-Velásquez (2010) compararon ocho variedades de fresa cultivadas en suelo, donde se obtuvo 10,92 °Bx, para la variedad Albión. En otros estudios, al utilizar ácido giberélico, el máximo contenido de sólidos solubles totales alcanzó 8,79 y 7,53 °Bx en diferentes años, valores superiores no afectarían el dulzor durante la maduración, ya que se encuentran en el rango (Roudeillac; Trajkovski, 2004; Pérez; Sanz, 2008). Valores similares de sólidos solubles totales fueron encontrados por Moccia; Mocano; Oberti; Chiesa (2007), en una caracterización al momento de la cosecha del cultivar Camarosa sin ningún tratamiento.

Por otro lado, Ozguven y Yilmaz (2002) encontraron valores similares al aplicar de 10 a 20 mg.L⁻¹ de ácido giberélico. Es importante tener en cuenta que Albión registra 1 °Bx más, con respecto a otros cultivares de día neutro (Ornelas-Paz *et al.*, 2013; Samykanno; Pang; Marriott, 2013). Según Pérez, Ojeda, Mogollón y Giménez (2013), los diferentes sustratos afectan el comportamiento de las variables físicas y químicas de calidad de los frutos, pero sin una tendencia definida, contrario a lo reportado por Martínez-Bolaños *et al.* (2008), quienes señalan que no existen diferencias estadísticas en las concentraciones de sólidos solubles totales (SST), entre diferentes cultivares en distintos periodos de muestreo. Por el contrario, para Palencia, Bordonaba, Martínez y Terry (2016) los azúcares no se vieron afectados significativamente por la naturaleza del sustrato. Además, posiblemente la fertirrigación en los diferentes sustratos permite que la planta tenga acceso a los elementos nutricionales de forma correcta, ya que las concentraciones y relaciones son las adecuadas para evitar fenómenos negativos, como efecto osmótico y antagonismos, que perturban la absorción de nutrientes de la planta (Cadahia, 2005), así, los fertilizantes se asimilan mejor y los frutos son de mejor sabor y calidad.

Por otro lado, los frutos producidos en sustratos con altos contenidos de cascarilla de arroz y fibra de coco presentaron mejor contenido de °Bx, lo cual puede traducirse en un mayor dulzor y calidad de la fruta, al contener una mayor cantidad de compuestos, como fructosa, glucosa y sacarosa, pues según Alavoine y Crochon (1989) y Montero *et al.* (1996), un mayor contenido de SST en frutos permite una mayor calidad. Así mismo, Perkins-Veazie (1995) menciona que los azúcares son los principales compuestos solubles en los frutos de fresa, de los cuales, fructosa, glucosa y sacarosa son los que se encuentran en mayor cantidad y determinan los grados Brix (Hidekazu, 2002; Hamano; Yamato; Yamazaki; Miura, 2002; Wrolstad; Shallenberger, 1981). El contenido de SST en los frutos varía según el cultivar (Hamano *et al.*, 2002; Hancock, 1999) y la época de cosecha (Anagnostou; Vasilakakis, 1995; Caglar; Paydas, 2002; Hakala; Tahvonen; Huopalahti; Lapveteläinen, 2002).

En el T6 y T3, posiblemente disminuyó el contenido de azúcares, por un incremento en la competencia por la distribución de fotoasimilados, lo cual puede explicar la disminución en los grados Brix en estos tratamientos. Por lo anterior, es posible que, al tener mayor cantidad de flores e inflorescencias y mayor potencial de formación de frutos, tuvo que distribuir sus fotoasimilados entre la mayor cantidad de estructuras florales que desarrolló (Taiz; Zeiger, 2006).

De igual forma, al generar mayor interés en la producción de fresas hidropónicas, se ha evaluado el efecto de la salinidad por NaCl, intentando lograr el balance del crecimiento vegetativo y reproductivo, mejorando así la calidad de fruta (Awang *et al.*, 1993a; Awang *et al.*, 1993b). Ya que el riego localizado incrementa la acumulación de sales en la zona húmeda, lo que disminuye la presión osmótica en la rizósfera, disminuyendo el crecimiento y la producción de las plantas (Casierra-Posada; García, 2005), como consecuencia de la salinidad en sustratos, se presenta un mayor contenido de sólidos solubles totales (SST) y de la acidez titulable no solo en fresa, sino también en otros frutales, como guayaba (Walker; Kriedmann; Maggs, 1979), manzana (El-Siddig; Lüdders, 1994), tomates (Mizrahi *et al.*, 1988; Adams, 1991) y pimienta dulce (Janse, 1989; Chartzoulakis, 1992).

Por otra parte, para la variable acidez titulable, según la Prueba de Comparación de Promedios de Tukey (Tabla 6), el tratamiento T2 obtuvo diferencias significativas, con un valor de 1,51 % de ácido cítrico, con respecto a los tratamientos T1, T3, T4 y T6, con valores de 1,29, 1,36, 1,21 y 1,13 % de ácido cítrico, respectivamente. Por otro lado, el T2 no presentó diferencias estadísticas significativas con el tratamiento T5, con un valor de 1,39 % de ácido cítrico. En todos los tratamientos, los valores fueron superiores a los de la NTC, ya que oscilaron entre 1,13 en T6 y 1,51 en T2.

Se debe tener en cuenta que el contenido de acidez afecta el sabor (Rivera, 1993). Para este experimento los tratamientos tienen un alto porcentaje de ácido cítrico. Sin embargo, el valor más bajo se encontró en el T6, con 1,13 %, ya que de acuerdo con los resultados obtenidos por Kader (1991), los frutos con una menor acidez titulable favorecen su consumo en fresco en mercado nacional e internacional, donde los frutos de todos los cultivares superarán la concentración máxima de acidez titulable de 0,8 % (NTC 4103, 1997) para un sabor aceptable. Por el contrario, los valores más altos de acidez titulable los obtuvieron las mezclas de los sustratos

en especial el T2, con 1,5 %, ya que, de acuerdo con Quian, Finn y Schroeder (2005) permiten obtener productos procesados de mayor calidad.

Para Martínez, Oliveira, Oliveira, Palencia (2017) la calidad de la fruta se vio afectada por el medio de crecimiento, donde la fibra de coco mostró cambios en los parámetros de calidad. Aunque esta característica depende de cada cultivar, ya que estudios similares muestran que el valor de acidez titulable es mayor en Camarosa con 1,04 que en la variable Chandler con 0,84, de igual forma, ambas presentan un sabor aceptable (Rivera, 1993). La acidez puede variar, dependiendo de la época de cosecha del fruto como lo afirman Martínez-Bolaños *et al.* (2008). De ahí que los resultados puedan ser influenciados por la fecha de cosecha (Hakala *et al.*, 2002). Por lo anterior, es posible afirmar que la calidad de fruta expresada, como peso fresco y diámetro de fruto, se disminuye por el aumento en la conductividad eléctrica, resultante de la salinidad; opuesto a lo anterior, los sólidos solubles totales y la acidez titulable tuvieron un incremento directo con respecto a la salinidad, según Casierra-Posada y García (2005).

La variable firmeza, de acuerdo con la Prueba de Comparación de Promedios de Tukey (Tabla 6), presentó valores estadísticamente superiores en los tratamientos T1, T2, T3, T4, T5, con valores de 3,42, 3,53, 3,53, 3,99 y 3,92 kgf*cm², respectivamente, con respecto al obtenido en el tratamiento T6 que presentó una firmeza de 2,27 kgf*cm². Donde los frutos de las plantas que se cultivaron en suelo, alcanzaron los menores valores de firmeza, lo cual incide en la calidad, ya que los frutos blandos son susceptibles a daños durante la selección, empaque, transporte, distribución, ataque de patógenos, menor capacidad de conservación del fruto y calidad (Maroto; López, 1988; Paraskevopoulou-Paroussi; Vassilakakis; Dogras, 1995). Por otro lado, los mayores valores de firmeza fueron obtenidos en los tratamientos cultivados en sustratos, lo que coincide con lo que afirman Buitrago, López, Coronado y Osorno, (2004), ya que la firmeza de un fruto favorece la resistencia a daños mecánicos ocasionados por la poscosecha y el embalaje, además del método de recolección y de la temperatura de almacenamiento.

Los frutos del T6 son más blandos que los cultivados en hidroponía. Son frutos más susceptibles a daños mecánicos e infección de enfermedades, deteriorándose más rápidamente la calidad del fruto, lo que coincide con Fabela, Hernández, Vázquez y Lozano (2002), quienes afirman que un producto hortícola se daña por la infección causada por varios hongos, ya que la piel del producto y sus capas se rasgan, incrementando el ingreso de bacterias. Durante este proceso se originan actividades fisiológicas en los tejidos, lo que altera el proceso de maduración. Además, se exponen los tejidos al contacto directo con el aire, lo que hace que se acelere la oxidación y se oscurezca rápidamente la piel del fruto, permitiendo la presencia de patógenos saprofitos facultativos con enzimas de tipo pectolítico e hidrolítico que favorecen la descomposición, acelerando la pudrición con un oscurecimiento enzimático, similar a un tejido dañado como lo que sucede con manzanas, peras, duraznos y cerezas. De igual forma, la respiración se hace más intensa, incrementando el consumo de oxígeno (Giörgy, 1986). También los azúcares y otros productos de almacenamiento de las frutas, se consumen y contribuyen a la pérdida del valor alimenticio y de las reservas, afectando el sabor del fruto (Crisosto; Garner; Doyle; Day, 1993).

Según Szczesniak y Smith (1969) las fresas presentan células grandes y muy separadas unas de otras, lo que hace que sea un tejido muy suave y, en consecuencia, susceptible al daño mecánico (Burkhart, 1943), ya que se suaviza la pared celular por los cambios que sufren las pectinas (Montero *et al.*, 1996) y la degradación de los materiales pécticos en la lámina media, lo que hace perder el poder cementante de la pared (Perkins-Veazie, 1995).

4. Conclusión

Los cultivos hidropónicos se presentan como una alternativa innovadora y competitiva para la producción de fresa en Nariño, ya que permite tener un buen número de plantas en áreas reducidas, obtener frutos más firmes y de buena calidad. Además, la implementación de esta herramienta en el departamento, brindará una oportunidad rentable y tecnológica al productor con suelos no aptos para agricultura y que se ajusta a las necesidades de la zona. De acuerdo con los resultados obtenidos en algunas variables de calidad, como firmeza, los frutos tendrán mayor resistencia, lo que le permitirá al productor tener una ventaja a la hora de realizar manipulación de fruta en poscosecha. Además, cabe resaltar que productores y técnicos del área permanentemente buscan información sobre el tema y realizar la comparación con las ventajas que el sistema presenta, con respecto al cultivo en suelo, razón por la cual esta investigación permitirá documentarse sobre el tema, ya que el éxito de la técnica dependerá del control de las condiciones y de los parámetros para asegurar la calidad y eficiencia en campo como se muestra en este artículo.

Referencias

- Adams, P. (1991). Effect of increasing the salinity of nutrient solution with major nutrients or sodium chloride on yield, quality and composition of tomatoes grown in rockwool. *Journal of Horticultural Science*, 66(6), 201-207.
- Aguilar, Martin (2011). *Demanda nutricional de cuatro variedades de fresa (Fragaria annanasa Duch), cultivadas en la región de Zamora Michoacan* (tesis de maestría). Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Alavoine, F.; Crochon, M. (1989). Taste quality of strawberry. *Acta Horticulturae*, 265, 449–452.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1989.265.68>
- Anagnostou, K.; Vasilakakis, M. (1995). Effect of substrate and cultivar on earliness, plant productivity, and fruit quality of strawberry. *Acta Horticulturae*, 379, 267–274.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1995.379.33>
- Ávila, Eliana (2015). *Manual de Fresa*. Cámara de Comercio de Bogotá. Vicepresidencia de fortalecimiento empresarial. Bogotá, Colombia: Cámara de Comercio de Bogotá.
- Awang, Y. B.; Atherton, J. G.; Taylor, A. J. (1993a). Salinity effects on strawberry plants grown in rockwool. I. Growth and leaf relations. *Journal of Horticultural Science*, 68(5), 783-790.
<https://doi.org/10.1080/00221589.1993.11516413>
- Awang, Y. B.; Atherton, J. G.; Taylor, A. J. (1993b). *Salinity effects on strawberry plants grown in rockwool. Part II. Fruit quality*. *Journal of Horticultural Science*, 68(5), 791-795.
<https://doi.org/10.1080/00221589.1993.11516414>
- Buitrago, Germán; López, Alonso; Coronado, Alfonso; Osorno, Fernando (2004). Determination of physical characteristics and mechanical properties of potatoes cultivated in Colombia. *Rev. bras. eng. agric. ambient.* 8(1), 102-110
<https://doi.org/10.1590/S1415-43662004000100015>
- Burkhart, Leland (1943). Firmness of strawberries as measured by a penetrometer. *Plant Physiol.*, 18(4). 693-698.
<https://doi.org/10.1104/pp.18.4.693>
- Cadahia, Carlos (2005). *Fertirrigacion. Cultivos hortícolas, frutales y ornamentales*. Madrid, España: Mundi-Prensa.
- Caglar, H.; Paydas, S. (2002). Changes of quality characteristics and aroma compounds of hybrids and some strawberry cultivars during harvest periods. *Acta Horticulturae*, 567, 203–206.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.567.40>

- Casierra-Posada, Fánor; García, Nehidy (2005). Crecimiento y distribución de materia seca en cultivares de fresa (*Fragaria* sp.) bajo estrés salino. *Agronomía Colombiana*, 23(1), 83-90.
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/19909>
- Chartzoulakis, K. (1992). Effects of NaCl salinity on germination, growth, and yield of greenhouse cucumber. *Journal of Horticultural Science*, 67, 115-119.
<https://doi.org/10.1080/00221589.1992.11516227>
- Chaves, Ángela; Lasso, Zahara (2012). *Efecto de dos coberturas plásticas y tres láminas de agua bajo un sistema de riego por goteo en un cultivo de fresa (Fragaria sp.)* (tesis de pregrado). Universidad de Nariño, Pasto, Colombia.
- Crisosto, C.; Garnes, D.; Doyle, J.; Day, K. (1993). Relationship between fruit respiration, bruising susceptibility, and temperature in sweet cherries. *HortScience*, 28(2), 132-135.
- D'anna, F.; Incalcaterra, G.; Moncada, A.; Miceli, A. (2003). Effects of different electrical conductivity on strawberry grown in soilless culture. *Acta Horticulturae*, 609, 355-360.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.609.53>
- Delgado, Ana (2014). *Efecto de las líneas de riego por goteo y la aplicación del silicio en un cultivo de fresa (Fragaria sp.) bajo cubierta* (tesis de pregrado). Universidad de Nariño, Pasto, Colombia.
- El-Siddig, K.; Lüdders, P. (1994). Interactive effects of nitrogen nutrition and salinity on reproductive growth of apples trees. *Gartenbauwissenschaft*, 59(2), 58-61.
- Fabela, Manuel; Hernández, José; Vázquez, David; Lozano, Alejandro (2002). Vibración durante el transporte y su efecto en percederos. Enfoque introductorio. *Publicación Técnica*, 188. 5-45.
- Flórez, Rafael; Mora, Ruth (2010). *Fresa (Fragaria ananassa Duch) producción y manejo poscosecha*. 1ª Edición. Bogotá, Colombia: Corredor Tecnológico Agroindustrial, Cámara de Comercio de Bogotá.
- Giörgy, Sitkei (1986). *Mechanics of Agricultural Materials*. Budapest, Hungary: Elsevier Science Publisher.
- González, Diana; Ferrucho, Ana (2013). *Evaluación y comparación del comportamiento agronómico de dos cultivares de fresa ('Albion' y 'Monterey') sembrados a libre exposición y bajo macrotúnel en la sabana de Bogotá (Colombia)* (tesis de pregrado). Universidad Militar "Nueva Granada", Cajicá, Colombia.
- Hakala, R.; Tahvonen, R.; Huopalahti, R.; Lapveteläinen, A. (2002). Quality factors of finnish strawberries. *Acta Horticulturae*, 567, 727-729.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.567.159>
- Hamano, M.; Yamato, Y.; Yamazaki, H.; Miura, H. (2002). Change in sugar contents and composition of strawberry fruit during development. *Acta Horticulturae*, 567, 369-372.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.567.80>
- Hancock, James (1999). *Strawberries*. New York, USA: CAB International Publishing.
- Hidekazu, Ito (2002). Potential of near infrared spectroscopy for nondestructive determination of °Brix in strawberries. *Acta Horticulturae*, 567, 751-754.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.567.165>
- Instituto Colombiano Agropecuario (2009). *Mis Buenas Prácticas Agrícolas "Guía para agroempresarios"*. Bogotá, Colombia: ICA.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC (1997). Norma Técnica Colombiana NTC 4103, Bogotá, Colombia.

- Janse, J. (1989). Effects of humidity, temperature, and concentration of the nutrient solution on firmness, shelflife and flavor of sweet pepper fruits (*Capsicum annuum* L.). *Acta Horticulturae*, 244, 123-132.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1989.244.12>
- Kader, A. (1991). Quality and its maintenance in relation to the postharvest physiology of strawberry. In: J.J. Luby; A. Dale (Eds.). *The strawberry into the 21st Century* (pp. 145–151). Portland, Oregon, USA: Timber Press.
- Maroto, José; López, S. (1988). *Producción de fresas y fresones*. Madrid, España: Mundi-Prensa.
- Martínez, Fátima; Oliveira, José; Oliveira, Eunice; Palencia, Pedro (2017). Influence of growth medium on yield, quality indexes and SPAD values in strawberry plants. *Scientia Horticulturae*, 217, 17-27.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.01.024>
- Martínez-Bolaños, M.; Nieto-Angel, D.; Téliz-Ortiz, D.; Rodríguez-Alcazar, J.; Martínez-Damián, T.; Vaquera-Huerta, H.; Carrillo, O. (2008). Comparación cualitativa de fresas (*Fragaria x ananassa* Duch.) de cultivares mexicanos y estadounidenses. *Revista Chapingo. Serie horticultur*, 14(2), 113-119.
- Martínez-Soto, G.; Mercado-Flores, J.; López-Orozco, M.; Prieto-Velásquez, B. (2010). *Propiedades fisicoquímicas de seis variedades de fresa (Fragaria ananassa) que se cultivan en Guanajuato* (tesis de pregrado). Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México.
- Massa, D.; Incrocci, L.; Maggini, R.; Carmassi, G.; Campiotti, C.; Pardossi, A. (2010). Strategies to decrease water drainage and nitrate emission from soilless culture of greenhouse tomato. *Agriculture Water Management*, 97(7), 971-980.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.01.029>
- Mizrahi, Y.; Taleisnik, E.; Kagan-Zur, V.; Zohar, Y.; Offenbach, R.; Matan, E.; Golan, R. (1988). A saline irrigation regime for improving tomato fruit quality without reducing yield. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 113(2), 202-205.
- Moccia, Silvia; Mocano, Edgardo; Oberti, Adriana; Chiesa, Ángel (2007). Evaluación comparativa de índices de calidad a cosecha en seis variedades de frutilla (*Fragaria annanassa* Duch. In: *V Congreso Iberoamericano de Tecnología Poscosecha y Agroexportaciones* (pp. 433-441). Cartagena, España.
- Montero, Teresa; Mollá, Esperanza; Esteban, Rosa; López-Andréu, Francisco (1996). Quality attributes of strawberry during ripening. *Scientia Horticulturae*, 65(4), 239–250.
[https://doi.org/10.1016/0304-4238\(96\)00892-8](https://doi.org/10.1016/0304-4238(96)00892-8)
- Ornelas-Paz, José; Yahia, Elhadi; Ramírez-Bustamante, Nidia; Pérez-Martínez, Jaime; Escalante-Minakata, María; Ibarra-Junquera, Vrani; Acosta-Muñiz, Carlos; Guerrero-Prieto, Víctor; Ochoa-Reyes, Emilio (2013). Physical attributes and chemical composition of organic strawberry fruit (*Fragaria x ananassa* Duch, Cv. Albion) at six stages of ripening. *Food Chemistry*, 138(1), 372-381.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.11.006>
- Ozguven, A.; Yilmaz, C. (2002). The effects of the gibberelle acid treatments on the yield and fruit quality in strawberry (*Fragaria annanassa*) CV. Camarosa. *Acta horticulturae*, 567, 277-279.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.567.57>
- Palencia, Pedro; Bordonaba, Jordi; Martínez, Fátima; Terry, León (2016). Investigating the effect of different soilless substrates on strawberry productivity and fruit composition. *Scientia Horticulturae*, 203, 12-19.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.03.005>
- Paraskevopoulou-Paroussi, G.; Vassilakakis, M.; Dogras, C. (1995). Effects of temperature, duration of cold storage and package on postharvest quality of strawberry fruit. *Acta Horticulturae*, 379, 337–344.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1995.379.42>

