

Evaluación del cloruro férrico como coagulante en el proceso de potabilización

Daniel Santiago, Nibis Bracho, Isabel Tapia, Luisa Saules y Alberto Trujillo*

Centro de Investigaciones del Agua, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Venezuela.

Recibido: 21-06-11 Aceptado: 08-12-11

Resumen

Se realizó un estudio en tres plantas de potabilización en el estado Zulia-Venezuela evaluando el proceso de coagulación, floculación y sedimentación, en diferentes tipos de aguas: superficial (planta C) y dos subterráneas (Planta B y Bajo Grande), con la finalidad de comparar la eficiencia del cloruro férrico (CF) vs las sales de aluminio (sulfato de aluminio (SA) y policloruro de aluminio (PAC)). Se utilizó la prueba de Jarra, para simular el proceso de clarificación y obtener las dosis óptimas de los coagulantes. En cada prueba, se determinó pH, alcalinidad, turbidez, color y características del floc (tamaño, tiempo de aparición y sedimentación). En el agua superficial, la dosis optima del CF es mucho mayor (40 mg/L) a la de sales de aluminio (SA= 16 mg/L y PAC= 8 mg/L). Caso similar ocurrió con el agua subterránea. La desventaja del cloruro férrico, es que le aporta color al agua, requiere ajuste de pH y altas dosis en comparación a las sales de aluminio, encareciendo el tratamiento. Sin embargo su ventaja, es la formación de un floc pesado que sedimenta inmediatamente. Las sales de aluminio actúan al pH natural del agua, producen una mejor calidad (3 UC y 3 UNT) a menores dosis.

Palabras clave: Sales de aluminio, sales férricas, prueba de jarra, clarificación.

Evaluation ferric chloride as coagulant in water purification process

Abstract

A study was conducted in three treatment plants in Zulia state, Venezuela undergoing the process of coagulation, flocculation and sedimentation, in different types of water: surface (Plant C) and two underground (Plant B and Bajo Grande), in order to compare the efficiency of ferric chloride (FC) vs. aluminum salts (aluminum sulfate (AS) and poly aluminum (PAC)). The jar test was used to simulate the process of clarification and to obtain the optimum doses of coagulants. In each test, pH, alkalinity, turbidity, color and floc characteristics (size, appearance time and settling time) were determined. In surface water, the optimum dose of CF is much higher (40 mg /L) than aluminum salts (SA= 16 mg /L PAC= 8mg/ L). A similar case occurred with groundwater. The disadvantage of ferric chloride is that it brings color into the water, requires pH adjustment and high doses compared to aluminum salts. It produces a more expensive treatment. However, its advantage is the formation of a heavy floc. Aluminum salts performance a natural pH of the water; produce a better quality (3 CU and 3 NTU) at lower doses.

Key words: Aluminum salts, feric salts, jar test, clarification.

* Autor para la correspondencia: nibisbracho@hotmail.com

Introducción

La etapa de clarificación es empleada en las plantas de tratamiento, con la finalidad de remover turbiedad, color, bacterias, algas, fosfatos y sustancias productoras de olor y sabor en el agua (1). Para tal fin, se utilizan, sustancias químicas (coagulantes) capaces de neutralizar la carga de los coloides, generalmente electronegativa, presentes en el agua, para permitir la formación de un precipitado. Los coagulantes se dividen en sales metálicas (sales de aluminio o hierro), coagulantes naturales y polielectrolitos (2).

Las sales de aluminio, tales como: sulfato de aluminio y policloruro de aluminio, son las más empleadas mundialmente, siendo el primero el más comúnmente usado debido a su bajo costo y su manejo relativamente sencillo (3). En las plantas de potabilización en el estado Zulia-Venezuela, se han empleado sales de aluminio para el proceso de coagulación y floculación, tal como lo demuestran las investigaciones realizadas por Castillo y col, 1999 y Domínguez, 2000, donde evaluaron plantas de tratamiento municipales (Planta de Alonso de Ojeda y la Planta B), con la finalidad de optimizar los procesos de clarificación (4, 5). En la actualidad en la región, no se cuenta con un estudio sobre el uso del cloruro férrico, como coagulante, debido a que este producto no se ha manufacturado en el país, lo cual conduce al desconocimiento de sus bondades.

