

Impacto del Método de Extracción sobre las Propiedades Fisicoquímicas, Reológicas y Floculantes de un Biofloculante de *Aloe vera*

Impact of the Extraction Method on the Physicochemical, Rheological and Flocculating Properties of an *Aloe vera* Bioflocculant

Juarez-Sánchez, J.A.,¹ Bustos-Ramírez, K.,¹ Varela-Santos, E.C.,¹ Avendaño-Vasquez, G.,¹ Vargas- García, K.A.^{1*}

¹TecNM/ITS de Tierra Blanca-Maestría en Ciencias de los Alimentos y Biotecnología, Ave. Veracruz S/N, Col. PEMEX, C.P.95180. Tierra Blanca, Veracruz. México

*Corresponding Author: k.vargas@itstb.edu.mx

Recibido: 27 de enero de 2025

Aceptado: 08 de mayo de 2025

Resumen

La contaminación en cuerpos de agua requiere alternativas de tratamiento sostenibles. El uso de biofloculantes de *Aloe vera* que permitan sustituir floculantes sintéticos fue evaluado. La materia prima se recolectó de Tierra Blanca, Veracruz, México; y la aloína se removió por inmersión (agua, 48 h). El gel se separó, cortó, trituró y homogeneizó. La extracción por maceración se llevó primero en inmersión con agua (relación S/L 1:1, 24 h) y posteriormente con etanol (96 %, relación S/L 1:3, 24 h). Mientras que la extracción por microondas con etanol (96 %, relación S/L 1:3, 5 min con pulsos de 0.5 min y 800 W). El biofloculante extraído fue secado (45 °C, 6 h) y triturado. La caracterización fisicoquímica del gel y biofloculante se realizó considerando humedad, sólidos totales, °Brix, pH, azúcares reductores, carbohidratos totales, ácido málico; en tanto que el desempeño se realizó en términos de propiedades reológicas (viscosidad, índice de consistencia y comportamiento de flujo) y reducción de turbidez (NTU). El mayor contenido de sólidos solubles, ácido málico, °Brix, azúcares reductores y carbohidratos totales se observó en el biofloculante. El gel y biofloculante mostraron un comportamiento no Newtoniano, tipo pseudoplástico con el modelo de Otswald ($R^2 > 0.99$, y $n < 1$) y la mayor reducción de turbidez se observó a pH 7.5 tanto en gel y biofloculante (78.31 %). Todo lo anterior independientemente del método de extracción. La extracción por microondas requiere menor tiempo de obtención del biofloculante de *A. vera*, pero no tuvo efecto sobre sus propiedades fisicoquímicas, estructurales, reológicas y floculantes, representando una alternativa sostenible y ecológica para sustituir floculantes sintéticos.

Palabras clave: Floculantes; Polisacáridos; Sábila; Tratamiento de aguas; Turbidez.

Abstract

Water pollution requires sustainable treatment alternatives. The use of *Aloe vera* bioflocculants to replace synthetic flocculants was evaluated. The raw material was collected from Tierra Blanca, Veracruz, Mexico; and the aloin was removed by immersion (water, 48 h). The gel was separated, cut, crushed and homogenized. Extraction by maceration was first carried out by immersion with water (S/L ratio 1:1, 24 h) and then with ethanol (96 %, S/L ratio 1:3, 24 h). While microwave extraction with ethanol (96 %, S/L ratio 1:3, 5min with 0.5 min pulses and 800 W). The extracted bioflocculant was dried (45 °C, 6 h) and grinded. The physicochemical characterization of the gel and bioflocculant was carried out considering moisture, total solids, °Brix, pH, reducing sugars, total carbohydrates, malic acid; the performance was done in terms of rheological properties (viscosity, consistency index and flow behavior) and turbidity reduction (NTU). The highest content of soluble solids, malic acid, °Brix, reducing sugars and total carbohydrates was observed in the bioflocculant. The gel and bioflocculant showed a non-Newtonian pseudoplastic behavior with the Otswald model ($R^2 > 0.99$, and $n < 1$) and the greatest reduction in turbidity was observed at pH 7.5 in both gel and bioflocculant (78.31 %). The above regardless of the extraction method, microwave extraction requires less time to obtain the bioflocculant *A. vera*, but had no effect on its physico-chemical, structural, rheological and flocculating properties, representing a sustainable and ecological alternative for replacing synthetic flocculants.

Keywords: Flocculants; Polysaccharides; Sabila; Water treatment; Turbidity.

INTRODUCCIÓN

La contaminación por descargas sobre cuerpos de agua y el deficiente funcionamiento de las plantas de tratamiento han ocasionado un problema socioambiental en el Estado de Veracruz, México. Este estado es abundante en plantas campestres; ocupando el segundo lugar de producción nacional de la sábila, cuyo nombre científico es *Aloe vera* L. (SIAP 2017). Esta planta (Figura 1) es de propagación sencilla para climas secos (Lagunes-Dominguez et al., 2024), y es abundante en el municipio de Tierra Blanca, Veracruz, donde su desarrollo y reproducción ocurre de manera natural, sin embargo, en la actualidad se le han dado muy pocas aplicaciones. El *A. vera* contiene polisacáridos entre sus principales compuestos bioactivos (por ejemplo el acemanano, Ac.), los cuales poseen excelente degradabilidad y biocompatibilidad, son considerados biomateriales de alto valor con amplio potencial de aplicación en procesos tecnológicos sostenibles para el área ambiental, alimentaria y farmacológica; y desempeñan un papel clave en las propiedades floculantes del *A. vera* (Bai et al., 2023).



