Extracción de cloruros de un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales a través de procesos mecánicos*

Mechanical Processes for Chloride Extraction from an Industrial Wastewater Treatment System

Palabras clave: cloruros, aguas residuales, agroindustria palmera, calentamiento, centrifugación.

* Segundo puesto del Módulo IV: Innovación tecnológica en plantas de beneficio.

July Marley Buitrago Barbosa

Coordinadora de Manejo Ambiental, Extractora Central S.A.
ambiental@extractoracentral.com

Resumen

Como alternativa para la remoción de cloruros en un sistema de tratamiento de aguas residuales para la agroindustria palmera, se encontró que los procesos mecánicos son una opción viable que permiten prevenir posibles efectos negativos sobre el ambiente en comparación con las metodologías químicas convencionales. Como parte del estudio, el agua resultante a la salida del sistema de tratamiento es sometida a procesos de calentamiento y posterior separación mecánica (centrifugación). La muestra es centrifugada a 1.000, 1.500, 2.500 y 3.000 revoluciones por minuto (rpm), alternando la temperatura a 60, 70, 80, 90 y 95 °C, tras lo cual se determinó que la mejor combinación es 3.000 rpm y 95 °C con una remoción de cloruros de 62,71 % a nivel de laboratorio. Cuando se replican las muestras en equipos a escala con capacidad de 1 m^3 dicha remoción alcanza 74,19 %, incluyendo centrífugas con una velocidad de giro de 6.000 rpm (dos) y 14.000 rpm (una), llevando la muestra a un resultado de 28 % por debajo del valor de referencia de la norma: Resolución 0631

de 17 de marzo de 2015. En una prueba adicional se incluye el paso de la muestra solo por uno de los equipos (centrífuga tubular con una velocidad de giro de 14.000 rpm) logrando una remoción de 70,43 %, teniendo en cuenta que el valor inicial se encontraba por encima de la referencia en 178,6 %.

Introducción

El cloruro es definido químicamente como un compuesto entre el cloro y otro elemento químico diferente al oxígeno, ya que con este se formarían óxidos ácidos de cloro. El ion cloruro (Cl^-) forma sales en general muy solubles. Suele ir asociado al ion Na^+, especialmente en aguas muy salinas (Lapeña, 1989).

Si se toma como ejemplo la reacción entre el sodio y el cloro para dar cloruro de sodio, tendremos un sólido iónico que, al disolverse en agua, resulta en iones de sodio positivamente electrizados, $Na^+(aq)$ y además iones cloruro negativamente electrizados, $Cl^-(aq)$ (ecuaciones 1 y 2). El compuesto formado en la reacción con el sodio es el hidruro de sodio (ecuación 3).

$$Na(s) + {}^1/_2\, Cl_2(g) \rightarrow NaCl\,(s) + energía \quad \text{(Ec. 1)}$$

$$NaCl\,(s) + agua \rightarrow Na^+(aq) + Cl^-(aq) \quad \text{(Ec. 2)}$$

$$Na(s) + {}^1/_2\, H_2(g) \rightarrow NaH\,(s) \quad \text{(Ec. 3)}$$

El producto de la reacción, cloruro de hidrógeno (ecuación 4), no es un sólido iónico como el cloruro de sodio (ecuación 1), ya que el cloruro de hidrógeno se disuelve en agua para dar iones hidratados. La formación $H^+(aq)$ y $Cl^-(aq)$ (ecuación 5) es semejante a la formación de iones $Na^+(aq)$ y $Cl^-(aq)$ cuando se disuelve sal común en el agua (ecuación 2) (Parry, 1973).

$${}^1/_2\, H_2(g) + {}^1/_2\, Cl_2(g) \rightarrow HCl\,(g) \quad \text{(Ec. 4)}$$

$$HCl\,(g) + agua \rightarrow H^+(aq) + Cl^-(aq) \quad \text{(Ec. 5)}$$

Dentro de las prácticas comúnmente asociadas a la fertilización de los cultivos de palma africana, se podría señalar al cloruro de potasio como uno de los principales compuestos empleados (desde la fase de vivero con aplicaciones hasta de 15 g/palma), debido a la naturaleza de acidez de los suelos en Colombia (Owen, 1992).

