

Empleo de semillas de *Moringa oleífera* en el tratamiento de residuales líquidos

Maylín Rondón Macías e-mail: maylin91@quimica.cujae.edu.cu

Yosvany Díaz Domínguez e-mail: ydiaz@quimica.cujae.edu.cu

Susana Rodríguez Muñoz e-mail: susana@quimica.cujae.edu.cu

Beatriz Guerra Álvarez e-mail: beatrizg@quimica.cujae.edu.cu

Elina Fernández Santana email: elina@quimica.cujae.edu.cu

Danger Tabio García email: dangerss@quimica.cujae.edu.cu

Fac. Ing. Química. Univ. Tecnol. de La Habana José A. Echeverría (Cujae), La Habana.

RESUMEN

El tratamiento de residuales líquidos es prioridad para el sistema de salud en Cuba. Los altos precios de los coagulantes químicos y la escasez de materias primas para producirlos nacionalmente propician el empleo de las semillas de la especie vegetal *Moringa oleífera* como alternativa para la sustitución de coagulantes químicos. En este trabajo se utilizó el residuo después de la extracción de aceite para el tratamiento de agua residual de una planta municipal, determinando parámetros indicadores de calidad de los residuales líquidos. La demanda química de oxígeno obtenida fue de 80 mg/L con una dosis de coagulante de 69,70 mg/L, lográndose una reducción superior al 90 %. Se analizó el contenido de sólidos, dureza, alcalinidad y fósforo. Con la utilización del producto evaluado se obtuvieron ventajas ambientales, económicas y sociales.

Palabras clave: coagulantes, semillas de *Moringa oleífera*, tratamiento de residuales líquidos.

Use of *Moringa oleifera* seeds in the wastewater treatment

ABSTRACT

The treatment of liquid wastes is a key priority in the Cuban healthcare system. The high international prices of the chemical coagulants and the shortage of raw materials to produce it nationally propitiate the employment of vegetable species seeds, as *Moringa oleifera*, as an alternative in the substitution of chemical coagulants. In this work the residue after oil extraction is used for the wastewater treatment in a municipal plant, determining indicative parameters of the residual water quality. The chemical demand of oxygen obtained was 80 mg/L with a dose of clotting of 69,70 mg/L, reaching a reduction higher than 90%. The content of solids, hardness, alkalinity and phosphorus were analyzed. Environmental, economic and social advantages were obtained with the use of the evaluated product.

Keywords: coagulants, *Moringa oleifera* seeds, wastewater treatment.

INTRODUCCIÓN

Los coagulantes naturales son sustancias solubles en agua, de origen vegetal o animal, que actúan de modo similar a los coagulantes sintéticos, aglomerando las partículas en suspensión que contiene el agua cruda, facilitando su sedimentación. Algunos poseen propiedades antimicrobianas. Su origen natural, garantiza la inocuidad para el ser humano y la biodegradabilidad de los lodos producidos, permitiendo su utilización en la agricultura. Existen coagulantes de origen vegetal que tradicionalmente se han utilizado en África subsahariana, la India y América del Sur; entre ellos se encuentran: las semillas de almendra, albaricoque, melocotón, *Cactus opuntia*, legumbres, guisantes, lentejas, nueces y *Moringa oleífera*. Esta última, la más conocida y recomendada; no es tóxica, no afecta el pH, ni la conductividad del agua, y el lodo producido por la coagulación es inocuo y poco voluminoso. Se utiliza para la purificación de agua y constituye una opción económicamente atractiva para los países en vías de desarrollo como Cuba, teniendo en cuenta el alto costo de muchos coagulantes químicos, y que las cantidades disponibles no cubren la demanda de la sociedad y la industria (Martín et al. 2013), (Castillo y Gómez 2011).

En años recientes ha existido un aumento en el interés de desarrollar coagulantes naturales alternativos, como el que se puede extraer de las semillas de Moringa oleífera. Investigaciones realizadas demuestran que los coagulantes naturales de origen vegetal y mineral han sido usados en el tratamiento de aguas antes del advenimiento de productos químicos sintéticos como las sales de aluminio y férricas. La utilización de productos de origen natural es segura y barata, siendo posible su amplia utilización en el tratamiento de aguas, lo que trae beneficios económicos para los países productores, además de constituir una alternativa medioambiental. Se ha verificado que los componentes activos de las semillas de Moringa son proteínas catiónicas. Se sugiere que el mecanismo predominante de coagulación sea el de adsorción y neutralización de cargas. Se ha verificado que el lodo generado no es tóxico y presenta un volumen considerablemente menor que el producido por los coagulantes tradicionalmente empleados a nivel mundial. Diversos investigadores afirman la presencia de propiedades bactericidas en estas semillas.

Investigadores cubanos reportan el empleo de la semilla de Moringa oleífera Lam de origen cubano y obtuvieron que con una dosis del coagulante de 60 y 70 mg/L, se logra reducir en las condiciones de agua cruda de altas y medianas turbiedades, más del 90 % de la turbiedad inicial y el 70 % del color. Se observa una reducción significativa (>60 %) de la materia orgánica presente en el agua cruda inicial. Los resultados de la demanda química de oxígeno (DQO) son en todos los casos inferiores a los reportados en la norma cubana de descarga de aguas residuales a cuerpos receptores (NC 27-2012). Con el producto natural se logra la reducción de metales pesados (Fe^{2+} , Al^{3+} , Mn^{2+}).

La torta tiene varios usos, puede utilizarse como fertilizante de suelo o para tratar aguas turbias, debido entre otros factores a su alto contenido de nitrógeno (Rodríguez et al. 2005). A estos estudios se le suman otros trabajos realizados por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), donde se ha demostrado la buena eficiencia de la Moringa oleífera Lam en la reducción de turbidez y el color (Mas et al. 2011).