Figura 1. Planta de sábila (*A. vera*)

La capacidad de floculación del *A. vera* se ha atribuido a la presencia de polisacáridos hidrosolubles como componentes principales del gel, que poseen grupos funcionales (por ejemplo grupos carboxilos e hidroxilos) con la capacidad de flocular partículas al interactuar con

contaminantes y sólidos suspendidos desestabilizando las suspensiones coloidales (Katubi et al., 2021; Figueiredo et al., 2022; Venegas-García et al., 2024). Los biofloculantes son sustancias orgánicas de que facilitan la agregación de partículas suspendidas en el agua, permitiendo su posterior sedimentación, eliminación y clarificación; y abordar los desafíos ambientales que plantea la contaminación de las aguas residuales y prevenir el ingreso de contaminantes químicos nocivos en la cadena alimentaria (Thamaraiselvi et al., 2024). Por lo que su uso representa una alternativa sostenible en sistemas de tratamiento de agua para mitigar el impacto socio ambiental ocasionado por la descarga inmoderada, y la subsecuente acumulación de sólidos suspendidos, residuos tóxicos y metales pesados (Das et al., 2021, Arcila & Peralta, 2016; Giannakoudakis et al., 2018; Diestra & Ramos 2019). Adicionalmente, Valdivia-Rivera et al. (2018), indicaron que la tasa de enfermedad renal crónica (ERC) en el municipio de Tierra Blanca, Veracruz está relacionada principalmente por el agua dulce que es de consumo humano, y que está contaminada por hidrocarburos, pesticidas, entre otros. Considerando lo anterior, el aprovechamiento de *A. vera* podría utilizarse para desarrollar procesos tecnológicos, que permitan sustituir floculantes sintéticos, reducir contaminantes químicos en cuerpos de agua y suelos de esta región; así como minimizar la acumulación de residuos tóxicos en el ambiente, ofreciendo una alternativa más sostenible y ecológica en diversas aplicaciones industriales. Lo anterior promoviendo la sustentabilidad en el manejo de recursos naturales a la economía circular y principalmente en el saneamiento de las aguas residuales del municipio de Tierra Blanca, Veracruz. Resultando de interés, evaluar el impacto del método de extracción sobre las propiedades fisicoquímicas, reológicas y floculantes de un biofloculante de *A. vera*; para desarrollar una alternativa de obtención de floculantes naturales a partir de la sábila de la región de Tierra Blanca, Ver.

MATERIALES Y MÉTODOS

Recolección de materia prima

La materia prima (sábila) se recolectó en tres zonas del municipio de Tierra Blanca, Veracruz: Col. La Floresta, Col. Pemex y Col. Barrio de Torreón. Las hojas de la sábila fueron colectadas en dos períodos estacionales (abril-mayo, y octubre-noviembre) evitando la temporada de lluvia en el municipio. Se tomaron las hojas inferiores en forma angular evitando el daño en las hojas superiores (Lagunes-Domínguez et al, 2024). Posteriormente las hojas fueron lavadas para la remoción de residuos, y colocadas en inmersión con exceso de agua para la remoción de la aloína residual (48 h). En la Figura 2, podemos observar los mapas geográficos de las zonas de recolección de la materia prima y que son acorde al impacto socioambiental de la presente propuesta.

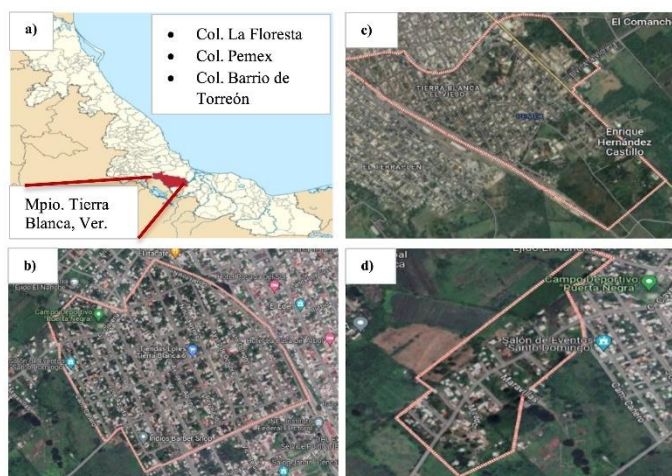


Figura 2. Zonas de recolección de la materia prima. a) Zona de influencia del impacto social, b) Col. Barrio de Torreón, c) Col. Pemex, d) Col. La Floresta.

Extracción del biofloculante

Una vez removida la aloína, la corteza y las espigas de las hojas del *A. vera*, el gel se separó, cortó, trituró y homogeneizó. La extracción por maceración se llevó a cabo en dos etapas de acuerdo al método reportado por Otálora et al. (2021) donde en la primera etapa se realizó una inmersión con agua con una modificación en la relación sólido: líquido (S/L 1:1, 24 h), posteriormente el gel hidratado fue filtrado y llevado a una segunda etapa

donde se sometió a maceración por inmersión con etanol (96 %, relación S/L 1:3, 24 h). Mientras que en la extracción por microondas el gel fue hidratado solo durante 2 h con agua (S/L 1:1, 24 h), y posteriormente el gel hidratado fue filtrado y se sometió a extracción con etanol (96 %, relación S/L 1:3, 5 min con pulsos de 0.5 min y 800 W) acorde a lo reportado por Salomón-Izquierdo et al. (2022). El biofloculante extraído fue secado en estufa 9023A ECOSHEL (45 °C, 6 h) y triturado independientemente del método de extracción evaluado. Todas las extracciones se realizaron por triplicado.

