



POTENCIAL DEL MUCÍLAGO DE CARDÓN DATO PARA LA FLOCULACIÓN DE PARTÍCULAS DE ARCILLA

POTENTIAL EFFECT OF CARDON DATO MUCILAGE TO FLOCCULATE CLAY PARTICLES

POTENCIAL DEL MUCÍLAGO DE CARDÓN DATO PARA LA FLOCULACIÓN DE PARTICULAS DE ARCILLA

Manuel Henriquez¹

hemanuel@ucla.edu.ve

<https://orcid.org/0000-0002-2271-0893>

Jose. M. Gascó²

jose.maria@upm.es

<https://orcid.org/0000-0002-8233-9993>

Juana Perez Arias³

perez@upm.es

<https://orcid.org/0000-0003-2991-2292>

Duilio Torres⁴

duiliorres@ucla.edu.ve

<https://orcid.org/0000-0002-5920-138X>

1

Recibido: 07/07/23

Aceptado: 08/08/23

Publicado: 05/09/23

Correspondencia: duiliorres@ucla.edu.ve

1. Ing. Agronomo. Doctor. Profesor Titular, Investigador Suelos Facultad de Ingeniería Agronomica, Universidad Lisandro Alvarado Barquisimeto, Venezuela.
2. Doctor. Catedratico titular Titular, Investigador edafologia, Departamento de Producción Agraria. Universidad politecnica de Madrid " UPM", Madrid, España.
3. Doctora. Catedratica Titular, Investigador edafologia, Departamento de Producción Agraria. Universidad politecnica de Madrid " UPM".
4. Ing. Agrónomo, MsC., Profesor Asociado, Investigador Suelos, Facultad de Ingeniería Agronomica, Universidad Lisandro Alvarado Barquisimeto, Venezuela.



RESUMEN

Para evaluar el potencial del mucilago del cardón dato en la floculación de partículas de caolín se evaluaron soluciones del mucilago a una concentración de 50 mg L^{-1} combinados con Fe^{+3} y Al^{+2} a concentraciones de 3.0 y 1,5 mmol (+)/100 gr de Fe^{+3} Al^{+3} respectivamente, las variables evaluadas fueron concentración de partículas en suspensión (CPS) y volumen floculado de partículas (VFP), un segundo experimento se llevó a cabo para comparar la efectividad del mucilago a concentraciones de 5, 10 y 30 mg L^{-1} combinados con Fe^{+3} y Al^{+2} a concentraciones de 1.5 mmol (+)/100 gr de Fe^{+3} + 1.5 Cmol(+)/Kg Al^{+3} (CD5FeAl1,5). Los resultados revelan que el CPS más bajo se obtuvo con CD50 (50 mg L^{-1}) y PAM10 (utilizado como un producto de referencia) y la máxima (FVP) se obtuvo cuando 50 CD se combinó con hierro y aluminio. El valor más bajo de CPS ocurrió debido al alto peso molecular de polímeros y su interacción con las partículas de arcilla. Por otro lado, el mayor volumen floculado puede explicarse debido a la capacidad de hinchamiento de mucilago húmedo y también a la formación de una estructura más abierta que favorece la mayor permeabilidad y aireación del sustrato de caolín, el uso del biopolímero de cardón dato constituye una alternativa económica y bajo impacto ambiental para la clarificación de aguas y la biorremediación de suelos contaminados con metales pesados.

Palabras clave: agregación; biopolímeros; restauración de suelos.

ABSTRACT

In order to evaluate the potential of the mucilage of cardón dato in flocculation of kaolin particles solutions of mucilage at a concentration of 50 mg L^{-1} combined with Fe^{+3} and Al^{+2} to levels of 1.5 and 3.0 mmol (+) / 100 gr of Fe^{+3} Al^{+3} respectively was evaluated. the variables evaluated were concentration of particles in suspension (CPS) and flocculated particles volume (FPV), a second experiment was conducted to compare the effectiveness of mucilage at concentrations of 5, 10, and 30 mg L^{-1} combined with Fe^{+3} and Al^{+2} at concentrations of 1.5 mmol (+) / 100 gr of Fe^{+3} + 1.5 Cmol (+) kg Al^{+3}). The results reveal that the lowest CPS was obtained with CD50 (50 mg L^{-1}) and PAM10 (used as a reference product) and maximum (FVP) is obtained when 50 CD is combined with iron and aluminum. The lowest value of CPS took place due to the high molecular weight of polymers and their interaction with the clay particles. On the other hand, the largest volume of flocculated can be explained due to the swelling of mucilage wet capacity and also to the formation of a more open structure that



favors greater permeability and aeration of the substrate of kaolin. The use of the biopolymer of cardón dato is an economical alternative and low environmental impact for the water clarification and the bioremediation of contaminated soils with heavy metals.

Key words: aggregation; biopolymers, soils reclamation.

RESUMO

Para avaliar o potencial do mucilago do cardón dato na floculação de partículas de caulim, foram avaliadas soluções do mucilago a uma concentração de 50 mg L⁻¹ combinadas com Fe⁺³ e Al⁺² em concentrações de 3.0 e 1.5 mmol (+)/100 gr de Fe⁺³ Al⁺³, respectivamente. As variáveis avaliadas foram concentração de partículas em suspensão (CPS) e volume floculado de partículas (VFP). Um segundo experimento foi realizado para comparar a efetividade do mucilago em concentrações de 5, 10 e 30 mg L⁻¹ combinadas com Fe⁺³ e Al⁺² em concentrações de 1.5 mmol (+)/100 gr de Fe⁺³ + 1.5 Cmol(+)/Kg Al⁺³ (CD5FeAl1,5). Os resultados revelaram que a menor CPS foi obtida com CD50 (50 mg L⁻¹) e PAM10 (utilizado como produto de referência) e o maior VFP foi obtido quando 50 CD foi combinado com ferro e alumínio. O valor mais baixo de CPS ocorreu devido ao alto peso molecular dos polímeros e sua interação com as partículas de argila. Por outro lado, o maior volume floculado pode ser explicado devido à capacidade de inchaço do mucilago úmido e também à formação de uma estrutura mais aberta que favorece a maior permeabilidade e aeração do substrato de caulim. O uso do biopolímero do cardón dato constitui uma alternativa econômica e de baixo impacto ambiental para a clarificação de águas e a biorremediação de solos contaminados com metais pesados.

Palavras-chave: agregação; biopolímeros; restauração de solos.

