

Valorización de residuos industriales en la producción de almidón de yuca

Valorization of industrial waste in the production of cassava starch

Lady Laura Del Rio Osorio¹ y Carlos David Grande-Tovar^{2*}

¹Estudiante de Ingeniería agroindustrial, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Agroindustrial, Universidad del Atlántico, Colombia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7306-3924>. Email: lldelrio@mail.uniatlantico.edu.co

²Doctor en Ciencias-Química, Grupo de Investigación en Fotoquímica y Fotobiología, Programa de Química, Facultad de Ciencias Básicas, Universidad del Atlántico, Carrera 30 # 8-49, Puerto Colombia, Atlántico, Colombia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6243-4571>. Email: carlosgrande@mail.uniatlantico.edu.co

*Autor de correspondencia: carlosgrande@mail.uniatlantico.edu.co

Recibido: 23/10/2020
Aceptado: 02/02/2021

Cite this article as: I. I. Del Río-Osorio, C. D. Grande-Tovar “Valorización de residuos industriales en la producción de almidón de yuca”, *Prospectiva*, Vol 19, N° 2, 2021.

<https://doi.org/10.15665/rp.v19i2.2556>

RESUMEN

La yuca es considerada un alimento esencial, debido a que proporciona una fuente importante de carbohidratos y contiene un porcentaje notable de vitaminas y minerales; además, es uno de los tubérculos más cultivados en el mundo. Sin embargo, la gran cantidad de residuos obtenidos del procesamiento industrial de la yuca genera un gran impacto al medio ambiente que afecta la salud y la calidad de vida de las personas. El aprovechamiento de los residuos agroindustriales es una de las mejores alternativas para mitigar la contaminación ambiental debido a que una mala disposición de los desechos en rellenos sanitarios, vertimientos de aguas residuales en cuerpos de aguas y suelos, causa gran contaminación y preocupación global. En esta revisión sistemática se recopiló información de estudios realizados recientemente del aprovechamiento de residuos provenientes del procesamiento del almidón de yuca en rallanderías alrededor del mundo, como la cáscara, el bagazo y efluentes industriales que, debido a sus características fisicoquímicas y funcionales, generan una gran aplicación como biosorbentes en la remoción de metales en aguas residuales, además de productos biodegradables con valor agregado en la industria.

Palabras clave: Aprovechamiento, biosorción, cáscara de yuca, medio ambiente, residuos agroindustriales.

ABSTRACT

Cassava is considered an essential food because it provides a vital carbohydrate source and contains a notable percentage of vitamins and minerals; Furthermore, it is one of the most cultivated tubers in the world. However, a large amount of waste obtained from the industrial processing of cassava generates a significant impact on the environment that affects people's health and quality of life. The use of agro-industrial waste is one of the best alternatives to mitigate environmental pollution. Poor disposal of waste

in sanitary landfills, wastewater discharges into water bodies and soils causes significant pollution and global concern. In this systematic review, collected information from recently conducted studies on the use of residues from cassava starch processing in rallanderias around the world is presented, such as peel, bagasse, and industrial effluents that, due to their physicochemical and functional characteristics, generate a great application as biosorbents in the removal of metals in wastewater, as well as biodegradable products with added value in the industry.

Keywords: Agro-industrial waste, sorption, cassava peel, environment, use.

1. INTRODUCCIÓN

La yuca o cassava (*Manihot esculenta*) es considerada un alimento base en la canasta familiar por su alto contenido de carbohidratos necesarios para la dieta diaria del ser humano [1]. Es un tubérculo con una alta demanda de consumidores y se considera el cuarto producto alimenticio esencial, seguido del arroz, el trigo y el maíz, con una amplia importancia en la seguridad alimentaria y generación de productos con valor agregado [2]. Se estima que la producción de yuca va en aumento debido a que es un alimento económico que tiene la capacidad de crecer en condiciones climáticas adversas, desde inviernos fríos hasta trópicos húmedos y cálidos, desarrollándose aun en suelos ácidos de escasa fertilidad, pobres en nutrientes y materia orgánica, en donde diferentes cultivos no pueden mantenerse [3]. Por otra parte, el incremento de la población, las necesidades y requerimientos alimenticios, la ampliación de mercados y el desarrollo industrial han generado un aumento en la elaboración de alimentos y así mismo un profundo impacto al medio ambiente [4].

El procesamiento de materia prima para la elaboración de productos con valor agregado genera una gran cantidad de residuos y por causa de una mala disposición, se descartan o eliminan al ambiente marino y terrestre, ocasionando el aumento del deterioro de la calidad del medio ambiente [5]. En consecuencia, los gobiernos impulsan planes de desarrollo sostenibles a nivel local, nacional y mundial, donde se dispongan de manera segura los residuos que poseen un alto grado de aprovechamiento, recuperándolos al proceso creando nuevos subproductos o aportando a la restauración del ecosistema, que dependerá del tipo de residuo y sus componentes [6]. La variedad de nutrientes y compuestos como proteínas, carbohidratos, fibras y minerales presentes en los residuos obtenidos del procesamiento de la yuca, ha permitido el análisis de diferentes aplicaciones biotecnológicas como biosorbentes, coagulantes y obtención de nanofibras a partir de celulosa, además de la extracción de biomasa para el tratamiento de aguas contaminadas [7–9]. En el siguiente estudio se revisó de manera sistemática la aplicación de los residuos del almidón de yuca de acuerdo con las variedades de yuca, su producción mundial y procesamiento. Asimismo, se revisó su importancia como biosorbente que contribuye a la disminución del impacto ambiental que generan estos residuos y el valor aplicativo de los residuos como materia prima en la industria para la elaboración de productos biodegradables.

2. LA YUCA

La yuca (*Manihot esculenta*), mandioca o tapioca, es originaria de América del Sur, perteneciente a la familia *Euphorbiaceae* (tabla 1) y está conformada por aproximadamente 7.200 especies [10]. Es un arbusto perennifolio (figura 1), mayormente cultivado en regiones de África, Asia, América latina y el Caribe [11]. Las hojas conforman una fuente de proteína rica en lisina pero pobre en metionina; sin embargo, sus raíces contienen una mayor proporción de nutrientes como aminoácidos, minerales, vitaminas, fibras y carbohidratos [12]. El cultivo de la yuca es apto para cosechar en cualquier momento entre los seis y ocho meses posterior al sembrado. En el momento de cosecharlas, son llevadas directamente a su consumo o son

cultivadas por industrias para luego ser procesadas, obteniendo productos con valor agregado para el sector alimentario y no alimentario, donde su procesamiento debe comenzar dentro de las 48 horas de cosechadas, ya que se deterioran rápidamente [13].

Tabla 1. Composición taxonómica de la Yuca (*Manihot esculenta*)

Table 1. Taxonomic composition of Yucca (*Manihot esculenta*)

| Taxonomía de la Yuca | |
|----------------------|-------------------|
| División | Magnoliophyta |
| Clase | Magnoliopsida |
| Orden | Euphorbiales |
| Familia | Euphorbiaceae |
| Subfamilia | Critonoideae |
| Tribu | Manihoteae |
| Genero | Manihot |
| Especie | Manihot esculenta |

Fuente: [14]

Figura 1. Planta de Yuca (*Manihot esculenta*).

Figure 1. Cassava (*Manihot esculenta*) plant.



Fuente: Tomada de [15]

2.1. Variedades de yuca

La yuca generalmente es clasificada por su contenido de glucósido cianogénico como dulce y amarga [16]. La variedad de yuca amarga contiene un porcentaje considerable de ácido cianhídrico, toxina que interfiere en la conducción de oxígeno a las células del organismo; por el contrario, la yuca dulce presenta una muy baja cantidad de esa toxina [17]. De este modo, se pueden encontrar diversas variedades de yuca, con raíces largas o cortas y de forma variada de acuerdo al lugar de origen y región donde es cultivada, por esto mismo varían sus características físicas y nutricionales [18] (tabla 2).

Tabla 2. Variedades de Yuca (*Manihot esculenta*) cultivadas en Asia, África y América del sur.

Table 2. Cassava (*Manihot esculenta*) varieties grown in Asia, Africa and South America.

| País | Nombre común o Genotipo | Características | | Referencias |
|----------|-------------------------------|---|--|-------------|
| | | Físicas | Nutricionales | |
| Colombia | Corpoica verónica o CM 4919-1 | Hojas color verde oscuro y ápice verde amarillento. Tallo sin ramificaciones, raíces cilíndrica-cónica con pulpa amarilla y amarga. | Carbohidratos: 71,5%. Fibra: 2%. Proteína: 2,2%. Vitaminas y minerales: 6,7% | [18,19] |
| Brasil | Macaxeira Preta o MBRA 1342 | Raíces fusiformes con pulpa blanca, corteza externa marrón. | Carbohidratos: 67%. Fibra: 0,9%. Proteína: 3%. Vitaminas y minerales: 5,3% | [21,23] |

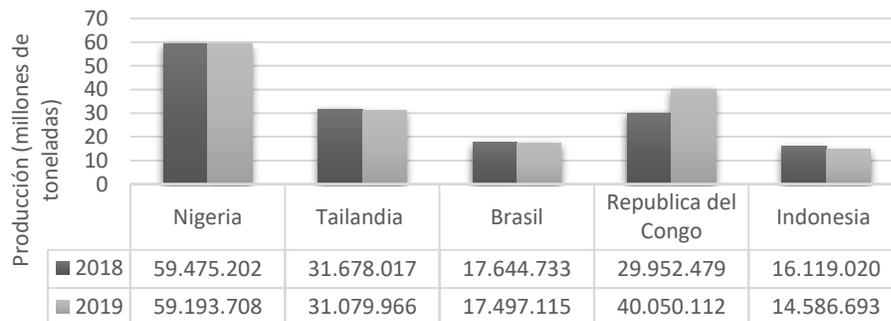
| | | | | |
|-----------|------------------------|--|--|------|
| Tailandia | MTAI 8 o CMR 246343 | Corteza blanca, pulpa color crema y amarga. Forma cónica cilíndrica. Hojas verdes claro y ápices verdes oscuros. | Carbohidratos: 62,3%. Fibra: 1,5%. Proteína: 3% | [19] |
| Nigeria | TME 419 | Forma del lóbulo de la hoja: lanceolada. Tallo sin ramificaciones, raíces fusiformes, color marrón, pulpa blanca | Carbohidratos: 65,7%. Fibra: 1%. Proteína: 2,3% Minerales y vitaminas: 6.1% | [22] |

2.2. Producción mundial de la yuca

Dentro los principales productores de yuca en el mundo se encuentran Nigeria, Indonesia, Tailandia, Brasil y el Congo (figura 2) [23]. En el continente africano se encuentra el 60% del área global de plantación de yuca, pero de la producción total en el mundo solo cosecha el 50%. Asia tiene un alto rendimiento, produciendo el 30% del total de yuca y teniendo el 22% del área total del mundo; por otro lado, América del sur solo cultiva el 16% del área global, con una producción poco menos de 19% [24]. Durante el periodo de 2018-2019, la producción de yuca en el mundo tuvo un rendimiento de 11 ton/ha [25].