Caracterización fisicoquímica y estructural

La caracterización fisicoquímica y estructural se realizó tanto en el gel del *A. vera* (fresco) como en los biofloculantes obtenidos en estado seco (polvo). La caracterización fisicoquímica se llevó a cabo en términos de humedad, sólidos totales, cenizas, °Brix, pH, y acidez (% ácido málico). En el caso de humedad, sólidos totales y cenizas, estas determinaciones se realizaron gravimétricamente por pérdida de masa de las muestras sin dilución (AOAC, 2000), utilizando una estufa de secado 9023A ECOSHEL a (100 °C, 24 h), y una mufla Lab Tech LEF-205S-0 (540 °C, 4 h). Mientras que la determinación de los Sólidos Solubles Totales (°Brix) y el pH se llevaron a cabo por dilución másica del gel de *A. vera* y de los biofloculantes con agua destilada (1:2), empleando un refractómetro análogo Bellingham + Stanley Eclipse, modelo 45-05, y un potenciómetro OHAUS AB23PH-F S calibrado a 3 puntos con soluciones estándar de pH 4, 7 y 10 respectivamente (AOAC, 2000). La obtención de ácido málico, se realizó sobre diluciones másicas de las muestras del gel de *A. vera* y de los biofloculantes con agua destilada (1:25) por volumetría ácido-base, utilizando NaOH (0.1 N) como agente valorante, fenolftaleína como indicador y aplicando el factor para ácido málico (AOAC, 2000). Mientras que la caracterización estructural se realizó en términos de la concentración de azúcares reductores y polisacáridos totales por espectrofotometría UV-VIS, con una adaptación de los métodos reportados por Miller (1959) y DuBois et al. (1956), utilizando una curva calibración de glucosa (0.1-1.0 g/L y 2.0-20.0 µg/mL respectivamente) y un espectrofotómetro UV-VIS (Thermo Scientific Genesys 10s) a 540 nm y 485 nm respectivamente. La concentración de las muestras del gel

de *A. vera* y de los biofloculantes, se obtuvo de acuerdo a la ecuación de la recta de la curva calibración de glucosa y el factor de dilución de las muestras preparadas del gel de *A. vera* y biofloculantes con agua destilada. La identificación cualitativa de pectina y ácidos carboxílicos se realizó por dilución másica de la muestras del gel de *A. vera* y de los biofloculantes con agua destilada (1:10) con adición de etanol acidificado al 0.01 % V/V (relación L:L 1:3) para la prueba de pectina (Davitadze, 2023); y (1:4) con bicarbonato de sodio al 10 % P/P (Guarnizo & Martínez, 2009). Donde la respuesta positiva está relacionada con la precipitación de polisacáridos de alto peso molecular para la prueba de pectina, y la efervescencia como evidencia de la liberación del CO₂, derivado de la presencia de los grupos carboxílicos. La caracterización fisicoquímica y estructural se realizó en el gel de *A. vera*, y en los biofloculantes obtenidos por maceración y por microondas. Todas las determinaciones se realizaron por triplicado.

Caracterización reológica

La caracterización reológica del gel del *A. vera* (fresco) y de los biofloculantes obtenidos en estado seco (polvo), se realizó en términos de viscosidad, índice de consistencia y comportamiento de flujo. Estas propiedades reológicas se determinaron utilizando el gel de *A. vera* (fresco) sin dilución y con los biofloculantes utilizando diluciones másicas con agua destilada (1:50); y como testigos se utilizaron glicerina (≥ 99 %) y sorbitol (≥ 91 %) sin dilución. La caracterización reológica se realizó utilizando un viscosímetro rotacional POLYVISC® FV, con la configuración de spindel R2 y con velocidades de rotación entre 0.3 rpm (1.6 s⁻¹) y 100 rpm (542 s⁻¹). El volumen de operación de los fluidos fue de 300 mL y la temperatura de la muestra fue monitoreada y controlada a 25 °C. Las lecturas correspondientes a la viscosidad de los fluidos se tomaron con variación en las velocidades de corte correspondientes a las velocidades de rotación (Chin et al., 2009; Jorge et al., 2018). Los modelos matemáticos empleados para la determinación de propiedades reológicas y el ajuste de los datos experimentales fueron los modelos de Ley de Newton (Ec. 1) y de Ostwald o de Ley de la Potencia (Ec. 2). Todas las mediciones se realizaron por triplicado.

$$\text{Ec. 1} \quad \tau = \mu\gamma$$

$$\text{Ec. 2} \quad \tau = K\gamma^n$$

Donde τ corresponde al esfuerzo cortante (N.m², Pa), μ coeficiente de viscosidad (Pa.s, mPa.s), γ velocidad de corte (s⁻¹), K Índice de consistencia, n índice de comportamiento de flujo (Pa.sⁿ).

Desempeño de los biofloculantes

El desempeño de los floculantes se evaluó en términos de reducción de turbidez (NTU), con el gel de *A. vera* (fresco), con los biofloculantes obtenidos por maceración y microondas en estado seco (polvo), y con sulfato de aluminio (Al₂(SO₄)₃) como floculante comercial. Lo anterior se llevó a cabo con cinéticas de sedimentación destructivas con un sistema modelo. El sistema modelo se preparó con caolín (polvo) y agua destilada (300 rpm, 30 min) para obtener la turbidez deseada (1000 NTU), donde el pH se ajustó entre 5.5 a 8.0 con HCl y/o NaOH (0.1 N) (Al-Samraiy, 2024). Las dosis empleada fue de 25 mL para todos los floculantes evaluados: Sulfato de aluminio (10 gL⁻¹), gel de *A. vera* (100 gL⁻¹), biofloculantes obtenidos por maceración y microondas (10 gL⁻¹). La reducción de turbidez (NTU) se determinó por espectrofotometría UV-VIS, con una adaptación del método NMX-AA-038-SCFI-2001, utilizando una curva calibración de Formacina (C₆H₁₂N₄) y un espectrofotómetro UV-VIS (Thermo Scientific Genesys 10s) a 420 nm. A partir de la curva calibración y la medición experimental del sobrenadante, se determinó la remoción de la turbidez del sistema modelo en cada cinética con los floculantes evaluados (Ec. 3). Todas las muestras se realizaron por triplicado.

$$\text{Ec. 3} \quad \% \text{ Reducción (NTU)} = \left[\frac{T_0 - T_F}{T_0} \right] \times 100$$

Donde T_0 corresponde a la Turbidez inicial de la solución modelo (NTU), T_F a la Turbidez en el tiempo final (NTU) de la cinética de sedimentación. La estrategia experimental hasta ahora descrita se muestra en la figura 3.