Los sulfatos de aluminio y de hierro son los coagulantes químicos que más se utilizan en Cuba, y por problemas económicos no están disponibles para su empleo en todo el territorio nacional. El sulfato de aluminio se obtiene en el país a partir del ácido sulfúrico de producción nacional y del hidróxido de aluminio que se importa, pero en ocasiones se ha visto afectada la adquisición de este producto. La producción actual de este coagulante químico no satisface la demanda total, y es utilizada fundamentalmente en los acueductos de las ciudades, dejando a los sistemas de abastecimiento de agua de pequeñas comunidades con déficit de este producto (Rodríguez et al. 2005)

Actualmente en Cuba se establecen alianzas interinstitucionales e intersectoriales destinadas a fomentar la producción, uso y consumo racional de la Moringa oleífera (Bonafant 2012). El Ministerio de la Agricultura ha tomado interés en diseminar y emplearla, por lo que desarrolla el programa nacional de la "Siembra del cultivo de la Moringa". Evalúan ventajas como son: elevada velocidad de crecimiento y producción de biomasa, su facilidad de cultivo, su capacidad de aceptar de forma sistemática grandes podas y su rusticidad en cuanto a soportar sequías o adaptación a tipos de suelos áridos. En la actualidad el cultivo se ha extendido a varias provincias del país. Camagüey tiene sembradas más de 170 hectáreas y recolectadas más de una tonelada de semillas (García et al. 2013), (Hernández 2012).

Los usos reconocidos a nivel internacional de la Moringa oleífera son varios, entre los que se encuentra la alimentación animal, purificación de agua, medicinal y la obtención de aceites. De este último uso queda un residuo al que se le da utilidad en el presente trabajo, que tiene como objetivo, emplear la torta residual obtenida de la extracción del aceite de las semillas de Moringa oleífera como coagulante de origen natural para el tratamiento de residuales líquidos, debido a los elevados precios de los coagulantes químicos existentes. Es importante resaltar que se le da utilidad a un residuo, lo cual añade valor ambiental y económico a los resultados obtenidos.

CARACTERIZACIÓN DEL COAGULANTE

Se emplea una torta obtenida como residuo de la extracción del aceite de semillas de Moringa oleífera Lam variedad Plain procedente de "La Pradera", Centro Internacional de Salud ubicado en 230 y 15, Siboney, La Habana, Cuba.

La fecha de siembra de las semillas data del 9 de agosto del 2011 y la de cosecha el 14 de junio del 2012. Durante el proceso de extracción sólido-líquido se emplea el solvente hexano ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}_3$) con un punto de ebullición de $68,7^\circ\text{C}$, gravedad específica igual a 0,659 y una pureza de 99 %.

Contenido de nitrógeno, proteína, humedad y peso volumétrico en el coagulante

Varios estudios han demostrado que el principio activo de la Moringa se encuentra en las proteínas que contiene. Las proteínas están formadas por aminoácidos, compuestos nitrogenados que contienen carbono, hidrógeno, oxígeno, azufre, fósforo, hierro, cobre, entre otros. La tabla 1 muestra los resultados obtenidos en la torta residual para los parámetros analizados según los métodos normalizados para el análisis de aguas totales y residuales que se muestran en la bibliografía consultada (Díaz de Santos 1992).

El contenido de proteína es más bajo que los reportados en la literatura consultada (Adegbe et al. 2016), no obstante, están presentes en su composición, indicando que el residuo caracterizado tiene propiedades coagulantes (Rodríguez et al. 2005)

Tabla 1. Características del coagulante

Parámetros	Coagulante
Nitrógeno (%)	7,7
Proteína (%)	11,31
Humedad (%)	5,20
Densidad (g/ cm ³)	0,33

Para la determinación del nitrógeno total se sigue el procedimiento descrito en Métodos normalizados para el análisis de aguas totales y residuales (Díaz de Santos 1992). En la técnica el nitrógeno total se expresa en (mg N/L), para esto se trabaja con una solución que contiene 1 gramo de la torta de Moringa utilizada por cada 100 mL de agua destilada. Lo que representaría 77 mg de Nitrógeno por 1 g de torta, lo que representa 7,7 % de N.

El valor promedio de la humedad reportada en la variedad cubana se encuentra entre 5,7 % y 8,9 %. El valor obtenido fue de 5,20 % (Adegbe et al. 2016). La densidad del coagulante es de 330 kg/m³, la cual es menor que la densidad del agua a temperatura ambiente (1 000 kg/m³). Es válido señalar que se desconocen las diferentes sustancias que son extraídas con el solvente y las cantidades que representan, así como la masa del solvente que queda en la torta después de las extracciones, ni si todo el aceite contenido en las semillas de Moringa es extraído durante el proceso de separación líquido-sólido.

Granulometría

Para los análisis de la caracterización física de la muestra de semillas de Moringa se utiliza una granulometría que está 100 % bajo 1,0 mm, en masa húmeda. En la tabla 2 se expone que el tamaño de las partículas que componen la muestra analizada se encuentra en el intervalo aproximado entre 10 y 2 009,68 μm (0,01 y 2,0 mm). El tamaño promedio de partículas es 656,36 μm y la mediana es 673,89 μm . Todas las mediciones se realizaron por triplicado.

El valor de 2 009,68 μm es reportado por el equipo HORIBA LA-950V2, por el procedimiento DME IO-20, realizado en el CIPIMM. A partir del tamiz con tamaño o fracción granulométrica de 2 009,68 μm es que empieza a retenerse las partículas, pero el equipo comenzó a analizar desde la fracción granulométrica de 2 301,84 μm , La tabla 2 son los resultados digitales que reporta el equipo.

Composición química del coagulante

En la tabla 3 se observa la composición en metales del coagulante empleado. La misma se puede deber a la formación de sales o complejos durante el proceso de extracción sólido-líquido. Se concluye que el metal predominante es el sodio y que el coagulante aporta poco contenido de metales y no metales, siendo el fósforo (P) el único no metal analizado en el agua residual.