Figura 2. Principales países productores de yuca durante el periodo 2018-2019

Figure 2. Main cassava producing countries during the period 2018-2019



Fuente: [25]

3. ALMIDÓN DE YUCA

La producción de almidón es la principal forma de procesamiento de la yuca realizada en industrias llamadas rallanderías [26]. En diferentes países productores, las rallanderías tienen etapas parcialmente semejantes donde la variación se ve mayormente identificada en las condiciones de procesamiento y en los equipos empleados [27]. Una de las diferencias que presentan las industrias procesadoras de almidón de yuca ocurre en la etapa de fermentación, donde se emplean fermentadores de material variado para su fabricación de diferente geometría y tamaño [28]. Las variaciones en la calidad del producto, suceden mayormente en el gránulo del almidón a través de procesos enzimáticos y fisicoquímicos que ocasiona modificaciones a nivel molecular que influyen en sus propiedades fisicoquímicas como la capacidad hinchamiento, la variación de pH y la temperatura [26].

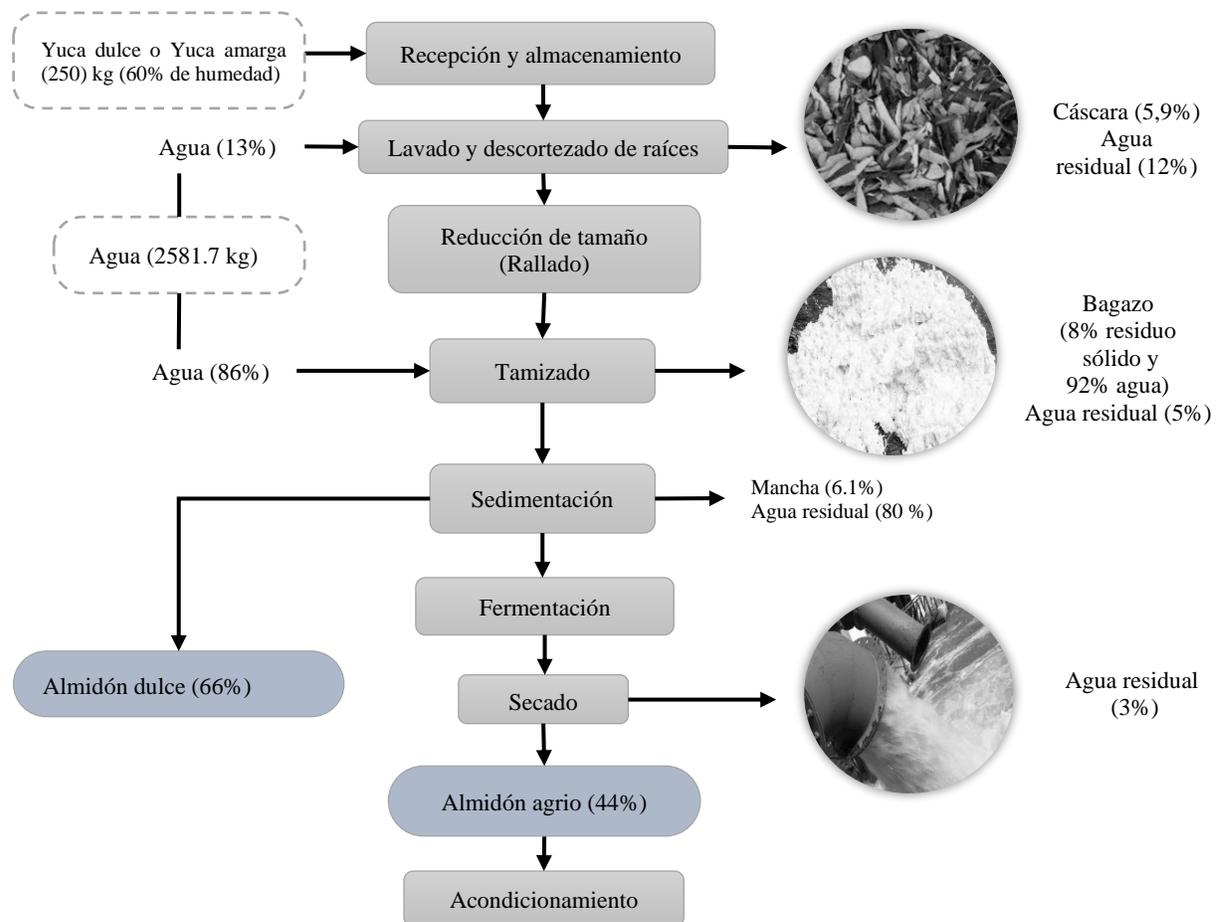
El almidón es utilizado como materia prima para la elaboración de productos de la industria alimentaria, textil, cosmética, papelería y farmacéutica, debido a sus características nutricionales y funcionales [29] (tabla 3). Entre sus componentes funcionales se pueden destacar la baja temperatura de gelatinización, capacidad de retención de agua y una alta viscosidad [30]. Se estima que anualmente aumentará la producción de almidón hasta 376,000 toneladas en el mundo para su comercialización durante el periodo 2019 - 2024 [31]. Por otra parte, dentro del proceso de obtención de 115,5kg de almidón dulce y 58,5kg de almidón agrio, se emplean 250kg de yuca y se generan residuos como el bagazo o afrecho, manchas, cáscaras y efluentes (figura 3), conformando el 96,2% de residuos de todo el proceso [32].

Tabla 3. Principales aplicaciones industriales del almidón de yuca en el mundo

Table 3. Main industrial applications of cassava starch in the world

| Aplicación | Forma del almidón y uso | Producción | Referencias |
|--------------------------|---|--|-------------|
| Papelería | Modificado – Aumenta la resistencia de la hoja; como adhesivo genera la unión de capas múltiples en cartones, en los procesos de ondulación y laminación. | 120.000 toneladas de almidón usados en la industria papelera. 55kg de almidón/ton de papel. | [34,35] |
| Edulcorantes | Modificado/Hidrolizado – Espesante y sabor neutralizado. Obtención de productos: jarabe de glucosa, glucosa e isoglucosa; utilizados en industrias heladeras, confiteras y pasteleras | 384.000 toneladas de almidón usados en la industria de edulcorantes. | [34,35] |
| Textiles | Modificado – Capacidad de brindar resistencia y flexibilidad al material. Cubre imperfecciones en procesos de encolado, acabado e impresión, mejorando la resistencia del hilo, tamices y telas estampadas. | 10.000 toneladas de almidón usados en la industria textil. | [32,34] |
| Farmacéutica y cosmética | Modificado/Hidrolizado - Agente de dispersión en la producción de polvos faciales compactos, finos y nutritivos; además, permite ligar y unir el componente activo de tabletas, pastas y productos farmacéuticos. | Aproximadamente 4.000 toneladas de almidón en la producción de medicinas y cosméticos. | [34,35] |

Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de extracción de 174kg de almidón de yuca
Figure 3. Flow diagram of the extraction process of 174 kg of cassava starch



Fuente: Adaptado de [32]; imágenes tomadas de [35]

3.1. Residuos agroindustriales en la producción del almidón de yuca

3.1.1. Bagazo o Afrecho.

El bagazo se genera durante la etapa de tamizado o colado donde se separa la pulpa del material fibroso, constituyendo el 10% de residuo de la yuca procesada. Este residuo contiene un elevado porcentaje de agua y residuos de almidón, debido a que, en la etapa de separación del almidón, se empapa en agua y, en estas condiciones, presenta un volumen mayor que la materia prima representado de un 61% a 90% de agua y un 11 % a 30% de almidón y fibra en peso seco [36]. Por su contenido de fibra, proporciona características lignocelulósicas por la formación de tres polímeros, 38% de celulosa y 37% de hemicelulosa más lignina [29]. El bagazo es utilizado mayormente para la alimentación animal, ya sea en estado húmedo o seco, siendo un residuo obtenido por medio de la molienda de la yuca rico en fibra, pero con baja proporción de proteína; por lo tanto, se debe balancear de acuerdo a los requerimientos o necesidades de cada especie animal [36].