Análisis estadístico

El efecto del método de extracción sobre las propiedades fisicoquímicas y estructurales del biofloculante de *A. vera* se analizó con un diseño factorial de una sola vía con tres niveles. El factor (método de extracción) y los niveles codificados se muestran en la tabla 1. La experimentación fue realizada por triplicado sobre diez variables de respuesta: humedad, sólidos totales, cenizas, °Brix, pH, ácido málico, azúcares reductores, polisacáridos totales, pectina y ácidos carboxílicos con un total de 9 corridas experimentales.

por triplicado teniendo como variable de respuesta el porcentaje en la reducción de turbidez (NTU) con un total de 72 corridas experimentales.

Tabla 1. Factores, niveles codificados y valores utilizados en el diseño de experimentos para evaluar el efecto del método de extracción sobre las propiedades fisicoquímicas

Factor (x ₁)	Valores de los niveles codificados		
	-1	0	+1
Método de Extracción	Sin Extracción	Maceración	Microondas

El análisis estadístico para ambos diseños fue realizado aplicando el software Design-Expert versión 7.1 mediante un análisis de ANOVA con un nivel de confianza del 95 %.

Tabla 2. Factores, niveles codificados y valores utilizados en el diseño de experimentos para evaluar el efecto del método de extracción sobre el desempeño del biofloculante de *A. vera*.

Factor (Símbolo) Tipo de Floculante (x ₁)	pH (x ₂)	Valores de los niveles codificados
No Aplica	5.5	-3
Al ₂ (SO ₄) ₃	6.0	-2
Gel de <i>A. vera</i>	6.5	-1
Biofloculante <i>A. vera</i> por maceración	7.0	+1
Biofloculante <i>A. vera</i> por microondas	7.5	+2
No Aplica	8.0	+3

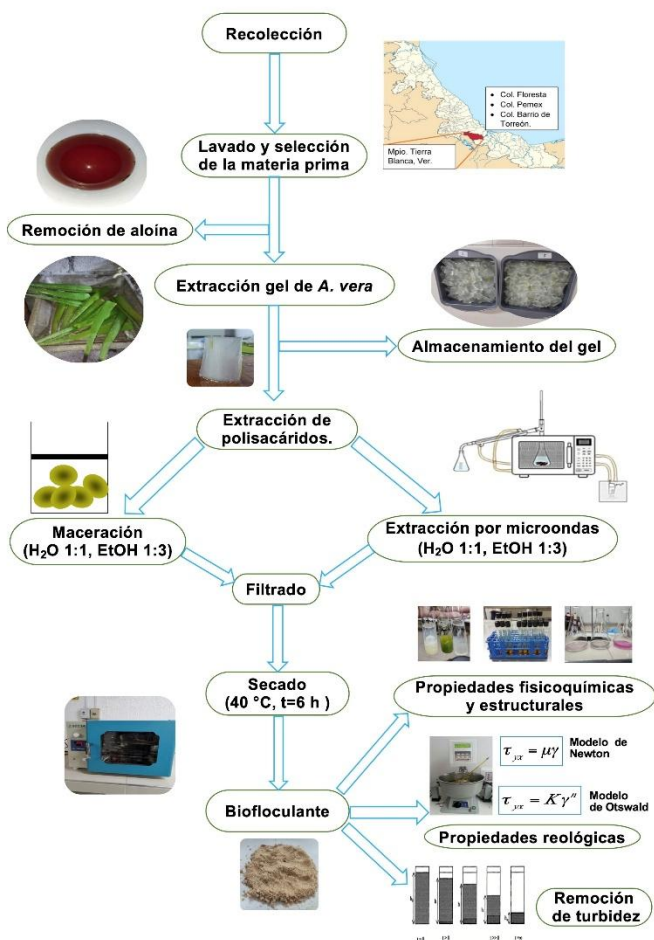


Figura 3. Estrategia experimental en la obtención de biofloculantes de *A. vera*

Adicionalmente el desempeño del biofloculante de *A. vera* se analizó con un diseño factorial con dos factores (x): tipo de floculante (x₁) y pH (x₂), a cuatro y seis niveles respectivamente. Los factores y niveles codificados se muestran en la tabla 2. La experimentación fue realizada

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización fisicoquímica y estructural

La Tabla 3 muestra los resultados de la caracterización fisicoquímicas del gel y de los biofloculantes de *A. vera*. Los resultados indican la mayor presencia de sólidos totales, °Brix, ácido málico, azúcares reductores y carbohidratos totales en los biofloculantes independientemente del método de extracción evaluado, mientras que los valores de humedad, cenizas y pH fueron mayores en el gel de *A. vera*. La diferencia de los valores obtenidos para el caso de azúcares reductores y carbohidratos totales en el gel se atribuyó a que la determinación se realizó en base húmeda (Perez-Benites, 2019). La presencia de ácidos carboxílicos y de pectina fue identificada tanto en el gel como en los biofloculantes del *A. vera* independientemente del método de extracción evaluado. Los resultados del análisis estadístico indicaron que no existe diferencia significativa entre las propiedades fisicoquímicas, ni entre las propiedades estructurales de los biofloculantes obtenidos por maceración y por microondas; pero si, con las propiedades fisicoquímicas y estructurales del gel de *A. vera* ($p < 0.05$), con excepción de la pruebas de pectina y de bicarbonato. Esto último confirmó la conservación de polisacáridos y de grupos carboxílicos en los biofloculantes obtenidos por ambos métodos, y sugiere propiedades floculantes similares a las del gel de *A. vera* (Katubi et al., 2021; Figueiredo et al., 2022; Venegas-García et al., 2024).

Adicionalmente, una ventaja del proceso de extracción del biofloculante por microondas es el tiempo de proceso (2 h y 5 min en total) en comparación con el proceso de maceración (48 h en total).