El ión calcio (Ca^{2+}) forma sales solubles o insolubles, es uno de los componentes que causa dureza total en el agua, responsable de la formación de incrustaciones y participa en la coagulación. No es deseable en el agua, por lo que se trata de eliminar o introducir la menor

cantidad posible de este elemento. El magnesio (Mg^{2+}) forma parte de la dureza total del agua también. Tiene propiedades muy similares al ión calcio, pero sus sales son, en general, más solubles y difíciles de precipitar. El potasio forma sales de solubilidad muy elevada y difícil de precipitar, por lo que es necesario evitarlo. En esta investigación se destaca el hecho de que el contenido de calcio es superior al de magnesio, lo que puede estar influenciado por las características de la variedad de semilla estudiada, las propiedades del suelo y la zona geográfica asociada al cultivo. Para la obtención de estos resultados se utilizó espectrometría de absorción atómica, según el elemento específico y el intervalo del contenido a evaluar.

Tabla 2. Granulometría del coagulante empleado

Fracción granulométrica (μm)	Partículas que pasan por el tamiz (%)	Partículas que quedan en el tamiz (%)	Cantidad de partículas acumuladas (%)
2301,84	100,0	0,0	0,0
1421,09	95,0	5,0	5,0
1242,35	90,0	5,0	10,0
1160,00	86,7	3,3	13,30
1047,37	80,0	6,7	20,0
1000,00	76,8	3,2	23,2
913,87	70,0	6,8	30,0
830,00	63,0	7,0	37,0
795,61	60,0	3,0	40,0
523,60	40,0	20,0	60,0
420,00	34,6	5,4	65,4
319,97	30,0	4,6	70,0
146,86	20,0	10,0	80,0
100,00	15,9	4,1	84,1
54,56	10,0	5,9	90,0
45,00	8,2	1,8	91,8
30,06	5,0	3,2	95,0
10,00	0,1	4,9	99,9
8,81	0,0	0,1	100,0

Tabla 3. Composición de metales-no metales (% másico)

Ca	Cr	Cu	Fe	Mn	Mg	P	K	Zn	Na
0,4400	0,0120	0,0077	0,3400	0,0051	0,2600	0,0210	1,0400	0,0092	1,5700

ANÁLISIS DEL RESIDUAL TRATADO

El residual líquido proviene de una planta de tratamiento municipal.

Prueba de jarras

Para realizar los ensayos de laboratorio, se utilizó un agitador múltiple provisto de seis impelentes, que permite agitar simultáneamente a una velocidad y durante un tiempo determinado, el líquido contenido en una serie de vasos que pueden variar el volumen de agua. En cada una de las pruebas realizadas se comparan los valores del agua residual inicial (A.R.I) con los obtenidos después del proceso de coagulación-floculación-sedimentación (A.R.F). Para analizarlas se calcula la DQO, turbidez y dureza removida mediante la ecuación (1).

$$\text{Reducción (\%)} = \frac{A.R.I - A.R.F}{A.R.I} * 100 \quad (1)$$

Determinación del mejor pH

Para fijar el mejor valor de pH se utilizaron 6 jarras que contenían 600 mL de agua residual cada una. Durante el experimento se mantuvo constante la dosis de coagulante. La solución que se prepara es a 1 %, es decir, 1g de torta de semilla por cada 100 mL de agua destilada. De ella se utilizaron 10 mL en cada jarra que representa una dosis de 100 mg/L, valor intermedio seleccionado entre dosis de 30 a 210 mg/L, dosis mínimas y máximas empleadas en el experimento.

Se introdujo la dosis del coagulante al mismo tiempo en las 6 jarras y de forma rápida se fueron fijando los diferentes pH en cada una de ellas, los cuales fueron de 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12, utilizando ácido sulfúrico e hidróxido de sodio como ácido y base respectivamente.

Para el proceso de coagulación-floculación se estableció un tiempo de agitación rápida (TAR) de 2 minutos a 100 rpm y luego un tiempo de agitación lenta (TAL) de 30 minutos a 35 rpm. Después se sedimenta dejando las jarras en reposo durante 1 hora. Las variables que se analizaron en el sobrenadante para cada valor de pH fueron: dureza total, turbiedad y DQO. Las pruebas de jarras y los análisis se realizaron por triplicado.

Los métodos que se emplean para la determinación de las variables respuestas están normalizados para el análisis de aguas totales y residuales, según la bibliografía consultada. (Díaz de Santos 1992), (NC- 27-2012).

En la tabla 4 se observa que para pH igual a 4, 5, 6 y 7 no hubo reducción de dureza. Esto se debe a que predominan los SO_4^{2-} para los primeros pH y como HCO_3^{1-} es muy soluble para los últimos no precipitan a esos valores de pH. Incluso, la dureza estuvo más alta que la del agua residual.

Después del proceso coagulación-floculación-sedimentación, el agua residual con un pH de 9 es el más transparente y el de 4 es el más turbio, en correspondencia con los valores obtenidos. Hasta pH igual a 9 se observa que ocurre una disminución de todos los parámetros por lo que fue necesario extender el estudio, según tabla 5.

Tabla 4. Reducción de DQO, turbidez y dureza a dosis a diferentes pH

pH	DQO (mg/L)	Reducción (%)	Turbidez (NTU)	Reducción (%)	Dureza (mg/L)	Reducción (%)
4	440	21,43	80,80	14,82	384	0
5	420	25	24,18	74,51	372	0
6	380	32,14	20,81	78,06	352	0
7	120	78,57	38,73	59,17	352	0
8	120	78,57	39,06	58,82	320	5,88
9	80	85,71	0	100	232	31,76
A.R.I	560		94,86		340	

Tabla 5. Reducción de DQO, turbidez y dureza a diferentes pH

pH	DQO (mg/L)	Reducción (%)	Turbidez (NTU)	Reducción (%)	Dureza (mg/L)	Reducción (%)
7	560	53,33	50,46	35,46	332	0
8	400	66,67	46,29	40,79	334	0
9	400	66,67	0	100	204	37,80
10	280	76,67	0	100	52	84,15
11	1160	3,33	0	100	64	80,49
12	1400	-	0	100	44	86,75
A.R.I	1200		78,18		328	

Las diferencias de DQO obtenidas se pueden deber a que las muestras de agua utilizadas no corresponden al mismo día, aunque son muestras integradas recogidas en el mismo horario del día; no obstante, el objetivo del trabajo es identificar el efecto que tiene el coagulante en el agua residual, demostrándose en los resultados que hay reducción de DQO.