- Pérez, Ana; Sanz, Carlos (2008). Técnicas de poscosecha, manejo, almacenamiento y transporte de frutos. En: Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca (Eds.), *La fresa Huelva* (pp. 273-276). Madrid, España: Viceconsejería. Servicio de Publicaciones y Divulgación.
- Pérez, María; Ojeda, Maritza; Mogollón, Norca; Giménez, Aracelis (2013). Efecto sobre los sustratos y ácido giberélico sobre el crecimiento, producción y calidad de fresa *Fragaria ananassa* Duch cv Camarosa. Venezuela. *Revista Bioagro*, 25, 31-38.
- Perkins-Weazie, P. (1995). Growth and ripening of strawberry fruit. *Horticultural Reviews*, 17, 267–297.
<https://doi.org/10.1002/9780470650585.ch8>
- Quian, M.; Finn, C.; Schroeder, J. (2005). *Objective flavor comparison of Oregon strawberries and those from other climatic conditions*. Oregon Strawberry Commission, USA: Progress report.
- Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario Colombiano [AGRONET], (2017). *Sistema de reportes y estadísticas*. Recuperado de:
https://www.agronet.gov.co/Documents/34-FRESA_2017.pdf
- Rivera, Álvaro (1993). *Commercial Postharvest handling of Strawberries (Fragaria spp)*. Minneapolis, EEUU: Minnesota Extension Service, University of Minnesota.
- Rodríguez-Delfín, A.; Chang, M.; Hoyos, M.; Falcón, F. (2010). Rendimiento de cebolla bajo cultivo hidropónico. *Red Hidroponía, Boletín*, 46.
- Roudeillac, P.; Trajkovski, K. (2004). Breeding for fruit quality and nutrition in strawberries. *Acta Horticulturae*, 842, 737-740.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.649.7>
- Samykanno, Kavitha; Pang, Edwin; Marriott, Philip (2013). Genotypic and environmental effects on flavor attributes of ‘Albion’ and ‘Juliette’ strawberry fruits. *Scientia Horticulturae*, 164, 633-642.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.09.001>
- Szczesniak, Alina; Smith, Bertha (1969). Observations on Strawberry Texture, a three-pronged approach. *Journal of Texture Studies*, 1(1), 65-89.
<https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.1969.tb00957.x>
- Taiz, Lincoln; Zeiger, Eduardo (2006). *Plant Physiology*. (4th edition). Sunderland, Massachusetts: Sinauer Associates Inc. Publishers.
- Tüzel, I.; Tunali, U.; Tüzel, Y.; Öztekin, G. (2009). Effects of salinity on tomato in a closed system. *Acta Horticulturae*, 807, 457-462.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.807.65>
- Van-Os, E. (2009). Comparison of some chemical and non-chemical treatments to disinfect a recirculating nutrient solution. *Acta Horticulturae*. 843, 229-234.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.843.29>
- Walker, R. R.; Kriedmann, P. E.; Maggs, D. H. (1979). Growth, leaf physiology and fruit development in salt-stressed guavas. *Australian Journal of Agricultural Research*, 30(3), 477-488.
- Wrolstad, Ronald; Shallenberger, Robert (1981). Free sugars and sorbitol in fruits – a compilation from the literature. *Journal of the Association of Official Analytical Chemist*, 64(1), 91–103.
<https://doi.org/10.1093/jaoac/64.1.91>

Determinación de la actividad antioxidante y antimicrobiana de residuos de mora (*Rubus glaucus Benth*)

Determination of the antioxidant and antimicrobial activity of blackberry residues (*Rubus glaucus Benth*)

Carlos David Grande-Tovar¹
Carlos Andrés Aranaga-Arias²
Edwin Flórez-López³
Liza María Araujo-Pabón⁴

¹ Universidad del Atlántico (Colombia). Correo electrónico: carlosgrande@mail.uniatlantico.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6243-4571>

² Universidad Santiago de Cali (Colombia). Correo electrónico: carlos.aranaga00@usc.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1806-657X>

³ Universidad Santiago de Cali (Colombia). Correo electrónico: Edwin.florez00@usc.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6312-7568>

⁴ Universidad Santiago de Cali (Colombia). Correo electrónico: lisis.94@hotmail.com

Recibido: 01-07-2020 Aceptado: 13-11-2020

Cómo citar: Grande-Tovar, Carlos; Aranaga-Arias, Carlos; Flórez-López, Edwin; Araujo-Pabón, Liza (2020). Determinación de la actividad antioxidante y antimicrobiana de residuos de mora (*Rubus glaucus Benth*). *Informador Técnico*, 85(1), 64-82.
<https://doi.org/10.23850/22565035.2932>

Resumen

El procesamiento de frutas y verduras genera alrededor de 1,3 billones de toneladas por año de residuos a lo largo de toda la cadena de producción. Con el propósito de agregar valor a los residuos de mora provenientes de una despulpadora de un mercado local, se determinó la capacidad antioxidante y antibacteriana con tres cepas de bacterias. Los residuos presentaron una alta cantidad de la antocianina cianidina-3-rutinosido (2520 mg/kg de muestra) mediante el análisis del sistema de cromatografía líquida de ultra alta resolución (UHPLC), una acidez titulable de 1,28 %, un pH ácido 3,23 y un contenido de cenizas de 0,45 %. El extracto hidrometanólico 80:20 % (v/v) presentó la mayor capacidad antioxidante por el método DPPH (40,53 µmol equivalente trolox, TE), mientras que el extracto liofilizado mostró la mayor capacidad antioxidante por el método del ácido 2,2'-azino-bis (3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico) (ABTS) (60,31 µmol equivalente trolox, TE). La actividad antibacteriana dependió de la cantidad del extracto hidrometanólico y del tipo de cepa (las Gram positivas fueron más sensibles), siendo *S. aureus* la bacteria más sensible (15,3 mm a 8 mg/mL de extracto). *S. aureus* y *E. coli* presentaron una sensibilidad alta respecto a la concentración mínima inhibitoria (MCI) (3 mg/mL y 4 mg/mL, respectivamente).

Palabras clave: ABTS, alimentos nutraceuticos, aprovechamiento de residuos, DPPH, residuos de mora.

Abstract

Fruit and vegetable production generate around 1.3 billion tons per year of waste throughout the entire production chain. To add value to blackberry residues, the antioxidant and antibacterial capacity was determined with three strains of bacteria. The residues showed a high amount of the anthocyanin cyanidin-3-rutinoside (2520 mg/kg of the sample) by UHPLC analysis, titratable acidity of 1.28 %, an acidic pH 3.23, and a content of ashes of 0.45 %. The 80:20 % (v/v) hydromethanolic extract presented the highest antioxidant capacity

by the DPPH method (40.53 μmol Trolox equivalents, TE), while the lyophilized extract presented a superior antioxidant capacity by the ABTS method 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzotiazolina-6-sulfónico) (60.31 μmol Trolox equivalents, TE). Antibacterial activity was dependent on the concentration of the hydromethanolic extract and the type of strain (*Gram-positive* were most sensitive than *Gram-negative*), with *Staphylococcus aureus* being the most sensitive bacteria (15.3 mm at 8 mg/mL of extract). *S. aureus* and *Escherichia coli* presented a high sensitivity concerning the MCI (3 mg/mL and 4mg/mL, respectively).

Keywords: ABTS, DPPH, nutraceutical foods, waste added-value, blackberry waste.

1. Introducción

A nivel global, se calcula que se pierden 1,3 billones de toneladas anuales de alimentos producidos (Vilarino; Franco; Quarrington, 2017; Xue; Liu, 2019; Abbade, 2020). Las pérdidas pueden ocurrir en cualquier etapa a lo largo de toda la cadena de producción, desde la etapa de producción agraria hasta el consumo por parte del cliente final. Se calcula que en la etapa de producción se pierde entre un 24 % y un 30 % de los alimentos producidos, mientras que en poscosecha se pierden alrededor de un 20 % y en la etapa de consumo un 30 % - 35 %, siendo las frutas y verduras (44 %) los alimentos que más se pierden (Vilarino *et al.*, 2017). Los productos vegetales, especialmente las frutas, poseen una variedad de compuestos químicos que actúan como agentes antioxidantes, sustancias que pueden neutralizar, prevenir o retrasar gran parte del proceso de oxidación (Cheok *et al.*, 2018; Ben-Othman; Jöudu; Bhat, 2020). La presencia de las vitaminas C, E y otros compuestos bioactivos son los principales antioxidantes presentes, siendo los fenoles el grupo más importante y prominente que actúan de forma directa e independiente del sistema enzimático (Coronado; Vega; Gutiérrez; Vázquez; Radilla, 2015). Los grupos hidroxilo de los compuestos fenólicos son los principales secuestradores de los radicales libres durante el proceso oxidativo (Mosquera; González; Cortés; Camargo, 2016; Zeb, 2020).

La prevención de enfermedades respiratorias, carcinogénicas, neurológicas, cardiovasculares y la disminución del envejecimiento son consecuencia del atrapamiento de los radicales libres y las especies reactivas de oxígeno (ROS) por parte de los compuestos fenólicos (Mosquera *et al.*, 2016; Samaniego *et al.*, 2020), atribuyéndoseles un efecto benéfico en la prevención de enfermedades (Kuskoski; Asuero; Troncoso; Mancini-Filho; Fett, 2005). Por otra parte, los antioxidantes de los alimentos aumentan su estabilidad de protección frente al deterioro por la acción de los ROS y aportan antioxidantes esenciales al organismo, complementando los niveles que el cuerpo humano produce y previniendo algunos de los procesos de oxidación celular (Vilaplana, 2007; Daza; Murillo; Pardo, 2015; Mahmoud; Abdelrazek, 2019; Xu; Hu; Wang; Cui, 2019).

Investigaciones científicas revelan la importancia del consumo de frutas, ya que constituyen la principal fuente de antioxidantes, además, una gran parte de estos frutos contienen compuestos capaces de inhibir o eliminar el desarrollo de microorganismos patógenos que pueden generar una alternativa para la conservación de alimentos de origen natural (Kizilkaya; Cevik; Turker, 2013; Laganà *et al.*, 2019; Villalobos-Delgado; Nevárez-Moorillon; Caro; Quinto; Mateo, 2019). Por tal motivo, hay un interés creciente en la industria alimentaria y en la investigación científica de fuentes de antioxidantes naturales, que protejan la salud de manera segura.

La mora (*Rubus glaucus benth*) es uno de los géneros más diversos de plantas y se distribuye en todo el mundo (Martínez-Cruz *et al.*, 2011). En Colombia se estima una producción de 94.151 toneladas anuales, lo que corresponde a la producción de unas 28.000 toneladas anuales de residuos de mora (López-Vásquez; Castaño-Zapata; Marulanda-Ángel; López-Gutiérrez, 2013; Rodríguez; Villegas, 2015). Su importancia nutricional radica en que los frutos de las especies del género *Rubus* contienen minerales, vitaminas y compuestos fenólicos a los cuales se les reconoce como agentes quimiopreventivos (Martínez-Cruz *et al.*, 2011).

La capacidad antioxidante se estudia por diversas metodologías ampliamente conocidas, como son la del ácido 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzotiazolina-6-sulfónico) (ABTS), la del 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH), la

de la N,N-dimetil-p-fenilenediamina (DMPD), la de la capacidad de absorber el radical oxígeno (ORAC) y el ensayo del poder antioxidante reductor del hierro (FRAP) (Kuskoski *et al.*, 2005). El método DPPH se considera como una metodología de determinación indirecta de la capacidad antioxidante, al estudiar la inhibición o disminución del radical 2,2-difenil-1-picrilhidracilo al reaccionar con sustancias donadoras de H⁺ (Cerón; Higuera; Cardona, 2011). Por otra parte, la generación del radical DPPH es rápida y sin previas preparaciones, mientras que la generación del radical ABTS requiere el uso de agentes químicos (dióxido de manganeso, persulfato de potasio), enzimáticos (peroxidasa, mioglobulina) o vía electroquímica (Kuskoski *et al.*, 2005).

El método ABTS monitorea la desaparición del catión ABTS^{•+} cuando distintas moléculas lo atrapan al reaccionar (Cerón *et al.*, 2011). Además, distintas bandas de absorbancia hacen que sea más amplia la cantidad de compuestos que se pueden estudiar (414, 654, 754 y 815 nm en medio alcohólico) gracias a una menor interferencia, a diferencia del DPPH que presenta su máximo de absorbancia únicamente a 515 nm (Kuskoski *et al.*, 2005).

El 70 % de las enfermedades gastrointestinales se les atribuye a alimentos contaminados con microorganismos tales como *E. coli*, *B. cereus* y *S. aureus*., debido, principalmente, a la contaminación cruzada o el deterioro de los alimentos (Venegas del Castillo; Vásquez-Valles, 2016; Gordillo, 2019; Maes *et al.*, 2019; Marin; Rodríguez; Minier; Zayas; Soler, 2020; Odeyemi; Alegbeleye; Strateva; Stratev, 2020).

La bacteria *E. coli* está asociada a enfermedades gastrointestinales producto del consumo de alimentos contaminados por falta de higiene y prácticas inadecuadas de procesamiento y conservación (Argote *et al.*, 2017). *S. aureus* es una de las bacterias patógenas que más enfermedades causa a nivel circulatorio y gastrointestinal, generalmente, como una consecuencia de la mala manipulación de alimentos (Zendejas-Manzo; Avalos-Flores; Soto-Padilla, 2014). *B. cereus* por su parte, genera numerosas toxinas a partir de alimentos contaminados con cantidades de 10⁵ a 10⁸ unidades formadoras de colonias (UFC) por gramo de alimento (Sánchez; Correa; Castañeda-Sandoval, 2016).

Se debe tener en cuenta que la susceptibilidad bacteriana y los resultados del estudio de la capacidad antibacteriana, dependen en gran medida del método usado, de las cepas, el grado de solubilidad de los compuestos, entre otras, por lo cual deben ser tenidos en cuenta a la hora de ser seleccionados para el análisis de la actividad (Ramírez; Castaño, 2009). Los métodos utilizados se clasifican en métodos de dilución y método de difusión. Las técnicas que emplean la difusión de los compuestos son las más útiles para evitar que la solubilidad de los compuestos sea un factor limitante en el análisis (Ramírez; Castaño, 2009).

En este trabajo se evaluó la actividad antioxidante del extracto etanólico, hidrometanólico y liofilizado por dos métodos (DPPH y ABTS) y la actividad antimicrobiana del extracto hidrometanólico, empleando el método de difusión en agar contra tres microorganismos patógenos.

2. Materiales y métodos

Los residuos de mora fueron obtenidos de una distribuidora y despulpadora de frutas y verduras ubicada en el barrio Santa Elena de la ciudad de Cali, situada en la región sur del Valle del Cauca, en las coordenadas 3°27'00"N, 76°32'00"O. Los residuos son una mezcla de semillas, cáscara, y pulpa de la fruta. Las muestras se conservaron en un congelador de -20 °C (*Barnstead/Lab-line, Waltham, Massachusetts, U.S.*) hasta su utilización. Todos los reactivos y solventes fueron adquiridos de *Sigma-Aldrich (Palo Alto, California, U.S.)* y se usaron sin previa purificación.

2.1. Caracterización fisicoquímica

La caracterización fisicoquímica de los residuos de mora se realizó con base en los métodos oficiales de análisis (AOAC). Los parámetros evaluados fueron: pH método 981,12; sólidos solubles método 932,12; humedad método 930,12; cenizas método 940,26 y acidez titulable método 942,15.

2.2. Preparación de los extractos etanólico, hidrometanólico y liofilizado

Los extractos se realizaron según la metodología propuesta por López *et al.* (2015). Se maceró los residuos de mora con un mortero. En un vaso de precipitados, se agregó 10 g de los residuos anteriormente macerados y se añadieron 30 mL de mezcla hidrometanólica (80:20 v/v) los cuales, se extrajeron durante 10 minutos. Luego se procedió a centrifugar a 4.000 rpm durante 20 min a 4 °C. Seguidamente, el sobrenadante se filtró y se transfirió a un matraz de fondo redondo, y, finalmente, se evaporó a sequedad usando evaporación a presión reducida en un rotaevaporador (*Heidolph, Rotary Evaporators/Hei-VAP US*). En el segundo procedimiento se mezclaron 10 g de los residuos macerados con 30 mL de etanol. Se procedió a centrifugar a 4.000 rpm x 20 min a 4 °C, y, seguidamente, el sobrenadante se filtró y se transfirió a un matraz de fondo redondo. Se evaporó a sequedad usando un evaporador rotativo. El extracto liofilizado se preparó adicionando 10 g de los residuos de mora previamente macerados en tubos Falcon, los cuales fueron completados hasta un volumen de 30 mL con agua destilada, que después fueron congelados en un congelador de -20 °C (*Barnstead/Lab-line, Waltham, Massachusetts, U.S.*) por 24 horas. Posteriormente, los tubos se ubicaron en un liofilizador (*Labconco Freezone 4.5, Labconco Corporation, Kansas City, MO, USA*) a una presión de 12 Pa y a -52 °C por 48 horas hasta sublimar completamente el agua de los residuos y dejarlos completamente secos para su posterior uso.

2.3. Caracterización de compuestos antioxidantes por cromatografía líquida de ultra alta resolución (UHPLC)

La preparación de la muestra consistió en secar a evaporación el extracto original de los residuos de mora (extractos obtenidos luego de macerar con mortero y evaporados a sequedad en rotaevaporador) y posterior redisolución en una mezcla hidrometanólica al 0,3 % en ácido acético (1:1 v/v). El extracto de residuos de mora fue analizado en un equipo cromatográfico líquido de ultra alta eficiencia (UHPLC, *Dionex Ultimate 3000, Thermo Scientific, Sunnyvale, CA, EE.UU.*), equipado con una bomba binaria de gradiente (HP G3400RS), un inyector automático de muestras (WPS 300TRS) y una unidad termostataada para la columna (TCC 3000) y acoplado a un analizador de masas (*Orbitrap*), usando una columna *Hypersil GOLD Aq* (*Thermo Scientific, Sunnyvale, CA, EE.UU.*; 100 x 2.1 mm, 1.9 µm de tamaño de partícula) a 30 °C. La fase móvil consistió en una solución acuosa de 0,2 % de formiato de amonio (A) y acetonitrilo con 0,2 % de formiato de amonio (B), con un gradiente que cambió linealmente en 8 minutos desde 100 % de A hasta 100 % de B. La identificación de los compuestos se realizó con el cromatograma de iones extraídos (EIC), medición de masas exactas ($\mu_{ppm} < 0,001$) y usando una solución estándar de antioxidantes y alcaloides de Sigma-Aldrich).

2.4. Determinación de la capacidad antioxidante por el método DPPH•

Se realizó usando el método desarrollado por Brand-Williams (Kuskoski *et al.*, 2005). El reactivo DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidracilo) se preparó disolviendo $1,0 \pm 0,1$ mg en $100 \pm 0,02$ mL de metanol anhidro, en un frasco ámbar, para obtener una concentración de 10 mg/L. El reactivo se ajustó por dilución con metanol a una absorbancia de $0,70 \pm 0,02$ en una longitud de onda de 517 nm, dejándose en ausencia de luz hasta su utilización. Se tomaron 50 mg de la muestra en un tubo eppendorf y se llevó a 1 mL con metanol absoluto. Posteriormente, se centrifugó durante 1 minuto a 1800 rpm con el objetivo de tener una muestra homogénea.

Las medidas de absorbancia a 517 nm se realizaron pasados los 30 minutos después de añadir la muestra. A partir de las absorbancias obtenidas se realizó una curva de calibración determinando el porcentaje de inhibición y la capacidad antioxidante de cada extracto expresando su resultado en Trolox (antioxidante de referencia, análogo de la vitamina E).

2.5. Determinación de la capacidad antioxidante por el método ABTS^{•+}

Inicialmente se disolvió $38,4 \pm 0,1$ mg de ABTS (ácido 2,2'-azino-bis (3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico), en 10 mL de agua desionizada para obtener una solución de concentración 7 mM. Posteriormente, se preparó una solución de persulfato de potasio ($K_2S_2O_8$) 2,45 mM disolviendo 66,2 mg de persulfato de potasio en 100 mL de agua desionizada. Seguidamente, se mezcló 10 mL de la solución ABTS y 10 mL persulfato de potasio en un frasco oscuro. La mezcla se incubó a temperatura ambiente y en ausencia de luz durante 16 h; una vez formado el radical, fue diluido en etanol hasta alcanzar una absorbancia de $0,70 \pm 0,2$ a 754 nm. El radical ABTS^{•+} formado se mezcló con el extracto a diferentes concentraciones. El porcentaje de inhibición se obtuvo a través del uso de una curva de calibración basada en Trolox. Los resultados se expresaron en unidades de μ mol Trolox equivalente/g de residuos de mora.

2.6. Determinación de la actividad antimicrobiana

2.6.1. Microorganismos y medios de crecimiento

La actividad antimicrobiana del extracto hidrometanólico de mora se evaluó contra dos bacterias *Gram positivas* (*Staphylococcus aureus* ATCC29213 y *Bacillus cereus* ATCC11788) y una bacteria *Gram negativa* (*Escherichia coli* ATCC25922) obtenidos del banco de cepas del Departamento de Ciencias Básicas de la Universidad Santiago de Cali y la cepa de *Bacillus cereus* ATCC 11788 donada por el Departamento de Biología de la Universidad del Valle.

2.6.2. Preparación del inóculo

Con un asa bacteriológica se tomó una colonia bien aislada del mismo tipo morfológico y se inoculó en 5 mL de caldo tripticasa de soya. Posteriormente, se incubó hasta visualizar una ligera turbidez. La concentración de bacterias se ajustó con caldo hasta obtener una turbidez visualmente comparable a un patrón de 0,5 en la escala de Mac Farland equivalente a 5×10^8 unidades formadoras de colonia (UFC)/mL.

2.6.3. Preparación del medio

El medio Mueller-Hinton se preparó, de acuerdo con las especificaciones del fabricante. El medio preparado se esterilizó en autoclave a una temperatura de 121 °C por 15 min y, finalmente, se distribuyó en cajas de Petri estériles de manera equivalente. El medio preparado se conservó en refrigeración hasta su utilización teniendo en cuenta no exceder 7 días desde su preparación.