Caracterización reológica

Por otra parte, en la Figura 4 se muestran las propiedades reológicas y los perfiles de flujo del gel de *A. vera*, del biofloculante y de los fluidos testigos (glicerina y sorbitol).

Tabla 3. Resumen de la caracterización fisicoquímica y estructural del gel de *A. vera* y los biofloculantes obtenidos por maceración y microondas.

Propiedad (g/100g)	Gel (<i>A. vera</i>)	Biofloculante (Maceración)	Biofloculante (Microondas)
Humedad	98.7 ± 0.36 ^a	11.43 ± 0.83 ^b	12.65 ± 1.13 ^b
Sólidos totales	1.50 ± 0.36 ^a	88.56 ± 0.83 ^b	87.35 ± 1.13 ^b
Cenizas	5.27 ± 0.01 ^a	2.62 ± 0.86 ^b	2.71 ± 0.93 ^b
SST (°Brix)	2.00 ± 0.00 ^a	5.00 ± 0.00 ^b	5.00 ± 0.50 ^b
pH ¹	5.52 ± 0.15 ^a	4.83 ± 0.52 ^b	4.81 ± 0.31 ^b
Ácido málico	2.81 ± 0.35 ^a	187.86 ± 7.33 ^b	187.63 ± 4.22 ^b
Carbohidratos totales	4.44 ± 0.01 ^a	25.34 ± 1.57 ^b	24.34 ± 1.65 ^b
Azúcares reductores	7.37 ± 0.41 ^a	35.16 ± 1.70 ^b	35.87 ± 1.28 ^b
Pectina ²	+++ ^a	+++ ^a	+++ ^a
Acidos carboxílicos ²	+++ ^a	+++ ^a	+++ ^a

Notas: ¹Valores de 1- 14; ²Cualitativa: Positiva (+++) ó negativa (---). Letras diferentes en la misma fila expresan que existen diferencias significativas ($p < 0.05$).

Puede observarse en esta figura el comportamiento del tipo Newtoniano para la glicerina al presentar una viscosidad constante independientemente de la velocidad de deformación, mientras que, para el sorbitol, el gel y el biofloculante de *A. vera* se observa un comportamiento del tipo no Newtoniano. El perfil de flujo de la glicerina confirmó su comportamiento Newtoniano al mostrar el esfuerzo cortante como una función lineal de la velocidad de corte acorde a los fluidos Newtonianos, y un mayor ajuste de los datos experimentales con el Modelo de Newton ($R^2 > 0.99$). Mientras que, para el sorbitol, el gel y los biofloculantes de *A. vera* puede verse que el esfuerzo cortante no es una función lineal de la velocidad de corte, sugiriendo nuevamente un comportamiento no Newtoniano (Figura 4).

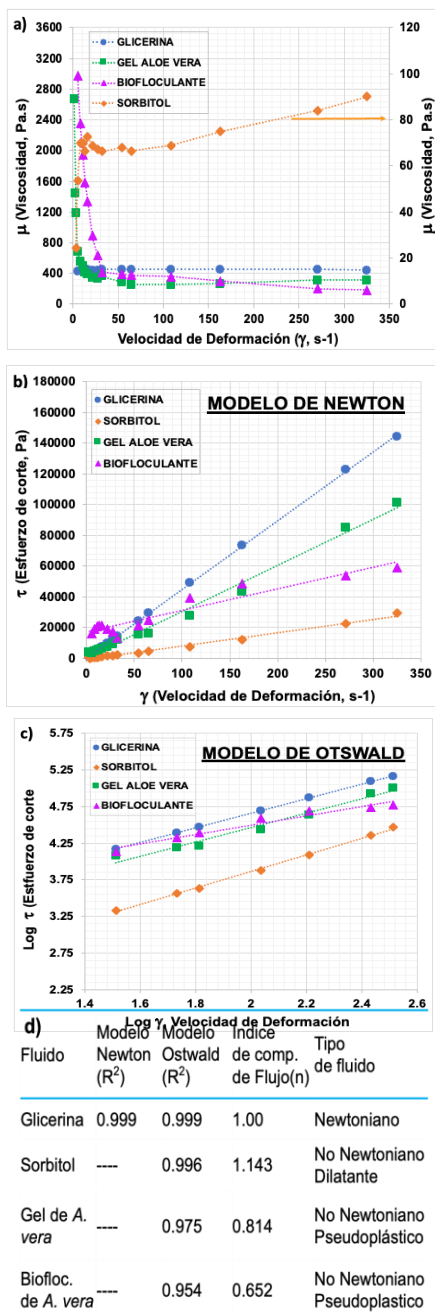


Figura 4. Caracterización reológica. a) Curvas de Viscosidad Vs velocidad de deformación. b) Curvas de Flujo Modelo de Newton. c) Curvas de Flujo Modelo de Ostwald o Ley de Potencia. d) Resumen de las propiedades reológicas.

También puede observarse en la Figura 4 que el perfil de flujo del sorbitol, del gel y del biofloculante de *A. vera*, confirmó su comportamiento no Newtoniano, donde los datos experimentales presentaron el mejor ajuste con