1. INTRODUCCIÓN

La aplicación de acondicionadores del suelo se ha incrementado en todo el mundo a causa del aumento de la demanda de alimentos y la necesidad de recuperar áreas degradadas (Pardo et al., 2014). La acción de los acondicionadores del suelo se resume en lo siguiente: estabilización de la estructura del suelo que se deriva de la formación de agregados, lo que se asocia con la porosidad y la permeabilidad al aire y el agua (Yazdanpanah et al., 2016); aumento de la retención de agua, lo que se asocia al carácter hidrofílico (Kargar et al., 2017) y la prevención del sellado y enconstramiento del suelo lo que



disminuye los riesgos de erosión y mejora la calidad del suelo (Sadeghi et al., 2015).

La agregación de las partículas del suelo (arena, limo y arcilla) en unidades más grandes, recibe el nombre de estructura del suelo y generalmente se debe a la tendencia de las partículas más finas (coloides) a mantenerse juntas. La estructuración requiere un proceso previo de floculación y posterior cementación que se ve favorecido por los acondicionadores del suelo, entre los que cabe mencionar: la poliacrilamida aniónica (PAM) y los mucílagos de cactus (Lee et al., 2015) y (Belbahloul et al., 2015), tanto la PAM como los mucílagos de cactus, han sido experimentados en el oeste de Venezuela con la finalidad de mejorar la infiltración del agua en los suelos de la depresión de Quíbor (Henríquez et al., 2003). También conviene resaltar que algunas sustancias minerales contribuyen a estabilizar los agregados del suelo, por ejemplo: el fosfoyeso (Da Costa et al., 2016) el yeso (Harris et al., 2016) y las sales de hierro y aluminio (Luo et al., 2015).

La utilización del mucílago de diferentes plantas cactáceas con fines agrícolas, para acondicionar la estructura del suelo y flocular los sólidos en suspensión del agua de riego, se inició en Venezuela en el año 1998, basados en las observaciones de Henríquez (Henríquez et al., 2000) sobre el uso del Cardón de Dato como floculante de las partículas sólidas suspendidas en el agua de consumo humano en la región de Quíbor, en el estado Lara en Venezuela. Así mismo (Parra et al., 2011), (Fuentes et al., 2011) y (Villabona et al., 2013) han reportado que especies de cactáceas como *Opuntia wentiana*, *Stenocereus griseus* y *Opuntia ficus-indica* han sido empleadas exitosamente para la purificación de agua en diversas regiones del mundo.

El efecto del mucílago extraído de varias cactáceas sobre el suelo y el agua, concretamente sobre la conductividad hidráulica del suelo, la profundidad de penetración del agua en el suelo y la floculación de partículas en suspensión fue estudiado por (Henríquez et al., 2000), quienes evaluaron concentraciones de mucílago proveniente de Cardón Dato (*Lemaireocereus griseus* (Haw.) Br. & Rose), Cardón Lefaria (*Cereus deficiens* Otto & Dietr) y Tuna Española (*Opuntia ficus indica*), un aumento significativo en la floculación de partículas, la penetración de agua y la conductividad hidráulica resultados similares fueron obtenidos por (Henríquez et al., 2003) tras aplicar soluciones de cardón dato a diferentes concentraciones, los resultados obtenidos fueron similares a los encontrados cuando se aplicaron enmiendas inorgánicas como las poliacrilamidas (PAM) y el fosfoyeso.

Los mucílagos tienen en muchos casos un efecto similar al de la PAM. (Muñoz et al., 2015) señalan que los polímeros de cactáceas están conformados



por polisacáridos estructurales como; L-arabinosa, D-galactosa, ácido D-galacturónico, L-ramnosa y D-xilosa por lo que se puede utilizar como un aditivo natural para mejorar la estructura del suelo, debido a que inducen floculación y la agregación de las partículas del suelo, haciendo que éstas precipiten debido a su alto peso molecular. (Henríquez et al., 2016) encontraron que el mucílago del cactus *Stenocereus griseus* (Haw.) F. Buxb, conocido como Cardón Dato (CD) contiene ácidos urónicos y azúcares neutros, principalmente galactopiranososa y cantidades menores de ramnosa, galactosa y arabinosa, composición similar a las de la pectina y que le confieren la capacidad de floculación a los acondicionadores naturales.

Las pectinas, según determinaron (Bouaziz et al., 2014) y (Espitia et al., 2014), poseen grupos hidroxilos (^{-}OH) y carboxilos ($^{-}\text{COOH}$) en las cadenas principales formadas por el ácido galacturónico (AG), situándose los hidroxilos de los azúcares ramnosa, arabinosa y galactosa en los laterales de la cadena principal de ácidos galacturónicos. Estos grupos hidroxílicos de los anómeros (AN) que forman el polisacárido pueden disociarse, dejando cargas negativas que pueden unirse a las arcillas directamente o por intermedio de puentes metálicos.

La hipótesis anterior de la unión directa arcilla-mucílago o mediante puentes metálicos del tipo arcilla-Ca-AN justifica la estructura abierta encontrada por (Henríquez et al., 2009) en los agregados formados en suelos tratados con mucílagos. La disociación de los grupos $^{-}\text{NH}_2$, $^{-}\text{COOH}$ y ^{-}OH dejando libres cargas negativas que funcionan como puentes o agentes enlazantes que unen el polisacárido a las arcillas directamente o mediante un catión metálico (Bouaziz et al., 2014). El puente de hidrógeno entre grupos hidroxilos (^{-}OH), carboxilos ($^{-}\text{COOH}$) o metoxilos ($^{-}\text{COOCH}_3$) es un enlace débil que puede unir las cadenas del ácido galacturónico de los mucílagos del cactus (Muñoz et al., 2015).

El Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de Norteamérica recomienda el uso agrícola de polímeros sintéticos como la PAM para reducir las pérdidas de suelo por erosión (Sojka et al., 2007), sin embargo, los mismos resultan costos para la mayoría de los agricultores, por lo tanto, se deben buscar alternativas más económicas y de bajo impacto ambiental. No obstante, los polímeros naturales, como los mucílagos de cactus, mezclados o no con hidróxidos de Fe y Al no han sido suficientemente comprobados como para llegar a recomendar su uso rutinario por los agricultores (Torres et al., 2015). Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de diferentes concentraciones de CD, Fe, Al y sus combinaciones utilizando una PAM como referencia, sobre el pH, la conductividad eléctrica (CE), la concentración de



partículas en suspensión y el volumen de partículas floculadas con el objetivo de usar los polímeros naturales para la clarificación del agua, mejorar la estructura del suelo y reducir los riesgos de erosión y aplicar los acondicionadores en la biorremediación de suelos contaminados con metales pesados.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Caracterización y descripción de los acondicionadores

Previo a la realización de los experimentos, se caracterizó el cardón dato y el caolín, siguiendo el procedimiento descrito por (Henríquez et al., 2009). El mucílago de cardón dato (*Stenocereus griseus* (Haw.) F. Buxb), estuvo constituido por azúcares como la ramnosa, arabinosa y galactosa (tabla 1). El cardón dato se compone de varios monómeros y polímeros (tabla 2). El ácido urónico que representa el 13,9%, es típico de las estructuras centrales de un tipo de pectina de polisacáridos, como el encontrado por (Parra et al., 2011) en el Cardón Lefaria (*Cereus deficiens*), tal estructura es común en polímeros con al menos dos cadenas de polisacárido, con interacciones de enlaces de hidrógeno entre carboxílico ($-\text{COOH}$) grupos, o entre alcoholicas (CH_2OH) grupos, o con los enlaces de la reticulación entre un catión polivalente como Ca^{+2} , actuando como el grupo central y los grupos carboxilo como el enlace de los polisacáridos.

Tabla 1. Características de mucilago de cardón dato.

Tipo de azúcar	(%)	FS (25%)	FI (75%)
Ramnosa	5.1	5.7	6.0
Arabinosa	7.9	5.0	15.4
Galactosa	33.8	25.6	44.7
Ácido urónico	13,9	Nd	nd

Leyenda: FS: Fracción soluble FI: fracción insoluble

El caolín utilizado en el experimento de laboratorio estuvo constituido por 55 % de arcilla y 45 % de limo, la arcilla estuvo constituida por 80 % de caolinita y 5 % de esméctita, con pH neutro, conductividad eléctrica baja y capacidad de intercambio catiónico de 10-12 cmol kg⁻¹.



2.2 Experimentos de laboratorio

Para evaluar el poder de floculación de los acondicionadores dos experimentos de laboratorio fueron conducidos, las condiciones de cada experimento se describen a continuación.

2.3 Primer experimento

Los tratamientos evaluados en el primer experimento son presentados en la tabla 2, ellos consistieron en soluciones acuosas de mucilago de cardón dato, cloruro de hierro ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$); cloruro de aluminio, combinación de esas soluciones y agua destilada como control.

Tabla 2. Denominación de los tratamientos empleados en el primer experimento.

Tratamientos	abreviatura
Fe^{+3} (3 cmol kg^{-1})	Fe^{+3}
Al^{+3} (3 cmol kg^{-1})	Al^{+3}
Fe^{+3} (1.5 cmol kg^{-1}) + Al^{+3} (1.5 cmol kg^{-1})	FeAl
CD (50 mg L^{-1})	CD50
CD (50 mg L^{-1}) + Fe^{+3} (1.5 cmol kg^{-1})	CD50Fe
CD (50 mg L^{-1}) + Al^{+3} (1.5 cmol kg^{-1})	CD50Al
CD (50 mg L^{-1}) + Fe^{+3} (1.5 cmol kg^{-1}) + Al^{+3} (1.5 cmol kg^{-1})	CD50FeAl
Control con agua destilada	AD

AD = agua destilada. CD = cardón dato (biopolímero orgánico natural).

En total se evaluaron 8 tratamientos, los cuales fueron replicados 4 veces, para un total de 32 unidades experimentales. Cada uno de los tratamientos fue aplicado a 4 gramos de caolín y enraizado en probetas de 100 ml de capacidad, la mezcla fue agitada y se dejó reposar por 6,5 horas. Posteriormente 20 cm^3 de las partículas de suspensión fueron recogidas con una pipeta y secadas a 105°C por 24 horas, el residuo sólido fue pesado, la concentración de partículas en suspensión (CPS) y el volumen de partículas floculadas (VPF) fueron determinadas por el procedimiento descrito por (Olivero et al., 2013). Antes y después de la aplicación del caolín el pH y la conductividad eléctrica de las soluciones y las suspensiones fueron medidas.



2.4 Diseño de tratamientos y análisis de los datos

Se aplicó un modelo factorial $2^3= 8$ tratamientos, los cuales fueron descritos en la tabla 2 y que consistieron en la interacción de las soluciones de Fe, Al y CD50 (3 factores) a 2 niveles (con presencia o ausencia de cada factor), los cuales fueron replicados 4 veces para un total de 32 unidades experimentales. Para comprobar el efecto de los tratamientos sobre la concentración de partículas en suspensión (CPS) y el volumen de partículas floculadas (VPF) se empleó el método de los mínimos cuadrados ponderados (LSD) para comparar las medias, con probabilidad ($P<0,05$).

2.5 Segundo experimento

Los tratamientos del Segundo experimento fueron los que presentaron la menor concentración de partículas en suspensión y los valores más altos de volumen de floculación de partículas (tabla3), adicionalmente la dosis de cardón dato de 50 mg L^{-1} , fue evaluada concentraciones de 30 y 10 mg L^{-1} . En este experimento la dosis de cardo Los polímeros naturales fueron comprados con una poliacrilamida comercial (PAM), el cual es producto granular, soluble en agua y de alto peso molecular, parcialmente hidrolizable, cuya denominación comercial es STOCKOPAM®.

Tabla 3. Denominación de los tratamientos empleados en el segundo experimento.

Tratamientos	abreviatura
CD (50 mg L^{-1})	CD50
CD (50 mg L^{-1}) + Fe^{3+} ($1.5 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$) + Al^{3+} ($1.5 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$)	CD50FeAl
CD (30 mg L^{-1})	CD30
CD (10 mg L^{-1})	CD10
CD (5 mg L^{-1}) + Fe^{3+} ($1.5 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$) + Al^{3+} ($1.5 \text{ cmol}^+ \text{ kg}^{-1}$)	CD5FeAl
Control con agua destilada	AD
PAM (10 mg L^{-1})	PAM10

CD: biopolímero de cardón dato; PAM: policrialamida, AD: agua destilada

En total se evaluaron 7 tratamientos, los cuales fueron replicados 4 veces, para un total de 28 unidades experimentales. El procedimiento experimental fue similar al aplicado en el primer experimento, se aplicaron las soluciones de acondicionadores sobre el sustrato de caolín y se evaluó su efecto sobre la



concentración de partículas en suspensión (CPS) y el volumen de partículas floculadas.