2.6.4. Ensayo de difusión en disco

Se realizó con base en la metodología del Subcomité de Ensayos de Susceptibilidad del *National Committee for Clinical Laboratory Standards*, (NCCLS) enunciado por Kirby-Bauer. Se sumergió un hisopo de algodón estéril dentro de la suspensión del microorganismo en estudio previamente estandarizado y se sembró el inóculo uniformemente sobre la superficie del medio. Una vez la superficie del medio se encontraba seca, se procedió a colocar los discos con una pinza estéril. Cada caja de Petri contenía un disco según la dilución (2 mg/mL; 4 mg/mL; 6 mg/mL y 8 mg/mL) del extracto hidrometanólico. Como control positivo, se realizó una dilución para cada antibiótico, de acuerdo a la bacteria en estudio (*S. aureus*-cefalexina 3mg/mL; *E. coli*-ampicilina 1 mg/mL y *B. cereus*-vancomicina 3mg/mL), del cual se tomaron 10 µL y se llevaron al sensidisco. Como control negativo, se usó agua destilada con la que se realizó las diluciones. Finalmente, se incubaron las cajas Petri a 35 °C. Los resultados se visualizaron 24 horas después de incubación.

2.6.5. Determinación de la concentración mínima inhibitoria (MIC)

Este método se llevó a cabo por la técnica de dilución. Para cada bacteria se tomaron tubos de ensayo, los cuales contenían 4 mL de caldo tripticasa de soya y concentraciones crecientes de extracto. En cada tubo de ensayo se inoculó un número definido de células bacterianas ($1,5 \times 10^4$ UFC/mL), a partir de una solución patrón de $1,5 \times 10^8$ UFC/mL (0,5 escala MacFarland), previamente estandarizada con caldo tripticasa de soya estéril e incubadas por 24 horas a temperatura óptima de crecimiento. Posteriormente, se verificó la absorbancia con ayuda de un espectrofotómetro a 545 nm y, finalmente, todos los tubos de ensayo se incubaron durante 9 horas para la bacteria. Transcurrido el tiempo de incubación, se realizó la lectura de cada tubo para determinar en cuáles de ellos se inhibió el crecimiento del microorganismo. La presencia de turbidez o sedimentación indica el crecimiento, es decir, generaría un aumento en el valor de la absorbancia de la solución contenida en el tubo y un valor menor o igual indica la inhibición por parte del antimicrobiano. El valor de la concentración mínima inhibitoria (MIC) fue determinado por el tubo de ensayo de menor concentración de extracto que inhibió el desarrollo *in vitro* del microorganismo.

2.6.6. Análisis estadístico

Los experimentos se realizaron por triplicado y sus resultados fueron expresados como valores promedio $\pm$ desviación estándar. Con el fin de evaluar si existían diferencias significativas en los resultados obtenidos para la susceptibilidad bacteriana, se presentan las pruebas de significancia estadística (contrastes para evaluar diferencias entre grupos) según cumplimiento de supuestos para su aplicación. Las pruebas se desarrollaron haciendo uso del software estadístico R-3.2.5, herramienta de análisis estadístico de libre distribución.

Prueba de Hipótesis:

H_0 : No existen diferencias en **variable** por nivel de concentración ($\mu_2 = \mu_4 = \mu_6 = \mu_8$)

H_1 : Si existen diferencias en **variable** en al menos un nivel de concentración.

**Prueba de Hipótesis solo para susceptibilidad antimicrobiana.*

El valor obtenido en la significación permite decidir si se rechaza o no la hipótesis.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización fisicoquímica

Los resultados obtenidos en las variables del análisis proximal de los residuos correspondientes a una mezcla de semillas, cáscara y pulpa de *Rubus glaucus* Benth, se encuentran dentro del rango para frutos maduros Tabla 1.

Tabla 1.

Caracterización fisicoquímica de los residuos de mora *Rubus glaucus* benth con base en los métodos oficiales de análisis (AOAC)

Variables	Promedio	Desviación estándar	CV
Acidez titulable (%)	1,28	0,04	3 %
Cenizas (%)	0,45	0,0004	9 %
Humedad (%)	86,0	0,005	1 %
pH	3,23	0,03	1 %
Sólidos Solubles	1,34	0,001	0 %

CV: coeficiente de variación de Pearson

Fuente: elaboración propia.

Generalmente, la acidez en la mayoría de las frutas disminuye durante y después del proceso de maduración. Barreto *et al.* (2016), Nair, Saxena y Kaur (2018) y Wu, Lu y Wang (2016) afirman que los ácidos contenidos en las frutas se consumen en la respiración a lo largo del tiempo, dando ascenso a nuevos compuestos, lo que explica el 1,28 % de acidez obtenido. El porcentaje de humedad alcanzado fue superior al 85 %, valor que coincide con los publicados por Ayala, Valenzuela y Bohórquez (2013). Este comportamiento es regular en la fruta fresca, ya que el agua es el componente mayoritario en su periodo de poscosecha, por tal motivo, presentan un periodo de vida corto (Ríos; Giraldo; Duque, 2007).

El porcentaje de cenizas obtenido fue de 0,45 %, valor que representa el contenido de material inorgánico, como minerales y sales inorgánicas en el fruto (Velciov *et al.*, 2019). El pH es uno de los parámetros con mayor variabilidad, debido a que los ácidos orgánicos contenidos en el fruto verde se van transformando o degradando a medida que el fruto respira, lo cual genera un incremento paulatino con los días de maduración del fruto, con un valor de 3,23 %, muy cercano al obtenido en otras investigaciones para el extracto del fruto (Ramos; Delgado; Bautista; Morales; Duque, 2005; Rodríguez; López; García, 2010). El valor obtenido indica el grado de acidez del residuo de mora que correlaciona muy bien con el valor del porcentaje de acidez obtenido (con un valor de 1,28 %), que refleja el contenido de ácidos orgánicos y de alta capacidad antioxidante presentes en la mora, tales como el ácido ascórbico, el ácido gálico, el ácido *p*-hidroxibenzoico, el ácido caféico, el ácido rosmarínico, entre otros (Ramos *et al.*, 2005). El contenido de sólidos solubles fue de 1,34 % (4,7 °Brix), lecturas que concuerdan con los publicados por Grijalba, Calderón y Pérez (2016). Este valor indica la cantidad de azúcar (sacarosa) presente en el fruto. Frecuentemente, se consideran los °Brix como equivalentes de los sólidos solubles, porque el mayor contenido de estos en el jugo de las frutas son azúcares (Rodríguez *et al.*, 2010). Estos valores obedecen a los cambios bioquímicos naturales en el fruto durante el proceso de maduración, lo cual, de acuerdo con los resultados obtenidos está en concordancia con otros estudios reportados para el análisis de extractos de mora (Rodríguez *et al.*, 2010; Ochoa; Pérez; Ávila; Gómez; García, 2019; Salcedo, 2019).

a. Caracterización de compuestos antioxidantes por UHPLC

La caracterización del extracto de residuos de mora obtenido por UHPLC, determinó la presencia de cianidina-3-rutinosido (Figura 1) en una concentración de 2520 mg/kg de muestra (t_r , 3,56 min, Figura 2). Este compuesto es un colorante natural muy común en frutas con bayas negras o moradas, como el agraz (*Vaccinium meridionale*) y la mora (*R. glaucus*), que normalmente muestra altos contenidos de antocianinas y fenoles (Garzón; Riedl; Schwartz, 2009; Osorio *et al.*, 2012). Es una antocianina altamente soluble en agua, bastante inestable en temperaturas superiores a 40 °C.

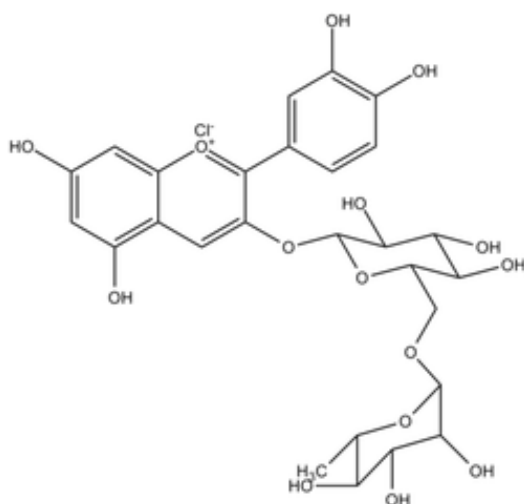


Figura 1. Estructura química de la antocianina cianidina-3-rutinosido
Fuente: elaboración propia.

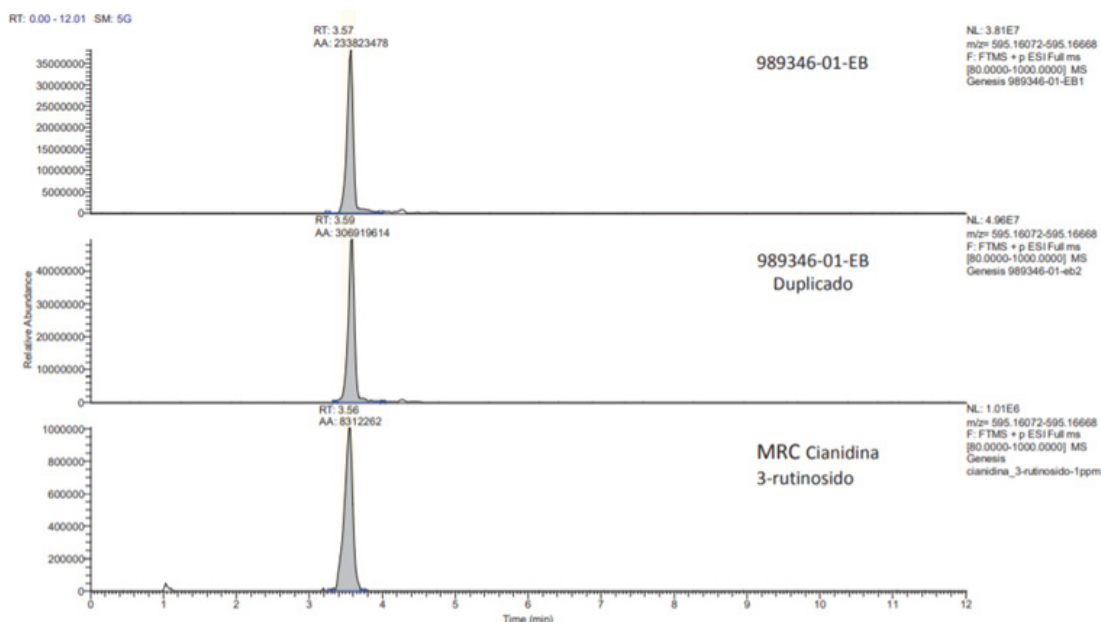


Figura 2. Cromatograma UHPLC de la antocianina cianidina-3-rutinosido
Fuente: elaboración propia.

b. Actividad antioxidante

Los extractos de mora evaluados demostraron actividad antioxidante por los métodos *in vitro* ABTS y DPPH (Tabla 2).

Tabla 2.

Resultados obtenidos capacidad antioxidante para los extractos alcohólicos y liofilizado de residuos de mora (*R. glaucus* benth) por los métodos *in vitro* ABTS y DPPH

Extracto	Método ABTS ($\mu\text{mol Trolox}$ equivalente/g mora)	Método DPPH ($\mu\text{mol Trolox}$ equivalente/g mora)
Extracto etanólico (100 %)	49,28	9,21
Extracto hidrometanólico (80:20 % v/v)	37,27	40,53
Extracto liofilizado	60,31	9,03

Fuente: elaboración propia.

La acción antioxidante de un alimento está profundamente influenciada por la reacción de diferentes grupos presentes en sus metabolitos con los radicales libres y las especies ROS, tales como grupos hidroxilo, enlaces conjugados, entre otros contenidos en fenoles, flavonoides, antocianinas, terpenos, etc. (Zapata; Cortes; Rojano, 2013; Durazzo; Lucarini; Novellino; Daliu; Santini, 2019; Gündeşli; Korkmaz; Okatan, 2019; Ismawanti; Suparyatmo; Wiboworini, 2019). Un gran número de frutas contienen niveles importantes de fenoles, como la mora, fruta perteneciente al grupo de las bayas. Huang, Zhang, Liu y Li (2012) afirman que las bayas (arándano, mora y fresa) exhiben buena capacidad antioxidante, principalmente, porque poseen compuestos fenólicos con grupos hidroxilo en la posición orto del anillo B.

Investigaciones realizadas afirman la importancia de la mora como fuente rica en polifenoles, especialmente flavonoides (antocianinas, flavonoles, flavan-3-oles y proantocianinas) y elagitaninos (Quirós, 2016; Salcedo, 2019). En el presente estudio, el componente mayoritario encontrado en el extracto de los residuos de mora correspondió a la antocianina cianidina-3-rutinosido (Figura 1) en una concentración de 2.520 mg/kg de muestra.

La extracción con solventes es el método más común para aislar compuestos fenólicos de diferentes matrices, por lo cual se utilizaron disolventes polares, como metanol y etanol (Lima *et al.*, 2019; Rocchetti *et al.*, 2019; Dzah *et al.*, 2020). Los resultados obtenidos de capacidad antioxidante fueron expresados en μmol equivalente de Trolox (6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcromo-2-ácido carboxílico), el cual es un análogo soluble en agua de la vitamina E, utilizado como compuesto de referencia, principalmente, para los métodos anteriormente mencionados (Tovar del Rio, 2013).

Los resultados (Tabla 2) muestran que para todos los extractos incluida la mora liofilizada, los valores de ABTS son mayores que en la técnica con DPPH, debido a una alta reactividad del ABTS^{••} (con poca selectividad), reaccionando con cualquier grupo hidroxilo sin que ello realmente indique un alto potencial antioxidante. Según Palomino, García, Gil, Rojano y Durango (2009) el radical DPPH no reacciona con flavonoides sin hidroxilar en el anillo B, ni con ácidos aromáticos monohidroxílicos, por lo cual es más selectivo que el ABTS^{••}.

En el método ABTS se evidenció que el extracto con menor actividad antioxidante fue el obtenido mediante el uso de la mezcla hidrometanólica (80:20) con un valor de 37,27 μmol equivalente Trolox/g mora, mientras que el extracto obtenido con etanol puro presentó mayor capacidad antioxidante (49,28 μmol equivalente Trolox/g mora). Por otra parte, la liofilización de los residuos de mora permitió obtener un valor más alto de actividad antioxidante por el método ABTS (60,31 μmol equivalente Trolox/g mora). Tarín (2015) afirma que en el proceso de liofilización se produce un aumento del contenido de fenoles totales gracias a la

congelación previa formando cristales de hielo que destruyen la estructura celular, facilitan el acceso de las moléculas del solvente y mejoran la extracción.

Por medio del ensayo DPPH se obtuvieron valores para la actividad antioxidante de 9,03 μmol equivalente Trolox/g mora para los residuos liofilizados, 9,21 μmol equivalente Trolox/g mora para el extracto etanólico y 40,53 μmol equivalente Trolox/g mora para el extracto metanólico. La actividad captadora del radical encontrada en el extracto metanólico es considerablemente superior al extracto etanólico y mora liofilizada. Lo anterior puede estar asociado a que durante el tratamiento con metanol se extrajeron algunos compuestos fenólicos de alta polaridad, además de ser previamente preparado con este solvente. En el ensayo del DPPH, los radicales se eliminan gracias a la donación de hidrógenos, mientras que la reducción del radical de ABTS se debe a la eliminación de radicales protónicos inducida a través de la donación de electrones (García, 2017).

Los datos arrojados por los métodos ABTS y DPPH en residuos de mora se encuentran cercanos a los publicados por Zapata *et al.* (2013), quienes investigaron la capacidad antioxidante total de la guayaba agria (*Psidium araca*), fruto con mayor poder antioxidante, con valores de 66,80 μmol Trolox equivalente/g de fruta fresca para el ensayo ABTS y 11,79 μmol Trolox equivalente/g de fruta para el ensayo DPPH.

c. Actividad antimicrobiana

Los efectos antimicrobianos de fuentes naturales son uno de los motivos por los cuales en forma permanente se realizan investigaciones de compuestos con capacidad para inhibir el crecimiento de microorganismos y aumentar la vida útil de los alimentos. La actividad antimicrobiana de los residuos de *R. glaucus benth* se evaluó con halos de inhibición, con el promedio del diámetro para los dos grupos de bacterias (*Gram positivas* y *Gram negativas*, Figura 3).

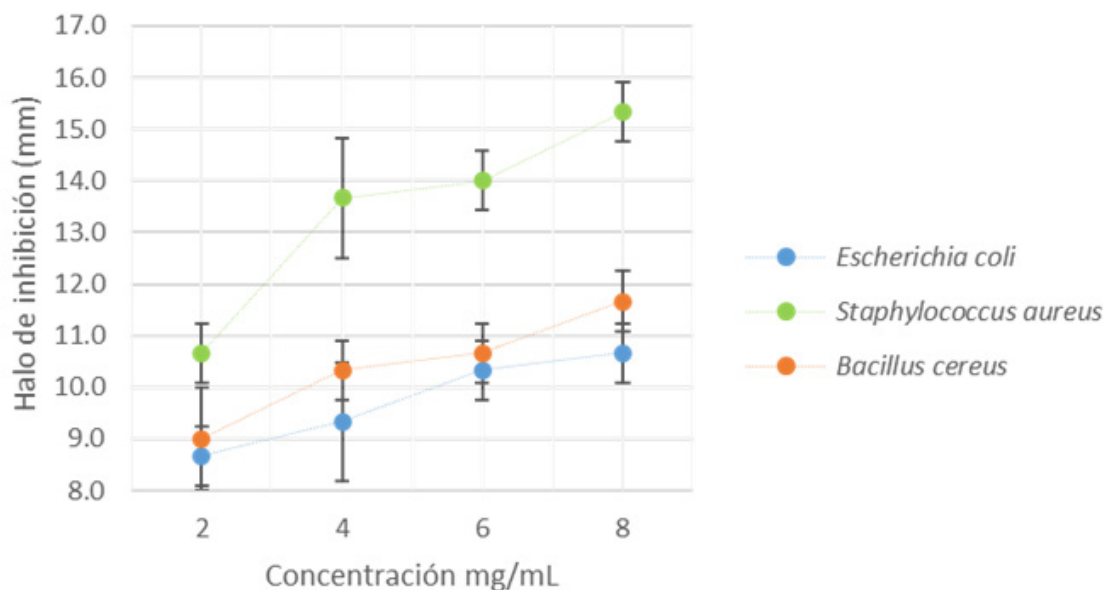


Figura 3. Distribución del halo de inhibición promedio a concentraciones de 2, 4, 6 y 8 mg/mL del extracto metanólico para las bacterias *E.coli*, *S.aureus* y *B.cereus*

Fuente: elaboración propia.

Los valores de inhibición promedio mostraron mayor sensibilidad para bacterias *Gram positivas* *S. aureus* y *B. cereus* que para la bacteria *Gram negativa* *E. coli*. Esto podría deberse a las diferencias estructurales

de las superficies celulares, en particular, de las bacterias *Gram negativas* con una pared celular que posee una membrana citoplasmática, una capa de peptidoglicano muy delgada, una capa adicional compuesta por lipopolisacáridos y lipoproteínas (Nieto; González, 2010), la cual puede impedir el ingreso de compuestos hidrofílicos, en comparación a los microorganismos *Gram positivos*, pues está compuesta por una capa externa de peptidoglicano y una membrana citoplasmática.

A bajas concentraciones (Figura 3) hay menor efecto inhibitorio respecto al control. *E. coli* presentó menor inhibición con la formación de un halo de 10,7 mm para la concentración más alta, en comparación al halo de inhibición del crecimiento formado por el antibiótico ampicilina de 29,0 mm. Teniendo en cuenta los patrones estándar del halo de inhibición para la cepa *E. coli* ATCC25922 elaborado por la NCCLS, 2000 (*Standards for Antimicrobial Susceptibility Tests*) se encuentra dentro la categoría resistente (Resistente ≤ 13 , Intermedia 14-16, sensible ≥ 17). Los microorganismos resistentes son aquellos que no se inhiben por las concentraciones empleadas, probablemente porque existen mecanismos de resistencia específicos (Picazo, 2000; Founou; Founou; Essack, 2017; Zaman *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2018).

B. cereus por su parte, presentó una inhibición media de crecimiento, con la formación de un halo de 11,7 mm para la concentración de 8 mg/mL del extracto metanólico y para el control positivo (vancomicina) se obtuvo un valor de 35,0 mm. Sin embargo, la bacteria *B. cereus* se encuentra dentro de la categoría resistente (Resistente ≤ 13 , Intermedia 14-17, sensible ≥ 18).

Por último, *S. aureus* presentó mayor grado de sensibilidad frente al extracto metanólico con un halo de inhibición para la concentración de 8 mg/mL de 15,3 mm, frente al antibiótico cefalexina 38,0 mm. De acuerdo con las tablas publicadas por la NCCLS para el antibiótico cefalexina, los datos obtenidos se encuentran en la categoría intermedia (Resistente ≤ 14 , Intermedia 15-16, sensible ≥ 17). Esta categoría representa cuando un aislamiento bacteriano es inhibido *in vitro* por una concentración de un antimicrobiano que se asocia a un tratamiento terapéutico incierto (Cantón, 2010). Estos resultados coinciden con los obtenidos por Sotelo, Casas y Camelo (2010) que también observaron mayor sensibilidad en *Gram positivas* por parte de extractos naturales más ricos en compuestos fenólicos.