3.1.2. Cáscara.

La cáscara se obtiene en la operación de pelado o descortezado. En primer lugar, se despunta la yuca y luego se retira la cáscara ya sea por operación manual o mecánica [37]. Se calcula que anualmente se generan 11 millones de toneladas de cáscaras en el mundo, las cuales abarcan aproximadamente del 3% al 5% del peso total de las raíces de la yuca, presentando mayor contenido de proteína, almidón y fibra que la pulpa [38]; sin embargo, contiene una considerable proporción de glúcidos cianogénicos (HCN): linamarina y lotaustralina, componentes que se encuentran en mayor concentración en yuca amarga, a diferencia de la yuca dulce que contiene baja cantidad del glúcido. Otros factores que pueden variar la concentración de los glúcidos cianogénicos son el estado fisiológico del tubérculo, la fertilidad y humedad del suelo [39]. El consumo para seres humanos no es recomendable debido a la toxicidad que presentan estos componentes, a causa de la acción de la enzima linamarasa que hidroliza los glucósidos (lotaustralina y linamarina) durante la digestión, la cual produce glucosa y cianhidrina. Esta última se descompone en ácido cianhídrico libre gaseoso y acetona ocasionando toxicidad en el organismo [40]. Sin embargo, esta enzima se inactiva a una temperatura de 75°C; por lo tanto, mediante tratamientos térmicos, se puede disminuir la concentración de esta toxina. También se conocen otros métodos de eliminación de la enzima linamarasa como la fermentación, donde la cáscara se deja en remojo por un tiempo breve o prolongado [26].

3.1.3. Efluentes o Aguas Residuales.

Para la producción de 174kg de almidón de yuca se requieren aproximadamente 12,4 m³/ton de agua, generando así la mayor cantidad de residuos líquidos del procesamiento del almidón. Estos han deteriorado significativamente suelos y fuentes superficiales de agua que se encuentran ubicadas cerca a las rallanderías [32]. Durante el proceso de fermentación, se producen enzimas amilolíticas y ácidos orgánicos que contribuyen a la funcionalidad del almidón agrio de yuca; asimismo, las aguas residuales contienen ácidos orgánicos provenientes de este proceso [41]. En un estudio realizado por Avancini *et al.* [42] donde caracterizaron las aguas residuales de la fermentación del almidón de yuca, se obtuvo un notable contenido de proteínas, baja concentración de sólidos totales y la presencia de ácidos orgánicos como el ácido láctico (tabla 4) utilizado en gran parte de la industria alimentaria y farmacéutica.

Tabla 4. Composición química de las aguas residuales de la fermentación del almidón de yuca

Table 4. Chemical composition of cassava starch fermentation wastewater

| Composición | g/100mL |
|-------------------------|--------------|
| Sólidos totales | 0,22 ± 0,04 |
| Lípidos | ---- |
| Proteínas | 1,35 ± 0,26 |
| Cenizas | 0,02 ± 0,001 |
| Carbohidratos | 0,19 ± 0,03 |
| Acidez en ácido láctico | 0,19 ± 0,01 |
| pH | 3,20 ± 0,17 |

Fuente: [42]

4. APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS DE LA PRODUCCIÓN DE ALMIDÓN DE YUCA

Existen diversos métodos para el aprovechamiento de residuos agroindustriales. Su implementación dependerá de las características fisicoquímicas y sus componentes químicos [43]. Los residuos industriales de yuca a pesar de tener sustancias nocivas para el ecosistema, contiene nutrientes y características funcionales. Por ello, se han realizado estudios e investigaciones (tabla 5) con el propósito de mitigar el deterioro del medio ambiente, además de la obtención de subproductos biodegradables [44].

Tabla 5. Investigaciones realizadas en la aplicación de residuos del almidón de yuca.

Table 5. Research carried out in the application of cassava starch residues.

| Aplicación | Residuo | Estudio | Resultados | Referencias |
|--------------------------|--------------------------|---|--|-------------|
| Nanofibras | Bagazo y cáscara de yuca | Aplicación de pretratamientos alcalino, quelante y blanqueo. Luego de hidrólisis ácida y un proceso desintegración ultrasónica. | Diámetro de Nanofibras: 2,3nm– 5,4nm. Alto índice de cristalinidad. Eliminaron lignina y hemicelulosa por el método de hidrólisis ácida. | [7] |
| | Cáscara de yuca | Aplicación de procesos fisicoquímicos (hidrólisis ácida, oxidación y desintegración ultrasónica) para la obtención de nanofibras y su comportamiento reológico. | Diámetro de nanofibras: 5nm-16nm. La aplicación de ultrasonido aumentó las propiedades viscoelásticas. Las nanofibras obtenidas por hidrólisis ácida presentaron un comportamiento de tixotropía. | [45] |
| Biopelículas comestibles | Cáscara de yuca | Aplicación de recubrimiento comestible a partir de almidón obtenido de la cáscara de yuca en aguacate con adición de extracto de hojas de laurel y sorbitol como plastificante. | El aguacate recubierto y almacenado a temperatura ambiente, tuvo una menor pérdida de peso, menor índice de acidez, mantuvo el color, en lugar del aguacate sin recubrimiento. | [46] |
| | Bagazo de yuca | Producción de pululano en fermentación en estado sólido, suplementado con fuentes de carbono como glucosa, sacarosa, fructosa, maltosa, manosa y xilosa con bagazo de yuca. | La adición de fuente de carbono, manosa mejoró el rendimiento. El peso molecular medio del pululano producido fue de $9,8 \times 10^6$ g/mol. El pH inicial influye en la morfología celular y, por tanto, en el rendimiento de pululano. | [47] |
| Biofertilizantes | Aguas residuales | En un cultivo de lechuga regaron 50% de efluentes y 50% agua normal | El cultivo regado con efluentes dio mejores características y sin contaminación de plagas | [48] |
| | Aguas residuales | Análisis de la planta de girasol regándola en dosis diferentes de aguas residuales de yuca | Luego de 60 días la dosis de 163cm ³ mejoró las características de la planta. | [49] |
| Biorrefinerías | Aguas residuales | Uso de cepas de <i>Clostridium</i> spp. con adición de levadura para la obtención de etanol y butanol. | Producción de etanol y butanol con un pH de 5,5. La levadura aumentó el crecimiento de bacterias, pero disminuyó la producción de etanol. | [49] |
| | Cáscara de yuca | Producción de bioetanol y biogás a partir de cáscaras de yucas pretratadas con álcali y pretratamiento combinado con enzimas. | El pretratamiento álcali-enzimas mejoró el rendimiento de metano un 56%. La producción etanol-metano tuvo un rendimiento energético de 1,2 a 1,3 veces en comparación con solo metano y de 3 a 4 veces en comparación con solo etanol. | [50] |
| | Cáscara de yuca | Producción de biogás a partir del almidón extraído de la cáscara de yuca mediante proceso de digestión anaerobia. | Mayor volumen de biogás obtenido: 3830mL a 37°C, 4,2g-VS (solidos volátiles) y 50% de cantidad de lodo, al mismo tiempo el CH ₄ g ⁻¹ -VS máximo fue de 850mL g ⁻¹ -VS a 37°C, 1,1g-VS y 50% de cantidad de lodos. | [51] |

| | | | | |
|---------------------|----------------------------------|---|--|------|
| Alimentación animal | Cáscara y puntas de raíz de yuca | Evaluación del efecto de la adición de 0, 5, 10, 15 y 20% de pollinaza al subproducto de yuca para el ensilado. | Mejores características nutricionales: 90% de residuos de yuca y 10% de pollinaza, permitiendo la fermentación. | [52] |
| | Cáscara de yuca | Efecto de las condiciones del proceso en la producción de un alimento para animales enriquecido a partir de cáscara de yuca por un hongo de pudrición blanca aislado localmente <i>Panus tigrinus</i> (M609RQY) | La combinación óptima de parámetros se encontró al 70% p/v de contenido de humedad, tamaño del inóculo del 6% p/v y pH de 5.30. Bajo estas condiciones, se obtuvo una pérdida de lignina del 50,62%. | [53] |
| Bioplásticos | Bagazo y cáscara de yuca | Caracterización de los residuos y los utilizaron como rellenos naturales de materiales termoplásticos, realizando una reducción de tamaño para obtener biopelículas similares al plástico. | La adición de relleno aumentó la capacidad de barrera a los rayos UV y la opacidad de las biopelículas. El bagazo aumentó un 260% el módulo elástico y un 128% la tracción máxima estrés de los compuestos | [54] |
| | Bagazo y cáscara de yuca | Comparación de las propiedades mecánicas del termoplástico a partir del almidón y residuos de yuca, utilizado como matriz y fructosa plastificante. | Las películas con bagazo mostraron mayor resistencia a la tracción y módulo a 581,68 y 10,78 MPa respectivamente, en comparación de las películas con cáscara. | [55] |

4.1. Biofertilizantes

Las investigaciones han tenido un resultado favorable al implementar estos residuos como biofertilizantes, productos orgánicos elaborados en su gran mayoría de restos vegetales con una carga alta de microorganismos y minerales que ayudan a nutrir y mejorar la calidad del suelo. Ogbo [56] utilizó *Aspergillus fumigatus* y *Aspergillus niger*, caracterizados y aislados de cáscaras de yuca en descomposición para convertir los desechos de la yuca mediante la técnica de fermentación semisólida (SSF) en biofertilizante de fosfato en una plantación de guandú (*Cajanus cajan*). Los microorganismos solubilizaron $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, AlPO_4 y FePO_4 . El medio para la SSF estaba compuesto por un 1% de almidón de yuca cruda, un 3% de excrementos de aves de corral como nutrientes y un 96% de cáscaras secas de yuca molidas (0,5–1,5 mm) como material portador, con lo cual ambos organismos aumentaron su biomasa. El biofertilizante producido usando *A. niger* mejoró el crecimiento del guandú en comparación con *A. fumigatus*.

4.2. Nanofibras

La obtención de fibras y nanofibras, compuestos producidos a partir de la celulosa, formadas principalmente de celulosa, lignina y hemicelulosa, ha cobrado interés en la realización de estudios mediante la utilización de cáscara y el bagazo de yuca por sus características lignocelulósicas. Pasquini *et al.* [57] utilizaron el bagazo de yuca para nanocristales de almidón y de celulosa empleando las condiciones de tratamiento de hidrólisis con ácido sulfúrico, los resultados mostraron que se obtuvieron con éxito bigotes de celulosa de alta relación de aspecto, igualmente investigaron la capacidad de refuerzo de las fibras de celulosa extraídas del bagazo de yuca utilizando caucho natural como matriz donde se observaron altas propiedades mecánicas a partir del análisis mecánico dinámico.