2.6 Diseño de tratamientos y análisis de los datos del segundo experimento

Se aplicó un diseño de experimentos completamente aleatorizado con 7 tratamientos y 4 repeticiones para 28 unidades experimentales, para comparar las medias entre los tratamientos, se aplicó el método de diferencias significativas mínimas (LSD), el cual fue calculado usando una probabilidad de $P < 0,05$.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los acondicionadores utilizados de manera separada y en diferentes dosis o combinados tuvieron diferentes efectos: sobre el pH la conductividad eléctrica CE de la solución y la suspensión de arcilla tratada, así como sobre la concentración de partículas en suspensión (CPS) y el volumen de partículas floculadas (VPF).

3.1 pH y conductividad eléctrica CE de las soluciones y las suspensiones de arcilla tratadas con los acondicionadores

Las soluciones y suspensiones obtenidas después de su aplicación presentaron los valores de pH y conductividad eléctrica que se expone en la Tabla IV. Las soluciones de Fe^{+3} y Al^{+3} fueron más ácidas en comparación con el testigo de agua destilada y las soluciones de Cardón Dato a una concentración de 50 mg L^{-1} (CD50), lo cual se explica por la hidrólisis de las especies de Fe^{+3} y el Al^{+3} con formación de H_3O^+ , $Fe(OH)+2$ y $Al(OH)+2$ siendo dicha acidez función de la concentración de Fe^{+3} y Al^{+3} . Las soluciones con CD50 tienen menos acidez a causa los electrolitos básicos del cactus (Olivero et al., 2013).

Tabla 4. pH y conductividad eléctrica de las soluciones y suspensiones de arcilla empleadas en el primer experimento.

CD 50 mg L^{-1}	Fe^{+3} $mmol^+ L^{-1}$	Al^{+3} $mmol^+ L^{-1}$	Solución		Suspensión	
			pH	CE ($dS \text{ cm}^{-1}$ a $25 \text{ }^\circ\text{C}$)	pH	CE ($dS \text{ cm}^{-1}$ a $25 \text{ }^\circ\text{C}$)
0	0	0	5,85	29	7,90	51
0	3	0	3,15	431	3,77	211
0	0	3	3,10	406	4,26	270



0	1,5	1,5	3,27	297	4,72	182
50	0	1,5	4,62	119	5,78	131
50	1,5	1,5	3,37	279	4,94	205
50	1,5	0	3,29	254	4,67	150
50	0	0	6,64	120	7,79	151

El aumento de la conductividad eléctrica (CE) de la solución luego de la aplicación del cardón dato confirma lo encontrado por (Contreras et al., 2015), quienes reportaron un aumento de 2 dS cm^{-1} por mg L^{-1} de CD añadido, debido a que la disolución de electrolitos de FeCl_3 y AlCl_3 en agua aumenta la CE de la solución. La interacción del mucílago de CD con el Fe^{+3} y el Al^{+3} determina una disminución de la CE de la solución resultante respecto a las soluciones de Fe^{+3} y Al^{+3} sin CD, esto ocurre por el acomplejamiento del hierro y el aluminio por el biopolímero (CD), lo que lo excluye del contacto directo con el agua de la solución, por lo que la CE resulta menor que en las soluciones sin CD, una menor concentración de CD implica menos densidad de carga eléctrica y por lo tanto menos adsorción, difusa o selectiva, de las especies de Fe^{+3} y Al^{+3} sobre la superficie de las partículas de CD.

Los resultados son sugerentes respecto a la depuración de aguas contaminadas mediante el uso de acondicionadores naturales (Arcila et al., 2016), porque, además del Fe y el Al, otros cationes polivalentes como Ni, Cu, Zn, Cd, y Pb pueden actuar como grupos centrales en la formación de complejos solubles órgano-metálicos con el mucílago de cardón actuando como ligando; sobre todo si se tiene en cuenta la separación de los sólidos en suspensión a causa de la actividad floculadora del mucílago.

Cuando se comparó el efecto de las soluciones del cardón dato, Fe^{+3} y Al^{+3} que presentaron los valores más bajos de CPS y los más altos de VPF con relación a una Poliacrilamida aniónica comercial (PAM), se observó un incremento significativo de la CE en todos los tratamientos ($P < 0,05$) a excepción del tratamiento donde se redujo la concentración de cardón datos a 10 mg L^{-1} , los valores más altos de conductividad eléctrica se encontraron cuando se aplicaron de forma aislada las soluciones de Fe^{+3} y Al^{+3} (Tabla 5).



Tabla 5. pH y conductividad eléctrica de las soluciones suspensiones de arcilla empleadas en el segundo experimento.

Tratamiento	Solución		Suspensión	
	pH	CE	pH	CE
Agua destilada	5,85	29	7,90	51
CD (50 mg L ⁻¹)	6,64	120	7,79	151
CD (50 mg L ⁻¹) Fe ⁺³ (1,5 mmol ⁺ L ⁻¹) Al ⁺³ (1,5 mmol ⁺ L ⁻¹)	3,37	279	4,94	205
CD (30 mg L ⁻¹)	6,23	86	7,63	96
CD (10 mg L ⁻¹)	6,24	43	8,16	56
CD (5 mg L ⁻¹) Fe ⁺³ (1,5 mmol ⁺ L ⁻¹) Al ⁺³ (1,5 mmol ⁺ L ⁻¹)	3,37	291	4,72	259
PAM (10 mg L ⁻¹)	6,28	94*	7,27	126

La CE de las suspensiones tratadas con el mucílago de cardón dato y con la poliacrilamida aniónica PAM aumenta en general respecto a la CE de las soluciones, Los tratamientos combinados de los biopolímeros con Fe⁺³ y Al⁺³ resultan diferentes al unirse el efecto de los polímeros orgánicos a la acción adsorbente de las arcillas. El balance de adsorción y desorción de sales puede explicar los resultados de las arcillas tratadas con Fe y Al (Sdiri et al., 2011), (Zhu et al., 2012) y (Sun et al., 2017). El efecto total tiene varias causas: la adsorción de Fe⁺³ y Al⁺³ en el complejo de intercambio de cationes y el desplazamiento total o parcial de los cationes Ca⁺², Mg⁺², Na⁺ y K⁺ hacia la solución; la formación de complejos entre el Fe, el Al y la arcilla (Vásquez et al., 2014), el Fe, el Al y el biopolímero (Ospina, 2014) y entre el Fe, el Al, la arcilla y el biopolímero (Rakesh et al., 2014) ; la polimerización del Fe y el Al y su adsorción sobre las arcillas, lo que causa su precipitación conjunta (Franco et al., 2016) y la precipitación parcial o total de ambos electrolitos al aumentar el pH.