En la tabla 5 se muestra el comportamiento de los diferentes pH analizados con la reducción lograda en las variables estudiadas. Se muestra que el mejor pH es 10, debido a que con este se logra eliminar la mayor cantidad de DQO, dureza y turbidez.

Determinación de la mejor dosis de coagulante

Se realizó un diseño experimental empleando el Statgraphics Plus versión 5.1. El diseño experimental Multi Nivel Factorial tiene 3 factores: dosis, TAR y TAL. Se estudiaron tres variables respuestas: DQO, turbidez y dureza total. Los experimentos con una réplica, suman un total de 32 corridas para un diseño $4^1 * 2^2$. Los niveles que se observan en la tabla 6 se establecieron teniendo en cuenta reportes de estudios internacionales y nacionales (Rodríguez et al. 2005).

Para establecer la mejor dosis de la solución de las semillas de Moringa oleífera se preparan dosis a 1 %, luego de la extracción del aceite con el solvente hexano. Mediante las pruebas realizadas a pH constante, velocidad de agitación rápida de 100 rpm, velocidad de agitación lenta de 35 rpm y 1 hora de sedimentación, también se definen los mejores tiempos de agitación rápida y lenta. Las dosis se aplicaron a 6 jarras con 600 mL de agua residual cada uno. Es importante que durante los ensayos el agua tenga una temperatura ambiente de 28°C en todos los experimentos. Estos valores se fijaron utilizando referencias de trabajos anteriores (Rodríguez et al. 2005).

Tabla 6. Dosis, TAR, TAL a los niveles estudiados

Parámetros	Niveles			
	30	90	150	210
Dosis (mg/L)				
TAR (min)	2		3	
TAL (min)	15		30	

En la tabla 7 se observan los resultados obtenidos con la torta residual del proceso de extracción de aceite. En este diseño experimental se estudian tres variables respuestas que son: reducción de DQO, reducción de dureza y reducción de turbidez. En la tabla 8 se observan los valores de la media, desviación estándar y el coeficiente de variación obtenido para las condiciones estudiadas.

Tabla 7. Reducción de DQO, dureza y turbidez con coagulante utilizado en diferentes condiciones

No.	Condiciones			DQO reducida			Dureza reducida			Turbidez reducida		
	Dosis (mg/L)	TAR (min)	TAL (min)	x _i (%)	s	c.v	x _i (%)	s	c.v	x _i (%)	s	c.v
1	30	2	15	37,5	8,0	21,4	84,3	0,4	0,5	12,6	3,9	31,1
2	30	2	30	67,0	1,6	2,4	67,0	1,6	2,4	0	0	0
3	30	3	15	45,1	3,2	7,0	77,1	3	3,9	33,0	1,5	4,5
4	30	3	30	28,5	2,9	10,4	85,6	0	0	26,9	1,1	3,9
5	90	2	15	48,9	8,0	16,5	83,7	0,4	0,5	32,3	24,0	74,3
6	90	2	30	94,3	1,6	1,7	85,8	4,0	4,7	39,6	9,0	22,6
7	90	3	15	81,1	1,5	1,9	86,7	1,4	1,6	55,1	3,7	6,6
8	90	3	30	53,8	1,5	2,7	76,3	0,2	0,3	59,6	0,8	1,4
9	150	2	15	13,6	0	0	82,6	0,1	0,2	62,2	0,3	0,4
10	150	2	30	48,9	8,0	16,5	56,5	1,2	2,1	100	0	0
11	150	3	15	60,0	6,0	10,0	85,8	1,6	1,9	45,5	0,4	1,0
12	150	3	30	44,4	0	0	75	0	0	42,7	2,7	6,4
13	210	2	15	9,2	0,2	1,8	80,2	1,3	1,6	22,2	2,2	9,9
14	210	2	30	0	0	0	37,8	4,4	11,7	100	0	0
15	210	3	15	30,8	3,2	10,3	82,7	2,7	3,3	47,4	0,4	0,9
16	210	3	30	50,7	1,0	1,9	72,8	0,8	1,1	52,6	4,4	8,4

Notas: media (x), desviación estándar (s) y coeficiente de variación (c.v)

Análisis para la variable respuesta reducción de DQO

En la tabla 8 se observa que 4 de los efectos tienen los P-valores inferiores a 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero al 95,0 % de nivel de confianza. El estadístico R-cuadrado indica que el modelo ajustado explica el 74,7281 % de la variabilidad de la reducción de DQO. El estadístico Durbin-Watson (DW) es de 2,1517 (P=0,2670). Puesto que el P-valor es superior a 0,05, no hay indicios de correlación de serie en los residuos, explicando numéricamente la variabilidad de los errores. El DW varía entre 0 y 4, siendo el valor deseado uno cercano al entorno de 2, y esto ocurre cuando el P-valor es mayor que 0,005, como en los casos analizados. El grado de ajuste de este modelo y de los próximos no fue comparado con la literatura por no existir reportes de estudios de este tipo. El análisis estadístico que se muestra en la figura 1 evidencia la influencia significativa que tienen sobre la reducción de DQO las interacciones entre las dosis, entre la dosis y el tiempo de agitación rápida, entre el tiempo de agitación rápido y lento, y la dosis utilizada.