Con respecto a los aspectos metodológicos de este trabajo, la línea base para el desarrollo de las pruebas se toma con la medida de cloruros registrada a la salida del sistema de tratamiento de aguas residuales de la empresa Extractora Central S.A., una vez se han cumplido todos los procesos involucrados. Dicha medida corresponde a 1.393 mg/L[1] (incluye dos lagunas ecualizadoras, tres anaeróbicas y dos facultativas, con un volumen total aproximado de 30.000 m^3). El aumento en el contenido de lodos en las muestras supone un aumento en la concentración de cloruros. Por lo anterior, los ensayos se basaron en dos principios claves:

1. *Fuerza G.* Mediante la utilización de una centrífuga, definida como un instrumento con motor que hace girar un rotor a altas velocidades, se realizó una separación de la muestra heterogénea mediante la sedimentación de sus componentes (Galán, 1987).
2. *Calentamiento.* Asumiendo el mismo comportamiento del cloruro cálcico puro expuesto por Shaw, Brosdal & Echeandía (2011), y el proceso de vertido líquido cero descrito en la Figura 1, en la que además se encuentra superpuesta su curva de solubilidad a presión atmosférica, se puede observar que la concentración del cloruro cálcico incrementa al aumentar la temperatura de ebullición. De hecho, las dos curvas se cruzan en el límite de solubilidad del cloruro cálcico en una solución hirviente (Shaw, 2011).

1 Resultado de análisis de laboratorio CEIAM – UIS, acreditado ante el IDEAM.

Materiales y métodos

Pruebas de laboratorio

Se tomó 1 litro de muestra a la salida del sistema de tratamiento de aguas residuales agroindustriales. Posteriormente, se tomó una submuestra de 10 ml en 4 tubos de ensayo que fueron sometidos a diferentes rpm (Tabla 1), para proceder a realizar la lectura de cloruros por medio del método colorimétrico a temperatura ambiente (referencia 28 °C).

Figura 1. Temperatura de ebullición de soluciones de cloruro cálcico puro, superpuesta a su diagrama de fase.

Fuente: Shaw & Brosdal (2011).

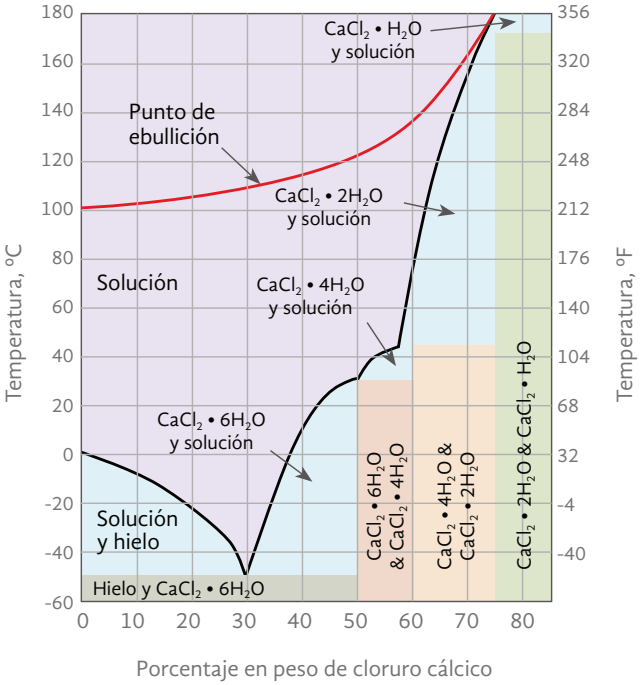


Tabla 1. Relación entre el número de muestra y revoluciones por minuto a la que es sometida.

N° de muestra	rpm
1	1.000
2	1.500
3	2.500
4	3.000

Una vez la muestra es centrifugada, se presenta una precipitación del lodo, de la cual solo se tomó para el análisis la fase líquida superficial, tal como se muestra en la Figura 2.