4.3. Biorrefinerías

Una de las problemáticas ambientales actualmente estudiadas es la extracción de petróleo para la obtención de combustibles fósiles, ya que ha traído consigo la contaminación de ambientes terrestres, acuáticos e incluso en el aire, emitiendo gases que afectan la atmósfera del planeta, además de que el petróleo es un recurso no renovable y su continua explotación acelera su agotamiento. Según la OPEP [58] se estima que al año se extraen aproximadamente 3.500 toneladas de petróleo y se prevé que este recurso se agote entre el 2050 y 2060. Por lo anterior, se han desarrollado investigaciones a cerca de las diferentes alternativas existentes para sustituir este recurso. Los residuos de yuca tienen un alto contenido de almidón, el cual es

una de las materias primas para la producción de biocombustibles, a causa de la degradación del almidón y la fermentación de azúcares [59]. Martínez *et al.* [60] sometieron a hidrólisis enzimática utilizando las enzimas alfa-amilasa y amiloglucosidasas, el bagazo de yuca para la producción de etanol en Brasil, seguido de fermentación y destilación, los resultados mostraron altos índices de almidón, aproximadamente 64% en promedio. El rendimiento medio de etanol que obtuvieron fue del 30% tras el tratamiento. Considerando el volumen estimado de bagazo de yuca en Brasil, es posible producir un promedio de 789 millones de metros cúbicos por bagazo, reemplazando alrededor del 24% del etanol de primera generación.

4.4. Biopelículas comestibles

Hoy en día se ha priorizado la necesidad de disminuir la contaminación ejercida por los productos comerciales compuestos por polímeros, los cuales no son biodegradables; por lo tanto, las biopelículas o recubrimientos han obtenido la aprobación para el almacenamiento y protección de alimentos debido a su capacidad biodegradable, el control en los gases de humedad y la migración de lípidos, además de influir positivamente en la adición de aditivos y nutrientes [61]. Por lo anterior, se han llevado a cabo estudios con el fin de utilizar los residuos industriales del almidón de yuca para la producción de biopelículas comestibles. Travalini *et al.* [29] utilizaron el bagazo de yuca para la producción de nanofibras de celulosa utilizadas para reforzar las biopelículas de almidón de yuca, en la cual se obtuvieron 2 tipos de películas moldeadas de almidón de yuca reforzadas con las nanofibras. Todas las películas reforzadas eran transparentes y tenían una buena distribución de las nanopartículas en su interior, mejorando la estabilidad en un 1,3% y concluyeron que las películas pueden ser aplicadas al envasado de alimentos debido a sus propiedades de barrera y tracción.

4.5. Alimentación animal

Actualmente, una de las aplicaciones con mayor desarrollo en el aprovechamiento de residuos del sector alimentario es su utilización como ingrediente en la elaboración de piensos, debido a la cantidad de nutrientes como proteínas, minerales y carbohidratos que poseen. El bagazo de yuca por su contenido de carbohidratos, es considerado una fuente de energía alternativa en la alimentación animal. Lima *et al.* [62] evaluaron la producción, la composición de la leche y los impactos de los costos de la dieta de bagazo de yuca al 10 y 15%, basado en la materia seca de la dieta total de vacas cruzadas (Holstein v. Cebú). La dieta con 15% de bagazo de yuca proporcionó un aumento del 13,2% en la producción comparado con el 10%. La proteína cruda, el único componente de la leche que cambió, aumentó linealmente con la inclusión de los niveles de bagazo de yuca. El tratamiento con bagazo de yuca al 15% generó un costo operativo más efectivo (42,8% más alto en comparación con el 10%) con mayor producción y punto de nivelación en el precio de la leche.

4.6. Posible Aprovechamiento de Aguas Residuales de la Producción de Almidón de Yuca

Las aguas residuales generadas en el procesamiento de almidón de yuca producen aguas residuales diluidas, siendo una fuente de contaminación y causante de problemas ambientales debido a su mala disposición [63]. Estas aguas contienen una serie de compuestos (discutidos en la sección 1.1.3.), que impulsan a los investigadores a conocer con mayor profundidad las propiedades y componentes específicos que se encuentren en ellas. En efecto, se han realizado estudios contribuyendo a la caracterización de aguas residuales de la producción de almidón de yuca para su adecuado procesamiento y reutilización. De Sena *et al.* [64] lograron identificar y cuantificar ácidos orgánicos presentes en efluentes de almidón agrario de yuca por medio de métodos de cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) de fase inversa y electroforesis capilar (CE). Los investigadores determinaron presencia de ácido acético a concentraciones de 398mg/L a 1336 mg/L, utilizado mayormente en la industria como reactivo, disolvente y en la producción de productos farmacéuticos; ácido propiónico de 57mg/L a 206 mg/L que inhibe el crecimiento de moho y de algunas bacterias; ácido láctico de 12mg/L a 126mg/L importante en la industria farmacéutica, química y alimentaria, y ácido butírico de 359mg/L a 1979mg/L que contribuye a la descomposición de los restos vegetales que presentes en el suelo. Asimismo, los procesos realizados en la extracción de almidón generan

componentes perjudiciales como cianuro, presentes en elevadas cantidades [65]. Saravanan *et al.* [66] llevaron a cabo un estudio donde utilizaron un consorcio de *Trichoderma harzianum* y *Trichoderma viride*, hongos capaces de degradar el cianuro, con el fin de eliminar este componente de los efluentes del almidón, además de usar bacterias nativas libres, inmovilizadas y en biopelículas, obteniendo este último método la mejor eficiencia de eliminación de cianuro en el tratamiento de aguas residuales de almidón yuca.

4.7. Aplicación de los Residuos como Biosorbentes en el Tratamiento de Aguas Residuales

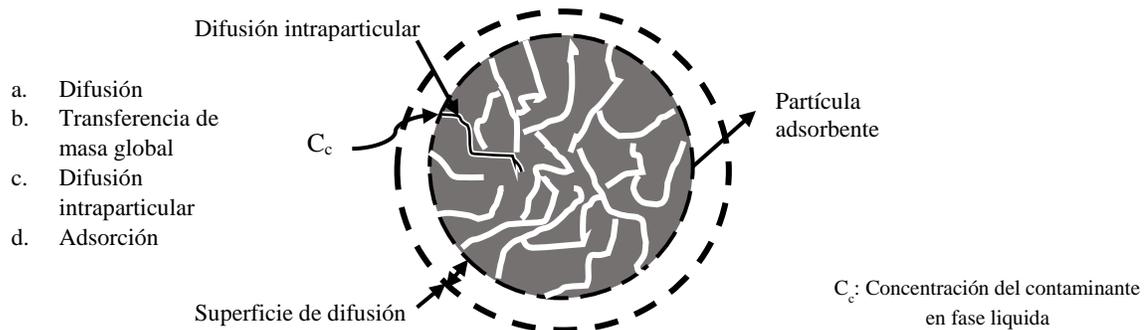
La principal causa de contaminación de las aguas son agentes externos como pesticidas, compuestos radiactivos, sustancias inorgánicas, productos industriales e hidrocarburos [67], y la concentración alta de metales pesados con una carga de toxicidad elevada en cuerpos de agua, producto del vertimiento de efluentes industriales [68].

4.7.1. Proceso y mecanismos de biosorción

La biosorción es un proceso fisicoquímico llevándose a cabo en ciertas biomasas capaces de concentrar y retener contaminantes [69], que implica una fase líquida (agua) donde se encuentran disueltas las sustancias que serán adsorbidas (metales pesados) y una fase sólida (biomasa) que será el material adsorbente de las sustancias [70] (figura 4). Para una mejor biosorción, debe haber una gran afinidad entre los grupos funcionales del contaminante y la biomasa, para que el contaminante sea atraído hacia el sólido y se enlace mediante de diferentes mecanismos de intercambio iónico, adsorción, precipitación y absorción [71].

Figura 4. Esquema del proceso de biosorción

Figure 4. Diagram of the biosorption process

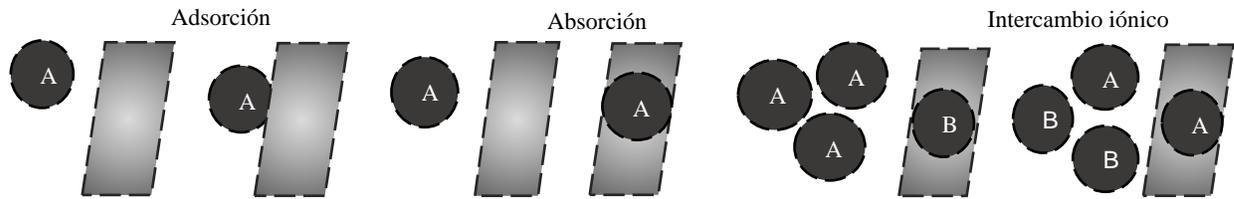


Fuente: Adaptado de [70]

Actualmente, los mecanismos de biosorción (figura 5) son utilizados para la remoción de contaminantes en aguas residuales, incluyendo otros métodos como la extracción a través de solventes, la reducción electrolítica y la filtración mediante membranas; sin embargo, algunos de estos mecanismos no se aplican en todos los procesos a causa de la baja eficiencia cuando hay presencia de distintos contaminantes en una misma solución y requieren un pretratamiento [72]. El mecanismo de adsorción ocurre cuando las moléculas de la sustancia están concentradas en la superficie del material adsorbente mientras que si las moléculas de la sustancia penetran la superficie del material se le conoce como mecanismo de absorción [73]. El término sorción regularmente es empleado cuando los mecanismos de absorción y adsorción se realizan de modo simultáneo [74]. Estos mecanismos pueden alterarse de forma positiva o negativa debido a las condiciones del proceso como pH, temperatura, tamaño de particular y/o la presencia de iones diferentes; de igual modo pueden afectar la atracción de iones metálicos [72]. El mecanismo de intercambio iónico se lleva a cabo cuando los iones de la sustancia se centran en la superficie de la biomasa adsorbente por consecuencia de la fuerza de atracción electrostática, considerado como uno de los mecanismos más eficientes para la remoción de iones metálicos en aguas residuales [75].