3.2 Partículas en suspensión y volumen ocupado por el floculado

El efecto de separación y floculación de las partículas de arcilla en suspensiones tratadas con acondicionadores preparados a base de mucílago de cardón dato (CD), se presenta en la tabla VI. Los resultados presentados en la Tabla VI revelan que la menor concentración de partículas floculadas se obtuvo cuando con la dosis de 50 mg L^{-1} de CD, mientras que el mayor volumen de partículas floculadas se obtuvo cuando se combinó el CD a concentración de 50 mg L^{-1} con las soluciones de Fe^{+3} y Al^{+3} a concentraciones de $1,5 \text{ mmol}^+ \text{ L}^{-1}$.

Tabla 6. Efecto de las soluciones de tratamiento sobre la concentración de partículas en suspensión (CPS) y volumen de partículas floculadas (VPF) en el primer experimento.

Cardón Dato CD	Fe^{+3}	Al^{+3}	Concentración de partículas en suspensión	Volumen del floculado
50 mg L^{-1}	$\text{mmol}^+ \text{ L}^{-1}$	$\text{mmol}^+ \text{ L}^{-1}$	mg L^{-1}	cm^3
0	0	0	1,24 a	10,11 g
0	3	0	0,07 cd	11,22 f
0	0	3	0,26 b	12,08 e
0	1,5	1,5	0,14 c	12,41 e
50	0	1,5	0,10 c	16,64 b
50	1,5	1,5	0,09 c	19,16 a
50	1,5	0	0,08 cd	15,36 c
50	0	0	0,01d	13,70 d

La menor concentración de partículas en las suspensiones que contienen hierro y aluminio con respecto al control de agua destilada se explica porque la alta concentración de electrolitos comprime la doble capa difusa, lo que disminuye las fuerzas de repulsión entre las partículas y permite su acercamiento para flocular en agregados tipo castillo de naipes (Martinez et al., 2015). La adición de mucílago de CD50 afecta por su unión directa con las arcillas o a través de puentes metálicos en presencia de cationes polivalentes. La interacción del CD50 con los electrolitos disminuye la eficacia de los polímeros naturales y de los electrolitos en cuanto a la clarificación de las suspensiones porque gran parte de las cargas se anulan, disminuyendo los puntos de adsorción sobre el polímero y la concentración del electrolito en la solución (Freitas et al., 2015). Esta explicación concuerda con la disminución de la CE de la suspensión en



relación a la de solución. La disminución de la CE de la suspensión también es consecuencia de la interacción de la arcilla con los electrolitos. La menor concentración de partículas en suspensión en el tratamiento Fe (3) con respecto al tratamiento Al (3) se atribuye a la adsorción preferente del hierro por parte de la caolinita (Barros et al., 2016) y a la polimerización rápida de los complejos de aluminio.

Cuando se compararon el efecto de las soluciones del cardón dato e Fe+3 y Al+3 que presentaron los valores más bajos de CPS y los más altos de VPF con relación a una poliacrilamida anionica comercial (PAM). En la tabla VII se observa que el efecto de clarificación de las dispersiones coloidales al aplicar el mucílago de cardón dato CD aumentó con la dosis, siendo la dosis de 50 mg L-1 la que tuvo un efecto similar al obtenido con la PAM en dosis de 10 mg L-1. El volumen de partículas floculadas fue superior cuando se aumentó la concentración de cardón dato, resultados similares se encontró cuando se combinaron las soluciones de CD con Fe+3 y Al+3, lo cual confirma lo encontrado por (Trujillo et al., 2014) para la PAM cuando evaluó la interacción de la misma con soluciones de Fe+3 y Al+3, al compararlo con biopolímeros naturales.

Tabla 7. Efecto de diferentes dosis y combinaciones de tratamiento sobre las suspensiones de arcilla en el segundo experimento.

Tratamiento	Concentración de partículas en suspensión mg L ⁻¹	Volumen floculado de partículas cm ³
Agua destilada	1,24 a	10,11 e
CD (50 mg L ⁻¹)	0,01 d	13,70 b
CD (50 mg L ⁻¹) Fe ⁺³ (1,5 mmol ⁺ L ⁻¹) Al ⁺³ (1,5 mmol ⁺ L ⁻¹)	0,09 bc	19,16 a
CD (30 mg L ⁻¹)	0,10 bc	12,96 c
CD (10 mg L ⁻¹)	0,14 b	11,14 d
CD (5 mg L ⁻¹) Fe ⁺³ (1,5 mmol ⁺ L ⁻¹)	0,05 cd	12,34 c



Al^{+3} (1,5 mmol ⁺ L ⁻¹)		
PAM (10 mg L ⁻¹)	0,01 d	12,82 c

CPS: concentración de partículas en suspensión; VPF: volumen de partículas floculadas

La clarificación de las suspensiones ocurrió por la reducción en la concentración de las partículas de suspensión (CPS), todos los tratamientos evaluados redujeron la concentración de partículas en suspensión respecto al tratamiento control con agua destilada; el tratamiento más efectivo en dicha reducción fue el CD a la dosis de 50 mg L⁻¹ cuyo efecto fue similar al de la poliacrilamida aniónica PAM a la dosis de 10 mg L⁻¹; el tratamiento con Al⁺³ a la dosis de 3 mmol L⁻¹ fue el menos efectivo como clarificador de la suspensión.

En relación con el potencial de floculación el tratamiento CD a la dosis de 50 mg L⁻¹ fue el que presentó el mayor volumen de partículas floculadas (VPF), el efecto de floculación se vio potenciado cuando los tratamientos fueron combinados con hierro y aluminio, lo que confirma lo encontrado por (Herrera et al., 2015) que encontró un mayor floculado cuando las PAM fueron mezcladas con soluciones de Fe⁺³ y Al⁺³.

La mayor eficacia del CD50 para flocular las partículas en suspensión se debe a que el mucílago de CD tiene una estructura tipo pectina (Guzmán et al., 2013) con cadenas de polisacáridos de origen vegetal que se unen para alcanzar un alto peso molecular (> 106 Dalton). El biopolímero está ramificado en el carbono 6 de los monosacáridos, el cual puede ser un grupo carboxílico (-COOH) o estar más o menos metoxilado (-COOCH₃). La densidad de carga de este biopolímero depende de los grupos carboxílicos (-COOH), los grupos alcohólicos (-CHOH) y el grado de hidrólisis de los grupos metoxílicos (-COOCH₃). Esta densidad de carga y su localización permite la interacción con la superficie de las arcillas, bien directamente con los bordes de las partículas cargados positivamente o bien con las caras y los bordes cargados negativamente mediante puentes de cationes de enlace (Bednarek et al., 2014) y (Duffy et al., 2015). La electrocarga en una solución acuosa dependerá principalmente de los grupos polares a base de ácidos urónicos no metoxilados y grupos alcohólicos (Jiang et al., 2015).