Una de las características del cloruro férrico, es el amplio pH de actuación. Sin embargo existe discrepancia entre los autores al momento de establecer un rango de pH óptimo, Black y col, (1963) reportó un rango de pH ácido 3-4 (6); por otra parte Arboleda (1992) y Walter. (1979) amplían el rango entre 4-11 (1, 2). Investigaciones recientes, llevadas a cabo por Cárdenas, (2000) y Beron y col, (2003), en aguas superficiales, concluyeron que el cloruro férrico puede actuar a pH ligeramente neutros, sin embargo debe existir un alto contenido de

materia orgánica y una alta turbidez en el agua (7, 8).

El objetivo de la presente investigación, fue comparar la eficiencia del cloruro férrico vs sulfato de aluminio y policloruro de aluminio, como coagulante en los procesos de potabilización de aguas subterráneas y superficiales del Estado Zulia, haciendo uso de la técnica del Test de Jarra, que permite la simulación a nivel de laboratorio de los fenómenos involucrados en el proceso de clarificación.

Metodología

En esta investigación se analizaron tres tipos de agua del Estado Zulia. En primera instancia se consideró una fuente de agua superficial proveniente del embalse de Tule, que alimentan a la planta Alonso de Ojeda (Planta C) que abastece a la ciudad de Maracaibo, la cual se evaluó en época de sequía y lluvia. El segundo estudio estuvo comprendido por fuentes de aguas subterráneas que difieren en sus características fisicoquímicas. Planta B que abastece al Municipio San Francisco y el Pozo J, ubicado en las instalaciones de la industria petrolera de Bajo Grande.

Se captaron muestras semanales para cada tipo de agua en estudio, durante un período de 4 meses. En cada planta, fueron tomadas cuatro (4) envases de plástico de veinte litros (20 L), para un total de 80 litros. Al agua cruda, se le realizó la caracterización fisicoquímica, analizando: pH, color, turbidez, alcalinidad, dureza total y cálcica, SST y disueltos, hierro (total y soluble), aluminio (total y soluble) e índice de langelier, empleando métodos estándar para el agua potable: colorimétricos, volumétricos, gravimétricos y potenciométricos (9).

Determinación de la dosis óptima

Se determinó la dosis óptima mediante pruebas de Jarra, empleando 1 min para la mezcla rápida, 20 min para la mezcla lenta y 30 min de sedimentación. Se analizaron los 3 coagulantes (CF, SA y PAC), en cada caso de agua en estudio, realizando 100 pruebas

donde resultaron un total de 780 análisis incluyendo replicas y repeticiones. Las aguas subterráneas fueron aireadas por veinte minutos (20 min) haciendo uso de un difusor de aire, con la finalidad de simular el proceso de aireación. Esta aireación tiene como objetivo, disminuir el contenido de hierro presente en estas aguas. El agua clarificada debe cumplir con los niveles máximos permisibles (15 UC y 5 UNT) para consumo humano (Gaceta Oficial N° 36.395, 1998) (10). Sin embargo, para la selección de la dosis óptima se emplearon valores ligeramente menores (13 UC y 3 UNT). Durante los ensayos, se determinaron las características del floc (tiempo de aparición (T.A.F), tamaño (T.F.P) y tiempo de sedimentación (T.S).

Resultados y discusión

Caracterización del agua cruda

Agua superficial Planta Alonso de Ojeda (Planta C). Se evaluó el agua cruda en diferentes épocas del año, con la finalidad de determinar las variaciones en las dosis de coagulante para cada calidad del agua. La investigación llevada a cabo por Beron y col. (2003) en aguas superficiales, estudiadas entre un período seco y otro lluvioso, reportaron reducciones en el consumo de coagulante hasta del 40% (8). Durante las épocas de lluvias se presentan incrementos en la turbiedad y otras sustancias orgánicas e inorgánicas debido al lavado y arrastre de los suelos en los ríos (11). En lagos y embalses, el cambio estacional en la calidad del agua es gradual y menos drástica que en los ríos; razón por la cual, los resultados obtenidos en Planta C, son consistente por lo señalado por el autor, es decir como el agua proviene del embalse de Tule, presenta resultados de color (24-34 UC) y turbidez (5-6 UNT) con la misma tendencia en ambas épocas de estudio (tabla 1). La baja turbidez en el agua es indicativa de un bajo contenido en materia orgánica e inorgánica (12).