Figura 5: Mecanismos de biosorción

Figure 5. Biosorption mechanisms



Fuente: [72]

4.7.2. Remoción de metales pesados mediante residuos de almidón de yuca.

Debido a la gran contaminación de metales pesados y sustancias nocivas en recursos acuáticos, se han hecho estudios determinando la eficacia de los residuos industriales de la yuca para eliminar estos contaminantes (tabla 6). Considerando el aprovechamiento total de los residuos industriales de la yuca, Omotosho y Sangodoyin [76] analizaron el resultado de la producción y utilización de carbón activado a partir de residuos sólidos (cáscara de yuca) en efluentes del mismo procesamiento de yuca, obteniendo una descontaminación de Ni, Cd, Cr y CN del 100% en los diferentes niveles de activación empleados. Albis *et al.* [77] lograron remover el azul de metileno usando como adsorbente cáscara de yuca modificada con ácido fosfórico. Ellos obtuvieron un porcentaje de remoción del 99,89% a 99,98% debido al aumento de temperatura de 115°C a 125°C, considerando esta última como la temperatura óptima para la eliminación total del colorante. La cáscara de yuca modificada con ácidos resulta ser un buen absorbente para el azul de metileno. Igualmente, en otro estudio realizado por Albis *et al.* [78] utilizaron cáscara de yuca modificada con ácido oxálico comparándola con cáscara de yuca no modificada, obteniendo un 5% más de rendimiento la cáscara de yuca modificada con una remoción hasta del 95% del colorante a concentraciones de 125mg/L en solo 15 minutos.

Tabla 6. Estudios realizados en la remoción de metales empleando residuos de almidón de yuca

Table 6. Studies carried out on metal removal using cassava starch waste

| Metales | Residuo | Condiciones | Rendimiento | Referencias |
|---------|--------------------------|--|--|-------------|
| Cr | Cáscara y bagazo de yuca | Concentración del metal: 5 mg L ⁻¹ - 200 mg L ⁻¹ Tiempo: 9600s. pH: 5,5 | 90% de remoción del metal | [79] |
| | Cáscara de yuca | Método: bioelectroquímico-biosorción. Concentración del metal: 1.36 mg L ⁻¹ , 1,02 mg L ⁻¹ , 0,68 mg L ⁻¹ y 0,34 mg L ⁻¹ . pH: 1. Tiempo Max: 1200s. | 47% de remoción del metal | [80] |
| | Cáscara de yuca amarga | Concentración del metal: 100 mg L ⁻¹ Tiempo: 3600s. Temperatura: 30°C pH: 2 | 70% de remoción del metal al aumentar la cantidad de adsorbente. | [81] |
| Cd | Varios residuos de yuca | Modificación de residuos con H ₂ O ₂ , H ₂ SO ₄ y NaOH. Tiempo: 2400s. pH: 5. Temperatura: 25°C. Concentración creciente del metal: 5, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 y 200 mg L ⁻¹ | Máxima capacidad de adsorción: 43,97 mg g ⁻¹ M. H ₂ O ₂ | [82] |
| | Varios residuos de yuca | Modificación de los residuos con H ₂ O ₂ , H ₂ SO ₄ y NaOH. Tiempo: 2400s. pH: 5. Temperatura: 25°C. Concentración creciente del metal: 5, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 y 200 mg L ⁻¹ | Máxima capacidad de adsorción: 19,54 mg g ⁻¹ M. NaOH | [82] |
| | Cáscara de yuca | Tamaño de partícula de la cáscara: 63µm - 75µm. pH: 5 | Capacidad de adsorción: 3 mg g ⁻¹ | [83] |

| | | | | |
|----|----------------------------|--|--|------|
| Zn | Cáscara de yuca | Modificación de la cáscara con H ₂ SO ₄ , HCl, HNO ₃ y KBr. Concentración del metal: 30 mg L ⁻¹ y 50 mg L ⁻¹ . Tiempo: 1800s. pH: 5 | 99% de metal removido. Capacidades de adsorción: 3.042 mg g ⁻¹ y 4.904 mg g ⁻¹ | [84] |
| | Cáscara y bagazo de yuca | Material adsorbente: cáscara, bagazo y cáscara + bagazo. pH: 5,5. Concentración creciente del metal: 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 y 160 mg L ⁻¹ | Capacidad Máxima de adsorción: 5,965 mg g ⁻¹ de la cáscara, 8,228 mg g ⁻¹ del bagazo y 7,481 mg g ⁻¹ de la cáscara + bagazo | [9] |
| Hg | Varios residuos de la yuca | Concentración inicial del metal: 400 mg L ⁻¹ pH: 4,75. Tiempo: 7200s. | 86,6% del metal removido. Capacidad máxima de remoción: 0,54 mg g ⁻¹ | [85] |
| | Cáscara de yuca | Cáscaras de yuca (CY) y limón (CL) modificadas con ácido cítrico. Tamaño de partícula: 355 - 500µm CY y 500-1000µm CL. Temperatura: 25°C. pH: 6 de Hg. Tiempo: 600s a 19800s. | Capacidad máxima de adsorción de las cáscaras de yuca modificadas: 72,98%, Cáscaras de limón: 49,83%. | [86] |
| Cu | Cáscara y bagazo de yuca | Adsorbentes: cáscara, bagazo y cáscara + bagazo. pH: 5,5. Concentración creciente del metal: 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 y 160 mg L ⁻¹ | Capacidad máxima de adsorción: 3,608 mg g ⁻¹ cáscara, 8,112 mg g ⁻¹ bagazo y 10,007 mg g ⁻¹ cáscara + bagazo | [9] |
| | Cáscara de yuca | Temperatura: 30°C, 45°C y 60°C | Capacidad máxima de adsorción: 41,77 mg g ⁻¹ | [87] |
| | Cáscara de yuca | Tiempo: 1200s a 7200s. pH: 8 | Aumentó de un 26% a 72% de remoción del metal al aumentar la dosis del adsorbente. Capacidad de adsorción: 8,00 mg g ⁻¹ | [88] |
| Pb | Cáscara de yuca | Tamaño de partícula: 500-1000 µm pH: 6. Concentración inicial: 100 mg L ⁻¹ . Temperatura: 25°C. Tiempo: 7200s. | 70% del metal removido. Capacidad de adsorción: 52.34 mg g ⁻¹ | [89] |
| | Varios residuos de yuca | Modificación de los residuos con H ₂ O ₂ , H ₂ SO ₄ y NaOH. Tiempo: 2400s. pH: 5. Temperatura: 25°C. Concentración creciente del metal: 5, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 y 200 mg L ⁻¹ | Máxima capacidad de adsorción 42,46 mg g ⁻¹ M. NaOH | [82] |
| | Cáscara de yuca | Tiempo:1200s a 7200s. pH: 8 | Aumentó del 12 al 73% la remoción del metal al aumentar la dosis del adsorbente. Capacidad de adsorción: 5.80 mg g ⁻¹ | [88] |

4.7.3. Coagulantes y floculantes.

La coagulación y la floculación son tratamientos utilizados para eliminar los sólidos en suspensión contenidos en cuerpo de aguas contaminadas. Dentro de los agentes coagulantes-floculantes más utilizados están el sulfato de aluminio, el sulfato ferroso, el sulfato y el cloruro férrico; sin embargo, la utilización de compuestos metálicos es riesgosa para la salud. El sulfato de aluminio se relaciona con la enfermedad del Alzheimer y las concentraciones altas de aluminio provocan intoxicaciones en el agua [90]. Por esto, se han estudiado la producción de biocoagulantes eliminando el riesgo a la salud para el tratamiento de aguas residuales (tabla 7). El proceso de coagulación-floculación se produce por la desestabilización de las partículas coloides suspendidas cargadas electrostáticamente, responsables de la turbidez y coloración de las aguas [91]. La coagulación incrementa la unión de las partículas pequeñas, formando partículas mayores, para su precipitación. La floculación es el complemento de la coagulación que permite formar glóbulos como resultado de la adherencia entre las partículas coaguladas [92]. Para estos procesos, se presentan varios mecanismos de coagulación-floculación en la remoción de contaminantes por parte de los residuos del almidón de yuca como las cáscaras ya que contienen abundante cantidad de almidón, carboxilos, grupos hidroxilo y amino, que favorecen a su utilización como coagulantes y coagulantes auxiliares [93]. La neutralización de cargas por adsorción emplea la interacción entre un coagulante y la carga de un contaminante. En este mecanismo, las partículas coloides atraen los iones positivos que se encuentran en la solución y adhiriéndose forman la primera capa del coloide. El atrapamiento de partículas dentro de un

precipitado es un mecanismo que implica la formación de flóculos (floc), el cual se da cuando se adiciona la cantidad suficiente de coagulantes, desestabilizando las partículas para ser atraídas entre sí y formar el floc. La adsorción y formación de puente es un mecanismo que utilizando polímeros absorben las partículas coloidales en las extremidades de estas, dejando espacio para la adsorción de otras partículas, por esta razón los polímeros forman puentes para su adsorción [94].