El mecanismo de acción de los agentes antimicrobianos no es del todo conocido. Sin embargo, se conoce que los agentes antimicrobianos de origen natural pueden afectar la síntesis de ergosterol, afectando la membrana citoplasmática, crean canales o pequeños orificios en la membrana por los cuales otros compuestos pueden atravesar y afectar las mitocondrias, el núcleo (los ácidos nucleicos), enzimas, las proteínas transmembranales, estrés oxidativo, la permeabilidad y, en última instancia, destruyendo la integridad celular (Mercado; Llenque; Trujillo, 2014; Castro-Montoya; Rangel-Peraza; Piña-Hernández; Mora-Rochín; Rochín-Medina, 2015; Grande-Tovar; Chaves-López; Serio; Rossi; Paparella, 2018).

La resistencia de *E. coli* frente a las sustancias antibacterianas se debe a una capa gruesa de lipopolisacáridos que actúa como barrera hidrofóbica, impidiendo la penetración y, además, también se debe a la presencia de enzimas en el espacio periplasmático que destruyen sustancias introducidas desde el exterior (Sotelo *et al.*, 2010). Por el contrario, para *S. aureus* la estructura de la membrana citoplasmática, permite a las sustancias antibacterianas destruir fácilmente la membrana de la célula ocasionando una salida del citoplasma.

De acuerdo con Sulca (2010), la mayoría de los extractos naturales que presentan actividad antimicrobiana contienen fenoles, terpenos, terpenos oxigenados, alcoholes, aldehídos, cetonas, ácidos orgánicos y flavonoides (antocianinas), conocidos como metabolitos secundarios.

Uno de los posibles mecanismos propuestos para el efecto antimicrobiano de los compuestos fenólicos está relacionado con la inactivación de enzimas celulares, la cual depende de la relación de la penetración de estos compuestos a la célula del microorganismo o por cambios en la permeabilidad de la membrana, en donde

los compuestos fenólicos pueden romper la integridad de dicha membrana y causar la pérdida de la integridad celular y una eventual muerte celular (Bouarab; Degraeve; Ferhout; Bouajila; Oulahal, 2019; Lima *et al.*, 2019; Dzah *et al.*, 2020).

Otra investigación indica que el mecanismo de la inhibición microbiana por los compuestos de bayas donde se incluyen las moras, se considera una acumulación de acciones directas e indirectas. Lacombe y Wu (2017) afirmaron que las acciones directas se consideran, principalmente, como las reacciones fitoquímicas con la membrana celular que causan la inactivación de enzimas celulares esenciales. Se considera que las acciones indirectas son efectos fitoquímicos sobre la disponibilidad de nutrientes o la expresión genómica que dan como resultado un deterioro del metabolismo y la función del microorganismo objetivo.

Luego de observar la inhibición del extracto metanólico por el método de difusión en disco, se determinó la concentración mínima inhibitoria (MCI) por la técnica de dilución para las bacterias *S. aureus* y *E. coli* que fueron las más sensibles. Este método se realizó con el objetivo de determinar la mínima concentración del extracto que inhibe el crecimiento de las bacterias *S. aureus* y *E. coli*, las cuales han sido asociadas en su gran mayoría al manejo deficiente de los alimentos (Castro del Campo; Chaidez; Rubio; Valdez, 2004). En la Figura 4 se observa un porcentaje de inhibición del 99 % para *S. aureus* a una concentración de 3,0 mg/mL mientras para *E. coli* se obtuvo un porcentaje de inhibición del 76 %, por lo cual fue necesario realizar dos concentraciones superiores, alcanzando un porcentaje de inhibición del 100 % a una concentración de 4,0 mg/mL.

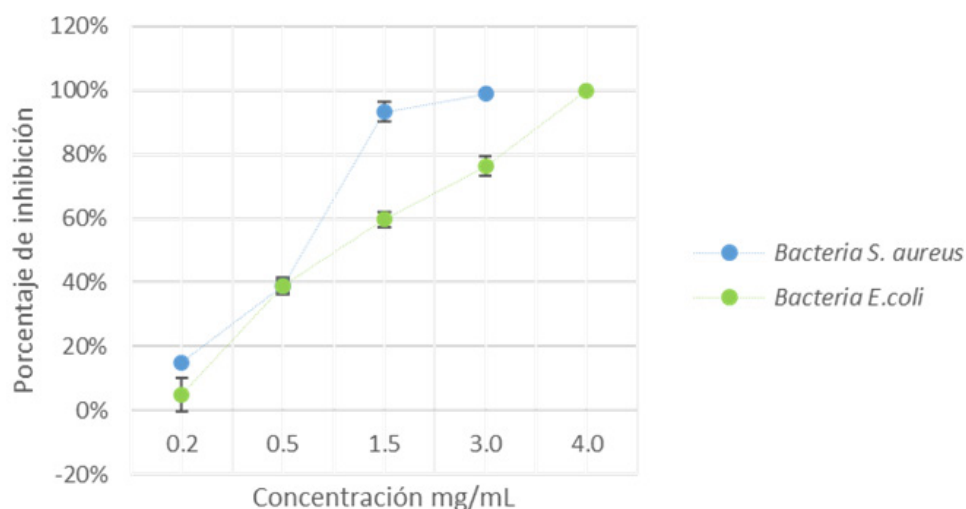


Figura 4. Distribución del porcentaje de inhibición promedio vs la concentración del extracto metanólico para la bacteria *E. coli* y *S. aureus*
Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con lo descrito por Cruz-Carrillo, Rodríguez y Rodríguez (2010), una cepa bacteriana es muy sensible cuando la sustancia evaluada presenta una MCI inferior a 12,5 mg/mL, una media sensibilidad entre 12,5 y 50,0 mg/mL, y de baja sensibilidad cuando la MCI está entre 50 y 100 mg/mL. El análisis estadístico de los resultados obtenidos mostró diferencias significativas (ANOVA $p \leq 0,05$) en el método de difusión en disco para las concentraciones de 2 mg/mL y 8 mg/mL para todas las bacterias en estudio y diferencias significativas para todas las concentraciones utilizadas en el método de dilución. Estas diferencias se deben al grupo perteneciente de cada bacteria y la concentración. Como se puede observar en los dos métodos existe una diferencia entre *S. aureus* y *E. coli*, es decir, para la bacteria *S. aureus* se necesita menos cantidad de extracto para inhibir el crecimiento bacteriano que para *E. coli*. Lo anterior, permite concluir que para las cepas evaluadas de *S. aureus* y *E. coli* se presentó una sensibilidad alta, lo cual concuerda con su actividad antioxidante moderada

presentada gracias al contenido de ácidos orgánicos y de la antocianina cianidina-3-rutinosido (Figura 1), en una concentración de 2.520 mg/kg de muestra.

4. Conclusiones

Los residuos de mora obtenidos en el presente estudio presentaron una alta cantidad de la antocianina cianidina-3-rutinosido (2.520 mg/kg de muestra) mediante el análisis de UHPLC, una acidez titulable de 1,28 %, un pH ácido (3,23) y un contenido de cenizas de 0,45 %. El extracto hidrometanólico 80:20 % (v/v) presentó la mayor capacidad antioxidante por el método DPPH (40,53 μ mol TEAC), mientras que el extracto liofilizado presentó el valor más alto de actividad antioxidante por el método ABTS (60,31 μ mol TEAC). La susceptibilidad bacteriana a los residuos de mora se evidenció por el método de difusión en disco, observando un incremento dependiente de la concentración de extracto y de la cepa de cada bacteria. En relación con la concentración, la mayor inhibición se dio a concentraciones superiores, afectando la viabilidad de las cepas bacterianas. Las cepas evaluadas de *S. aureus* y *E. coli* presentaron una sensibilidad alta respecto a la MCI (3 mg/mL y 4 mg/mL, respectivamente), lo cual concuerda con su contenido de ácidos orgánicos (índice de acidez de 1,28 %) y el contenido de la antocianina cianidina-3-rutinosido (2.520 mg/kg de muestra).

5. Agradecimientos

Los autores agradecen profundamente el apoyo de la profesora Elena Stashenko para la caracterización por UHPLC de los extractos de residuos mora en el Laboratorio de Cromatografía de la Universidad Industrial de Santander.

Referencias

- Abbate, Eduardo (2020). Estimating the nutritional loss and the feeding potential derived from food losses worldwide. *World Development*, 134, 105038.
<https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.105038>
- Argote, Francisco; Suarez, Zully; Tobar, Magaly; Pérez, José; Hurtado, Andrés; Delgado, Johannes (2017). Evaluación de la capacidad inhibitoria de aceites esenciales en *Staphylococcus aureus* y *Escherichia coli*. *Bioteecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 15(2), 52-60.
[https://doi.org/10.18684/bsaa\(v15\)EdiciónEspecialn2.578](https://doi.org/10.18684/bsaa(v15)EdiciónEspecialn2.578)
- Ayala, Leidy; Valenzuela, Claudia; Bohórquez, Yanneth (2013). Caracterización fisicoquímica de mora de castilla (*Rubus glaucus* Benth) en seis estados de madurez. *Bioteecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 11(2), 10-18.
- Barreto, Tainá; Andrade, Sonalle; Maciel, Janeeyre; Arcanjo, Narciza; Madruga, Marta; Meireles, Bruno; Cordeiro, Ângela; Souza, Evandro; Magnani, Marciane (2016). A Chitosan Coating Containing Essential Oil from *Origanum vulgare* L. to Control Postharvest Mold Infections and Keep the Quality of Cherry Tomato Fruit. *Frontiers in Microbiology*.
<https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmicb.2016.01724>
- Ben-Othman, Sana; Jõudu, Ivi; Bhat, Rajeev (2020). Bioactives from Agri-Food Wastes: Present Insights and Future Challenges. *Molecules*, 25(3), 510.
<https://doi.org/10.3390/molecules25030510>

- Bouarab, Lynda; Degraeve, Pascal; Ferhout, Hicham; Bouajila, Jalloul; Oulahal, Nadia (2019). Plant antimicrobial polyphenols as potential natural food preservatives. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(4), 1457-1474.
<https://doi.org/10.1002/jsfa.9357>
- Cantón, Rafael (2010). Lectura interpretada del antibiograma: una necesidad clínica. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, 28(6), 375-385.
<https://doi.org/10.1016/j.eimc.2010.01.001>
- Castro del Campo, Nohelia; Chaidez, Cristóbal; Rubio, Werner; Valdez, José (2004). Sobrevivencia de *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus* en frutos mínimamente procesados. *Revista Cubana de Salud Pública*, 30(1), 83-86.
- Castro-Montoya, Jesús; Rangel-Peraza, Jesús; Piña-Hernández, Claribel; Mora-Rochín, Saraïd; Rochín-Medina, Jesús (2015). Actividad antioxidante de compuestos fenólicos en semillas de ajonjolí y su efecto sobre el crecimiento bacteriano. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 2, 63-70.
- Cerón, Ivonne; Higueta, Juan; Cardona, Carlos (2011). Capacidad antioxidante y contenido fenólico total de tres frutas cultivadas en la región andina. *Vector*, 5, 17-26.
- Cheok, Choon; Adzahan, Noranizan; Rahman, Russly; Abedin, Nur; Hussain, Norhayati; Sulaiman, Rabiha; Chong, Gun (2018). Current trends of tropical fruit waste utilization. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(3), 335-361.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1176009>
- Coronado, Marta; Vega, Salvador; Gutiérrez, León; Vázquez, Marcela; Radilla, Claudia (2015). Antioxidantes: perspectiva actual para la salud humana. *Revista Chilena de Nutrición*, 42(2), 206-212.
<https://doi.org/10.4067/S0717-75182015000200014>
- Cruz-Carrillo, Anastasia; Rodríguez, Natalia; Rodríguez, Carlos (2010). Evaluación in vitro del efecto antibacteriano de los extractos de *Bidens pilosa*, *Lantana camara*, *Schinus molle* y *Silybum marianum*. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 13(2), 117-124.
- Daza, Luis; Murillo, Elizabeth; Pardo, Daniel (2015). Evaluación de la capacidad antioxidante de frutas cultivadas en el departamento del Tolima y sus residuos agroindustriales. *Revista Tumbaga*, 2(10), 3-14.
<http://orcid.org/0000-0002-9932-7163>
- Durazzo, Alessandra; Lucarini, Massimo; Novellino, Ettore; Daliu, Patricia; Santini, Antonello (2019). Fruit-based juices: Focus on antioxidant properties—Study approach and update. *Phytotherapy Research*, 33(7), 1754-1769.
<https://doi.org/10.1002/ptr.6380>
- Dzah, Courage; Duan, Yuqing; Zhang, Haihui; Wen, Chaoting; Zhang, Jixian; Chen, Guangying; Ma, Haile (2020). The effects of ultrasound assisted extraction on yield, antioxidant, anticancer and antimicrobial activity of polyphenol extracts: A review. *Food Bioscience*, 35, 100547.
<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100547>
- Founou, Raspail; Founou, Luria; Essack, Sabiha (2017). Clinical and economic impact of antibiotic resistance in developing countries: A systematic review and meta-analysis. *PloS One*, 12(12), e0189621.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189621>
- García, Rafael (2017). *Estudio sobre la capacidad antioxidante de extractos de hoja de Moringa oleifera de diferente origen geográfico* (trabajo de grado). Universidade da Coruña, España.

- Garzón, G.; Riedl, K.; Schwartz, S. (2009). Determination of anthocyanins, total phenolic content, and antioxidant activity in Andes berry (*Rubus glaucus* Benth). *Journal of Food Science*, 74(3), C227–C232.
<https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01092.x>
- Gordillo, Marco (2019). *Prevalencia de Salmonella spp. en alimentos contaminados y descripción según serotipos; tipos de alimentos y jurisdicciones sanitarias afectadas en Chiapas, durante el periodo 2016-2018* (tesis de maestría). Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, México.
- Grande-Tovar, Carlos; Chaves-López, Clemencia; Serio, Annalisa; Rossi, Chiara; Paparella, Antonello (2018). Chitosan coatings enriched with essential oils: Effects on fungi involved in fruit decay and mechanisms of action. *Trends in Food Science & Technology*, 78, 61-71.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.05.019>
- Grijalba, Carlos; Calderón, Luz; Pérez, María (2010). Rendimiento y calidad de la fruta en mora de castilla (*Rubus glaucus* Benth), con y sin espinas, cultivada en campo abierto en Cajicá (Cundinamarca, Colombia). *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 6(1), 24-41.
<https://doi.org/10.18359/rfcb.2079>
- Gündeşli, Muhammet; Korkmaz, Nazan; Okatan, Volkan (2019). Polyphenol content and antioxidant capacity of berries: A review. *International Journal of Agriculture Forestry and Life Sciences*, 3(2), 350-361.
- Huang, Wu-yang; Zhang, Hong-cheng; Liu, Wen-xu; Li, Chun-yang (2012). Survey of antioxidant capacity and phenolic composition of blueberry, blackberry, and strawberry in Nanjing. *Journal of Zhejiang University-Science B (Biomedicine & Biotechnology)*, 13(2), 94-102.
<https://doi.org/10.1631/jzus.B1100137>
- Ismawanti, Zuhria; Suparyatmo, Joseph; Wiboworini, Budiyantri (2019). The Effects of Papaya Fruit as Anti Diabetes: A Review. *International Journal of Nutrition Sciences*, 4(2), 65-70.
<https://doi.org/10.30476/IJNS.2019.81751.1013>
- Kizilkaya, Bayram; Cevik, Nazan; Turker, Gulen (2013). The phenolic compounds in berries: beneficial effects on human health. *New Knowledge Journal of Science*, 52-55.
- Kuskoski, E.; Asuero, Agustín; Troncoso, Ana; Mancini-Filho, Jorge; Fett, Roseane (2005). Aplicación de diversos métodos químicos para determinar actividad antioxidante en pulpa de frutos. *Ciênc. Tecnol. Aliment*, 25(4), 726-732.
<https://doi.org/10.1590/S0101-20612005000400016>
- Lacombe, Alison; Wu, Vivian (2017). The potential of berries to serve as selective inhibitors of pathogens and promoters of beneficial microorganisms. *Food Quality and Safety*, 1(1), 3-12.
<https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyx001>
- Laganà, Pasqualina; Anastasi, Giuliano; Marano, Fiorella; Piccione, Serena; Singla, Rajeev; Dubey, Ashok; Delia, Santi; Coniglio, Maria; Facciola, Alessio; Di Pietro, Angela; Haddad, Moawiya; Al-Hiary, Masnat; Caruso, Gabriella (2019). Phenolic Substances in Foods: Health Effects as Anti-Inflammatory and Antimicrobial Agents. *Journal of AOAC INTERNATIONAL*, 102(5), 1378-1387.
<https://doi.org/10.1093/jaoac/102.5.1378>
- Lima, M.; Paiva, C.; Fernandez-Prada, C.; Harel, J.; Dubreuil, J.; de Souza, E. (2019). A review of the current evidence of fruit phenolic compounds as potential antimicrobials against pathogenic bacteria. *Microbial Pathogenesis*, 130, 259-270.
<https://doi.org/10.1016/j.micpath.2019.03.025>

- López-Vásquez, Juan; Castaño-Zapata, Jairo; Marulanda-Ángel, Marta; López-Gutiérrez, Ana (2013). Caracterización de la resistencia a la antracnosis causada por *Glomerella cingulata* y productividad de cinco genotipos de mora (*Rubus glaucus Benth.*). *Acta Agronómica*, 62(2), 174-185.
- López, Clemencia; Mazzarrino, Giovanni; Rodríguez, Aida; Fernández-López, Juana; Pérez-Álvarez, José; Viuda-Martos, Manuel (2015). Assessment of antioxidant and antibacterial potential of borojo fruit (*Borojoa patinoi* Cuatrecasas) from the rainforests of South America. *Industrial Crops and Products*, 63, 79-86.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.10.047>
- Maes, Sharon; Heyndrickx, Marc; Vackier, Thijs; Steenackers, Hans; Verplaetse, Alex; de Reu, Koen (2019). Identification and spoilage potential of the remaining dominant microbiota on food contact surfaces after cleaning and disinfection in different food industries. *Journal of Food Protection*, 82(2), 262-275.
<https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-18-226>
- Mahmoud, Yasmina; Abdelrazek, Heba (2019). Cancer: Thymoquinone antioxidant/pro-oxidant effect as potential anticancer remedy. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 115, 108783.
<https://doi.org/10.1016/j.biopha.2019.108783>
- Marin, Mayelin; Rodríguez, Arístides; Minier, Laidelbis; Zayas, Ekaterine; Soler, Raxsy (2020). Caracterización de agentes bacterianos aislados en brotes de enfermedades transmitidas por alimentos. *MEDISAN*, 24(2), 235-251.
- Martínez-Cruz, Nieves; Arévalo-Niño, Katiushka; Verde-Star, María; Rivas-Morales, Catalina; Oranday-Cárdenas, Azucena; Núñez-González, Adriana; Morales-Rubio, Eufemia (2011). Antocianinas y actividad anti radicales libres de *Rubus adenotrichus* Schltdl (zarzamora). *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, 42, 66-71.
- Mercado, Pedro; Llenque, Luis; Trujillo, María (2014). Sensibilidad de *Pseudomonas aeruginosa* y *Staphylococcus aureus* a concentración de aceite de *Citrus reticulata* variedad Satsuma “mandarina”. *Revista ciencia y tecnología*, 10(2), 61-71.
- Mosquera, Oscar; González, Lina; Cortés, Yeny; Camargo, Juan (2016). Caracterización fitoquímica, determinación del contenido de lignina y la actividad antioxidante de los culmos de *Guadua angustifolia* Kunth. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 11(2), 124.135.
<https://doi.org/10.18359/rfcb.1301>
- Nair, Sneha; Saxena, Alok; Kaur, Charanjit (2018). Effect of chitosan and alginate-based coatings enriched with pomegranate peel extract to extend the postharvest quality of guava (*Psidium guajava* L.). *Food Chemistry*, 240, 245-252.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.122>
- Nieto, Leonardo; González, Wilmer (2010). *Evaluación de la concentración mínima inhibitoria y letal de los extractos de cebolla roja (Allium cepa L.) para Escherichia coli y Staphylococcus aureus* (tesis de pregrado). Universidad de Cartagena, Colombia.
- Ochoa, Eréndira; Pérez, Rosa; Ávila, Teresa; Gómez, Juan; García, Pedro (2019). Propiedades fisicoquímicas de frutos silvestres de *Rubus* con potencial nutracéutico y alimenticio. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (23), 291-301.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v0i23.2028>
- Odeyemi, Olumide; Alegbeleye, Oluwadara; Strateva, Mariyana; Stratev, Deyan (2020). Understanding spoilage microbial community and spoilage mechanisms in foods of animal origin. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(2), 311-331.
<https://doi.org/10.1111/1541-4337.12526>