el Modelo de Otswald o Ley de la Potencia ($R^2 > 0.95$); así mismo los valores de índice de comportamiento de flujo confirmaron un comportamiento de fluido no Newtoniano del tipo dilatante ($n > 1$) para el sorbitol, y un comportamiento de fluido no Newtoniano del tipo pseudoplástico ($n > 1$) tanto para el gel como para el biofloculante de *A. vera* (Figura 4). Los valores de índice de comportamiento de flujo reportados por Sonawe et al. (2020) ($n = 0.48 - 0.55$) coinciden con los obtenidos en este estudio, lo que confirma un comportamiento reológico similar en el gel de *A. vera*. Este resultado es un indicativo indirecto de la conservación del acemanano tanto en el gel como en el biofloculante obtenido independientemente del método de extracción evaluado; ya que el comportamiento adelgazante al corte está relacionado con sus grupos acetilos; mientras que un comportamiento del tipo Newtoniano en los derivados o productos del gel de *A. vera* indican la descomposición de este polisacárido como una consecuencia del almacenamiento y manejo inadecuado del gel; así como a las condiciones de proceso, en este caso del biofloculante (Sonawane et al., 2020; Bai et al., 2023). Adicionalmente se confirmó la aplicabilidad del Modelo de Newton y Ley de la Potencia para la caracterización reológica del gel de *A. vera* y su biofloculante, lo cual coincide con lo reportado previamente no sólo para *A. vera*, sino también para productos naturales y formulados (hidrocoloides, jugo de tomate, jugos cítricos, jugo de caña) que contienen polisacáridos como compuestos principales (Chin et al., 2009; Astolfi-Filho et al., 2011; Jorge et al., 2018; Sonawane et al., 2020). Además el conocimiento de propiedades reológicas está relacionada con la calidad del producto, su estabilidad en etapas de procesamiento almacenamiento y consumo; así como con el diseño, optimización y aplicación en procesos tecnológicos para este tipo de productos. Al respecto este trabajo puntualiza la importancia del comportamiento reológico en el gel y en el biofloculante de *A. vera*, ya que podría ser un parámetro crítico durante su aplicación en sistemas de tratamiento de agua, y cuya vertiente ha sido poco explorada a diferencia del área alimentaria (Diestra & Ramos 2019).

Desempeño de los biofloculantes

En la Tabla 4 se muestra la matriz experimental y los

resultados obtenidos para la variable de respuesta estudiada en el desempeño de los floculantes, donde los porcentajes de reducción de la turbidez más altos se observan a valores de pH de 7.5 tanto con gel como con el biofloculante de *A. vera*, independientemente del método de extracción evaluado, en comparación con el floculante comercial (Sulfato de aluminio). Estos resultados coinciden con lo reportado por Adco et al. (2024), con condiciones de operación y dosis similares de gel de *A. vera* (79.36 % de reducción de turbidez), pero con una dosis mayor a la del biofloculante y una turbidez inicial 10 veces menor a la del presente trabajo (110 NTU).

Benalia et al. (2021), evaluaron el desempeño del gel y del biofloculante de *A. vera* en los estados físicos similares al del presente trabajo (gel en fresco y biofloculante en polvo) con remociones de turbidez de 87.84 % y 28.23 % respectivamente; sin embargo, la diferencia en porcentajes de remoción para el caso del biofloculante en polvo se atribuyó a una menor dosis empleada en comparación al presente trabajo. Además, el valor inicial de turbidez fue 100 veces menor (13 NTU) al del presente trabajo.

Por otro lado, en la tabla 5 se muestra el análisis de varianza ANOVA del efecto del método de extracción y del pH sobre el desempeño de los floculantes. Puede verse en esta tabla que el efecto tanto del tipo de floculante, como del pH, y la interacción de estos dos factores (x_1 , x_2 y x_1x_2 respectivamente) fue significativo estadísticamente sobre el porcentaje de reducción de turbidez (NTU) al 95 % de nivel de confianza.

Tabla 5. Tabla de analisis de varianza ANOVA del efecto del tipo de floculante y del pH sobre el desempeño de los floculantes

Términos del modelo	GL	SC	F	p
x_1	3	292.520571	353.376405	1.0463E-32
x_2	5	6841.88145	4959.15784	6.9671E-64
$x_1 x_2$	15	311.107671	75.1660712	4.5124E-28
Error	48	13.2446		
Corridas totales	71	7458.75429		

x_1 :Tipo de floculante; x_2 :pH; x_1x_2 : Interacción (Tipo de floculante-pH); GL : Grados de Libertad; SC : Suma de cuadrados; F : Valor de F; p : Valor de probabilidad.

Esto indica que al menos un tipo de floculante, un valor de pH, y una interacción de pH tuvieron un efecto significativo ($p < 0.05$) en el desempeño de los floculantes en terminos de reducción de la turbidez (NTU). Por lo que, el análisis de varianza se realizó nuevamente considerando sólo los biofloculantes obtenidos por maceración y microondas del diseño de la matriz experimental, y de esta forma identificar el efecto del método de extracción sobre el desempeño del biofloculante de *A. vera*.

Los resultados de este análisis se muestran en la Tabla 6. Se puede observar que el valor estadístico de F indica que no existe diferencia significativa entre el desempeño del biofloculante obtenido por maceración y el biofloculante obtenido por microondas ($0.000184 < 4.2596$). Contrario a lo anterior, el pH si muestra un efecto significativo ($p < 0.05$) sobre el desempeño de los biofloculantes independientemente del método de extracción evaluado acorde al valor estadístico de F ($2988.6658 > 2.62065$).

Tabla 6. Tabla de analisis de varianza ANOVA del efecto del método de extracción y del pH sobre el desempeño de los biofloculantes.

Términos del modelo	GL	SC	F	p	Valor crítico F
x_1	1	4.44 E-05	0.000184	0.98928	4.259677
x_2	5	3608.856	2988.666	1.05E-32	2.620654
$x_1 x_2$	5	0.000189	0.000156	0.99999	2.620654
Error	24	5.796067			
Corridas Totales	35	3614.652			

x_1 : Tipo de floculante; x_2 : pH; x_1x_2 : Interacción (Tipo de floculante-pH); GL: Grados de Libertad; SC: Suma de cuadrados; F: Valor de F; p: Valor de probabilidad.

Tabla 4. Diseño de la matriz experimental y resultados obtenidos de la variable de respuesta en el desempeño de los floculantes.