En la figura 2 se evidencia que la superficie respuesta tiene un comportamiento curvilíneo idóneo, es decir, no muestra signo de seguir aumentando en ninguno de los factores analizados. En la figura 3 se aprecia el gráfico de los residuos para la reducción de DQO, en el cual los puntos no siguen una tendencia, lo que demuestra gráficamente la independencia entre los errores. La mejor dosis según el modelo obtenido es 69,7065 mg/L, con un TAR rápido de 2 minutos y un TAL de 30 minutos. La ecuación (2) describe el modelo obtenido para la reducción de la DQO, obviando los factores no significativos.

Tabla 8. Análisis de la varianza

Factores e interacciones	P-valor
A: Dosis	0,0005
B: TAR	0,0800
C: TAL	0,1472
AA	0,0003
AB	0,0007
AC	0,9542
BC	0,0023

para la reducción de DQO

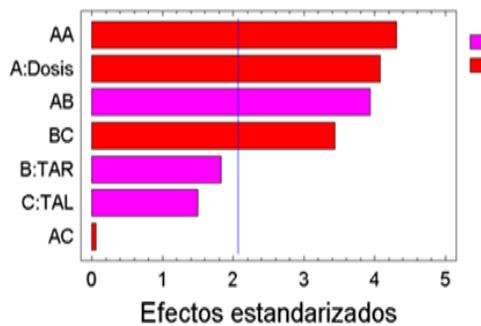


Figura 1. Gráfico de Pareto estandarizado para reducción de DQO

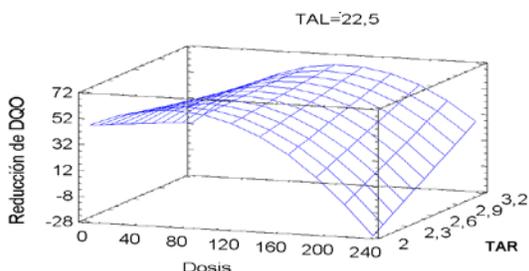


Figura 2. Superficie respuesta estimada

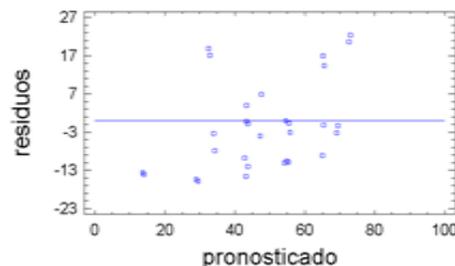


Figura 3. Gráfico de residuos

$$\text{Reducción de DQO} = -8,794 - 0,171 * \text{Dosis} + 16,714 * \text{TAR} + 5,858 * \text{TAL} - 0,003 * \text{Dosis}^2 + 0,300 * \text{Dosis} * \text{TAR} - 2,343 * \text{TAR} * \text{TAL} \quad (2)$$

La ecuación (2) se obtiene eliminando del modelo los parámetros e interacciones no significativas, pero el modelo obtenido es jerárquico y aun cuando se eliminan del análisis los términos no significativos, persisten en la ecuación porque sus interacciones sí son significativas.

Análisis para la reducción de dureza

Los análisis de reducción de dureza se realizaron de igual forma que los realizados para la DQO. Los 7 factores e interacciones analizadas tienen los P-valores inferiores a 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero al 95,0 % de nivel de confianza. El estadístico R-cuadrado indica que el modelo ajustado explica el 80,1886 % de la variabilidad en la reducción de la dureza.

El estadístico DW es 2,4215 (P=0,0815) cercano a 2, rechazando cualquier correlación significativa basada en el orden en el que se suceden en el fichero de datos. Para la variable respuesta dureza la mejor dosis a emplear es 149,736 mg/L y los mejores TAR y TAL son 3 y 15

minutos respectivamente. La ecuación (3) describe el modelo que mejor ajusta a la variable respuesta reducción de dureza.

$$\text{Reducción de dureza} = 136,233 + 0,099*\text{Dosis} - 25,552*\text{TAR} - 2,368*\text{TAL} \\ - 0,001*\text{Dosis}^2 + 0,089*\text{Dosis}*\text{TAR} - 0,009*\text{Dosis}*\text{TAL} + 1,016*\text{TAR}*\text{TAL} \quad (3)$$

Análisis para la reducción de turbidez

Los análisis de reducción de turbidez se realizaron de igual forma que los realizados para la DQO. De los factores e interacciones analizados, 6 tienen los P-valores inferiores a 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero al 95,0 % de nivel de confianza. El factor TAR resulta ser no significativo. El estadístico R-cuadrado indica que el modelo ajustado explica el 77,25 % de la variabilidad en la reducción de la turbidez. El estadístico DW examina los residuos dando un valor de 2,3178 (P=0,1368) determinando, por su proximidad a dos, que no hay correlación significativa. Puesto que el P-valor es superior a 0,05, no hay indicios de correlación de serie en los residuos. La mejor dosis fue de 210 mg/L, con un TAR de 2 minutos y un TAL de 30 minutos. La ecuación (4) es la que mejor describe el modelo obtenido, excluyendo los factores no significativos.

$$\text{Reducción de turbidez} = -160,135 + 1,075*\text{Dosis} + 73,667*\text{TAR} + 3,306*\text{TAL} \\ - 0,002*\text{Dosis}^2 - 0,271*\text{Dosis}*\text{TAR} + 0,018*\text{Dosis}*\text{TAL} + 1,827*\text{TAR}*\text{TAL} \quad (4)$$

El análisis de la reducción de DQO es uno de los parámetros globales de contaminación de las aguas residuales. Está presente en la norma para Límites Máximos Permisibles Promedios para los parámetros de los residuales líquidos (LMPPRL) (NC 27:1999), no siendo así para la dureza y la turbidez. Teniendo en cuenta que con las mejores condiciones de reducción de DQO, se obtienen resultados elevados de reducción de dureza (82- 89 %) y buenos resultados de reducción de turbidez (33- 45 %), se seleccionó para continuar el estudio las mejores condiciones obtenidas del análisis estadístico para la reducción de DQO. Para el proceso en estudio de coagulación-floculación-sedimentación la mejor dosis fue de 69,70 mg/L, con un TAR de 2 minutos y un TAL de 30 minutos. De manera general, al aumentar la dosis a valores superiores de 210 mg/L, los parámetros de calidad del sobrenadante comienzan a afectarse, debido a la presencia en exceso del coagulante natural empleado.