Agua subterránea: Planta Municipal B y Pozo J. La caracterización del agua de alimentación de planta B, presentó una con-

centración de hierro de 2,58 mg/L superior a lo establecido en la norma Venezolana para el agua potable (10); sin embargo, no se observó el color naranja (color 110 UC) típico de las aguas subterráneas por la presencia de hierro, lo cual se debió al bajo valor de pH (pH 6,55) registrado. La intensidad de color depende del pH, normalmente el color aumenta con el incremento del pH (13). El proceso de aireación disminuyó la concentración de hierro total en un 18 % (tabla 1).

En el caso del pozo J, se obtuvo un valor de 1,62 mg/L para el hierro, menor a lo obtenido por Planta B (2.58 mg/L), observándose el color naranja característico de estas aguas, como consecuencia de un valor de pH de 7,05, tal como expresa Romero (1999). EL valor de conductividad fue de 1900 μ mhos/cm, esto se debe, a la cantidad de sólidos disueltos (281,133 mg/L), cloruros (389 mg/L) y poca actividad del pozo que origina una acumulación de sales en la superficie aumentando el valor de la conductividad. Esto coincide con los resultados reportados por Morales y col., (2010), quienes demostraron que al activar la frecuencia de explotación del pozo, la concentración de cloruro disminuye en el tiempo (14). El color y la turbidez se encontraron entre valores de: 20 UNT y 109 UC Planta B 36 UNT y 257 UC para el pozo J. (tabla 1).

Determinación de la dosis óptima de los coagulantes.

Agua superficial: Planta Alonso de Ojeda (Planta C)

Sales de Aluminio: Posterior a varios ensayos, con diferentes muestras resultó una dosis óptima de 16 mg/L para el SA y de 8 mg/L para el PAC (figura 1), sin ajuste de pH, lo cual disminuye costos de operación y mantenimiento durante la aplicación de los productos. Comparando estos valores con los obtenidos por Castillo y col. (2000), (15 mg/L SA y para 19 mg/L PAC), la dosis empleada para el policloruro disminuyó en un 50% (4). Sin embargo, la aplicación de este coagulante es más costoso que el sulfato de aluminio.

Tabla 1
Parámetros Físico-Químicos de las aguas crudas

Parámetros	Agua Superficial		Agua Subterránea		Bajo Grande	
	Planta C		Planta B			
	Época de sequía	Época de Lluvia	Cruda	Aireada	Cruda	Aireada
pH	7,3	7,1	6,5	6,8	7,0	7,1
Conductividad ($\mu\text{mhos/cm}$)	198,9	222	327,3	315	1926,6	1890
Turbidez (UNT)	4,7	5,5	20,7	19,3	37	29,6
Color (UC)	24,6	34	109,3	108,3	256,6	216,3
Alcalinidad (mg/L CaCO_3)	70	70,5	90	90,6	331	331,3
Dureza total (mg/L CaCO_3)	146,6	151	46	46	280	280
Dureza Cálcica (mg/L CaCO_3)	110,6	113	22	19,6	120	103,3
Sólidos Totales (mg/L)	153,7	161,5	283	274,3	935	930
Sólidos Suspendedos Totales (mg/L)	12	13,5	1,8	1,1	28,6	27,27
Sólidos Disueltos (mg/L)	141,6	148	281,1	273,1	906,3	902,4
Fe (total) (mg/L)	0,4	0,4	2,58	2,1	1,62	1,5
Fe (disuelto) (mg/L)	0,1	0,1	2,02	1,45	1,41	1,3
Aluminio (total) (mg/L)	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15
Aluminio (disuelto) (mg/L)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
pH saturación	7,3	7,1	6,5	6,8	7,69	7,64
Índice de Langelier	0,067	0,006	0,057	0,073	-0,63	-0,60