Para el segundo ensayo se tomaron 5 muestras de 50 ml (cada una) procediendo a calentar como se relaciona en la Tabla 2. Paso seguido, se tomó una submuestra de 10 ml en 4 tubos de ensayo, sometiéndolos a la mayor velocidad de giro proporcionada por el equipo (3.000 rpm). Para la lectura de cloruros se repite el procedimiento representado en la Figura 2.

Pruebas a escala

Se tomó 1 m^3 de muestra dispuesta dentro de un recipiente metálico con la adaptación de un serpentín interno. Esta muestra fue calentada hasta alcanzar 95 °C. Una vez lograda dicha temperatura se pasó la muestra por los equipos ubicados en serie, tal como se describe en la Tabla 3.

Figura 2. Registro fotográfico de la muestra sometida a 3.000 rpm para el análisis de cloruros de su fase superficial.

Tabla 2. Relación entre el número de muestra y temperatura expresada en grados Celsius, con velocidad de giro fija de 3.000 rpm.

N° de muestra	T °C
1	60
2	70
3	80
4	90
5	95

Para la segunda prueba se repitió el proceso de calentamiento, pasando la muestra solo por el equipo de mayor velocidad de giro: centrífuga tubular de 14.000 rpm.

Resultados y discusión

Pruebas de laboratorio

Teniendo en cuenta la línea base para el desarrollo de las pruebas (1.393 mg/l), la cual representa un aumento del 178,6 % con respecto a la norma de referencia (Resolución 0631 de 17 de marzo de 2015), se observó que a medida que se aumenta la velocidad de giro incrementa también la precipitación del lodo y se registra una disminución del cloruro, el cual alcanzó una remoción de 20,90 %, como se referencia en la Tabla 4. Sin embargo, dicha remoción aún se encuentra lejana del cumplimiento de la norma, representando 120,4 % sobre el valor de referencia.

Cuando se incluyó en el segundo ensayo la variable temperatura se observó una mejora en el porcentaje de remoción, el cual alcanzó 62,71 % con la temperatura máxima sometida (95 °C) a 3.000 rpm, como se observa en la Tabla 5. Lo anterior representa una disminución de 174,8 % con respecto al valor de referencia y un aumento de tan solo 3,8 % en relación con la citada resolución.

Pruebas a escala

En la medición a la salida del paso en serie con los equipos descritos en la Tabla 3, se registró una reducción en cloruros que incluyó una remoción total de 74,19 %, logrando no solo el cumplimiento normativo, sino además un registro que se encuentra 28 % por debajo de los límites de la resolución. Adicional al control de cloruros, se realizaron mediciones a la entrada y salida de parámetros como la demanda química de oxígeno (DQO), el pH y la temperatura, tal como se observa en la Tabla 6. Es de mencionar que el valor de referencia para DQO se encontraba un 46 % por encima de los límites de la norma, lo cual significó no solo el cumplimiento de la misma, sino una reducción de 50,2 % con respecto a los límites de la resolución, sin que ello representara un cambio significativo en el pH.

Tabla 3. Descripción de los equipos utilizados para las pruebas a escala con capacidad de 1 m^3.

Secuencia	Equipo	Velocidad de giro (rpm)
1	Decanter	6.000
2	Centrífuga de platos	6.000
3	Centrífuga tubular	14.000

Tabla 4. Referencia valores de cloruros registrados y relación con el porcentaje de remoción.

N° de muestra	rpm	Cloruros (mg/l)	% Remoción
1	1.000	1.228	11,86
2	1.500	1.181	15,25
3	2.500	1.133	18,64
4	3.000	1.102	20,90

En el segundo ensayo también se presentan resultados positivos, los cuales incluyen una remoción de cloruro de 70,43 %, logrando nuevamente no solo el cumplimiento normativo sino también un valor de 17,6 % por debajo de los límites de la resolución. En cuanto a DQO, el ensayo registró tanto el cumplimiento de la normatividad vigente, como una reducción de 57,4 % con respecto a los límites de la resolución. Estos datos, nuevamente, no representaron cambios significativos en el pH, tal como se observa en la Tabla 7.

Además de los cambios descritos, se evidenció una diferencia en color en las muestras a la salida de cada uno de los equipos, como se observa en la Figura 3.