La eficacia de la floculación depende del tamaño y características de las macromoléculas, en cuya formación intervienen los enlaces cruzados tipo quelato entre un catión divalente o trivalente actuando como grupo central y varios grupos funcionales carboxílicos de las cadenas contiguas de polisacáridos (Yan et al., 2014) y (Lentz et al., 2015). La interacción entre la macromolécula orgánica y la arcilla mediante enlaces cruzados, actuando los cationes divalentes y trivalentes como puentes iónicos, origina grandes flóculos que sedimentan y se separan de



la fase acuosa (Panda et al., 2013), (Okaiyeto et al., 2014) y (Jia et al., 2016).

El menor volumen de floculado en los tratamientos de Fe^{+3} y Al^{+3} respecto al resto de los tratamientos puede atribuirse a su depósito sobre la superficie de las partículas, recubriéndolas y reduciendo su carácter hidrofílico (Mamani et al., 2013) y al tipo de unión cara-cara que debe predominar. El mayor volumen de floculación respecto al control puede atribuirse a la formación de flóculos de mayor tamaño (Fuentes et al., 2011). El radio iónico del Fe^{+3} es mayor que el del Al^{+3} (Zhao et al., 2011), lo que explica la diferencia del volumen floculado entre tratamientos con Fe^{+3} y Al^{+3} . Según (Chen et al., 2015) un mayor radio iónico supone menor energía de hidratación. Los óxidos e hidróxidos de Fe adsorbidos bloquean las cargas negativas de la superficie de las partículas de arcilla y disminuyen su retención de agua, según lo comprobado por (Regelink et al., 2015) en montmorillonitas.

El mayor volumen de floculado con CD50 respecto a Fe^{+3} , Al^{+3} y FeAl_3 puede deberse al tamaño de las macromoléculas del biopolímero y a su higroscopicidad. La fijación de agua alrededor de las moléculas supone una disminución del poder aislante de los dipolos de agua libre (Regelink et al., 2015) y (Fuentes et al., 2014), lo que supone un gran poder clarificador de la suspensión y a la vez el aumento del volumen ocupado por el floculado. La formación de complejos de esfera externa explica también el comportamiento de los tratamientos combinados con CD a una concentración de 50 mg L^{-1} con soluciones de Fe^{+3} y Al^{+3} a concentraciones de 1,5 y 1.5 y $3 \text{ mmol}^+ \text{ L}^{-1}$ respectivamente. En estos casos, los grupos aniónicos del polímero interactúan con la arcilla, enlazándolos mediante un catión intercambiable con moléculas de agua interpuestas. Los cationes metálicos polivalentes propician la unión de cadenas de polisacáridos para formar moléculas muy grandes y con menos sitios de intercambio en su estructura, por lo que interactúan menos con las partículas de arcilla. En consecuencia, el CD50 combinado con Fe^{+3} o Al^{+3} es menos eficaz en la floculación de las partículas que el CD50 sólo, aunque el grado de imbibición determine un volumen mayor del floculado. En este sentido, ambos índices: el de concentración de partículas en suspensión (CPS) que define la clarificación de la suspensión y el de volumen ocupado por el floculado son necesarios para definir el comportamiento de un tratamiento acondicionador.

El mejoramiento de la floculación y por ende la reducción de partículas en suspensión debido a la aplicación de biopolímeros naturales a base de mucilago de cactácea es una alternativa válida en Venezuela debido a su bajo costo e inocuidad, autores como (Fuentes et al., 2014) ha reportado que el empleo a gran escala de sales de hierro y polímeros sintéticos ha estado correlacionado con enfermedades neurológicas como el mal de Alzheimer, así mismo el uso de estos



biopolímeros podría emplearse para la biorremediación de aguas contaminadas con metales pesados, dada su alta capacidad para formar complejos con iones metálicos, lo cual constituye una alternativa para la recuperación de suelos y aguas contaminadas, sobre todos en las regiones mineras e industriales venezolanas.

4. CONCLUSIONES

La aplicación del mucílago de cardón dato CD presenta una eficiencia similar a la de la poliacrilamida anionica (PAM) en la clarificación de la suspensión, por lo cual puede ser empleado para la purificación de agua y tratamiento de suelos contaminados, su utilización disminuye los costos y los riesgos ecotoxicológicos por tratarse un biopolímero natural.

La clarificación de la suspensión se incrementó con el aumento de la dosis, pero no el volumen de floculación, debido a la higroscopicidad del CD, mientras que el uso de acondicionadores a base de Fe^{+3} y Al^{+3} al combinarse con CD no mejoraron la clarificación de las suspensiones, pero sí tuvieron un efecto positivo el volumen de floculado, lo cual favorece la aireación y permeabilidad del suelo.

Dado la gran capacidad de los biopolímeros naturales para formar complejos con metales, su utilización podría emplearse tanto para la purificación de aguas contaminados como para la remoción de metales pesados producto de actividades mineras e industriales, constituyendo una alternativa ecológica y de bajo costo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo de Desarrollo científico y Tecnológico de la UCLA (CDCHT) y el vicerrectorado académico de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) por el aporte financiero para la realización de este trabajo y a Gregorio Cabello y Alfredo Mateo por el apoyo técnico logístico en la fase experimental.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arcila H.; Peralta J. (2016). Agentes naturales como alternativa para el tratamiento del agua. Revista Facultad de Ciencias Básicas 11(2): 136-153. DOI:10.18359/rfcb.1303

Barros M.; Bustamante P.; Bustamante M. (2016). Blanqueo de caolín por medio de lixiviación en pilas con ácido oxálico. Respuestas 21(1): 65-76.