Tabla 7. Estudios realizados en la eliminación de contaminantes empleando cáscara de yuca

Table 7. Studies carried out on the elimination of pollutants using cassava peel

| Estudio | Resultado | referencia |
|---|---|------------|
| Efecto sinérgico del almidón de cáscara de yuca modificado con alumbre como coagulantes duales en la eliminación de sólidos suspendidos totales y <i>Escherichia coli</i> en agua de represa. | El almidón modificado eliminó el 100% de <i>E. coli</i> en el agua cruda. Reducción de dosis de alumbre con TSS (sólidos suspendidos totales) y <i>E. coli</i> superiores: 50% combinación alumbre-almidón | [8] |
| Desempeño del almidón derivado de los desechos de la cáscara de la yuca como coagulante primario y coagulante auxiliar utilizando la combinación de alumbre y cáscara de yuca. | Combinación alumbre-cáscara tiene un mayor efecto logrando hasta el 90.48% de remoción de sólidos suspendidos totales en condiciones de trabajo optimizadas (pH 9, 7.5 mg / L: 100 mg / L de alumbre: dosis de cáscara) | [95] |
| Caracterización de la cáscara de la yuca como material coagulante y exploración del proceso de optimización utilizando la cáscara de la yuca a través de la coagulación y la floculación. | FTIR (espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier) reveló que los aminoácidos de la cáscara tienen capacidades significativas para eliminar contaminantes. La espectrometría XRF (análizador de fluorescencia de rayos X) indicó que las cáscaras que contienen Fe ₂ O ₃ y Al ₂ O ₃ podrían contribuir a su capacidad de coagulación. Eliminación de turbidez: 90%. | [93] |
| Desempeño del almidón de cáscara de yuca (CPS) extraído de los desechos de la cáscara de yuca en combinación con alumbre como coagulante dual para la remoción de turbidez en agua cruda de represa | El uso de alumbre-cáscara de yuca como coagulante dual no solo mejoró la remoción de turbidez con un logro máximo de hasta 91.47%. | [96] |
| Caracterización química y morfológica de la biomasa de las cáscaras de yuca como coagulante de turbidez, metales pesados y la eliminación de microbios. Por medio de la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). | La cáscara contiene gran cantidad de grupos hidroxilos y carboxilos, restos de óxido de hierro y aluminio que podrían contribuir a la eficiencia de la biomasa como coagulante debido a la capacidad de generar interacciones tipo puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo y carboxilo de la cáscara con los metales. | [97] |

5. CONCLUSIONES

La industria de la yuca posee una alta producción a nivel mundial, generando una gran cantidad de residuos que, de acuerdo con las investigaciones revisadas, son susceptibles de ser aprovechadas, gracias a su composición química (proteínas, almidón y demás nutrientes) a través de procesos eficaces y amigables con el medio ambiente. El bagazo puede ser utilizado en alimento de rumiantes, producción de textiles, obtención de bioplásticos y nanofibras, debido a la proporción de almidón que contiene. Asimismo, la cáscara, por su contenido lignocelulósico presenta potencial para la producción de etanol, papel, entre otras aplicaciones. Su utilización como un biosorbente económico reemplazando a los absorbentes convencionales ha cobrado mucho interés en los últimos años debido a la producción de carbón activado que genera alta eficiencia en la remoción de metales pesados y colorantes. La cáscara de yuca aplicada como coagulante primario no ejerce un rendimiento eficaz en el tratamiento de aguas contaminadas, pero si la cáscara de yuca es modificada y utilizada como coagulante auxiliar, aumenta su capacidad de remoción generando en promedio un 90% de remoción de contaminantes. Se hace necesario realizar investigaciones con el fin de aumentar la capacidad de coagulación de la cáscara de yuca y disminuir el uso de coagulantes convencionales que ocasionan de manera afectan negativamente la salud humana, además de incorporar residuos como el bagazo de yuca seco por su significativo contenido de almidón. Igualmente, se requieren estudios para el mejoramiento de la calidad de los efluentes del almidón de yuca que pueden ser tratados a partir de los mismos residuos generados. Un ejemplo es el bagazo y la cáscara, aplicando procesos eficientes

para la remoción de los componentes tóxicos presentes en ellos y la modificación del pH adecuado para su utilización como biofertilizantes aprovechando las sustancias benéficas que aporten al nutrimento del suelo y la generación de productos con valor agregado en la industria.

REFERENCIAS

- [1] Cartay Rafael, “Difusión y comercio de la yuca (Manihot Esculenta) en Venezuela y en el mundo,” *Agroaliment.*, vol. 9, no. 18, pp. 14–23, 2004.
- [2] J. Aristizábal, T. Sánchez Autoras, and D. M. Lorío, *Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca*, Boletín de. 2007.
- [3] M. Drapal, T. M. Ovalle Rivera, L. A. Becerra Lopez-Lavalle, and P. D. Fraser, “Exploring the chemotypes underlying important agronomic and consumer traits in cassava (Manihot esculenta crantz),” *J. Plant Physiol.*, vol. 251, p. 153206, Aug. 2020.
- [4] A. M. Loboguerrero, B. Campbell, P. Cooper, J. Hansen, T. Rosenstock, and E. Wollenberg, “Food and Earth Systems: Priorities for Climate Change Adaptation and Mitigation for Agriculture and Food Systems,” *Sustainability*, vol. 11, no. 5, p. 1372, Mar. 2019.
- [5] Y. A. Vargas Corredor and L. I. Pérez Pérez, “Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente,” *Rev. Fac. Ciencias Básicas*, vol. 14, no. 1, pp. 59–72, Apr. 2018.
- [6] K. Cury R, Y. Aguas M, A. Martinez M, R. Olivero V, and L. Chams Ch, “Residuos agroindustriales su impacto, manejo y aprovechamiento,” *Rev. Colomb. Cienc. Anim. - RECIA*, vol. 9, no. S, p. 122, May 2017.
- [7] R. Wicaksono, K. Syamsu, I. Yuliasih, and M. Nasir, “Cellulose Nanofibers from Cassava Bagasse: Characterization and Application on Tapioca-Film,” *Int. Institue Sci. Technol. Educ.*, vol. 3, no. 13, pp. 79–87, 2013.
- [8] S. M. Asharuddin, N. Othman, N. S. M. Zin, H. A. Tajarudin, and M. F. Md Din, “Flocculation and antibacterial performance of dual coagulant system of modified cassava peel starch and alum,” *J. Water Process Eng.*, vol. 31, p. 100888, Oct. 2019.
- [9] D. Schwantes, A. C. Gonçalves, A. Junior Miola, G. F. Coelho, M. G. Dos Santos, and E. A. V. Leismann, “Removal of Cu (II) and Zn (II) from water with natural adsorbents from cassava agroindustry residues,” *Acta Sci. - Technol.*, vol. 37, no. 3, pp. 409–417, Jul. 2015.
- [10] B. Rivera-Hernández, L. A. Aceves-Navarro, J. F. Juárez-López, D. J. Palma-López, R. González-Mancillas, and V. González-Jiménez, “Zonificación agroecológica y estimación del rendimiento potencial del cultivo de la yuca (Manihot esculenta Crantz) en el estado de Tabasco, México,” vol. 16, no. 1, pp. 29–48, 2012.
- [11] O. E. Dudu, L. Li, A. B. Oyedeji, S. A. Oyeyinka, and Y. Ma, “Structural and functional characteristics of optimised dry-heat-moisture treated cassava flour and starch,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 133, pp. 1219–1227, Jul. 2019.
- [12] M. A. Rojas Rivera, “Estudio de las características fisicoquímicas de la yuca (manihot esculenta crantz) y sus efectos en la calidad de hojuelas fritas para su procesamiento en la empresa pronal s.a.,” Universidad tecnológica de pereira, Pereira, 2012.
- [13] FAO, “Save and Grow: Cassava - 7. Value addition,” *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 2016. .
- [14] G. Chandrika, U. Svanberg, and E. R. Jansz, “In vitro accessibility of β -carotene from cooked Sri Lankan green leafy vegetables and their estimated contribution to vitamin A requirement,” *J. Sci. Food Agric. J Sci Food Agric*, vol. 86, pp. 54–61, 2006.
- [15] IITA Image Library / photo on flickr, “Cassava plant,” *flickr.com*. [Online]. Available: <https://visualhunt.com/f4/photo/5125393667/748eee98fc/>. [Accessed: 17-Sep-2020].
- [16] C. García-Mogollón, J. Salcedo-Mendoza, and A. Alvis-Bermudez, “Condiciones óptimas de la etapa de lixiviación en la extracción de almidón de yuca,” *Biotecnol. en el Sect. Agropecu. y*