- Osorio, Coralia; Hurtado, Nelson; Corinna, Dawid; Hofmann, Thomas; Heredia-Mira, Francisco; Morales, Alicia (2012). Chemical characterisation of anthocyanins in tamarillo (*Solanum betaceum* Cav.) and Andes berry (*Rubus glaucus* Benth.) fruits. *Food Chemistry*, 132(4), 1915-1921.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.12.026>
- Palomino, Lady; García, Carlos; Gil, Jesús; Rojano, Benjamín; Durango, Diego (2009). Determinación del contenido de fenoles y evaluación de la actividad antioxidante de propóleos recolectados en el departamento de Antioquia (Colombia). *Vitae*, 16(3), 388-395.
- Picazo, Juan (2000). *Procedimientos en Microbiología Clínica*. <https://www.seimc.org/contenidos/documentoscientificos/procedimientosmicrobiologia/seimc-procedimientomicrobiologia10.pdf>
- Quirós, Ana (2016). *Obtención de un extracto etanólico en polifenoles a partir de un subproducto del procesamiento industrial de mora* (tesis de pregrado). Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Ramírez, Luz; Castaño, Darwin (2009). Metodologías para evaluar *in vitro* la actividad antibacteriana de compuestos de origen vegetal. *Scientia Et Technica*, 15(42), 263-268.
<https://www.redalyc.org/pdf/849/84916714049.pdf>
- Ramos, F.; Delgado, J.; Bautista, E.; Morales, A.; Duque, C. (2005). Changes in volatiles with the application of progressive freeze-concentration to Andes berry (*Rubus glaucus* Benth). *Journal of Food Engineering*, 69(3), 291-297.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.07.022>
- Ríos, Eunice; Giraldo, Germán; Duque, Alba (2007). Predicción de la actividad de agua en frutas tropicales. *Revista de Investigaciones*, 17, 27-32.
- Rocchetti, Gabriele; Blasi, Francesca; Montesano, Domenico; Ghisoni, Silvia; Marcotullio, María; Sabatini, Stefano; Cossignani, Lina; Lucini, Luigi (2019). Impact of conventional/non-conventional extraction methods on the untargeted phenolic profile of *Moringa oleifera* leaves. *Food Research International*, 115, 319-327.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.11.046>
- Rodríguez, Cristian; Villegas, Brenda (2015). *Caracterización de los cultivos de mora de castilla (Rubus Glaucus Benth) con espinas, en dos fincas del municipio de Guática, Risaralda* (tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
<http://hdl.handle.net/11059/6118>
- Rodríguez, Ligia; López, Leslie; García, Maribel (2010). Determinación de la composición química y actividad antioxidante en distintos estados de madurez de frutas de consumo habitual en Colombia, mora (*Rubus glaucus* B.), maracuyá (*Passiflora edulis* S.), guayaba (*Psidium guajava* L.) y papayuela (*Carica cundinam*). *Alimentos Hoy*, 19(21), 35-42.
- Salcedo, Dayanna (2019). *Evaluación de características botánicas morfológicas y fisicoquímicas, y el contenido de polifenoles y vitamina C de cuatro cultivares de mora (Rubus glaucus) para determinar su estabilidad durante el período de cosecha* (tesis de pregrado). Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Samaniego, Iván; Brito, Beatriz; Viera, William; Cabrera, Ana; Llerena, Wilma; Kannangara, Tissa; Vilcacundo, Rubén; Angós, Ignacio; Carrillo, Wilman (2020). Influence of the Maturity Stage on the Phytochemical Composition and the Antioxidant Activity of Four Andean Blackberry Cultivars (*Rubus glaucus* Benth) from Ecuador. *Plants*, 9(8), 1027.
<https://doi.org/10.3390/plants9081027>
- Sánchez, Jennifer; Correa, Margarita; Castañeda-Sandoval, Laura (2016). *Bacillus cereus* an important pathogen the microbiological control of food. *Facultad Nacional de Salud Pública*, 34(2). 230-242.
<https://doi.org/10.17533/udea.rfnsp.v34n2a12>

- Sotelo, Indira; Casas, Nidia; Camelo, Gustavo (2010). Borojó (*Borojoa patinoi*): fuente de polifenoles con actividad antimicrobiana. *Vitae*, 17(3), 329-336.
- Sulca, Tania (2010). *Determinación de la actividad antimicrobiana de los extractos de Acmella repens (Botoncillo), Urtica dioica (Ortiga negra) y Sonchus oleraceus (Kana yuyo), plantas registradas en la parroquia La Esperanza – Imbabura, sobre Staphylococcus aureus, Pseudomonas aeruginosa y Candida albicans, causantes de enfermedades bucofaríngeas.* (tesis de pregrado). Escuela Politécnica del Ejército, Ecuador.
- Tarín, Miriam (2015). *Evaluación de la calidad funcional de extractos de mora y fresa liofilizada.* (tesis de pregrado). Universitat Politècnica de València, España.
<http://hdl.handle.net/10251/55561>
- Tovar del Río, Jennifer (2013). *Determinación de la actividad antioxidante por DPPH y ABTS de 30 plantas recolectadas en la ecoregión cafetera* (tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
- Velciov, Ariana; Birtea, A.I.; Popescu, Sofia; Nicolae, A.; Zippenfening, Simelda; Dinu, Monica; Hădărugă, Nicoleta (2019). Preliminary research on the proximate composition of blackberry fruits (*Rubus fruticosus*). *Journal of Agroalimentary Processes and Technologies*, 25(4), 248–251.
- Venegas del Castillo, Alan; Vásquez-Valles, María (2016). Efecto del aceite esencial de Lantana cámara sobre el crecimiento de *Staphylococcus aureus* y *Escherichia coli*. *Revista Rebiol*, 36(1), 29-37.
- Vilaplana, Montse (2007). Antioxidantes presentes en los alimentos. Vitaminas, minerales y suplementos. *Elsevier*, 26(10), 11-41.
- Vilariño, María; Franco, Carol; Quarrington, Caitlin (2017). Food loss and Waste Reduction as an Integral Part of a Circular Economy. *Frontiers in Environmental Science*, 5, Art.21.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00021>
- Villalobos-Delgado, Luz; Nevárez-Moorillon, G.; Caro, Irma; Quinto, Emiliano; Mateo, Javier (2019). Natural antimicrobial agents to improve foods shelf life. In: Charis, Galanakis (Ed.), *Food Quality and Shelf Life* (pp. 125-157). Vienna, Austria: Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817190-5.00004-5>
- Wu, Shengjun; Lu, Mingsheng; Wang, Shujun (2016). Effect of oligosaccharides derived from *Laminaria japonica*-incorporated pullulan coatings on preservation of cherry tomatoes. *Food Chemistry*, 199, 296-300.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.12.029>
- Xu, Dong; Hu, Meng-Jiao; Wang, Yan-Qiu; Cui, Yuan-Lu (2019). Antioxidant activities of quercetin and its complexes for medicinal application. *Molecules*, 24(6), 1123.
<https://doi.org/10.3390/molecules24061123>
- Xue, Li; Gang, Liu (2019). Introduction to global food losses and food waste. In: Charis, Galanakis (Ed.), *Saving Food* (pp. 1-31). Chania, Greece: Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815357-4.00001-8>
- Yang, Yuyi; Song, Wenjuan; Lin, Hui; Wang, Weibo; Du, Linna; Xing, Wei (2018). Antibiotics and antibiotic resistance genes in global lakes: A review and meta-analysis. *Environment International*, 116, 60-73.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.011>
- Zaman, Sojib; Hussain, Muhammed; Nye, Rachel; Mehta, Varshil; Mamun, Kazi; Hossain, Naznin (2017). A review on antibiotic resistance: alarm bells are ringing. *Cureus*, 9(6), e1403.
<https://doi.org/10.7759/cureus.1403>
- Zapata, Karol; Cortes, Farid; Rojano, Benjamín (2013). Polifenoles y actividad antioxidante del fruto de Guayaba Agria (*Psidium araca*). *Información Tecnológica*, 24(5), 103-112.
<https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000500012>

Zeb, Alam (2020). Concept, mechanism, and applications of phenolic antioxidants in foods. *Journal of Food Biochemistry*, 44(9), e13394.

<https://doi.org/10.1111/jfbc.13394>

Zendejas-Manzo, Guadalupe; Avalos-Flores, Héctor; Soto-Padilla, Marisela (2014). Microbiología general de *Staphylococcus aureus*: Generalidades, patogenicidad y métodos de identificación. *Rev Biomed*, 25, 129-143.

Técnicas emergentes de extracción de β -caroteno para la valorización de subproductos agroindustriales de la zanahoria (*Daucus carota* L.): una revisión

Emerging extraction techniques of β -carotene for the valorisation of agroindustry by-products of carrot (*Daucus carota* L.): a review

Daniel Otálora-Orrego¹
D.A. Martin G.²

¹ Hortalizas Boyacá S.A.S. (Colombia). Correo electrónico: daniel.otalora@estudiantes.uamerica.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9092-8050>

² Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC (Colombia). Correo electrónico: dario.martin@uptc.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4629-166X>

Recibido: 27-05.2020 Aceptado: 06-10-2020

Cómo citar: Otálora-Orrego, Daniel; Martin-G, D.A (2020). Técnicas emergentes de extracción de β -caroteno para la valorización de subproductos agroindustriales de la zanahoria (*Daucus carota* L.): una revisión. *Informador Técnico*, 85(1), 83-106.
<https://doi.org/10.23850/22565035.2857>

Resumen

El objetivo de la presente revisión es reunir, contrastar y analizar algunas de las técnicas convencionales y no convencionales de extracción de β -caroteno a partir de la zanahoria (*Daucus carota* L.), a través de un análisis bibliométrico de estudios e investigaciones recientes, en los que confluyen numerosas técnicas, parámetros y hallazgos. Asimismo, establecer las posibles contribuciones de la extracción con solventes verdes para estos procesos, permitiendo su aplicabilidad a escala industrial para el aprovechamiento de los subproductos agroindustriales de este vegetal. La zanahoria es rica en carotenoides, en especial β -caroteno, fuente de provitamina A, utilizada como colorante natural en la industria de alimentos y farmacéutica. La extracción asistida con microondas (MAE por su sigla en inglés), con enzimas (EAE por su sigla en inglés) y en fluidos supercríticos (SFE por su sigla en inglés), han sido evaluadas en la zanahoria y comparadas con las técnicas convencionales de extracción (CSE por su sigla en inglés), encontrando rendimientos y eficiencias similares e incluso superiores. Sin embargo, la extracción asistida con ultrasonido (UAE por su sigla en inglés), muestra resultados satisfactorios y considerablemente mayores (157,0 mg β -caroteno/100 g base seca). Se requieren estudios posteriores para optimizar las condiciones y los parámetros de extracción, y evaluar las condiciones de conservación de la materia prima y del extracto final que aseguren una mayor estabilidad del producto y, por ende, un rendimiento de extracción superior, al igual que considerar alternativas verdes de extracción para reducir el impacto ambiental.

Palabras clave: extracción; solvente verde; rendimiento; zanahoria; *Daucus carota* L., β -caroteno; colorante natural.

Abstract

The objective of this review was to collect, contrast and analyse the conventional and non-conventional extraction techniques to obtain β -carotene from carrot (*Daucus carota* L.), by conducting a bibliometric analysis of different recent studies and investigations where different approaches, techniques, and findings converge. Similarly, the contribution of green solvents to the extraction process is established to determine its applicability at an industrial scale. Carrots are rich in carotenoids, and especially in β -carotene, a source of provitamin A used as a natural coloring in the food and pharmaceutical industry. Microwave-assisted extraction (MAE), enzyme-assisted extraction (EAE), and Supercritical fluid extraction (SFE) have been evaluated using the carrot and have been compared to conventional solvent extraction techniques (CSE), showing similar and even higher extraction yields and efficiencies. However, ultrasound-assisted extraction (UAE) shows successful and considerably higher results (157.0 mg β -carotene/100 g DB) compared to other non-conventional techniques. Further investigations are required to optimize the extraction conditions and parameters, as well as the evaluation of suitable preservation conditions for both the raw material and the final extract that ensure a higher stability of the end-product, and thus providing a higher extraction yield. Green alternatives should be considered to reduce environmental impact in future extraction processes.

Keywords: carrot; extraction; green solvent; yield; *Daucus carota* L.; β -carotene; natural colorant.

1. Introducción

El crecimiento de la demanda de alimentos por el aumento de la población a nivel mundial ha traído nuevos retos para las industrias de este sector agropecuario y agroindustrial. En Colombia, la producción de zanahoria aumentó un 30 % entre 2007 y 2020, con un rendimiento promedio del 30,54 % (Ministerio de Agricultura, 2017). Esto genera un problema en el manejo de residuos y subproductos remanentes de sus procesos que pueden alcanzar hasta un 30 % de la cosecha (Clementz *et al.*, 2019). A pesar de los diferentes usos que actualmente tienen, como la producción de biogás, compostaje, alimentación animal (Martínez; Quintero, 2017), una gran parte de este volumen aún no tiene ningún tipo de transformación útil, causando un problema económico y ambiental, ya que solo entre el 15 % y 20 % tiene un uso alternativo (Clementz *et al.*, 2019).

El desarrollo de tecnologías extractivas de compuestos bioactivos de fuentes naturales, han permitido conformar nuevas técnicas y procesos que establecen posibles alternativas para aprovechar componentes, como vitaminas, almidones y fibras dietarias, entre otras. Uno de los grupos de compuestos de alto valor nutricional y con un amplio campo de aplicación en diferentes industrias son los carotenoides. Estos compuestos pertenecientes al grupo de los tetraterpenoides, son pigmentos naturales oleosolubles, conformados por una cadena de hidrocarburos de 40 átomos de carbono con dos anillos terminales a los extremos brindándoles un color amarillo - naranja - rojo característico (Cheng; Khoo; Kong; Prasad; Galanakis, 2020).

El consumo global de carotenoides tuvo un crecimiento de 1500 toneladas métricas entre el 2007 (4193 ton) y 2017 (5693,6 ton) y se espera que esta cifra llegue hasta las 622,6 ton para el 2022, lo cual se refleja en el mercado global que tuvo un crecimiento estimado para el 2017 de 1.5 billones de dólares, no obstante, otros estudios pronostican una cifra de US\$2,0 billones de dólares para el 2022 (Bogacz-Radomska; Harasym; Piwowar, 2020).

El β -caroteno natural pertenece al grupo de los compuestos carotenoides que ha tomado fuerza en los últimos años gracias a sus beneficios nutricionales como compuesto antioxidante y sus efectos en la salud, especialmente porque disminuye el riesgo de presentar algunos tipos de cáncer (Clementz *et al.*, 2019) y es útil para la prevención de enfermedades crónicas y degenerativas; lo anterior, sin mencionar sus aplicaciones en la industria de alimentos, como colorante natural, suplemento vitamínico y compuesto activo para medicamentos (Martins; Ferreira, 2017). En el mercado se puede encontrar el β -caroteno en solución oleaginosa, generalmente

en aceite de girasol refinado entre 0.2-1.0 % de concentración, cuya aplicación se centra en los alimentos funcionales (Underwriters, 2020).

La zanahoria (*Daucus carota* L.) es conocida por su alto contenido de carotenoides especialmente α -y β -caroteno, precursores de la vitamina A, cumpliendo varias funciones relevantes en el cuerpo humano (Bogacz; Harasym, 2018). Diferentes técnicas de extracción sólido-líquido al igual que técnicas de cuantificación y detección han sido investigadas y evaluadas, de manera paralela, procurando su optimización, reducción de solventes de extracción y sustitución de solventes tóxicos para así ajustarse a las nuevas tendencias de los procesos sostenibles, económicos y amigables con el ambiente (Boukroufa; Boutekedjiret; Chemat, 2017). Las técnicas de extracción no convencionales, a diferencia de las técnicas convencionales (CE), se fundamentan en el uso de métodos de alta energía que permiten llegar al compuesto objetivo en una matriz vegetal, brindando una serie de ventajas, como una reducción en el tiempo, el consumo energético, la temperatura y la cantidad de solvente de extracción, al igual que sus altos rendimientos de extracción y sus bajos efectos de termodegradación de compuestos bioactivos (Goula; Ververi; Adamopoulou; Kaderides, 2017). Es por esto que han ganado gran interés en los últimos años y generan gran expectativa en el ámbito científico e industrial.

El presente documento tiene como propósito reunir y discutir los diferentes hallazgos y desarrollos en el proceso de extracción de β -caroteno, a partir de los subproductos de la zanahoria, como la epidermis o pulpa, teniendo en cuenta los conceptos, parámetros y variables fundamentales para definir su metodología y técnica, haciendo énfasis en las ventajas y beneficios potenciales que pueden traer para la valorización de subproductos agroindustriales a escala industrial, considerando los grandes retos que trae el aumento de la producción, consumo y procesamiento de la zanahoria (*Daucus carota* L.) y los desarrollos tecnológicos hacia el consumo de productos procesados con compuestos naturales.

2. Metodología

La información recopilada para el desarrollo de este documento fue consultada en publicaciones indexadas, artículos científicos o de revisión, secciones de libros en bases de datos de diferentes comunidades científicas. El criterio de selección se fundamentó en un análisis bibliométrico estableciendo un intervalo de tiempo de publicación a partir del año 2015 hasta la actualidad y seleccionando estudios que exponen tanto resultado experimental como fundamentos teóricos y metodologías de evaluación, optimización y análisis de los hallazgos que cada uno de estos expone. La búsqueda fue enfocada únicamente a artículos que giraran en torno al proceso de extracción, usando como materia prima la zanahoria variedad chantenay o (*Daucus carota* L.). Una vez realizado el rastreo bibliográfico se encontró que el porcentaje de artículos de investigación con respecto a los artículos de revisión es del 70 % y 30 %, respectivamente. Las palabras clave o tesauros empleados como criterios de búsqueda con ayuda de los operadores de búsqueda más relevantes fueron "*carrot AND β -carotene*", "*carrot AND extraction*", "*carrot AND ultrasound*" y "*Green AND extraction*", encontrando una gran afluencia de investigaciones relacionadas con estas técnicas de extracción entre los años 2013 y 2017, y, específicamente con relación a la zanahoria entre los años 2015 y 2017.

Las fuentes de información consultadas corresponden a las bases de datos digitales Science direct; Springer link; Scielo y Scopus, además de secciones o capítulos de libros digitales y manuales de equipos o dispositivos relacionados a los métodos de extracción y cuantificación mencionados. La búsqueda inicial arrojó un total de 72 artículos y publicaciones de carácter científico, los cuales fueron posteriormente depurados hasta obtener un total de 60 documentos. Los criterios de descarte aplicados para los artículos de investigación constaban de una serie de requerimientos donde era necesario una descripción de la técnica y metodología especificada, al igual que proporcionaran resultados cuantitativos y preferiblemente soportados por análisis estadísticos. Para los artículos de revisión y capítulos de libros se estableció que las fuentes de los fundamentos teóricos no debían superar el rango temporal establecido.

3. Desarrollo del tema

3.1. La zanahoria como fuente natural de carotenoides

La zanahoria es un vegetal de tipo raíz perteneciente a la familia *Apiaceae* anteriormente conocida como *Umbelliferae*, cuya producción se especializa en el consumo humano centrado en una siembra y cosecha bianual (ideal para regiones tropicales por su cosecha continua durante todo el año) y cuya calidad es dependiente de varios factores como las condiciones climáticas, relación corteza-raíz, su sistema vascular y la calidad del xilema y floema de la raíz (Raees; Prasad, 2015). En la Figura 1 se muestra su morfología, que está compuesta por el cuello y corona (parte más gruesa de la raíz), el fruto o floema, el corazón o xilema y, por último, la base o punta (parte más angosta). En conjunto, la zanahoria puede crecer en longitud desde los 5 hasta los 20 cm (Barzee; El- Mashad; Zhang; Pan, 2019).

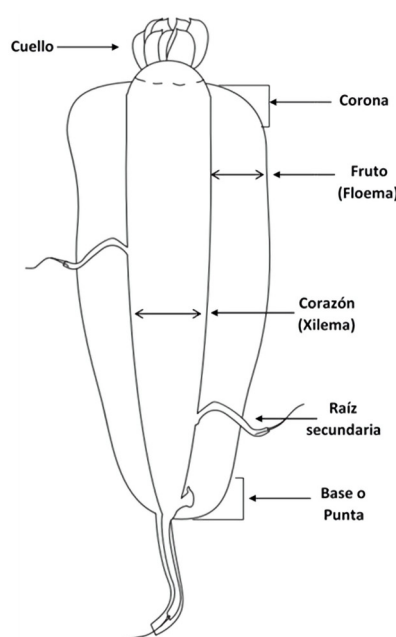


Figura 1. Morfología general de la zanahoria

Fuente: adaptado de Barzee *et al.* (2019).

El consumo mundial de zanahoria es de aproximadamente 37 millones de toneladas anuales, de las cuales un 11 % pertenece a los residuos de su procesamiento compuesto, principalmente, por la epidermis, tubérculos y trozos de fruto adheridos (de Andrade; Charalampopoulos; Chatzifragkou, 2018). En países de América y Europa la generación de desechos es un problema común, ya que entre el 15-20 % de estos son destinados al consumo animal y el restante es descartado hasta su descomposición, generando olores ofensivos y proliferación de insectos y plagas (Clementz *et al.*, 2019). La fuente principal que origina subproductos de zanahoria es la producción de jugo, la cual crea una gran cantidad de pulpa (Barzee *et al.*, 2019). Algunas cifras indican que hasta el 50 % de la pulpa de zanahoria usada para producción de jugo se obtiene como desperdicio. Este volumen es usado posteriormente como alimento animal o, incluso, descartado (Tiwari; Upadhyay; Singh; Meena; Arora, 2019), a pesar de ser rico en contenido de β -caroteno (Purohit; Gogate, 2015). Gracias al gran volumen de producción y procesamiento de la zanahoria y el fácil acceso a sus desperdicios de bajo costo, podría ser una alternativa potencial para obtener pigmentos naturales de alto valor económico y reducir su impacto ambiental (Mirheli; Dinani, 2018). En Latinoamérica el mercado de los compuestos valiosos de la zanahoria, como el β -caroteno, puede llegar hasta un valor de venta de 500 USD por kilogramo (Clementz *et al.*, 2019).