No. de corrida experimental			Factores		Variables de Respuesta		
			x ₁	x ₂	% Reducción NTU		
1	2	3	-2	-3	66.34	66.15	65.98
4	5	6	-2	-2	50.46	50.38	49.99
7	8	9	-2	-1	52.78	51.88	52.68
10	11	12	-2	1	75.36	75.36	75.01
13	14	15	-2	2	76.75	76.34	76.05
16	17	18	-2	3	59.15	58.56	58.58
19	20	21	-1	-3	76.87	76.78	75.35
22	23	24	-1	-2	56.86	56.64	55.46
25	26	27	-1	-1	52.78	51.88	52.68
28	29	30	-1	1	72.41	71.98	72.9
31	32	33	-1	2	77.76	77.79	76.07
34	35	36	-1	3	69.58	69.88	68.68
37	38	39	1	-3	77.64	77.64	77.31
40	41	42	1	-2	55.85	55.77	54.65
43	44	45	1	-1	53.86	53.83	53.58
46	47	48	1	1	74.74	74.73	74.13
49	50	51	1	2	78.16	78.2	78.58
52	53	54	1	3	68.52	69.73	68.04
55	56	57	2	-3	77.31	77.63	77.66
58	59	60	2	-2	55.02	55.04	56.19
61	62	63	2	-1	53.86	53.84	53.58
64	65	66	2	1	74.31	74.35	74.94
67	68	69	2	2	78.19	78.15	78.58
70	71	72	2	3	69.69	68.62	67.96

Por otro lado, al interpretar el efecto de la interacción (biofloculante por maceración-pH y biofloculante por microondas-pH), los resultados del análisis de varianza indican que el efecto de interacción no sobrepasa a un efecto principal. En este caso, el valor de F no significativo para la interacción nos indica que no hay un efecto de interacción entre las variables ($0.000156428 < 2.620654148$). En otras palabras, no existe una diferencia significativa entre los rangos de pH evaluados relacionada al biofloculante de *A. vera* obtenido por maceración y al obtenido por microondas.

Esto confirma que el desempeño de los biofloculantes obtenidos en el presente trabajo a partir de *A. vera* no sólo compiten con floculantes comerciales como el sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), sino que, es más eficiente y estable en forma de polvo en comparación con el gel; minimizando el riesgo de modificación en las propiedades reológicas y la capacidad de floculación por descomposición de los polisacáridos durante el almacenamiento y manejo del gel en fresco; así como de contaminación microbiana (Sonawane et al., 2020). Complementariamente a estos resultados, se ha encontrado que el gel de *A. vera* permite la remoción de arsénico V con valores de remoción similares al de otros floculantes naturales como el quitosano y superiores al de gomas como la xantana; también obteniendo niveles de concentración aceptables para el saneamiento de agua (Venegas-García et al., 2024) confirmándolo como una alternativa sostenible de floculante natural en sistemas de tratamiento de agua.

CONCLUSIÓN

Los métodos de extracción evaluados no tuvieron impacto sobre las propiedades fisicoquímicas, estructurales, reológicas y floculantes del biofloculante. El uso de los modelos reológicos de Newton y de Otswald o Ley de la potencia indicó un comportamiento no Newtoniano, específicamente del tipo pseudoplástico, tanto en el gel como en el biofloculante obtenido ($R^2 > 0.950$ n > 1). Los resultados de remoción de turbidez confirmaron que el desempeño del biofloculante obtenido compite con floculantes comerciales como el sulfato de aluminio. Además, que su uso es más eficiente y estable

en su forma de polvo en comparación con el gel de *A. vera* (fresco); minimizando el riesgo de modificación en las propiedades reológicas y la capacidad de floculación por descomposición de los polisacáridos durante el almacenamiento y manejo del gel en fresco; así como de la contaminación microbiana. La aplicación de la sábila (*A. vera*) del municipio de Tierra Blanca, Veracruz representa una alternativa sostenible, ecológica y amigable con el ambiente, para sustituir el uso de floculantes sintéticos en sistemas de tratamiento de agua. Adicionalmente, la extracción por microondas ha demostrado ser un proceso que permite minimizar el tiempo de extracción, el uso de solventes y obtener biofloculantes con características fisicoquímicas, estructurales, reológicas y capacidad de floculación similares a los obtenidos por métodos convencionales.

Agradecimientos

Los autores agradecen: al TecNM (1941824-PD) y al COVEICYDET (CP09111806/2023) por el apoyo otorgado. J. A. Juárez Sánchez agradece al SECIHTI por la beca (1323942) para estudios de Maestría en Ciencias de los Alimentos y Biotecnología en el TecNM Campus Tierra Blanca.

REFERENCIAS

- Al-Sameraiy, M. (2024). Partial Replacement of Alum Coagulant by Green Coagulant: A Novel Approach for Removing Turbidity from Kaolin Synthetic Water. *Pollution*, 10(3), 899-914. doi: 10.22059/poll.2024.369833.2192
- Adco, L. D. F., Genix, R. S. J., Fuentes, D. P. C., & Ramos, R. H. P. (2024). Estudio de la aplicación del Aloe vera (L.) como coagulante para reducir la turbidez en el agua del río Caplina. *Scienceevolution*, 3(11), 38-46. <https://doi.org/10.61325/ser.v3i11.95>
- Anuario estadístico de la producción agrícola SIAP. Anuario estadístico de la producción agrícola: 2017.
- AOAC (2000) Métodos oficiales de análisis. 17.^a edición, Asociación de Químicos Analíticos Oficiales, Gaithersburg, MD, EE. UU.