El coagulante de origen natural refleja resultados alentadores. Con este se logra disminuir patrones de contaminación, en condiciones de agua cruda de altas y medianas turbiedades. Se logran valores de 80 % y hasta de 95 % de reducción de la DQO. De dureza el mínimo de reducción logrado fue de 40,91 % y el máximo de 88,64 %. Con respecto a la turbidez, se logra eliminar el 100 % de este parámetro en dos ocasiones, sin embargo, en otras no se logran valores tan elevados, inclusive de 0 %.

Es importante tener en cuenta que durante el diseño experimental predominaron valores de reducción de DQO entre 52 % y 68 %. En el caso de la dureza, además de los constituyentes de las semillas de *Moringa* con sus solventes, está incidiendo el hecho de que el mejor pH sea igual a 10. Existe una gran posibilidad de que se favorezca la formación de hidróxidos de calcio y se desfavorezca la formación de calcio, ocasionando la precipitación de las sales y la disminución de la dureza del agua.

Características del agua residual tratada

En la tabla 9 se muestran los parámetros característicos del residual tratado con 69,70 mg/L del coagulante, con un TAR de 2 minutos y un TAL de 30 minutos.

Tabla 9. Parámetros promedios obtenidos con el A.R.I y el A.R.F

Parámetros	A.R.I	A.R.F
DQO (mg/L)	1 680	80
Conductividad (μ S/cm)	861	944
Alcalinidad (mg/L como CaCO_3)	312	260
DBO_5 (mg/L)	800	60
Dureza (mg/L como CaCO_3)	520	40
Nitrógeno (mg/L)	5,6	14
Fósforo (mg/L)	0,27	0,167 5
Grasas y aceites (mg/L)	23,3	26,4
Turbidez (NTU)	100	39,8
COT (mg/L)	480	32
pH	7,48	10
Índice de Willcombs	0	10

En la tabla 10 se observan los valores promedios de la cantidad de sólidos totales (ST), sólidos totales disueltos (STD), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos totales fijos (STF), sólidos disueltos fijos (SDF), sólidos totales volátiles (STV), sólidos disueltos volátiles (SDV), sólidos suspendidos fijos (SSF) y sólidos suspendidos volátiles (SSV), encontrados en el A.R.I y en el A.R.F. Se utiliza la gravimetría como método de ensayo (Díaz de Santos 1992).

En la misma se muestra que el coagulante logra disminuir sólidos. Comparando este resultado con tratamientos fisico-químicos realizados, en los que se puede llegar a eliminar del 80 al 90 % de los SST, los alcanzados en este estudio se aproximan en gran medida, pues se logra reducir el 75 % de este parámetro, alcanzándose valores similares a los reportados en los tratamientos donde se emplean coagulantes químicos. (Rodríguez et al. 2005)

Tabla 10. Sólidos promedios presentes en el agua residual cruda y tratada

Aguas	ST	STD	SST	STF	SDF	STV	SDV	SSF	SSV
A.R.I (mg/L)	527	291	236	260	148	267	143	112	124
A.R.F(mg/L)	412	353	59	248	189	164	164	59	0

El nivel de contaminación de las aguas residuales se determina a través de parámetros globales, como la DQO. Los valores de la DQO se obtienen por colorimetría. Teniendo en cuenta que el agua residual inicial tiene un valor de 1 680 mg/L, se logra reducir más del 90% . Los valores de DQO del agua residual inicial tenían un valor mínimo de 680 mg/L y máximo de 2 680 mg/L. El valor de DBO_5 (mg/L), es un valor promedio. El valor del agua residual inicial para una $\text{DBO}_5= 800$ mg/L, corresponde a un valor de 1 680 mg/L. En el trabajo se exponen los valores de reducción de DQO (%) con respecto a un valor inicial. Se logran valores de 80 % y hasta de 95 % de reducción. El mejor valor de DQO encontrado es 80 mg/L, el cual supera a los de los tratamientos fisico-químico, en los que se han podido eliminar del 30 al 40 % de la DQO.

El mejor valor es próximo al encontrado en los cotiledones de la *Moringa oleifera* Lam sometidos a la maceración como único tratamiento, donde se logra un resultado de 76,22 mg/L con 89,5 mg/L de dosis a 2 minutos de TAR (Rodríguez et al. 2005). La cantidad de DQO obtenida en el agua tratada cumple con la norma para LMPPRL para vertimientos a las aguas al alcantarillado, la cual establece valores menores de 700 mg/L.

El resultado obtenido cumple con los Límites Máximos Permisibles Promedios (LMPP) para las descargas de aguas residuales, para ríos y embalses con las clases B y C, que admiten valores menores de 90 y 120 mg/L respectivamente; para acuífero vertimiento en el suelo y zona no saturada de 5 m cumple con los parámetros de las tres clases (A, para menores de 90 mg/L, B, para menores de 160 mg/L y C, para menores de 250 mg/L); y para zona de acuífero vertimiento directo a la zona saturada, cumple con las clases B y C, que admiten valores menores de 140 y 250 mg/L respectivamente (NC- 27-2012).