- Agroindustrial*, vol. 16, no. 1, pp. 62–67, 2018.
- [17] H. Harijono, M. Hindun Pulungan, J. Muchlisiyah, E. Triyas Tanti, and T. Estiasih, “Chemical Characteristics of Biscuit Substituted by Modified Cassava Product (Mocap) Flour from High Cyanide Variety of Cassava,” *Res. J. Life Sci.*, vol. 4, no. 2, pp. 97–105, Apr. 2017.
- [18] A. H. M. M. Rahman and M. Akter, “Euphorbiaceae (Spurge) Family of Rajshahi, Bangladesh,” *Res. Plant Sci.*, vol. 1, no. 3, pp. 74–80, 2013.
- [19] L. Duque, “Cassava Drought Tolerance Mechanisms Re-Visited: Evaluation Of Drought Tolerance In Contrasting Cassava Genotypes Under Water Stressed Environments,” *undefined*, 2012.
- [20] CIAT, “Corpoica-Verónica variedad de yuca para uso industrial,” 2004.
- [21] A. F. Silva, L. M. De Santana, C. R. R. S. França, C. A. D. S. Magalhães, C. R. De Araújo, and S. G. De Azevedo, “Growth and production of different cassava varieties in an agroecological system,” *Rev. Bras. Eng. Agric. e Ambient.*, vol. 13, no. 1, pp. 33–38, 2009.
- [22] A. Dixon *et al.*, “TME/419: new cassava variety series,” 2005.
- [23] FAO, “Perspectivas alimentarias Resúmenes de mercado,” 2017.
- [24] B. Ospina, *La Yuca en el Tercer Milenio: Sistemas Modernos de Producción, Procesamiento ... -*, vol. 327. publicación CIAT, 2002.
- [25] Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura (FAO), “FAOSTAT,” *Datos: producción-cantidad-yuca*. [Online]. Available: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>. [Accessed: 30-Aug-2020].
- [26] C. Chaves-López, A. Serio, C. D. Grande-Tovar, R. Cuervo-Mulet, J. Delgado-Ospina, and A. Paparella, “Traditional Fermented Foods and Beverages from a Microbiological and Nutritional Perspective: The Colombian Heritage,” *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, vol. 13, no. 5, pp. 1031–1048, Sep. 2014.
- [27] A. C. M. de Sena Aquino, J. M. Pereira, L. B. Watanabe, and E. R. Amante, “Standardisation of the sour cassava starch reduces the processing time by fermentation water monitoring,” *Int. J. Food Sci. Technol.*, vol. 48, no. 9, pp. 1892–1898, Sep. 2013.
- [28] L. N. Chiquiza-Montaño, O. I. Montoya, C. Restrepo, and F. Orozco-Sánchez, “Estudio de la microbiota del proceso de producción de almidón agrio de yuca,” in *Informacion Tecnologica*, 2016, vol. 27, no. 5, pp. 3–14.
- [29] A. P. Travalini, B. Lamsal, W. L. E. Magalhães, and I. M. Demiate, “Cassava starch films reinforced with lignocellulose nanofibers from cassava bagasse,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 139, pp. 1151–1161, Oct. 2019.
- [30] S. Aldana and F. Quintero, “Physicochemical characterization of two cassava (*Manihot esculenta* Crantz) starches and flours,” May 2013.
- [31] IMARC group, “Cassava Starch Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2019-2024,” Feb. 2019.
- [32] P. Torres, A. Pérez, L. F. Marmolejo, J. A. Ordóñez, and R. E. García, “Una mirada a la agroindustria de extracción de almidón de yuca, desde la estandarización de procesos,” *Rev. EIA*, vol. 7, no. 14, p. 23, Nov. 2013.
- [33] T. A. Shittu, B. A. Alimi, B. Wahab, L. O. Sanni, and A. B. Abass, “Cassava Flour and Starch: Processing Technology and Utilization,” in *Tropical Roots and Tubers: Production, Processing and Technology*, Wiley Blackwell, 2016, pp. 415–450.
- [34] R. Howeler, “Cassava in Asia: Trends in Cassava Production, Processing and Marketing,” in *Partnership in modern science to develop a strong cassava commercial sector in Africa and appropriate varieties*, 2020.
- [35] rtb_cgjar / photo on flickr, “Cassava peels, bagaze, wastewater in Benin, photo by D. Dufour,” *flickr.com*. [Online]. Available: <https://visualhunt.com/f4/photo/16985016787/2aaed1f6fa/>. [Accessed: 17-Sep-2020].
- [36] L. de F. Araújo, R. A. A. R. Felix, E. M. Aguiar, and R. R. P. Coelho, “Evaluation of the Potentiality of Maniocresidues (*Manihot esculenta* Crantz) in animal feeding,” *Int. J. Adv. Eng. Res. Sci.*, vol. 7,

- no. 2, Feb. 2020.
- [37] F. P. Martín Gómez, J. Orlando Montoya Gómez, and J. Luis Rubiano Fernández, “Evaluación de Alternativas de Pelado Industrial de Yuca,” in *IV CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA MECATRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN - CIIMA*, 2015.
- [38] A. Albis, J. Martínez, M. Severiche, and J. García, “Remoción de plomo de soluciones acuosas usando cáscara de yuca modificada con ácido cítrico,” Dec. 2016.
- [39] Faezah O Nur, Aishah H. Siti, and Kalsom Y Umi, “Comparative evaluation of organic and inorganic fertilizers on total phenolic, total flavonoid, antioxidant activity and cyanogenic glycosides in cassava (*Manihot esculenta*),” *African J. Biotechnol.*, vol. 12, no. 18, pp. 2414–2421, 2016.
- [40] E. Rivadeneyra-Domínguez, J. Francisco Rodríguez-Landa, and D. R. Salas-Montero, “¿Neuropatía atáxica tropical y Konzo asociadas al consumo excesivo de yuca?,” *Arch Neurocienc.*, vol. 17, no. 1, p. 52, 2012.
- [41] L. N. Chiquiza-Montaño, O. I. Montoya, C. Restrepo, and F. Orozco-Sánchez, “Estudio de la Microbiota del Proceso de Producción de Almidón Agrio de Yuca Microbiota Study of the Production Process of Sour Cassava Starch,” *Inf. Tecnológica*, vol. 27, no. 5, pp. 3–14, 2016.
- [42] S. R. P. Avancini *et al.*, “Cassava starch fermentation wastewater: Characterization and preliminary toxicological studies,” *Food Chem. Toxicol.*, vol. 45, no. 11, pp. 2273–2278, Nov. 2007.
- [43] E. Cabrera, V. León, A. Montano, and D. Dopico, “Caracterización de residuos agroindustriales con vistas a su aprovechamiento,” *Cent. Azucar*, vol. 43, no. 4, 2016.
- [44] C. N. Anyanwu, C. N. Ibeto, S. L. Ezeoha, and N. J. Ogbuagu, “Sustainability of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) as industrial feedstock, energy and food crop in Nigeria,” *Renew. Energy*, vol. 81, pp. 745–752, Sep. 2015.
- [45] A. Czaikoski, R. L. da Cunha, and F. C. Menegalli, “Rheological behavior of cellulose nanofibers from cassava peel obtained by combination of chemical and physical processes,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 248, p. 116744, Nov. 2020.
- [46] M. N. Handayani, S. Karlina, Y. Sugiarti, and D. Cakrawati, “Application of edible coating from cassava peel - Bay leaf on avocado,” in *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1013, no. 1, p. 12168.
- [47] K. R. Sugumaran, P. Jothi, and V. Ponnusami, “Bioconversion of industrial solid waste - Cassava bagasse for pullulan production in solid state fermentation,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 99, pp. 22–30, Jan. 2014.
- [48] B. Katriny Silva and R. Feellini de Sá, “Uso da manipueira de mandioca (*Manihot esculenta*) como biofertilizante e bioinseticida na cultura da alface (*Lactuca sativa*) Use manipueira of cassava as biofertilizer and bioinsecticide in lettuce crop,” *Cad. Agroecol.*, vol. 13, no. 1, 2018.
- [49] M. S. M. Dantas, M. M. Rolim, A. de S. Duarte, E. M. R. Pedrosa, J. N. Tabosa, and D. da C. Dantas, “Growth of sunflower fertilized with liquid waste from processing of cassava/ Crescimento do girassol adubado com residuo liquido do processamento de mandioca,” *Rev. Bras. Eng. Agric. e Ambient.*, vol. 19, no. 4, pp. 350–358, Apr. 2015.
- [50] A. P. Moshi *et al.*, “Combined production of bioethanol and biogas from peels of wild cassava *Manihot glaziovii*,” *Chem. Eng. J.*, vol. 279, pp. 297–306, Nov. 2015.
- [51] A. M. Alrefai, R. Alrefai, K. Y. Benyounis, and J. Stokes, “Impact of Starch from Cassava Peel on Biogas Produced through the Anaerobic Digestion Process,” *Energies*, vol. 13, no. 11, p. 2713, May 2020.
- [52] A. Jose, R. Augusto, and P. Matthew, “Efecto de la Adición de Pollinaza sobre las Características Nutricionales y Fermentativas del Ensilado de Subproductos Agroindustriales de Yuca (*Manihot esculenta*),” *Agro. Costarric.*, vol. 39, no. 1, 2015.
- [53] P. Jamal, R. I. D. Tijani, M. Z. Alam, and M. E. S. Mirghani, “Effect of operational parameters on solid state fermentation of cassava peel to an enriched animal feed,” *J. Appl. Sci.*, vol. 12, no. 11, pp. 1166–1170, 2012.
- [54] F. Versino, O. V. López, and M. A. García, “Sustainable use of cassava (*Manihot esculenta*) roots