Bednarek M.; Basko M.; Biedroń T.; Kubisa P.; Pluta M. (2014). Aggregation of

Revista INNOCIEN: <https://innovacientifica.com/index.php/ict/index>
Volumen 1 Número 1 septiembre - octubre (2023)
ISSN XXXX-XXXX



- polylactide with carboxyl groups at one chain end in the presence of metal cations. *Polymer Bulletin* 71(8):1891-1907. DOI: 10.1007/s00289-014-1162-x
- Belbahoul M.; Zouhri A.; Anouar A. (2015). Biofloculants extraction from Cactaceae and their application in treatment of water and wastewater. *Journal of Water Process Engineering* 7: 306-313. DOI:10.1016/j.jwpe
- Bouaziz M.; Rassaoui R.; Besbes S. (2014). Chemical composition, functional properties, and effect of inulin from tunisian *Agave americana* L. leaves on textural qualities of pectin gel. *Journal of Chemistry* (1):1- DOI:10.1155/2014/758697
- Chen W.; Zheng H.; Teng H.; Wang Y.; Zhang Y.; Zhao C.; Liao Y. (2015). Enhanced Coagulation-Flocculation Performance of Iron-Based Coagulants: Effects of PO₄³⁻ and SiO₂-Modifiers. *PloS one* 10(9) e0137116. DOI:10.1371/journal.pone.0137116
- Contreras Karen.; Mendoza, Y.; Salcedo J.; Olivero R.; Mendoza G.(2015). El Nopal (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementario en la clarificación de agua. *Producción + Limpia* 10(1):40-50.
- Da Costa C.; Crusciol C. (2016). Long-term effects of lime and phosphogypsum application on tropical no-till soybean–oat–sorghum rotation and soil chemical properties. *European Journal of Agronomy* 74: 119-132. DOI: 10.1016/j.eja
- Duffy C.; David L.; Crouzier T. (2015). Covalently-crosslinked mucin biopolymer hydrogels for sustained drug delivery. *Acta biomaterialia* 20: 51-59. DOI: 10.1016/j.actbio.2015.03.024
- Espitia P.; Du W.; De Jesús R.; Soares N.; McHugh T. (2014). Edible films from pectin: Physical-mechanical and antimicrobial properties-A review. *Food Hydrocolloids* 35:287-296. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2013.06.005
- Franco F.; Benítez M.; Gonzalez I.; Pérez R.; Assiego C.; Cifuentes J.; Pascual J. (2016). Low-cost aluminum and iron oxides supported on dioctahedral and trioctahedral smectites: A comparative study of the effectiveness on the heavy metal adsorption from water. *Applied Clay Science* 119: 321-332. DOI: 10.1016/j.clay.2015.10.035
- Freitas T.; Oliveira, V.; De Souza M.; Geraldino H.; Almeida V.; Fávoro S.; García J. (2015). Optimization of coagulation-flocculation process for treatment of industrial textile wastewater using okra (*A. esculentus*) mucilage as natural coagulant. *Industrial Crops and Products* 76: 538-544. DOI: 10.1016/j.indcrop.2015.06.027
- Frenkel H.; Fey M.; Levy G. (1992). Organic and inorganic anion effects on reference and soil critical flocculation concentration. *Soil Sc. Soc. Am. J.*



- 56: 1762-1766. DOI:10.2136/sssaj1992.03615995005600060018x
- Fuentes L.; Mendoza I.; López A.; Castro M.; Urdaneta, C. (2011). Efectividad de un coagulante extraído de *Stenocereus griseus* (Haw.) Buxb. En la potabilización del agua. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad de Zulia* 34 (1): 48-56.
- Fuentes L.; Mendoza I.; Díaz P.; Fernández Y.; Zambrano Á.; Villegas Z. (2014). Potencial coagulante de la tuna opuntia cochinellifera (L.) mill. (cactácea) en aguas para consumo humano. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas* 46(2):173-187.
- Guzmán L.; Villabona A.; Tejada C.; García R. (2013). Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: una revisión. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* 16(1): 253-262.
- Harris M.; Rengasamy P. (2016). Aggregation of Sodic Subsoils Using Gypsum and Decomposable Phyto-organics: Interactions and Implications for Bauxite Red Muds. In *Geobiotechnological Solutions to Anthropogenic Disturbances* (pp. 227-255). Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-30465-69
- Henríquez M.; Montero F.; Rodríguez O. (2000). Efecto de diferentes suspensiones de cardón Lefaría, cardón dato y PAM sobre algunas propiedades físicas de un suelo de Quíbor. *Revista. Facultad. Agronomía. LUZ.* 17(4):295-306.
- Henríquez M.; Rodríguez O.; Montero F. (2003). Efecto de acondicionadores naturales y sintéticos sobre los cationes solubles y la infiltración del agua en un Aridisol. *Revista Pesquisa agropecuária Brasil* 38 (2):311-316. DOI: 10.1590/S0100-204X2003000200019
- Henríquez M.; Pérez J.; Gascó J.; Rodríguez O.; Prieto A. (2009). Caracterización bioquímica preliminar de los principales componentes del mucílago del Cardón dato. *Revista UNELLEZ de Ciencia y Tecnología* 27:95-102
- Herrera L.; Flores P.; Mejías P.; Vargas L.; Cárdenas C.; Araujo I.; Delgado J. (2015). Tratamiento de aguas residuales domésticas para su potencial reutilización industrial. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas* 48(2):101-114.
- Jia Q.; Song C.; Li H.; Zhang Z.; Liu H.; Yu Y.; Wang T. (2016). Synthesis of strongly cationic hydrophobic polyquaternium flocculants to enhance removal of water-soluble dyes in wastewater. *Research on Chemical Intermediates*: 1-19. DOI:10.1007/s11164-016-2832-0
- Jiang Z.; Liu Y.; Zeng G.; Xu W.; Zheng B.; Tan X.; Wang S. (2015). Adsorption of hexavalent chromium by polyacrylonitrile (PAN)-based activated carbon fibers from aqueous solution. *RSC Advances* 5(32): 25389-25397. DOI:



- 10.1039/C5RA01844G.
- Kargar M.; Suresh, R.; Legrand M., Jutras P.; Clark O.; Prasher S. (2017). Reduction in Water Stress for Tree Saplings Using Hydrogels in Soil. *Journal of Geoscience and Environment Protection*: 5(1): 27-39. DOI: 10.4236/gep.2017.51002
- Lee B.; Schlautman M. (2015). Effects of Polymer Molecular Weight on Adsorption and Flocculation in Aqueous Kaolinite Suspensions Dosed with Nonionic Polyacrylamides. *Water* 7(11): 5896-5909. DOI:10.3390/w7115896
- Lameda P.; Negrelli C.; Hidalgo C.; Fuentes L. (2015). Clarificación de aguas de baja turbidez empleando el coagulante *Opuntia ficus-indica*. *REDIELUZ4*(1):44-48.
- Lentz R. (2015). Polyacrylamide and biopolymer effects on flocculation, aggregate stability, and water seepage in a silt loam. *Geoderma* 241: 289-294. DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.11.019
- Luo J.; Wang L.; Li Q.; Zhang Q.; He B.; Wang Y.; Li S. (2015). Improvement of hard saline-sodic soils using polymeric aluminum ferric sulfate (PAFS). *Soil and Tillage Research* 149: 12-20. DOI 10.1016/j.still.2014.12.014
- Mamani J.; Chamorro R. (2013). Polielectrolitos orgánicos naturales en el tratamiento de agua para consumo humano. *Revista de investigación universitaria* 2(2):69-74.
- Martinez K.; Lázaro J.; Caballero E. (2015). Dispersantes químicos y cuantificación de fracciones texturales por los métodos Bouyoucos y pipeta. *Acta Agronómica* 64(4):293-300. DOI: 10.15446/acag.v64n4.45722
- Muñoz J.; Quintero R.; Pérez J.; Valdés E.; Garcia B.; Rojas M. (2015). Comportamiento de la actividad enzimática del suelo al aplicar mucílago de nopal (*Opuntia* spp.). *Terra Latinoamericana* 33: 161-167
- Okaiyeto K.; Nwodo U.; Mabinya L.; Okoh A. (2014). Evaluation of the flocculation potential and characterization of bioflocculant produced by *Micrococcus* sp. *Leo. Applied biochemistry and microbiology* 50(6):601-608. DOI:10.1134/S000368381406012X
- Olivero R.; Mercado I.; Montes L. (2013). Remoción de la turbidez del agua del río Magdalena usando el mucílago del nopal *Opuntia ficus-indica*. *Producción + Limpia* 8(1): 19-27.
- Ospina S. (2015). Biopolímeros y su aplicación en medio ambiente. *Revista Colombiana de biotecnología* 17 (2): 5-6. DOI: 10.544/rev.colon.biote.v17n2.542.95
- Panda L.; Banerjee P.; Biswal S.; Venugopal R.; Mandre N. (2013). Performance



- evaluation for selectivity of the flocculant on hematite in selective flocculation. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials* 20(12): 1123-1129. DOI:10.1007/s12613-013-0844-y
- Pardo T.; Clemente R.; Alvarenga P.; Bernal M. (2014). Efficiency of soil organic and inorganic amendments on the remediation of a contaminated mine soil: II. Biological and ecotoxicological evaluation. *Chemosphere* 107:101-108. DOI:10.1016/j
- Parra Y.; Cedeño M.; García M.; Mendoza I.; González Y.; Fuentes L. (2011). Clarificación de aguas de alta turbidez empleando el mucílago de *Opuntia Wentiana* (Britton & Rose) / (Cactaceae). *Redieluz* 1 (1): 27-33
- Rakesh S.; Saxena S.; Dhar D.; Prasanna R.; Saxena, A. (2014). Comparative evaluation of inorganic and organic amendments for their flocculation efficiency of selected microalgae. *Journal of applied phycology* 26(1): 399-406. DOI: 10.1007/s10811-013-0114-4
- Regelink I.; Stoof C.; Rousseva S.; Weng L.; Lair G.; Kram P.; Comans R. (2015). Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties. *Geoderma* 247, 24-37. DOI: 10.1016/j.geoderma.2015.01.022
- Sadeghi S.; Gholami L.; Homae M.; Darvishan A. (2015). Reducing sediment concentration and soil loss using organic and inorganic amendments at plot scale. *Solid Earth* 6(2): 445-455. DOI:10.5194/se-6-445-2015
- Sdiri A.; Higashi T.; Hatta T.; Jamoussi F.; Tase N. (2011). Evaluating the adsorptive capacity of montmorillonitic and calcareous clays on the removal of several heavy metals in aqueous systems. *Chemical Engineering Journal*, 172(1): 37-46. DOI: 10.1016/j.cej.2011.05.015
- Sojka R.; Bjorneberg D.; Entry J.; Lentz R.; Orts W. (2007). Polyacrylamide in agriculture and environmental land management. *Advances in Agronomy* 92: 75-162. DOI:10.1016/S0065-2113(04)92002-0
- Sun Y.; Zhu C.; Zheng H.; Sun W.; Xu Y.; Xiao X.; Liu C. (2017). Characterization and coagulation behavior of polymeric aluminum ferric silicate for high-concentration oily wastewater treatment. *Chemical Engineering Research and Design* 119:23-32. DOI: 10.1016/j.cherd.2017.01.009
- Torres D.; Mogollón J.; Lázaro Y.; González M.; López M.; Yendís H. (2015). Uso de acondicionadores orgánicos y biopolímeros para Biorremediación de suelos salinos-sódicos de la llanura de Coro, Falcón, Venezuela. *Revista Unellez Ciencia y Tecnología* 33: 36-45.
- Trujillo D.; Duque L.; Arcila J.; Rincón A, Pacheco S.; Herrera, O. (2014). Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano. *Revista ION*, 27(1), 17-34



- Vásquez J.; Macías F.; Menjivar J. (2014). Formas de hierro y aluminio en suelos con diferentes usos en la zona norte del departamento del Magdalena, Colombia. *Acta Agronómica* 63(4): 352-360. DOI: 10.15446/acag.v63n4.42038
- Villabona Á.; Paz I.; García J. (2013). Caracterización de la *Opuntia ficus-indica* para su uso como coagulante natural. *Revista Colombiana de Biotecnología* 15(1): 137-144.
- Yan X.; Zhang X. (2014). Interactive effects of clay and polyacrylamide properties on flocculation of pure and subsoil clays. *Soil Research* 52(7): 727-737. DOI: 10.1071/SR14106
- Yazdanpanah N.; Mahmoodabadi M.; Cerdà A. (2016). The impact of organic amendments on soil hydrology, structure and microbial respiration in semiarid lands. *Geoderma* 266: 58-65. DOI:10.1016/j
- Zhao Y.; Gao B; Shon H.; Cao B.; Kim J. (2011). Coagulation characteristics of titanium (Ti) salt coagulant compared with aluminum (Al) and iron (Fe) salts. *Journal of hazardous materials* 185(2): 1536-1542. DOI:10.1016/j.jhazmat.2010.10.084
- Zhu G.; Zheng H.; Chen W.; Fan W.; Zhang P.; Tshukudu, T. (2012). Preparation of a composite coagulant: Polymeric aluminum ferric sulfate (PAFS) for wastewater treatment. *Desalination* 285: 315-323. DOI: 10.1016/j.desal.2011.10.019