El agua tratada con el coagulante tiene un valor de conductividad de 944 $\mu\text{S}/\text{cm}$, superior al del agua residual sin tratar que es de 861 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Este valor superior puede deberse al contenido de metales que se le agrega al agua residual con la torta de *Moringa* después de la extracción de aceite con hexano. No obstante, este valor obtenido en el agua tratada cumple con la norma para LMPPRL, la cual establece valores menores a 4 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. También cumple con los LMPP para las descargas de aguas residuales para ríos y embalses, acuífero vertimiento en el suelo y zona no saturada de 5 m, y en zona de acuífero vertimiento directo a la zona saturada, que establecen valores entre 1 400 y 4 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Se utiliza el método potenciométrico.

Otro de los parámetros globales analizados es la DBO_5 , utilizando el método de respirometría, lográndose un resultado de 60 mg/L. Desde el punto de vista de la salud pública se encuentra aceptable un agua servida que contiene una DBO inferior a 50 mg/L. El valor obtenido no es inferior, pero sí bastante próximo a 50 mg/L, repercutiendo positivamente en la disminución de la dosificación de cloro o de otros productos químicos que se utilicen para limpiar las aguas.

Es importante recalcar la potencialidad de estas semillas después de la extracción de aceite para la reducción de este importante indicador de contaminación, que se compara con otros tratamientos físico-químicos, donde pueden llegar a eliminarse del 40 al 70 % de la DBO (Rodríguez et al. 2005). La DBO_5 del residual tratado cumple con la norma para LMPPRL, la cual establece valores menores que 300 mg/L. El residual tratado también cumple con los LMPP para las descargas de aguas residuales, para ríos y embalses, con la clase C que admite valores menores o iguales que 60 mg/L; para acuífero vertimiento en el suelo y zona no saturada de 5 m, con la clase B y C; y para acuífero vertimiento directo a la zona saturada, con la clase C (NC - 27-2012).

Para la determinación de la alcalinidad se sigue el procedimiento descrito en "Métodos normalizados para el análisis de aguas totales y residuales". En la técnica la alcalinidad se expresa en mg/L como CaCO_3 . La alcalinidad es comúnmente identificada como la capacidad para neutralizar ácidos. En el agua está dada por sustancias contenidas en ellas como hidrogenocarbonatos, carbonatos e hidróxidos. Se determina mediante la valoración con un ácido fuerte (ácido sulfúrico) de concentración conocida y empleando como indicador la fenoftaleína.

Con la torta residual obtenida después de extraerle el aceite con hexano, se logra una alcalinidad de 260 mg /L como CaCO_3 . Teniendo en cuenta que el agua cruda presentaba un valor de 312 mg /L como CaCO_3 , se logra una reducción de este parámetro de 16,67 %. Los resultados obtenidos pueden estar asociados con los valores de pH. La alcalinidad del ARI a $\text{pH} = 7,48$ es debida al $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ o de $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ y la del ARF a $\text{pH} = 10$ es debido a la presencia de OH^- . Con este último valor de pH prácticamente todo el Ca debe estar precipitado como CaCO_3 y el Mg como $\text{Mg}(\text{OH})_2$ y por eso ocurre una reducción de este parámetro.

La dureza obtenida después del proceso de coagulación-floculación-sedimentación fue de 40 mg/L. Con respecto a este parámetro se alcanzan excelentes resultados pues la dureza inicial del agua residual era de valores que llegaban a los 520 mg/L. En el momento de comentar sobre este parámetro en particular, no se puede perder de vista la influencia directa del mejor pH ajustado, teniendo en cuenta la explicación del párrafo anterior. En la NC 422-2006 el límite máximo admisible es de 400 mg/L, y el coagulante cumple con creces esta exigencia.

El nitrógeno del agua tratada fue de 14 mg/L. El contenido de este parámetro aumentó en 2,5 veces en comparación con el encontrado inicialmente en el agua cruda, debido al aporte que le hace la torta que contiene alto contenido de nitrógeno. El nitrógeno, como nutriente, es la causa de un crecimiento excesivo de organismos acuáticos que consumen oxígeno y excretan sustancias que causan mal olor y sabor, por lo que no es conveniente el aumento de este parámetro.

Cuando las bacterias anaerobias degradan la materia orgánica presente en el residual se producen malos olores después de 24 horas de dejadas las soluciones iniciales a temperatura ambiente. En una literatura consultada se evidencia también un desagradable mal olor después de las 48 horas, empleando semillas de Moringa oleífera, y en presencia de otros solventes.

El resultado obtenido cumple con los LMPP para las descargas de aguas residuales, para ríos y embalses en la clase c que admite valores menores de 20 mg/L; para acuífero vertimiento en el suelo y zona no saturada de 5 m, cumplen con la clase C que admite hasta 15 mg/L; y para zona de acuífero vertimiento directo a la zona saturada, cumplen también con la clase c que admite hasta 15 mg/L.

El contenido de fósforo inicial de 0,2745 mg/L y se redujo a 0,1675 mg/L utilizando el coagulante. El fósforo constituye un factor imprescindible para la vida de los organismos acuáticos como algas que afectan la calidad del agua. Por lo antes expuesto la disminución del contenido de fósforo alcanzado es un resultado positivo, que respalda aún más la efectividad de las tortas de Moringa después de la extracción de aceite como coagulante de origen natural.

El valor obtenido cumple en su totalidad con los LMPP para las descargas de aguas residuales, para ríos y embalses, para acuífero vertimiento en el suelo y zona no saturada de 5 m y para acuífero vertimiento directo a la zona saturada (NC- 27-2012).

El contenido inicial de grasas y aceites en el agua residual fue de 23,3 mg/L. Este valor aumenta a 26,4 mg/L al utilizar el coagulante. El aumento de este parámetro va en contra de la calidad del tratamiento, pero durante la extracción sólido-líquido que le precede se intenta eliminar la mayor cantidad de grasas y aceites, no obstante, el coagulante obtenido tiene menor

contenido de este parámetro que si se empleara las semillas directamente de la planta. La cantidad de grasa y aceites en el agua tratada cumple con la norma para LMPPRL para vertimientos al alcantarillado, la cual establece valores menores que 50 mg/L.