- as raw material for biocomposites development,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 65, pp. 79–89, Mar. 2015.
- [55] A. Edhirej, S. M. Sapuan, M. Jawaid, N. I. Zahari, and M. L. Sanyang, “Effect of cassava peel and cassava bagasse natural fillers on mechanical properties of thermoplastic cassava starch: Comparative study,” in *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1901, no. 1, p. 100010.
- [56] F. C. Ogbo, “Conversion of cassava wastes for biofertilizer production using phosphate solubilizing fungi,” *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 11, pp. 4120–4124, Jun. 2010.
- [57] D. Pasquini, E. de M. Teixeira, A. A. da S. Curvelo, M. N. Belgacem, and A. Dufresne, “Extraction of cellulose whiskers from cassava bagasse and their applications as reinforcing agent in natural rubber,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 32, no. 3, pp. 486–490, Nov. 2010.
- [58] Organización de Países Exportadores de Petróleo, “OPEC Share of World Crude Oil Reserves,” *OPEP*, 2019. .
- [59] S. Sivamani, A. P. Chandrasekaran, M. Balajii, M. Shanmugaprakash, A. Hosseini-Bandegharai, and R. Baskar, “Evaluation of the potential of cassava-based residues for biofuels production,” *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, vol. 17, no. 3. Springer Netherlands, pp. 553–570, 01-Sep-2018.
- [60] D. Martinez, A. Feiden, R. Bariccatti, and K. de Freitas Zara, “Ethanol Production from Waste of Cassava Processing,” *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 11, p. 2158, Nov. 2018.
- [61] T. Cardoso, L. A. Esmerino, B. C. Bolanho, I. M. Demiate, and E. D. G. Danesi, “Technological viability of biobased films formulated with cassava by-product and *Spirulina platensis*,” *J. Food Process Eng.*, vol. 42, no. 5, p. e13136, Aug. 2019.
- [62] L. P. Lima, C. M. Veloso, F. F. da Silva, A. J. V. Pires, F. A. Teixeira, and P. V. N. Nascimento, “Milk production and economic assessment of cassava bagasse in the feed of dairy cows,” *Acta Sci. - Anim. Sci.*, vol. 37, no. 3, pp. 307–313, Aug. 2015.
- [63] D. A. Okunade and K. O. Adekalu, “Physico-chemical analysis of contaminated water resources due to cassava wastewater effluent disposal Rainwater Harvesting to Mitigate Dry Spell in Small Holder Farming Systems View project Design and Implementation of a Smart Irrigation System. View project,” *Eur. Int. J. Sci. Technol.*, vol. 2, no. 6, pp. 75–84, 2013.
- [64] A. C. M. De Sena, M. S. Azevedo, D. H. B. Ribeiro, A. C. O. Costa, and E. R. Amante, “Validation of HPLC and CE methods for determination of organic acids in sour cassava starch wastewater,” *Food Chem.*, vol. 172, pp. 725–730, Apr. 2015.
- [65] D. A. Okunade, “Physico-chemical analysis of contaminated water resources due to cassava wastewater effluent disposal,” *Eur. Int. J. Sci. Technol.*, vol. 2, no. 6, pp. 75–84, 2013.
- [66] S. Saravanan, A. Kumari, and A. Sriram, “Comparative study on treatment of cassava wastewater using free, immobilized and biofilm of *Trichoderma harzianum*-*Trichoderma viride* consortium,” *Desalin. Water Treat.*, vol. 156, pp. 370–377, 2019.
- [67] A. Bhatnagar, M. Sillanpää, and A. Witek-Krowiak, “Agricultural waste peels as versatile biomass for water purification - A review,” *Chem. Eng. J.*, vol. 270, pp. 244–271, Jun. 2015.
- [68] A. Babarinde *et al.*, “Equilibrium Sorption of Cd(II), Pd(II) and Zn(II) from Solution onto Cassava (*Manihot esculenta*) Leaf: Kinetics, Isotherms, and Thermodynamics,” *Pacific J. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 1, 2013.
- [69] G. Hincapié Mejía, S. Cardona Cuervo, and L. A. Ríos, “Absorption thermodynamic study of azoic dye with by means of a lignocellulosic waste in aqueous medium,” *Ing. y Desarro.*, vol. 36, no. 1, pp. 97–118, Jan. 2018.
- [70] C. Tejada Tovar, A. Villabona Ortiz, and E. Ruiz Paternina, “Remoción de Pb (II), Ni (II) y Cr (VI) en soluciones acuosas usando matrices modificadas químicamente,” *Prospectiva*, vol. 12, no. 2, p. 7, Nov. 2014.
- [71] S. Luikham, S. Malve, P. Gawali, and S. Ghosh, “a novel strategy towards agro-waste mediated dye biosorption for water treatment,” *Ghosh al. World J. Pharm. Res. World J. Pharm. Res. SJIF Impact Factor*, vol. 7, pp. 197–208, 2018.
- [72] H. C. Morales, B. Villavicencio, C. Bejerano, A. Leyva Mormul, and S. Fajardo Martínez,

- “Remoción de metales pesados en soluciones sintéticas empleando Zeolita natural Cubana,” in *XI Convención cubana de ciencias de la tierra, Geociencias*, 2015.
- [73] S. Papiro *et al.*, “Heavy Metal Removal from Wastewaters by Biosorption: Mechanisms and Modeling,” in *Sustainable Heavy Metal Remediation*, Springer, Cham, 2017, pp. 25–63.
- [74] S. Manna, D. Roy, B. Adhikari, S. Thomas, and P. Das, “Biomass for water defluoridation and current understanding on biosorption mechanisms: A review,” *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 37, no. 5, pp. 1560–1572, Sep. 2018.
- [75] G. E. Acosta Niño, C. A. Coy Barrera, A. Bourdón García, and E. Cuervo Lumbaqué, “La Electrocoagulación como un Tratamiento Eficiente para la Remoción de Metales Pesados Presentes en Aguas Residuales,” *Rev. Fac. Ciencias Básicas*, vol. 9, no. 2, p. 306, Dec. 2013.
- [76] O. A. Omotosho and A. Y. Sangodoyin, “Production and utilization of cassava peel activated carbon in treatment of effluent from cassava processing industry,” *Water Pract. Technol.*, vol. 8, no. 2, pp. 215–224, Jun. 2013.
- [77] A. R. Albis Arrieta, A. J. López Rangel, and M. C. Romero Castilla, “Remoción de azul de metileno de soluciones acuosas utilizando cáscara de yuca (Manihot esculenta) modificada con ácido fosfórico,” *Prospectiva*, vol. 15, no. 2, pp. 60–73, Jul. 2017.
- [78] A. Albis-Arrieta, H. Llanos-Reales, J. Galeano-Gil, and D. García-Moreno, “Adsorción de azul de metileno utilizando cáscara de yuca (Manihot esculenta) modificada químicamente con ácido oxálico,” *Rev. ION*, vol. 31, no. 2, pp. 99–110, 2018.
- [79] M. C. Hawerth, J. Antonio Gonzalez Da Silva, L. C. Gutkoski, E. G. Arenhardt, A. Costa De Oliveira, and F. I. Félix De Carvalho, “Removal of Cr (III) from contaminated water using industrial waste of the cassava as natural adsorbents,” *African J. Agric. Res.*, vol. 10, no. 47, pp. 4295–4305, 2015.
- [80] R. A. Rachman, U. Tri, I. Martia, A. B. Pambudi, S. Jovita, and F. Kurniawan, “cassava peel biosorbent (manihot utilissima) for removal chromium (vi) with microbial fuel cell system of combination techniques,” *Proceeding Int. Conf. Green Technol.*, vol. 8, no. 1, pp. 235–239, 2017.
- [81] A. Albis, L. V. Cajar, and M. I. Domínguez, “Análisis cinético de la Adsorción de Cr (VI) en soluciones acuosas a concentraciones de 10-20 mg/L con el uso de cáscara de yuca amarga (Manihot esculenta),” vol. 13, pp. 64–71, 2015.
- [82] D. Schwantes *et al.*, “Chemical modifications of cassava peel as adsorbent material for metals ions from wastewater,” *J. Chem.*, vol. 2016, 2016.
- [83] A. D. O. Jorgetto, A. C. P. da-Silva, B. C. R. C. Barbosa, M. A. Utrera, and G. R. de-Castro, “Cassava root husks as a sorbent material for the uptake and pre-concentration of cadmium(II) from aqueous media,” *Orbital Electron. J. Chem.*, pp. 206–212, 2013.
- [84] A. Ricardo, A. Arrieta, J. Fonseca, A. Albis, and A. R. Montenegro, “Evaluation of zinc adsorption using cassava peels (Manihot esculenta) modified with citric acid,” *Contemp. Eng. Sci.*, vol. 11, no. 72, pp. 3575–3585, 2018.
- [85] A. R. Albis Arrieta, S. A. Arzuza Orellano, and A. M. Mosquera Palacio, “Remoción de Mercurio (II) en solución acuosa usando residuo industrial de yuca (Manihot esculenta),” *Prospectiva*, vol. 17, no. 2, 2019.
- [86] C. Tejada Tovar, Á. Villabona Ortiz, L. Ercilia Garcés Jaraba, C. Tejada Tovar, Á. Villabona Ortiz, and L. E. Garcés Jaraba, “Kinetics of Adsorption in Mercury Removal Using Cassava (Manihot esculenta) and Lemon (Citrus limonum) Wastes Modified with Citric Acid,” *Ing. Unv.*, vol. 19, no. 2, pp. 283–298, 2015.
- [87] A. N. Kosasih, J. Febrianto, J. Sunarso, Y. H. Ju, N. Indraswati, and S. Ismadji, “Sequestering of Cu(II) from aqueous solution using cassava peel (Manihot esculenta),” *J. Hazard. Mater.*, pp. 366–374, 2010.
- [88] H. I. Owamah, “Biosorptive removal of Pb(II) and Cu(II) from wastewater using activated carbon from cassava peels,” *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 16, no. 2, pp. 347–358, Sep. 2014.
- [89] C. N. Tejada, Z. Montiel, and D. Acevedo, “Aprovechamiento de Cáscaras de Yuca y Ñame para el

- Tratamiento de Aguas Residuales Contaminadas con Pb(II),” *Inf. Tecnol.*, vol. 27, no. 1, pp. 9–20, 2016.
- [90] D. Choque, J. Choque, A. Solano, and B. Ramos, “Capacidad floculante de coagulantes naturales en el tratamiento de agua,” *Tecnol. Quim.*, vol. 38, no. 2, 2018.
- [91] L. Muruganandam, M. P. S. Kumar, A. Jena, S. Gulla, and B. Godhwani, “Treatment of waste water by coagulation and flocculation using biomaterials,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 263, no. 3, p. 032006.
- [92] T. Harif, M. Khai, and A. Adin, “Electrocoagulation versus chemical coagulation: Coagulation/flocculation mechanisms and resulting floc characteristics,” *Water Res.*, vol. 46, no. 10, pp. 3177–3188, Jun. 2012.
- [93] N. Othman, N. S. Abd-Rahim, S. N. F. Tuan-Besar, S. Mohd-Asharuddin, and V. Kumar, “A Pontential Agriculture Waste Material as Coagulant Aid: Cassava Peel,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 311, no. 1, p. 012022.
- [94] P. Nanjan Bellie and V. Sockan, “Waste Water Treatment by Coagulation and Flocculation,” *Int. J. Eng. Sci. Innov. Technol.*, vol. 3, no. 2, 2014.
- [95] S. Mohd-Asharuddin, N. Othman, N. S. Mohd-Zin, and H. A. Tajarudin, “Removal of total suspended solid by natural coagulant derived from cassava peel waste,” in *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 995, no. 1, p. 12040.
- [96] Othman Norzila, Mohd Zin Nur Shaylinda, Tajarudin Husnul Azan, and Md. Din Mohd Fadhil, “Performance Assessment of Cassava Peel Starch and Alum as Dual Coagulant for Turbidity Removal in Dam Water ,” *Int. J. Integr. Eng.*, vol. 10, no. 4, 2018.
- [97] S. Mohd-Asharuddin, N. Othman, N. Shaylinda, M. Zin, and H. A. Tajarudin, “A Chemical and Morphological Study of Cassava Peel: A Potential Waste as Coagulant Aid,” *EDP Sciences*, 2017.