La provitamina A (β -caroteno) está presente en varios alimentos y también es consumido en suplementos dietarios. Como fuente natural, se encuentra en las frutas o verduras de color amarillo o naranja, como el melón, mango, calabaza y patata dulce; no obstante, la zanahoria se considera como una de las mejores fuentes de este pigmento (Kumari; Rajarani; Bansal; Dahuja; Praveen, 2019). Hasta seis especies de carotenoides se han encontrado en la zanahoria: α -, β -, γ -, ζ - caroteno, licopeno y β -zeacaroteno (Figura 2) con una proporción promedio 33:60:1:4:1:1, respectivamente, dependiendo del estado y condiciones de siembra.

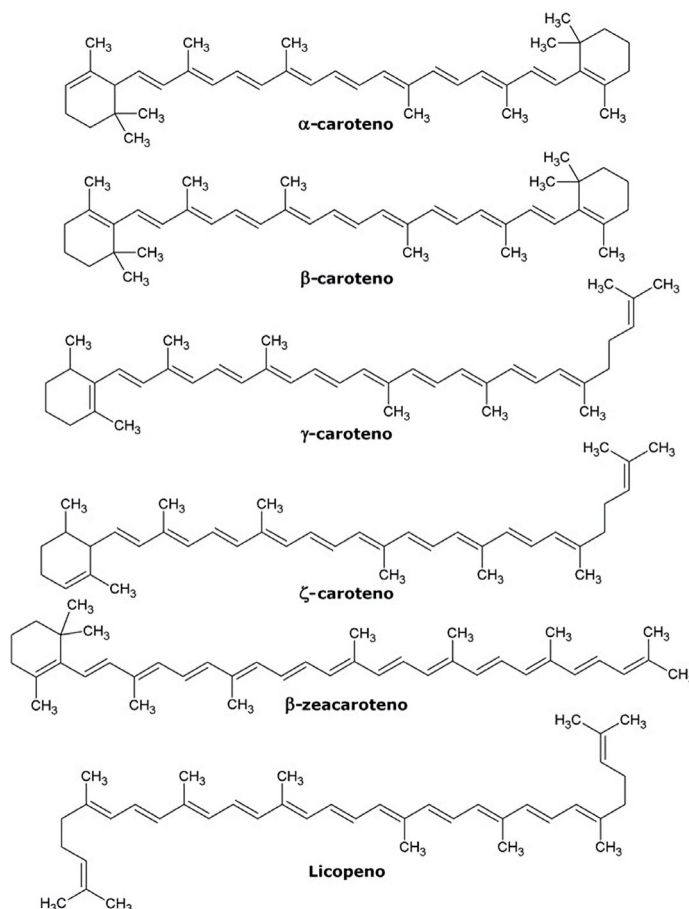


Figura 2. Carotenoides de la zanahoria
Fuente: adaptado de Juliana; Indrawati; Yuliati (2019).

Diferentes estudios concuerdan en que la zanahoria es la mayor fuente natural de carotenoides, en especial β -caroteno, cuyos valores se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1.
Valores reportados de β -caroteno en la zanahoria (*Daucus carota* L.)

Concentración (mg β -caroteno/100 g) base seca	Fuente
6.5 – 8.8	(da Silveira <i>et al.</i> , 2020)
8.0	(Platel; Srinivasan, 2016)
18.0	(Desobry; Netto; Labuza, 1998)
28.0	(Kumari <i>et al.</i> , 2019)
80.0	(Kyriakopoulou; Papadaki; Krokida, 2015)

Fuente: elaboración propia.

En la zanahoria este compuesto existe en forma cristalina como un complejo adherido a una lipoproteína helicoidal rica en alanina, leucina, ácido glutámico y aspártico, la cual se cree posee funciones enzimáticas en la biosíntesis del mismo (Desobry *et al.*, 1998). La presencia de β -caroteno es la responsable del color característico amarillo-naranja de esta raíz (Martins; Ferreira, 2017).

Si bien en la industria de alimentos se utiliza una gran variedad de colorantes minerales y sintéticos, gracias a su rango de colores intensos y su alta estabilidad; según estudios recientes, a algunos de estos se les atribuyen efectos secundarios en la salud desde enfermedades degenerativas hasta problemas de atención e hiperactividad (Ngamwonglumlert; Devahastin; Chiewchan, 2017). Asimismo, solventes como el n-hexano, ampliamente usado en la extracción convencional de carotenoides es considerado reprotóxico y contaminante agudo acuático (Boukroufa *et al.*, 2017). Es por esto que se ha prestado mayor atención a fuentes naturales de colorantes, como las clorofilas, antocianinas y carotenoides, abundantes en la naturaleza y cuyo uso en la industria alimentaria son aprobados por la FDA (Ngamwonglumlert *et al.*, 2017). Gracias al desarrollo de nuevas tecnologías de obtención de pigmentos a partir de fuentes naturales a escala laboratorio, se ha permitido llevar estas técnicas a una escala mayor mejorando el potencial de estas tendencias de consumo más saludable y de procesos más amigables y sostenibles.

El consumo de frutas y verduras provee al cuerpo humano nutrientes, vitaminas, fibra y compuestos antioxidantes con alto valor nutricional. Estos alimentos son procesados, generalmente, en jugos, purés o concentrados, dejando como subproductos cáscaras, piel y demás residuos que contienen compuestos valiosos bioactivos que pueden utilizarse para producir alimentos funcionales o ingredientes activos en la industria farmacéutica (Sharmin *et al.*, 2016). La búsqueda de un enfoque hacia los procesos de “cero desechos” junto con la economía circular son temas de interés actual, a través del aprovechamiento de los desperdicios de frutas y verduras, y su posterior valorización (Ojha; Aznar; O'Donnell; Tiwari, 2020), permitiendo, incluso, una reducción de los costos de los recursos naturales por medio de la reutilización de estos desechos (Kumari *et al.*, 2019).

3.2. Los carotenoides y el β -caroteno

Los carotenoides pertenecen a la familia de pigmentos naturales sintetizados por diferentes especies de plantas, algas y bacterias. En las plantas han sido posible identificar alrededor de 650 variedades de carotenoides; sin embargo, solo unos 40 pertenecen a las frutas y verduras pertenecientes a la dieta humana, la cual representa la mayor fuente de consumo de carotenoides (Goula *et al.*, 2017). Los carotenoides son compuestos de tipo tetraterpeno o tetraterpenoide, es decir, están constituidos de una cadena principal de 40 carbonos (C_{40}), conformada por ocho unidades de isopreno; son considerados pigmentos naturales que varían en el rango visible entre los colores amarillo claro, pasando por el anaranjado, hasta el rojo intenso. Algunos de los ejemplos más comunes en la naturaleza (Figura 3) son el caroteno, licopeno, la astaxantina, zeaxantina, luteína, bixina, cantaxantina, violaxantina y neoxantina (Vasconcelos *et al.*, 2020).

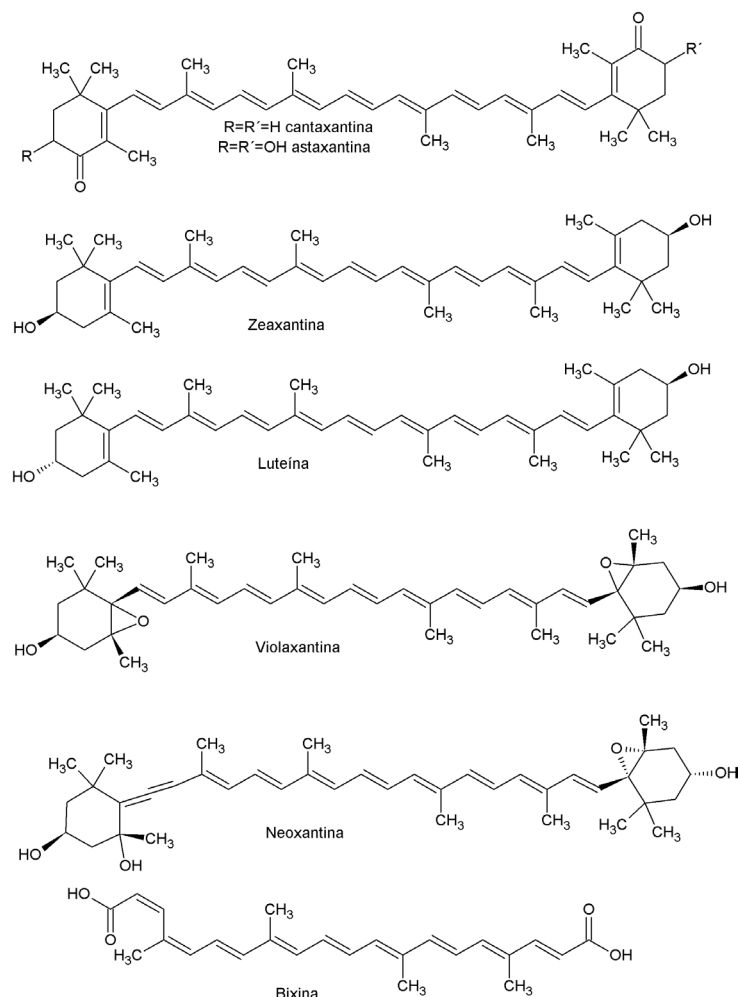


Figura 3. Carotenoides más comunes en la naturaleza

Fuente: Adaptado de (da Silveira *et al.*, 2020).

Los carotenoides son sintetizados por las plantas en los cromoplastos, siguiendo la ruta metileritrol fosfato (MEP) iniciando con la condensación de dos moléculas C₂₀ GGPP formadas a partir de isopentenil difosfato (IPP) y pirofosfato de dimetilalilo (DMAPP). En este primer paso, se obtiene 15-*cis*-fitoeno catalizado por la enzima fitoeno sintasa (PSY); este es luego transformado en licopeno a través de reacciones de isomerización y desaturación, catalizadas por las enzimas fitoeno desaturasa (PDS) y des-caroteno desaturasa (ZDS), respectivamente. Subsecuentemente, para la formación de los demás carotenos y xantofilas, el licopeno pasa a través de reacciones de ciclación (formación de α -, β -, γ -caroteno), hidroxilación (formación de luteína, astaxantina, cantaxantina y zeaxantina) y/o formación de anillos (formación de violaxantina y neoxantina) (Vasconcelos *et al.*, 2020).

Entre algunos de los beneficios más relevantes de los carotenoides se encuentra su acción antioxidante y su capacidad de reducir el riesgo de sufrir enfermedades degenerativas, como el cáncer y problemas cardiovasculares (Miękus; Iqbal; Marszałek; Puchalski; Świergiel, 2019). Por otra parte, sus numerosas aplicaciones en la industria de alimentos, como colorante natural, en la industria farmacéutica como modulador del sistema inmune, protector contra los rayos UV y precursor del pigmento visual retinol o vitamina A (Saini; Keum, 2018).

El β -caroteno es uno de los carotenoides más abundantes en las frutas, verduras y hortalizas. Es una molécula apolar de alto peso (536.85 g/mol) compuesta estructuralmente por una cadena insaturada de hidrocarburos cuyos extremos poseen anillos de ciclohexano. Este pigmento representa entre el 60 – 80 % de los carotenoides presentes en la zanahoria (Vasconcelos *et al.*, 2020) (Figura 4).

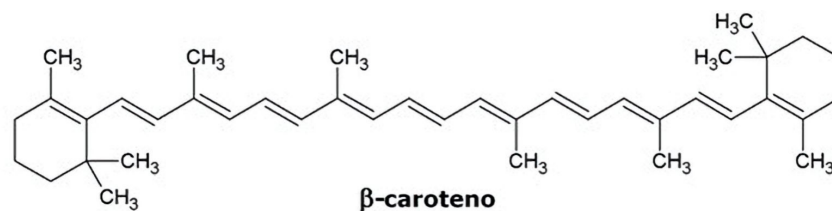


Figura 4. Estructura molecular del β -caroteno

Fuente: adaptado de (Murray y Capelli, 2020).

El β -caroteno junto con el α -caroteno y la β -criptoxantina son los carotenoides que exhiben mayor aporte de vitamina A al cuerpo humano; no obstante, estos últimos dos representan únicamente el 50 % de la actividad de esta vitamina comparado con el β -caroteno. En el espectro visible, este pigmento absorbe longitudes de onda entre los 450 y 460 nm (Murray; Capelli, 2020). Al igual que la mayoría de carotenoides, el β -caroteno es usado como agente colorante en varios tipos de alimentos, bebidas, suplementos alimenticios e incluso medicamentos. De igual forma, sus beneficios en la actividad biológica y, por ende, en la salud humana, son atribuidos a su efecto antioxidante (Martins; Ferreira, 2017).

3.3. Técnicas de extracción de β -caroteno de la zanahoria (*Daucus carota* L.)

Entre los métodos más destacados de extracción de β -caroteno a partir de la zanahoria se encuentran el convencional con solventes (CSE), el cual incluye la extracción convencional Soxhlet (SE), y los métodos de extracción no convencionales, conformados por la extracción asistida con microondas (MAE), la extracción asistida con ultrasonido (UAE), la extracción con fluidos supercríticos (SFE) y la extracción asistida con enzimas (EAE) (Kyriakopoulou *et al.*, 2015). En la Tabla 2 se enlistan las ventajas y desventajas principales de estas técnicas de extracción.

Tabla 2.

Ventajas y desventajas de las técnicas de extracción de β -caroteno de la zanahoria

Técnica de extracción	Ventajas	Desventajas	Fuente
CSE (Convencional)	Altos rendimientos de extracción. No requiere equipos sofisticados.	Grandes cantidades de solvente. Uso de solventes tóxicos. Alto consumo energético.	(Saini; Keum, 2018)
MAE (No convencional)	Altos rendimientos de extracción. Permite uso de solventes verdes. Reducción de gradientes térmico. Tiempos cortos de extracción.	Pérdidas de compuestos volátiles. Degradación térmica probable.	(Selvamuthukumaran; Shi, 2017)

Técnica de extracción	Ventajas	Desventajas	Fuente
UAE (No convencional)	Altos rendimientos de extracción. Bajo consumo energético. Tiempos cortos de extracción. Permite uso de solventes verdes.	Difícil control de variables. Escalado comercial complejo. Requiere optimización específica. Degradación térmica probable.	(Li; Fabiano-Tixier; Tomao; Cravotto; Chemat, 2013) (Wen <i>et al.</i> , 2018)
SFE (No convencional)	Evita la degradación térmica. Bajos volúmenes de solvente. Simple y rápido.	Equipos costosos y sofisticados. Difícil manipulación del proceso. Costos altos de análisis.	(Miękus <i>et al.</i> , 2019)
EAE (No convencional)	Rendimientos de extracción altos. Previene la degradación térmica.	Tiempos largos de extracción. Costos elevados de enzimas.	(Ngamwonglumlert <i>et al.</i> , 2017)

Fuente: elaboración propia.

Partiendo del hecho de que la zanahoria es la fuente vegetal con mayor contenido de carotenoides, específicamente de β -caroteno, diversas investigaciones se han centrado en optimizar las condiciones y parámetros de extracción y de cuantificación con el fin de obtener el máximo rendimiento. Teniendo en cuenta que, en promedio, de 50 kg de zanahoria fresca, se obtienen 2 g de α - y β -caroteno. De igual forma, las propiedades fisicoquímicas del β -caroteno exhiben una baja resistencia a las condiciones externas de luz y temperatura, lo que sugiere que se deben monitorear las condiciones poscosecha para evitar pérdidas de este compuesto (Bogacz; Harasym, 2018).

3.4. Extracción convencional (CSE)

Según Varón *et. al* (2017), un solvente se define como: “un líquido capaz de disolver, diluir o extraer otras sustancias sin causar modificación química a la sustancia o a sí mismo” (p.10). La extracción convencional es conducida a escala laboratorio y tiene como propósito principal evaluar el rendimiento de diferentes solventes a diferentes condiciones. Dentro de esta encontramos tres métodos principales, extracción Soxhlet, maceración e hidrodestilación. El primer método consta de un montaje, en el cual, a través de la ebullición y condensación de un solvente volátil, se provee un contacto directo y continuo de este con la muestra contenida en una cámara de extracción que posee un sifón, que permite la recuperación del solvente líquido. El segundo, que es la maceración, se considera el método más antiguo y consta de un proceso de mezcla del material sólido con un solvente específico y su posterior separación por medio de filtración sencilla o a vacío, donde las variables principales a controlar es el tipo de solvente y el área superficial. El tercer y último método consta del uso de agua para la generación de vapor y su uso como agente de extracción, en donde los compuestos bioactivos o aceites esenciales son recuperados por la volatilización del agua de las muestras (Selvamuthukumaran; Shi, 2017).

En la Tabla 3 se reúnen los principales hallazgos encontrados en diferentes investigaciones para la extracción de β -caroteno a partir de la zanahoria mediante los métodos de extracción convencional.

Tabla 3.

Extracción convencional (CSE) de β -caroteno de zanahoria (*Daucus carota* L.)

β -caroteno extraído (mg/100 g) base seca	Parámetros	Técnica de Cuantificación	Fuente
31,00	Sólido-solvente 1:10 m/v Maceración t: 1 h Cis-Pineno y n-Hexano	UV-VIS / HPLC	(Varón <i>et al.</i> , 2016)
18,10 – 4,90	Sólido-solvente 1:1 m/v Calentamiento y Filtración t: 5 min Etanol y diclorometano	UV-VIS	(Hasan; Mohamad; Aldaaiek, 2019)
38,05	Sólido-solvente 1:4 m/v Baño térmico (60 °C) t: 240 min Etanol, metanol y éter de petróleo	UV-VIS	(Sharmin <i>et al.</i> , 2016)
65,00	Sólido-solvente 1:5 m/v Agitación (temperatura ambiente) 1000 rpm, 20 Wh Hexano	UV-VIS	(Kyriakopoulou <i>et al.</i> , 2015)
69,60	Sólido-solvente 1:20 m/v Agitación en incubadora (65 °C) t: 270 min Aceite de linaza	UV-VIS	(Elik; Yanık; Göğüş, 2020)

Fuente: elaboración propia.

De los estudios analizados se encontró que las variables y parámetros más relevantes en estas técnicas convencionales son: relación sólido-solvente, polaridad, afinidad y toxicidad del solvente y estabilidad del compuesto bioactivo de interés. De los métodos convencionales expuestos al inicio cabe mencionar que, mediante la hidro-destilación no es utilizada para extraer β -caroteno, pues su estructura química conformada por unidades de carbono e hidrógeno hace que este sea de carácter lipo-soluble, es decir, su solubilidad en solventes polares, como el agua, no es la suficiente como para obtener rendimientos de extracción altos (Murray; Capelli, 2020). Los resultados de rendimiento de extracción obtenidos arrojaron un valor promedio de 37,8 mg β -caroteno/100 g base seca. La variabilidad de resultados de esta técnica de extracción está relacionada con la solubilidad de los carotenoides, que depende de las propiedades físicas y químicas de los mismos y, de igual forma, de la polaridad del solvente usado y las condiciones de temperatura y presión de extracción (Varón *et al.*, 2016). Por otro lado, el procesamiento o tratamiento de las muestras, afectando la integridad estructural de la matriz, produce un efecto tanto negativo (pérdida de carotenoides por oxidación) como positivo (incremento de la biodisponibilidad de carotenoides) (Sharmin *et al.*, 2016). Al comparar los resultados de las diferentes investigaciones, también se observa un posible aumento del rendimiento de extracción de β -caroteno al usar aceites de origen vegetal como en el caso del estudio realizado por Elik *et al.* (2020), quienes usaron aceite de linaza y una temperatura y tiempo de extracción superior a los demás estudios (65 °C y 270 min, respectivamente).

3.5. Extracción asistida con microondas (MAE)

La extracción asistida con microondas consiste en el uso de irradiación electromagnética en frecuencias entre los 0,3 y 300 GHz (Vinatoru; Mason; Calinescu, 2017), lo cual genera una excitación de las moléculas del medio por acción de rotación de dipolos y conducción de iones causando gradientes de calor y masa que logran romper las estructuras por generación de presión en el interior de la matriz biológica y facilitan el acceso a los compuestos bioactivos de la fuente vegetal (Selvamuthukumar; Shi, 2017). A diferencia de los procesos convencionales, la radiación por microondas genera el aumento de la temperatura interna a través del volumen de la célula o matriz vegetal donde se almacena el compuesto de interés, provocando un aumento de presión interno que termina causando una lisis o ruptura del sistema, liberando así la molécula objetivo (Vinatoru *et al.*, 2017). La relación sólido-solvente, potencia, el tiempo de extracción y el tipo de solvente, son las variables más evaluadas en esta técnica (Tabla 4). Además, junto con la extracción asistida con ultrasonido (UAE), son considerados los métodos más prácticos por su aplicabilidad a escala industrial, conveniencia de operación y sus buenos resultados en el rendimiento de extracción (Chuyen; Nguyen; Roach; Golding; Parks; 2018).

Tabla 4.

Extracción de β -caroteno de zanahoria (*Daucus carota* L.) técnica (MAE)

β -caroteno extraído (mg/100 g) base seca	Parámetros	Técnica de Cuantificación	Fuente
61,98	Sólido-solvente 1:8,06 m/m Potencia 165 W t: 9,39 min Aceite de linaza	HPLC	(Elik <i>et al.</i> , 2020)
112,60 – 110,90	Sólido-solvente 1:37,5 y 1:75 m/v Potencia 180 W – 300 W t: 3,5 y 6,5 min Hexano, acetona y etanol	UV-VIS / HPLC	(Hiranvarachat; Devahastin, 2014)

Fuente: elaboración propia.