También cumple con los LMPP para las descargas de aguas residuales para ríos y embalses de la clase C que admiten valores menores de 30 mg/L, y en acuífero vertimiento en el suelo y zona no saturada de 5 m de clase C, que admiten valores menores de 30 mg/L.

La turbidez del agua inicial examinada es alta. Después del tratamiento que se le da, se alcanzaron resultados de 40,75 % a 60,2 % de reducción de la turbiedad, correspondiendo el último valor con la mejor dosis del coagulante.

Las aguas tratadas con el coagulante que se estudia no tenían presencia de carbono inorgánico, por lo que todo el carbono que se obtuvo fue orgánico. El valor obtenido inicialmente es de 480 mg/L y disminuye a 32 mg/L, luego del proceso de extracción sólido-líquido utilizando hexano como solvente.

El pH utilizado en los experimentos fue 10. Se conoce que al aumentar el pH se ve favorecida la formación de hidróxidos de calcio, no obstante, durante la experimentación a pH que variaron entre 7 y 9 se logra reducir, como promedio, un 67 % de la DQO a dosis constante. Se utiliza el método potenciométrico.

El valor del Índice de Willcombs es 10, correspondiendo a un excelente proceso, pues los flóculos formados son de un tamaño apreciable y sedimentan fácilmente dejando el agua cristalina, quedando demostrada la efectividad de las tortas residuales de semillas de Moringa como coagulantes primarios.

CONCLUSIONES

- La torta residual del proceso de extracción de aceite contiene un 11,31 % de proteína y logra reducir parte de la contaminación en las aguas residuales. El coagulante empleado tiene valor ambiental pues constituye un residuo de la extracción de aceite al que se le da utilidad.
- Las semillas de la especie vegetal, Moringa oleífera, se pueden emplear como alternativa para la sustitución de coagulantes químicos. Se logra reducir más del 90% de la DQO respecto al agua inicial utilizada a un pH igual a 10.
- La mejor dosis según el modelo obtenido para este parámetro es 69,70 mg/L, con un TAR rápido de 2 minutos y un TAL de 30 minutos. El resultado obtenido supera a los tratamientos fisico-químico reportados en la literatura, en los que se han podido eliminar del 30 al 40 % de la DQO.
- La cantidad de DQO obtenida en el agua tratada cumple con la norma para LMPPRL y con los Límites Máximos Permisibles Promedios (LMPP) para diferentes clasificaciones. El coagulante utilizado logra reducir sólidos, contenido de fósforo, dureza, turbidez y COT.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Lic. Cándida Ferrer, al Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM), al Centro de Estudios de Ingeniería de Procesos (CIPRO) y al Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CNIC).

REFERENCIAS

- Adegbe A. A.; Larayetan R. A. and Omojuwa T. J.** (2016). “Proximate analysis, physicochemical properties and chemical constituents characterization of *Moringa oleifera* (*Moringaceae*) seed oil using GC-MS analysis”, American Journal of Chemistry, Vol.6, No.2, pp.23-28, ISSN: 2165-8749, Scientific & Academic Publishing, Anyigba, Nigeria.
- Bonal R. R.** (2012). “Moringa oleífera: una opción saludable para el bienestar”, INFOMED, vol. 16, no. 10, pp. 1586-1599. Editorial Ciencias Médicas. ISSN: 1029-3019. Santiago de Cuba, Cuba. Extraído de http://bvs.sld.cu/revistas/san/vol_16_10_12/san141012.htm en abril 2014.
- Castillo J. y Gómez G.** (2011). “Procesos de tratamiento de aguas. Coagulación y floculación”. Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda, Caracas, Distrito Capital, Venezuela, extraído de: <http://es.slideshare.net/guillermo150782/coagulacion-y-floculacion> en octubre 2015.
- Díaz de Santos S. A.** (1992). “Métodos normalizados para el análisis de aguas totales y residuales”, ed. W. Comité editorial conjunto: APHA, AWWA and WPCF; Vol.3-A.28006. ISBN: 84-7978-031-2. Universidad de Castilla. La Mancha, Madrid, España.
- García T. A. G.; Rocio K. M. y Rodríguez D. I.** (2013). “Evaluación de los usos potenciales del Teberinto (*Moringa oleífera*) como generador de materia prima para la industria química”, Tesis de grado, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador, El Salvador.
- Hernández D. M. P.** (2012). “Experiencia del desarrollo de la Moringa oleífera en la provincia de Camagüey”. Primer taller internacional de Moringa, XVI Convención de Ingeniería y Arquitectura, Cujae, La Habana, Cuba.
- Martín C.; Martín G.; García A.; Fernández T.; Hernández E. y Puls J.** (2013) “Potenciales aplicaciones de Moringa oleífera”, Pastos y Forrajes, vol. 36, no. 2, pp. 137-149, ISSN: 0864-0394, Sistema de Información Científica Redalyc (Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal), Matanzas, Cuba.
- Mas M.; Martínez D.; Carrasquero S. y Vargas L.** (2011). “Uso de la Moringa oleífera para el mejoramiento de la calidad del agua de un efluente doméstico proveniente de lagunas de estabilización”, Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas, Revicyhluz, Vol. 45, No. 2, pp.169-180, ISSN: 0375-538X, Universidad de Zulia, Venezuela.
- NC-27-2012** (2012). “Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado-especificaciones”. Norma Cubana Obligatoria, 2da edición. Oficina Nacional de Normalización (NC). 14 pp. ICS: 13.060.30. Habana, Cuba.
- Rodríguez S.; Muñoz R.; García O. y Fernández E.** (2005). “Empleo de un producto coagulante natural para clarificar agua”, Ciencias Químicas, Vol. 36, No. Especial, ISSN: 1015-8553, CENIC, Ciencias Químicas, La Habana, Cuba.