Tabla 5. Referencia de los valores de cloruros registrados y relación con el porcentaje de remoción con variación de temperatura a 3.000 rpm.

N° de muestra	Temperatura (°C)	Cloruros (mg/l)	% Remoción
1	60	1.086	22,03
2	70	944	32,20
3	80	756	45,76
4	90	567	59,32
5	95	519	62,71

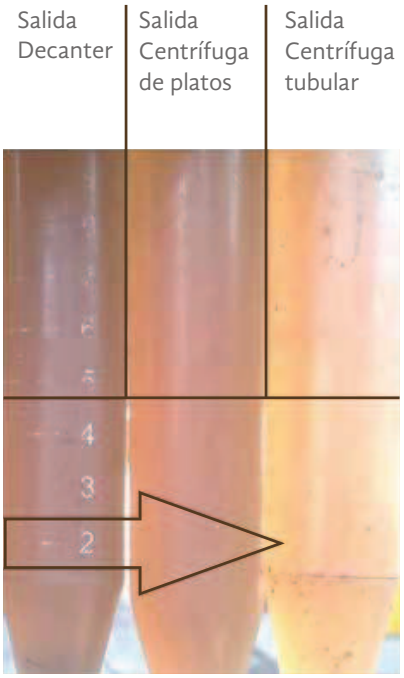
Tabla 6. Resultados obtenidos, paso por equipos en serie.

Parámetro	Entrada	Equipos		
		Decanter	C. Platos	C. Tubular
		Salida		
Temperatura	95 °C	80 °C		
Cloruros	1.393 mg/l	360 mg/l		
DQO	2.190 mg/l	747 mg/l		
pH	7,8	7,7		

Tabla 7. Resultados obtenidos, paso por centrífuga tubular.

Parámetro	Entrada	Equipo
		Centrífuga tubular
		Salida
Temperatura	95°C	82 °C
Cloruros	1.393 mg/l	412 mg/l
DQO	2.190 mg/l	639 mg/l
pH	7,8	7,7

Figura 3. Registro fotográfico de las muestras a la salida de cada equipo.



Conclusiones y recomendaciones

Los mejores resultados en las pruebas de laboratorio fueron obtenidos mediante el calentamiento previo de la muestra con la combinación de 3.000 rpm a 95 °C, con la cual se alcanzó un 62,71 % de remoción del cloruro.

En las dos pruebas realizadas a escala se logró no solo al cumplimiento de la norma, sino además una reducción de 28 % en el paso en serie por todos los equipos y de 17,6 % en el paso por la centrífuga tubular.

Además de la medición de cloruros, se verificó una mejora en la reducción de la DQO que incluyó no solo el cumplimiento de la Resolución 0631 de 17 de marzo de 2015, sino además una reducción de 50,2 % en el paso en serie por todos los equipos y de 57,4 % en el paso por la centrífuga tubular.

Para la réplica en este tipo de pruebas se recomienda la repetición de muestras que permitan establecer un modelo estadístico, dando solidez a los hallazgos. Se recomienda también incluir la prueba estándar de laboratorio (Argentométrico, *Standard Methods* 4500-Cl-B) como metodología de análisis, dado que la evaluación realizada en el presente trabajo se basó en el método colorimétrico.

Agradecimientos

A la empresa Extractora Central S.A. por su apoyo logístico y financiero, especialmente a Gaspar Rueda Plata en calidad de gerente y a Fernando González Martínez como Director de planta.

Referencias bibliográficas

Galán, J. L. (1987). *Sistemas de unidades físicas*. Barcelona: Reverté S.A.

Lapeña, R. M. (1989). *Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales* (Vol. 27). Barcelona: Boixareu Editores.

Owen, E. (1992). Fertilización de la palma Africana (*Elaeis guineensis* Jacq.) en Colombia. *Palmas*, *13*(2), 54-56.

Parry, W. R. (1973). *Química: fundamentos experimentales*. Barcelona: Reverté S.A.

Shaw, W. A., Brosdal, J. D., & Echeandía, S. (2011). Estrategias para minimizar el vertido de aguas residuales. Procesos de vertido líquido cero. *Ingeniería Química*, *495*, 76-84.