- Arcila, H. R., & Peralta, J. J. (2016). Agentes Naturales como Alternativa para el Tratamiento del Agua. *Revista Facultad De Ciencias Básicas*, 11(2), 136. <https://doi.org/10.18359/rfcb.1303>
- Astolfi-Filho, Z., Telis, V. R. N., De Oliveira, E. B., Coimbra, J. S. D. R., & Telis-Romero, J. (2011). Rheology and fluid dynamics properties of sugarcane juice. *Biochemical Engineering Journal*, 53(3), 260–265. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2010.11.004>
- Bai, Y., Niu, Y., Qin, S., & Ma, G. (2023). A New Biomaterial Derived from Aloe vera - Acemannan from Basic Studies to Clinical Application. *Pharmaceutics*, 15(7), 1913. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15071913>
- Benalia, A., Derbal, K., Khalfaoui, A., Bouchareb, R., Panico, A., Gissoni, C., Crispino, G., Pirozzi, F., & Pizzi, A. (2021). Use of Aloe vera as an Organic Coagulant for Improving Drinking Water Quality. *Water*, 13(15), 2024. <https://doi.org/10.3390/w13152024>
- Chin, N., Chan, S., Yusof, Y., Chuah, T., & Talib, R. (2009). Modelling of rheological behaviour of pummelo juice concentrates using master-curve. *Journal of Food Engineering*, 93(2), 134–140. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.01.005>
- Das, N., Ojha, N., & Mandal, S. K. (2021). Wastewater treatment using plant-derived bioflocculants: green chemistry approach for safe environment. *Water Science & Technology*, 83(8), 1797–1812. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.100>
- Davitadze, N. (2023). Modification of the process of obtaining pectin by the methods of membrane technology. *Journal of Ecological Engineering*, 24(11), 117–126. <https://doi.org/10.12911/22998993/171469>
- Diestra, R F. S., & Ramos, P, I. V. (2019). Efecto de la concentración de Aloe vera (Sábila) y tiempo de floculación en la remoción de sólidos suspendidos y materia orgánica biodegradable de aguas residuales municipales sector el Cerillo, Santiago de Chuco. Trujillo- Perú: Biblioteca Digital - Dirección de Sistemas de Informática y Comunicación. <https://hdl.handle.net/20.500.14414/11549>
- DuBois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350–356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>
- Figueiredo, F. F., De Souza Freitas, T. K. F., Dias, G. G., Geraldino, H. C. L., Scandelai, A. P. J., Vilvert, A. J., & Garcia, J. C. (2022). Textile-effluent treatment using Aloe vera mucilage as a natural coagulant prior to a photo-Fenton reaction. *Journal of Photochemistry and Photobiology a Chemistry*, 429, 113948. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2022.113948>
- Giannakoudakis, D. A., Hosseini-Bandegharai, A., Tsafrakidou, P., Triantafyllidi, K. S., Kornaros, M., Anastopoulos I. (2018). Aloe vera waste biomass-based adsorbents for the removal of aquatic pollutants: A review. *Journal of Environmental Management*, 227(1), 354–364. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.064>
- Guarnizo Franco, A., & Martínez Yepes, P. (2009). Experimentos de química orgánica con enfoque en ciencias de la vida. Armenia: Ed. Elizcom. p, 220.
- Jorge, F. F., Hector, C. V., & Carlos, M. C. (2018). Incorporation of hydrocolloids and aloe vera gel on tree tomato beverages (CyphomandrabetaceaS.). Part I: Rheological Properties. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 14(3), 93–102. <https://doi.org/10.19026/ajfst.14.5842>
- Katubi, K. M., Amari, A., Harharah, H. N., Eldirderi, M. M., Tahoon, M. A., Ben Rebah, F. (2021). Aloe vera as Promising Material for Water Treatment: A Review. *Processes*, 9(5), 782. <https://doi.org/10.3390/pr9050782>
- Lagunes-Domínguez, A., Pérez-Vázquez, A., Hernández-Salinas, G., Acosta-Osorio, A. A., & Castillo-Zamudio, R. (2024). Caracterización agro-morfológica en genotipos de Aloe vera en dos estados de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15(3). <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i3.3659>
- Miller, G. L. (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Analytical Chemistry*, 31(3), 426–428. <https://doi.org/10.1021/ac60147a030>
- NMX-AA-038-SCFI-2001. ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE TURBIEDAD EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA.

- Otálora, M. C., Wilches-Torres, A., & Castaño, J. a. G. (2021). Extraction and Physicochemical Characterization of Dried Powder Mucilage from *Opuntia ficus-indica* Cladodes and Aloe Vera Leaves: A Comparative Study. *Polymers*, 13(11), 1689. <https://doi.org/10.3390/polym13111689>
- Perez-Benites, V. J., Minjares, F. J. R, Martínez, G. J. J., Baez, G. J.G., Candelas C. M.G.b (2019). Composición Química, Propiedades Físicas y Reológicas del mucílago de Aloe barbadensis Miller. *Investigación y desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 4(1), 902-906
- Salomón Izquierdo, S., Pérez Suárez, J. C., & López Arma, M. (2022). Extracción asistida por microondas para la obtención del extracto hidroalcohólico de Aloe vera L. (sábila). *Revista Cubana De Plantas Medicinales*, 27(1).
- Sonawane, S. K., Gokhale, J. S., Mulla, M. Z., Kandu, V. R., & Patil, S. (2020). A comprehensive overview of functional and rheological properties of aloe vera and its application in foods. *Journal of Food Science and Technology*, 58(4), 1217–1226. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04661-6>
- Thamaraiselvi, C., S . T, A., Nandhini, M., Kala, K., Vasanthi, M., Rajakannan, V., Al-Khattaf, F. S., Hatamleh, A. A., Chandrasekaran, M., Ravi, K., Chang, S. W., & Ravindran, B. (2024). Mitigating pollutants in textile dye wastewater with Aloe vera (L.) Burm. f. and *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench: A study on treatment efficacy. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 16, 100517. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100517>
- Valdivia-Rivera, S., Martínez-Cano, A. K., Aguirre-García, G., & Lizardi-Jiménez, M. A. (2018). Hydrocarbon water-pollution related to chronic kidney disease in Tierra Blanca, a perfect storm. *Environment International*, 121, 1204–1209. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.10.036>
- Venegas-García, D. J., Wilson, L. D., & De La Cruz-Guzmán, M. (2024). Aloe vera mucilage as a sustainable biopolymer flocculant for efficient arsenate anion removal from water. *RSC Sustainability*, 2(9), 2632–2643. <https://doi.org/10.1039/d4su00170b>