Los rendimientos de extracción con microondas (Tabla 4), muestran una diferencia significativa entre cada autor. Una de las posibles causas de esto es el uso de potencias superiores en el estudio de (Hiranvarachat; Devahastin, 2014), quienes afirman que el rendimiento de extracción obedece a un comportamiento directamente proporcional de la potencia de microondas y el volumen de solvente en conjunto, ya que un aumento únicamente del volumen de solvente resulta en un contenido menor de β -caroteno y carotenoides, pues ocurre una mayor disipación de la potencia. No obstante, teniendo en cuenta que en el estudio de Elik *et al.* (2020) se usó un solvente alternativo (aceite de linaza) y se condujo el análisis con una potencia de microondas inferior. Los resultados son prometedores y similares a los que se obtendrían a través de técnicas convencionales de extracción.

3.6. Extracción con fluidos súper críticos (SFE)

A diferencia de los otros métodos de extracción mencionados, la extracción con fluidos supercríticos (SFE) se caracteriza por usar fluidos específicos en estado supercrítico, en el cual, este se comporta como un gas, es decir, adquiere una viscosidad, difusión y tensión superficial de naturaleza de este estado, manteniendo sus propiedades de dilución y densidad en el estado líquido. Esta tecnología usa, principalmente, dióxido de carbono CO₂ en estado supercrítico, pues este no crea residuos tóxicos tras la extracción; además, evita la degradación del compuesto bioactivo y permite su obtención en alta pureza rápidamente luego del proceso sin requerir un tratamiento posterior de purificación o recuperación del extracto (de Andrade *et al.*, 2018). La

revisión bibliográfica arrojó resultados limitados de estudios experimentales con la zanahoria (*Daucus carota* L.), por tal motivo, fue necesario seleccionar el estudio de (Sun; Temelli, 2006). En la zanahoria se han realizado algunas investigaciones (Tabla 5) en las que incluso se han utilizado co-solventes reciclados de naturaleza vegetal, como aceite de canola, para obtener al final este enriquecido con β -caroteno.

Tabla 5.

Extracción de β -caroteno de zanahoria (*Daucus carota* L.) técnica (SFE)

β -caroteno extraído (mg/100 g) base seca	Parámetros	Técnica de Cuantificación	Fuente
110,0	Presión:55.1 MPa Temperatura: 70 °C Medio: SC-CO ₂ (2 L/min) Co-solvente: aceite de canola	HPLC	(Sun; Temelli, 2006)
21,0	Presión:306 bar Temperatura: 58.5 °C Medio: SC-CO ₂ (2 L/min) Co-solvente: etanol	HPLC	(de Andrade <i>et al.</i> , 2018)

Fuente: elaboración propia.

De la Tabla 5 se puede inferir que se puede obtener un rendimiento de extracción superior al aumentar la temperatura y presión de operación, pues esto tiene un efecto positivo significativo en la extracción de carotenoides a excepción de la luteína (Sun; Temelli, 2006). De igual manera, se puede evidenciar un efecto positivo de la sustitución del co-solvente de extracción por uno de origen natural y fuente renovable, como el aceite de canola. El óxido nitroso N₂O también se ha usado como fluido de extracción en estado supercrítico mostrando una solubilidad comparable a las encontradas en el uso de co-solventes sin alterar el proceso en su recuperación, no obstante, este fluido no ha sido investigado de igual forma que el S-CO₂, pues es considerado riesgoso al entrar en contacto con productos orgánicos naturales (de Andrade *et al.*, 2018).

3.7. Extracción asistida con enzimas (EAE)

En realidad, la extracción asistida con enzimas no está dirigida directamente a la etapa de extracción, en cambio, utiliza enzimas hidrolíticas para romper la estructura o matriz que encubre los compuestos bioactivos de interés, es decir, centrándose en la etapa de separación de micro- y macro-moléculas. Las enzimas más usadas en la extracción de β -caroteno de la zanahoria reportadas en investigaciones (Tabla 6), son la celulasa y pectinasa. La primera se encarga de romper o hidrolizar la celulosa presente en la pared celular principal de las células vegetales, degradando las uniones 1,4- β -d-glicosídicos. La segunda degrada la pectina presente en la interface de la pared celular (Saini; Keum, 2018).

El motivo principal que llevó el desarrollo de esta técnica para la extracción de carotenoides radica en el hecho de que estos compuestos bioactivos son termosensibles y propensos a degradarse (isomerización) en condiciones alcalinas. El uso de enzimas provee una mayor estabilidad, pues posteriormente a este tratamiento, la extracción no requerirá de técnicas elaboradas para obtener altos rendimientos de extracción. Sin embargo, algunos estudios combinan esta técnica junto con otras no convencionales para obtener el mayor rendimiento posible.

Tabla 6.

Extracción de β -caroteno de zanahoria (*Daucus carota* L.) técnica (EAE)

β -caroteno extraído (mg/100 g) base seca	Parámetros	Técnica de Cuantificación	Fuente
42,96	Tiempo: 3 h Temperatura: 45 °C Enzimas empleadas: Celulasa (0,8 U/mg) Pectinasa (1,15 U/mg) pH Buffer: (7) Relación: 0,35 / 0,5 % Fuente: (<i>Aspergillus niger</i>)	HPLC	(<i>Tiwari et al.</i> , 2019)
7,0	Tiempo: 120 min Temperatura: 40 °C Surfactantes empleados: Tween 20, 60 y 80 Span 20, 40 y 60 Relación: 1,5 / 0,4 g	UV-VIS	(Zhao; Zhang; Wu; Ouyang, 2015)

Fuente: elaboración propia.

La ventaja principal de implementar una hidrólisis enzimática es disminuir la energía de activación de la reacción química y proveer al sistema de condiciones ideales en lo posible para llevar a cabo el proceso extractivo posterior (Ghosh; Biswas, 2016).

3.8. Extracción asistida con ultrasonido (UAE)

Esta técnica de extracción no convencional se basa en el uso de ondas ultrasónicas, comprendidas entre las frecuencias de 20 kHz y los 10 MHz y se divide en sonicación de baja y alta intensidad. La fuerza que genera el proceso de extracción se conoce como la cavitación acústica, en la cual microburbujas se generan por la diferencia de presión localizada en diferentes puntos del medio extractivo, las cuales posteriormente colapsan y generan focos de calor y energía que permiten el rompimiento de la matriz vegetal, facilitando el ingreso del solvente o agente de extracción al compuesto de interés (Vernès; Vian; Chemat, 2020). Los tratamientos con ultrasonido de baja frecuencia también han sido evaluados en procesos de tratamiento de la materia vegetal, encontrando efectos que promueven una migración de humedad mayor y, por ende, un proceso de secado más efectivo por causa del rompimiento de la estructura interna de la matriz vegetal (Wang; Xu; Wei; Zeng, 2018).

La efectividad de este método depende de las siguientes variables: amplitud, intensidad, potencia y frecuencia ultrasónica, temperatura y tiempo de extracción, naturaleza y propiedades fisicoquímicas del solvente y, por último, la naturaleza de la matriz. Esta técnica ha demostrado un futuro muy prometedor gracias a su flexibilidad en lo que concierne al diseño de procesos continuos y por lotes a escala industrial, siempre y cuando se realicen procesos de intensificación, para asegurar un consumo energético lo suficientemente sostenible y amigable con el ambiente y condiciones seguras (Tiwari, 2015).

En la Tabla 7 se reúnen los hallazgos y parámetros usados de los numerosos estudios encontrados, relacionados con la extracción de β -caroteno de la zanahoria publicados en la última década.

Tabla 7.

Extracción de β -caroteno de zanahoria (*Daucus carota* L.) técnica (UAE)

β -caroteno extraído (mg/100g) base seca	Parámetros	Técnica de Cuantificación / Detección	Fuente
104,5	Sólido-solvente 1:30 m/v Potencia y frecuencia: 165 W/25kHz Temperatura: 55 °C t: 60 min Aceite de girasol	UV-VIS	(da Silva <i>et al.</i> , 2020)
31,69	Frecuencia: 20 kHz Temperatura: 35 °C t: 20 min Etanol 55 %	UV-VIS	(Barzee <i>et al.</i> , 2019)
53,88	Sólido-solvente: 1.5:100 Potencia / frecuencia: 20 kHz Temperatura/tiempo UAE: 50 °C / 80 min Temperatura/tiempo agitación: 30 °C/ 120 min Etanol	UV-VIS	(Mirheli; Dinani, 2018)
83,32	Equipo: sonda ultrasónica Sólido-solvente: 0.3:20 m/v Potencia: 100 W Temperatura / tiempo: 50 °C / 50 min Etanol	UV-VIS	(Purohit; Gogate, 2015)
64,66	Equipo: baño ultrasónico Sólido-solvente: 0.3:20 m/v Potencia / frecuencia: 180 W / 40 kHz Temperatura / tiempo: 50 °C / 50 min Etanol	UV-VIS	(Purohit; Gogate, 2015)
46,10	Equipo: sonda ultrasónica y Ultra Turrax Sólido-solvente: 1:1 m/v Potencia: 750 W Centrifugación: 20000 rpm / 12 min Temperatura / tiempo: ambiente/12 min Aceite de linaza	HPLC	(Tiwari <i>et al.</i> , 2019)

β-caroteno extraído (mg/100g) base seca	Parámetros	Técnica de Cuantificación / Detección	Fuente
11,10	Equipo: Sonda ultrasónica Sólido-solvente: 1:2 m/v Potencia / frecuencia: 1000 W / 20 kHz Tiempo: 40 min Solución de surfactantes	UV-VIS	(Zhao <i>et al.</i> , 2015)
157,00	Equipo: Baño ultrasónico Sólido-solvente: 0.2:15 m/v Potencia / frecuencia: 1000 W / 20 kHz Temperatura / tiempo: 25°C / 30 min Hexano/acetona/etanol (50:25:25) v/v	UV-VIS / HPLC	(Lau; Van; Vuong, 2018)

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 7 se puede observar una gran cantidad de estudios asociados a la extracción de β -caroteno a partir de la zanahoria, cada uno presenta una alternativa diferente para esta técnica, utilizando diferentes parámetros y evaluando diferentes variables. El rendimiento de extracción promedio de los estudios es de 69,03 mg β -caroteno/100g base seca. Las condiciones y parámetro de extracción tienen un efecto específico en la efectividad de esta técnica. Entre algunos de los efectos más importantes para destacar, según los resultados reunidos en la Tabla 7 son:

Solvente: la viscosidad y tensión superficial del solvente son inversamente proporcionales a la efectividad del fenómeno de cavitación (Vernès *et al.*, 2020). En los valores de la Tabla 7 se puede observar que la sustitución de solventes por aceites vegetales no muestra un efecto significativo en la degradación del extracto, pues la degradación ultrasónica del β -caroteno es típicamente lenta en comparación con otros solventes aromáticos más volátiles (Varón *et al.*, 2017).

Temperatura de extracción: causa una variación en las propiedades del solvente como su viscosidad, mejorando la solubilidad y promoviendo el fenómeno de cavitación y, por otro lado, facilita la difusión y la transferencia de masa (Vernès *et al.*, 2020). Sin embargo, se observa en los resultados de la revisión, que una temperatura superior a los 50 °C puede disminuir el rendimiento de extracción, lo cual, puede estar relacionado con la termo-sensibilidad del β -caroteno que puede generar la isomerización o degradación de la molécula (Juliana *et al.*, 2019).

Tiempo de extracción: es directamente proporcional al rendimiento de extracción, sin embargo, este comportamiento ocurre hasta cierto punto, donde el rendimiento alcanza un valor constante y máximo para la extracción a ciertas condiciones (Purohit; Gogate, 2015). Por otra parte, se debe tener precaución, ya que una exposición prolongada del β -caroteno a altas temperaturas puede tener un efecto negativo en la estabilidad del pigmento.

Frecuencia ultrasónica: los rangos comunes de frecuencia ultrasónica utilizados en extracción de carotenoides varían entre los 20 y 40 kHz, pues un aumento significativo de la frecuencia fuera de este rango dificulta la formación de microburbujas para que se dé la cavitación en el medio (Vernès *et al.*, 2020). Por otra parte, en el estudio de (Purohit; Gogate, 2015), se encontró una relación directa entre el rendimiento de extracción

y la frecuencia ultrasónica, como efecto de la disipación energética de las ondas ultrasónicas en el medio. Sin embargo, un aumento considerado en la frecuencia tiene un efecto inhibitor del proceso de cavitación al reducir la formación de microburbujas en el medio (Wen *et al.*, 2018).

Tipo de equipo: el equipo tipo baño ultrasónico permite una distribución uniforme de las ondas ultrasónicas, sin embargo, este opera a potencias ultrasónicas bajas. Mientras que en el equipo tipo sonda ultrasónica, la sonda se encuentra en contacto directo con el medio y opera a potencias superiores, no obstante, hay una mayor probabilidad de pérdida de energía por difusión en el medio (Tiwari, 2015). En estudios analizados se puede observar un rendimiento promedio mayor para los ensayos realizados en equipos tipo sonda ultrasónica que en los de baños ultrasónicos.

3.9. Extracción verde como alternativa

Una gran parte de las experimentaciones de extracción de β -caroteno, a partir de fuentes naturales reportadas por diferentes autores, muestran el uso de solventes provenientes de fuentes no renovables, como el hexano, etanol, benceno, cloroformo y la acetona. A pesar de ello, hoy en día estos son considerados como altamente inflamables, tóxicos y perjudiciales para la salud y el ambiente. Así mismo, las nuevas necesidades y tendencias a escala industrial buscan reducir su consumo y sustituirlos con solventes alternativos de fuentes renovables y naturales (Saini; Keum, 2018). Estudios recientes han evaluado y comparado el efecto del rendimiento de extracción a través de una sustitución parcial o total de los solventes convencionales con otros más amigables. En la Tabla 8 se presentan algunos de estos ejemplos donde se evidencia también el solvente convencional comparado y el resultado en el rendimiento final de extracción.

Tabla 8.

Comparación rendimientos de extracción con solventes verdes

Solvente	Técnica de extracción	Rendimiento	Solvente convencional comparado	Fuente
Pineno	CSE	17,3 % mayor	n-Hexano	(Varón <i>et al.</i> , 2016)
Limoneno	CSE	16,7 % mayor	n-Hexano	(Aissou; Chemat-Djenni; Yara-Varón; Fabiano-Tixier; Chemat, 2017)
Limoneno	UAE / CSE	Similares	n-Hexano	(Boukroufa <i>et al.</i> , 2017)

Fuente: elaboración propia.

Entre algunos de los solventes considerados como verdes, usados para la extracción de compuestos bioactivos, cabe destacar el acetato de etilo, alcohol isopropílico, el ciclopentil etil éter, como solventes de menor impacto ambiental. Por otra parte, se destacan los solventes naturales, como el pineno, limoneno y los aceites vegetales de canola, girasol y oliva (Saini; Keum, 2018). El uso de aceites vegetales en extracciones de carotenoides ha arrojado resultados satisfactorios con altos porcentajes de retención, disminuyendo la degradación de los mismos, en especial cuando estos se encuentran de forma refinada y no natural. Pese al reemplazo de los solventes convencionales con aceites vegetales, la difusividad de los carotenoides continúa siendo una de los mayores riesgos e inconvenientes que se presentan por afectos viscosos durante la extracción; por otra parte, no existen los suficientes estudios que sustenten una reducción considerable de los costos a condiciones óptimas de extracción (Saini; Keum, 2018). Existe un potencial considerable gracias al fortalecimiento de las leyes y la demanda por parte de la sociedad actual para migrar a procesos más sostenibles que empleen fuentes renovables, lo cual va acorde con las cifras del mercado global de compuestos químicos estimado en 3000 billones de dólares

para el 2025, de los cuales se estima un crecimiento en la participación de compuestos renovables del 3 % al 15 % comparado con el 2009 (Varón *et al.*, 2017). Si bien existe una reducción en el impacto ambiental al usar solventes amigables con el ambiente, algunas de las técnicas no convencionales requieren una replicabilidad considerable para llegar a un análisis cuantitativo confiable, requiriéndose un consumo energético mayor en la operación de los equipos, lo cual puede aumentar en cierta medida los costos y el impacto neto ambiental (Armenta; Garrigues; Esteve-Turrillas; de la Guardia, 2019).

De este modo, el objetivo principal que se busca al momento de seleccionar un solvente considerado como verde es cumplir con los siguientes requisitos: no debe emitir compuestos orgánicos volátiles, baja toxicidad para los humanos, impacto ambiental limitado, proveniente de fuentes renovables, alto poder como disolvente, fácil recuperación y ajustable a procesos existentes (Armenta; Garrigues; de la Guardia, 2015).

4. Discusión de resultados

En primera instancia, se observa un crecimiento en la producción anual de la zanahoria (*Daucus carota* L.) en Colombia en la última década, como consecuencia del crecimiento de la demanda por el incremento en la población. Para el 2017 la cifra anual de producción de zanahoria en el país fue de 306.746 toneladas, con una participación liderada por los departamentos de Cundinamarca (30 %), Boyacá (26 %), Antioquia (26 %) y Nariño (14 %) (Ministerio de Agricultura, 2017). Esto indica un crecimiento paralelo de los residuos agroindustriales en el cultivo, cosecha y procesamiento. En Colombia se pierden aproximadamente el 22 % de los alimentos al año o 6,22 millones de toneladas (Martínez; Quintero, 2017). La principal causa de generación de subproductos agroindustriales en Colombia tiene que ver con su estética o imperfecciones y con las condiciones de manipulación o almacenamiento equívocas (Palacio, 2020). Las centrales de abasto generan una gran cantidad de desperdicios de alimentos, siendo para el caso de las verduras u hortalizas un 50 % del total de residuos (Gonzalez; Gómez; Abad, 2017).

Lo anterior crea un problema significativo en cuanto al manejo, manipulación y disposición de estos subproductos de carácter ambiental, por contaminación de suelos por residuos sólidos, y de carácter económico para las industrias que pierden esta materia prima, pues no tienen la capacidad de valorizarla. Los residuos agroindustriales no solo representan una pérdida de la materia prima en sí, sino que también involucra pérdidas en el uso del suelo, fertilizantes, agua, energía y mano de obra. Además, crean un problema ambiental grande por su descomposición en los suelos, emanando gases de invernadero dañinos (Sagar; Pareek; Sharma; Yahia; Lobo, 2018).

El β -caroteno es un compuesto carotenoide presente en la zanahoria (*Daucus carota* L.) con alto valor comercial y presenta un crecimiento en el mercado global por sus numerosas aplicaciones en la industria farmacéutica, alimentaria y cosmética, de igual forma, por sus beneficios en la salud. El β -caroteno juega un rol muy importante en la prevención de enfermedades del sistema inmune y otras enfermedades, como el cáncer de mama, próstata, colorectal y de pulmón; asimismo, para el tratamiento de la osteoporosis, desórdenes cardiovasculares, salud visual y problemas de sensibilidad en la piel (Singh; Ahmad; Ahmad, 2015).

La revisión del desarrollo de las técnicas de extracción de β -caroteno a partir de la zanahoria, permiten establecer un horizonte amplio de posibilidades y alternativas potenciales para el aprovechamiento de esta fuente natural y sus subproductos industriales. En primera instancia, las características fisicoquímicas de la zanahoria y sus volúmenes de disponibilidad en forma de subproducto industrial. En la presente revisión fue posible evidenciar que existen diferentes técnicas de extracción aplicadas a la obtención de β -caroteno de la zanahoria, demostrando el surgimiento de tecnologías de extracción con miras a la aplicación en la industria de alimentos, farmacéutica, química y cosmética (Tsiaka; Sinanoglou; Zoumpoulakis, 2017). Cada una de estas técnicas presentan ventajas y desventajas, y de igual forma, diferentes rendimientos de extracción, encontrando numerosas investigaciones en la extracción asistida con ultrasonido (UAE). Esta técnica, al parecer, es la más efectiva para esta materia prima, encontrándose un rendimiento de extracción máximo reportado en el estudio

conducido por (Lau *et al.*, 2018), con un valor de rendimiento de extracción de 157 mg β -caroteno/100 g base seca. Estudios recientes que emplearon técnicas analíticas de extracción de β -caroteno de la zanahoria (*Daucus carota* L.) reportados en la literatura, arrojaron un valor de concentración de 7,75 mg β -caroteno/100 g zanahoria base seca (Owolade *et al.*, 2017), indicando un rendimiento de extracción considerable para la técnica no convencional asistida con ondas ultrasónicas.

Un análisis de contraste realizado con el modelo de la Mínima Diferencia Significativa (LSD) para un diseño no balanceado, para un valor de $\alpha = 0,5$ a través de un modelo tipo *t* de Student, permitió establecer que en los rendimientos de extracción para las técnicas convencionales y no convencionales seleccionados no existe una diferencia significativa entre ninguno de los tratamientos o técnicas, es decir, dicho análisis sugiere que estadísticamente la técnica de extracción comparada, ya sea entre métodos convencionales y no convencionales, o entre métodos no convencionales, no tiene un efecto significativo en el rendimiento de extracción. No obstante, este hallazgo no determina la efectividad final del método, pues se deben tener en cuenta las demás variables, como equipos, tipo de solvente, consumo energético, relación sólido - solvente, temperatura y tiempo de extracción, entre otros, para establecer la diferencia real entre cada una de las técnicas.

Para la extracción asistida con ultrasonido (UAE) es correcto afirmar que se observa una serie de resultados en los hallazgos de las diferentes investigaciones, cuyo motivo principal es el tipo de equipo ultrasónico usado, pues, generalmente, la sonda ultrasónica puede generar intensidades ultrasónicas hasta 100 veces mayores que las instaladas en baños ultrasónicos (Rutkowska; Namieśnik; Konieczka, 2017). De igual forma, las condiciones de operación y parámetros seleccionados fueron diferentes. La frecuencia ultrasónica es un parámetro relevante que puede mejorar el rendimiento de extracción al permitir la formación de microcanales dentro de la matriz vegetal, causando un cambio en la microestructura que hace más accesible el contacto con el β -caroteno (Nowacka; Wedzik, 2016).

La posibilidad de emplear aceites vegetales en esta técnica, hace más amigable ecológicamente este proceso y satisface las necesidades que posibilitan su aplicación a escala industrial (da Silva *et al.*, 2020). Para la extracción asistida con ultrasonido (UAE) se puede constatar que, temperaturas inferiores a los 40 °C disminuyen el rendimiento de extracción. A pesar de ello, temperaturas muy superiores pueden generar degradación por isomerización de la molécula como consecuencia de su termo sensibilidad afectando, de igual manera, la eficiencia de extracción. La singularidad de cada técnica además conlleva a la necesidad de controlar y establecer parámetros específicos, con el propósito principal de buscar sus valores óptimos que permitan maximizar los rendimientos de extracción dentro de rangos de operación controlables, seguros y energéticamente sostenibles.

La eficiencia y efectividad no solo depende de las condiciones de extracción, por el contrario, las condiciones de la poscosecha y de la etapa de recuperación y generación de producto repercuten en la estabilidad del extracto de β -caroteno final obtenido posteriormente a la extracción, depende de su manipulación y condiciones de almacenamiento, como pH, temperatura y tiempo de almacenamiento (Juliana *et al.*, 2019).

Otro aspecto relevante hallado son las técnicas de detección y cuantificación de β -caroteno, donde la espectrofotometría UV-VIS parece ser la preferida por su flexibilidad para diferentes solventes de extracción y facilidad de determinar el contenido total de carotenoides en una muestra. No obstante, la cromatografía líquida de alta eficiencia HPLC también es un método muy utilizado para detectar, de manera específica, los tipos de carotenoides presentes en muestras y su concentración, gracias a su detector ultravioleta acoplable (Sarungallo; Hariyadi; Andarwulan; Purnomo; Wada, 2015).

Dadas las dificultades y limitantes que aún se evidencian en las técnicas estudiadas, es necesario llevar a cabo investigaciones a mayor profundidad, que permitan conformar procesos más estandarizados y, por ende, llevar el concepto de la biorrefinería a la práctica (Moreno; Ballesteros; Negro, 2020). Lo anterior, con el fin de poder alcanzar un nivel de aplicabilidad más amplio en el cual sea posible fusionar todos los aspectos característicos de esta tendencia, como la economía circular, uso de solventes verdes y reducción del consumo energético.

5. Conclusiones

La creciente demanda en el consumo de zanahoria (*Daucus carota* L.) se encuentra en constante aumento acorde con el crecimiento poblacional en Colombia, siendo un gran reto para la manipulación y aprovechamiento de los subproductos luego de su procesamiento. Diversos autores concuerdan con el gran potencial de esta como fuente natural de carotenoides, especialmente β -caroteno, cuya obtención es posible por medio de diferentes técnicas de extracción no convencionales, como la extracción asistida por microondas (MAE), la extracción con fluidos supercríticos (SFE), la extracción asistida con enzimas (EAE) y, en especial, la extracción asistida con ultrasonido (UAE). Esta última técnica promete ser simple, económica, rápida y segura. Además, permite el uso de solventes naturales de origen renovable que satisface las nuevas necesidades ecoamigables de los procesos industriales y crea un horizonte prometedor para el uso del β -caroteno natural altamente benéfico para la salud en la industria de alimentos, farmacéutica y química. El éxito de esta técnica en la industria en el futuro dependerá de investigaciones enfocadas en la optimización, tanto de las condiciones y parámetros extractivos como de los controles de estabilidad poscosecha y posextracción, para asegurar un rendimiento y eficiencia máxima del extracto de este compuesto valioso.

Referencias

- Aissou, Mohamed; Chemat-Djenni, Zoubida; Yara-Varón, Edinson; Fabiano-Tixier, Anne; Chemat, Farid (2017). Limonene as an agro-chemical building block for the synthesis and extraction of bioactive compounds. Utilisation du limonène comme synthon agrochimique pour la synthèse et l'extraction de produits naturels. *Comptes Rendus Chimie*, 20 (4), 346-358.
<https://doi.org/10.1016/j.crci.2016.05.018>
- Armenta, Sergio; Garrigues, Salvador; de la Guardia, Miguel (2015). The role of green extraction techniques in Green Analytical Chemistry. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 71, 2-8.
<https://doi.org/10.1016/j.trac.2014.12.011>
- Armenta, Sergio; Garrigues, Salvador; Esteve-Turrillas, Francesc; de la Guardia, Miguel (2019). Green extraction techniques in green analytical chemistry. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 116, 248-253.
<https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.03.016>
- Barzee, Tyler; El- Mashad, Hamed; Zhang, Ruihong; Pan, Zhongli (2019). Chapter 12 - Carrots. In: Z. Pan; R. Zhang; S. Zicari (Eds.), *Integrated Processing Technologies for Food and Agricultural By-Products* (pp. 297-330). Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814138-0.00012-5>
- Bogacz-Radomska, Ludmila; Harasym, Joanna; Piwowar, Arkadiusz (2020). 10 - Commercialization aspects of carotenoids. In: *Carotenoids: Properties, Processing and Applications* (pp. 327-357). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817067-0.00010-5>
- Bogacz, Ludmila; Harasym, Joanna (2018). β -Carotene—properties and production methods. *Food Quality and Safety*, 2(2), 69-74.
<https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyy004>
- Boukroufa, Meryem; Boutekedjiret, Chahrazed; Chemat, Farid (2017). Development of a green procedure of citrus fruits waste processing to recover carotenoids. *Resource-Efficient Technologies*, 3(3), 252-262.
<https://doi.org/10.1016/j.reffit.2017.08.007>
- Clementz, Adriana; Torresi, Pablo; Molli, José; Cardell, Daniel; Mammarella, Enrique; Yori, Juan (2019). Novel method for valorization of by-products from carrot discards. *LWT*, 100, 374-380.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.10.085>

- Cheng, Shi; Khoo, Hock; Kong, Kin; Prasad, Krishnamurthy; Galanakis, Charis (2020). 8- Extraction of carotenoids and applications. In: C. M. Galanakis (Ed.), *Carotenoids: Properties, Processing and Applications* (pp. 259-288). Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817067-0.00008-7>
- Chuyen, Hoang; Nguyen, Minh; Roach, Paul; Golding, John; Parks, Sophie (2018). Microwave-assisted extraction and ultrasound-assisted extraction for recovering carotenoids from Gac peel and their effects on antioxidant capacity of the extracts. *Food science y nutrition*, 6(1), 189-196.
<https://doi.org/10.1002/fsn3.546>
- da Silva, Heloísa; Iwassa, Isabela; Marques, Janaina; Postau, Najla; Stevanato, Natália; da Silva, Camila (2020). Enrichment of sunflower oil with β -carotene from carrots: Maximization and thermodynamic parameters of the β -carotene extraction and oil characterization. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(4), e14399.
<https://doi.org/10.1111/jfpp.14399>
- da Silveira, Mirele; de Oliveira, Luciana; Nunes-Pinheiro, Diana; da Silva, Francisco; de Sousa, Felipe; de Siqueira, Luciana; Cardoso, Andréia; Goebel, Tamiris; Sanches, Ana; Nabavi, Seyed; de Melo; Dirce (2020). Chapter 12 - Analysis of tetraterpenes and tetraterpenoids (carotenoids). In: A. Sanches; S. Nabavi; M. Saeedi; S. Nabavi (Eds.), *Recent Advances in Natural Products Analysis* (pp. 427-456). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816455-6.00012-3>
- de Andrade, Micael; Charalampopoulos, Dimitris; Chatzifragkou, Afroditi (2018). Optimisation and modelling of supercritical CO₂ extraction process of carotenoids from carrot peels. *The Journal of supercritical fluids*, 133(1), 94-102.
<https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.09.028>
- Desobry, Stephane; Netto, Flavia; Labuza, Theodore (1998). Preservation of β -carotene from carrots. *Critical reviews in food science and nutrition*, 38(5), 381-396.
<https://doi.org/10.1080/10408699891274255>
- Elik, Aysel; Yanık, Derya; Göğüş, Fahrettin (2020). Microwave-assisted extraction of carotenoids from carrot juice processing waste using flaxseed oil as a solvent. *LWT*, 123, 109100.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109100>
- Ghosh, Debasree; Biswas, Prasanta (2016). Enzyme-aided extraction of carotenoids from pumpkin tissues. *Indian Chemical Engineer*, 58(1), 1-11.
<https://doi.org/10.1080/00194506.2015.1046697>
- Gonzalez, Laura; Gómez, Sandra; Abad, Paula (2017). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. *RIAA*, 8 (2), 141-150.
- Goula, Athanasia; Ververi, Maria; Adamopoulou, Anna; Kaderides, Kyriakos (2017). Green ultrasound-assisted extraction of carotenoids from pomegranate wastes using vegetable oils. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 821-830.
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.07.022>
- Hasan, Hamade; Mohamad, Abdelrazin; Aldaai, Gebreel (2019). Extraction and Determination the of Beta carotene content in carrots and tomato samples Collected from some markets at El-Beida City, Libya. *EPH-International Journal of Applied Science*, 1(1), 105-110.
<https://ephjournal.org/index.php/as/article/view/1327>
- Hiranvarachat, Bhudsawan; Devahastin, Sakamon (2014). Enhancement of microwave-assisted extraction via intermittent radiation: Extraction of carotenoids from carrot peels. *Journal of Food Engineering*, 126, 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.10.024>

- Juliana, Juliana; Indrawati, Renny; Yuliati, Leny (2019). Effects of pH and Storage Time on the Stability of Papaya and Carrot Extracts. *Indonesian Journal of Natural Pigments*, 1(1), 25-25.
<https://doi.org/10.33479/ijnp.2019.01.1.25>
- Kumari, Suresh; Rajarani, A.; Bansal, N.; Dahuja, A.; Praveen, Shelly (2019). Extraction and estimation of provitamin A carotenoids from carrot. In: V. Krishnan; S. Kumar; S. Praveen (Eds.). *Omics meet Plant Biochemistry: Applications in nutritional enhancement with one health perspective* (pp. 56-55). New Delhi: Head, Division of Biochemistry ICAR-Indian Agricultural Research Institute.
- Kyriakopoulou, Konstantina; Papadaki, Sofia; Krokida, Magdalini (2015). Life cycle analysis of β -carotene extraction techniques. *Journal of Food Engineering*, 167, 51-58.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.03.008>
- Lau, Wai; Van, Hoang; Vuong, Quan (2018). Physical properties, carotenoids and antioxidant capacity of carrot (*Daucus carota* L.) peel as influenced by different drying treatments. *International Journal of Food Engineering*, 14(3).
<https://doi.org/10.1515/ijfe-2017-0042>
- Li, Ying; Fabiano-Tixier, Anne; Tomao, Valérie; Cravotto, Giancarlo; Chemat, Farid (2013). Green ultrasound-assisted extraction of carotenoids based on the bio-refinery concept using sunflower oil as an alternative solvent. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(1), 12-18.
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.07.005>
- Martínez, Maritza; Quintero, Jelen (2017). *Estado actual de los desperdicios de frutas y verduras en Colombia*. Recuperado de:
<http://rida2.utp.ac.pa/handle/123456789/2887>
- Martins, Natália; Ferreira, Isabel (2017). Wastes and by-products: Upcoming sources of carotenoids for biotechnological purposes and health-related applications. *Trends in Food Science y Technology*, 62, 33-48. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.01.014>
- Miękus, Natalia; Iqbal, Aamir; Marszałek, Krystian; Puchalski, Czesław; Świergiel, Artur (2019). Green Chemistry Extractions of Carotenoids from *Daucus carota* L.—Supercritical Carbon Dioxide and Enzyme-Assisted Methods. *Molecules*, 24(23), 4339.
<https://doi.org/10.3390/molecules24234339>
- Ministerio de Agricultura (2017). *Evaluaciones Agropecuarias Municipales - Zanahoria*. Recuperado de:
https://www.agronet.gov.co/Lists/Boletin/Attachments/2535/TERCER%20INFORME%20COSTOS%20DE%20PRODUCCION%20MADR_V4.pdf
- Mirheli, Maryam; Dinani, Somayeh (2018). Extraction of β -carotene pigment from carrot processing waste using ultrasonic-shaking incubation method. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12(3), 1818-1828.
- Moreno, Antonio; Ballesteros, Mercedes; Negro, María (2020). 5 - Biorefineries for the valorization of food processing waste. *The Interaction of Food Industry and Environment* (pp. 155-190). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816449-5.00005-9>
- Murray, Michael; Capelli, Bob (2020). 57 - Beta-Carotene and Other Carotenoids. In: J. Pizzorno; M. Murray (Eds.), *Textbook of Natural Medicine (5th Edition)* (pp. 443-450). Churchill Livingstone.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-43044-9.00057-1>
- Ngamwonglumlert, Luxsika; Devahastin, Sakamon; Chiewchan, Naphaporn (2017). Natural colorants: Pigment stability and extraction yield enhancement via utilization of appropriate pretreatment and extraction methods. *Critical reviews in food science and nutrition*, 57(15), 3243-3259.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1109498>

- Nowacka, MMalgorzata; Wedzik, Malgorzata (2016). Effect of ultrasound treatment on microstructure, colour and carotenoid content in fresh and dried carrot tissue. *Applied Acoustics*, 103, 163-171.
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.06.011>
- Ojha, Shikha; Aznar, Ramón; O'Donnell, Colm; Tiwari, Brijesh (2020). Ultrasound technology for the extraction of biologically active molecules from plant, animal and marine sources. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 122, 115663.
<https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.115663>
- Owolade, S.; Akinrinola, A.; Popoola, F.; Aderibigbe, O.; Ademoyegun, O.; Olabode, I. (2017). Study on physico-chemical properties, antioxidant activity and shelf stability of carrot (*Daucus carota*) and pineapple (*Ananas comosus*) juice blend. *International Food Research Journal*, 24(2), 534-540.
<http://agris.upm.edu.my:8080/dspace/handle/0/15903>
- Palacio, Natalia (2020). *Cadena de valor sostenible para zanahorias (Daucus carota) imperfectas en Cundinamarca, Colombia*. Recuperado de:
<http://hdl.handle.net/10726/2512>
- Platel, Kalpana; Srinivasan, Krishnapura (2016). Bioavailability of micronutrients from plant foods: an update. *Critical reviews in food science and nutrition*, 56(10), 1608-1619.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2013.781011>
- Purohit, Ashwini; Gogate, Parag (2015). Ultrasound-assisted extraction of β -carotene from waste carrot residue: effect of operating parameters and type of ultrasonic irradiation. *Separation Science and Technology*, 50(10), 1507-1517.
<https://doi.org/10.1080/01496395.2014.978472>
- Raees, Haq; Prasad, K. (2015). Nutritional and processing aspects of carrot (*Daucus carota*)-A review. *South Asian Journal of Food Technology and Environment*, 1(1), 1-14.
- Rutkowska, Małgorzata; Namieśnik, Jacek; Konieczka, Piotr (2017). Chapter 10 - Ultrasound-Assisted Extraction. In: F. Pena; M. Tobiszewski (Eds.), *The Application of Green Solvents in Separation Processes* (pp. 301-324). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805297-6.00010-3>
- Sagar, Narashans; Pareek, Sunil; Sharma, Sunil; Yahia, Elhadi; Lobo, Maria (2018). Fruit and vegetable waste: bioactive compounds, their extraction, and possible utilization. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(3), 512-531.
<https://doi.org/10.1111/1541-4337.12330>
- Saini, Ramesh; Keum, Young (2018). Carotenoid extraction methods: A review of recent developments. *Food Chemistry*, 240, 90-103.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.099>
- Sarungallo, Zita; Hariyadi, Purwiyatno; Andarwulan, Nuri; Purnomo, Eko; Wada, Mitsuhiro (2015). Analysis of α -Cryptoxanthin, β -Cryptoxanthin, α -Carotene, and β -Carotene of Pandanus Conoideus Oil by High-performance Liquid Chromatography (HPLC). *Procedia Food Science*, 3, 231-243.
<https://doi.org/10.1016/j.profoo.2015.01.026>
- Selvamuthukumaran, M.; Shi, John (2017). Recent advances in extraction of antioxidants from plant by-products processing industries. *Food Quality and Safety*, 1(1), 61-81.
<https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyx004>
- Sharmin, Tajnuba; Ahmed, Neaj; Hossain, Abul; Hosain, Mojaffor; Mondal, Shakti; Haque, Raihanul; Almas, Mohammed; Siddik, Abu (2016). Extraction of bioactive compound from some fruits and vegetables (pomegranate peel, carrot and tomato). *American Journal of Food and Nutrition*, 4(1), 8-19.

- Singh, Aasti; Ahmad, Sayeed; Ahmad, Anees (2015). Green extraction methods and environmental applications of carotenoids-a review. *RSC advances*, 5 (77), 62358-62393.
<https://doi.org/10.1039/C5RA10243J>
- Sun, Mei; Temelli, Feral (2006). Supercritical carbon dioxide extraction of carotenoids from carrot using canola oil as a continuous co-solvent. *The Journal of supercritical fluids*, 37(3), 397-408.
<https://doi.org/10.1016/j.supflu.2006.01.008>
- Tiwari, Brijesh (2015). Ultrasound: A clean, green extraction technology. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 71, 100-109.
<https://doi.org/10.1016/j.trac.2015.04.013>
- Tiwari, Swati; Upadhyay, Neelam; Singh, Ashish; Meena, Ganga; Arora, Sumit (2019). Organic solvent-free extraction of carotenoids from carrot bio-waste and its physico-chemical properties. *Journal of food science and technology*, 56(10), 4678-4687.
- Tsiaka, Thalia; Sinanoglou, Vassilia; Zoumpoulakis, Panagiotis (2017). Chapter 8 - Extracting Bioactive Compounds From Natural Sources Using Green High-Energy Approaches: Trends and Opportunities in Lab- and Large-Scale Applications. In: A. Grumezescu; A. Holban (Eds.), *Ingredients Extraction by Physicochemical Methods in Food*, 307-365. Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811521-3.00008-9>
- Underwriters, L. (2020). *Beta-Carotene Oil Solutions*. Recuperado de: from ulprospector.com
- Varón, Edinson; Li, Ying; Balcells, Merce; Canela-Garayoa, Ramon; Fabiano-Tixier, Anne; Chemat, Farid (2017). Vegetable oils as alternative solvents for green oleo-extraction, purification and formulation of food and natural products. *Molecules*, 22(9), 1474.
<https://doi.org/10.3390/molecules22091474>
- Varón, Edinson; Selka, A.; Fabiano-Tixier, Anne; Balcells, Merce; Canela-Garayoa, Ramon; Bily, Antoine; Touaibia, M.; Chemat, Farid (2016). Solvent from forestry biomass. Pinane a stable terpene derived from pine tree byproducts to substitute n-hexane for the extraction of bioactive compounds. *Green Chemistry*, 18(24), 6596-6608.
<https://doi.org/10.1039/C6GC02191C>
- Vasconcelos, Mirele; de Oliveira, Luciana; Nunes-Pinheiro, Diana; da Silva, Francisco; de Sousa, Felipe; de Siqueira, Luciana; Cardoso, Andréia; Goebel, Tamiris; Sanches, Ana; Nabavi, Seyed; de Melo, Dirce (2020). Chapter 12 - Analysis of tetraterpenes and tetraterpenoids (carotenoids). In: A. Sanches; S. Nabavi; M. Saeedi; S. Nabavi (Eds.), *Recent Advances in Natural Products Analysis* (pp. 427-456). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816455-6.00012-3>
- Vernès, Léa; Vian, Maryline; Chemat, Farid (2020). Chapter 12 - Ultrasound and Microwave as Green Tools for Solid-Liquid Extraction. In: C. Poole (Ed.), *Liquid-Phase Extraction* (pp. 355-374). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816911-7.00012-8>
- Vinatoru, M.; Mason, T.; Calinescu, I. (2017). Ultrasonically assisted extraction (UAE) and microwave assisted extraction (MAE) of functional compounds from plant materials. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 97, 159-178.
<https://doi.org/10.1016/j.trac.2017.09.002>
- Wang, Lin; Xu, Baoguo; Wei, Benxi; Zeng, Rong (2018). Low frequency ultrasound pretreatment of carrot slices: Effect on the moisture migration and quality attributes by intermediate-wave infrared radiation drying. *Ultrasonics Sonochemistry*, 40, 619-628.
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.08.005>

- Wen, Chaoting; Zhang, Jixian; Zhang, Haihui; Dzah, Courage; Zandile, Manyakara; Duan, Yuqing; Ma, Haile; Luo, Xiaoping (2018). Advances in ultrasound assisted extraction of bioactive compounds from cash crops—A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 48, 538-549.
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.07.018>
- Zhao, Qiaojiao; Zhang, Weiwei; Wu, Yanwen; Ouyang, Jie (2015). Extraction Techniques and Stability of Carotenoprotein from Carrot (*Daucus carota* L.) Root. *Journal of Food Process Engineering*, 38(3), 290-298.
<https://doi.org/10.1111/jfpe.12134>