Cloruro férrico. El empleo de cloruro férrico difiere al de las sales de aluminio, debido a que el coagulante a pH natural del agua (pH 7,2-7,4) no reacciona. Esto se demostró aplicando dosis de coagulante de 2 mg/L a 38 mg/L resultando que a medida que se aumentaban las dosis de CF se incrementaba el color (23 a 400 UC) y la turbidez (5 a 76 UNT) como producto de la coloración que imparte las altas concentraciones de hierro suministradas por el coagulante (figura 2).

Esto significa que se debe realizar un ajuste de pH con la finalidad de obtener el pH óptimo de actuación, con lo cual se obtendrá la dosis óptima. En virtud de ello, se realizaron variaciones de pH en los rango de cuatro (4) a once (11) recomendados por Arboleda (1992), obteniéndose como pH y

dosis óptima nueve y 40 mg/L, respectivamente para cumplir los criterios establecidos (figura 2). Las características del agua son importantes para la selección del coagulante. Pavón y col., (2007) y Beron y col., (2003) utilizaron el CF en sus investigaciones, para un agua con color y turbidez superior a la utilizada en esta investigación, sin requerir ajuste de pH; esto indica que para altas concentración de color y turbidez y presencia de materia orgánica, este coagulante puede ser eficiente (8, 15).

Agua subterránea: Planta B. Sales de aluminio. En la misma planta, Domínguez (2000), evaluó el SA pre-clorando el agua, obteniendo una dosis de: 22 mg/L (5); es decir, la oxidación del hierro se realizó por vía química y no física tal cual como se hizo en

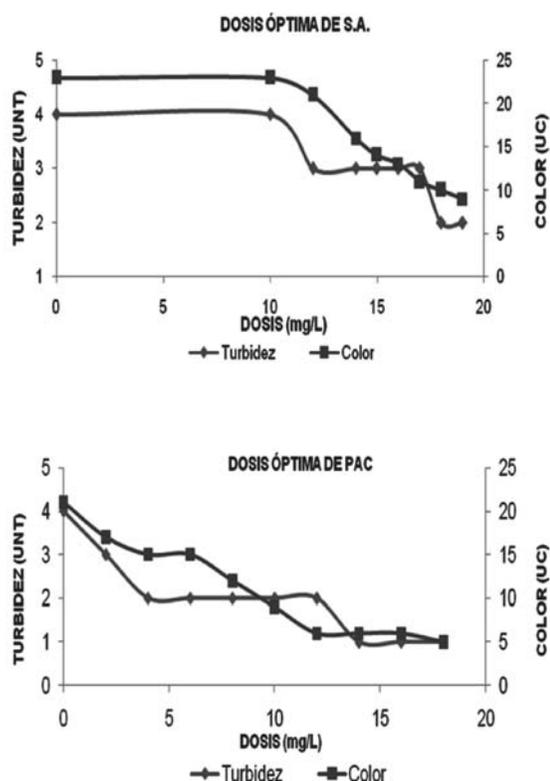


Figura 1. Dosis óptima del sulfato de aluminio y policloruro de aluminio en el agua superficial de planta C.

esta investigación. Por tal razón, la dosis de SA encontrada fue de 32 mg/L (figura 3) 1,4 veces mayor a la del estudio previo. Se evidencia que la oxidación química es más eficiente que la física, puesto que al oxidar el hierro se remueve color. Cuando la oxidación del hierro es eficiente, se emplea menos coagulante (12).

El PAC se comportó de manera diferente al SA puesto que requirió un ajuste de pH de 6,9 a 8,5, obteniéndose una dosis óptima de 20 mg/L (figura 3). El PAC presenta un rango de pH entre 6 y 8,5, donde los mejores resultados se obtienen al trabajar con pH superiores a 8 (2).

Cloruro férrico. El CF presentó un bajo rendimiento al pH natural del agua (pH

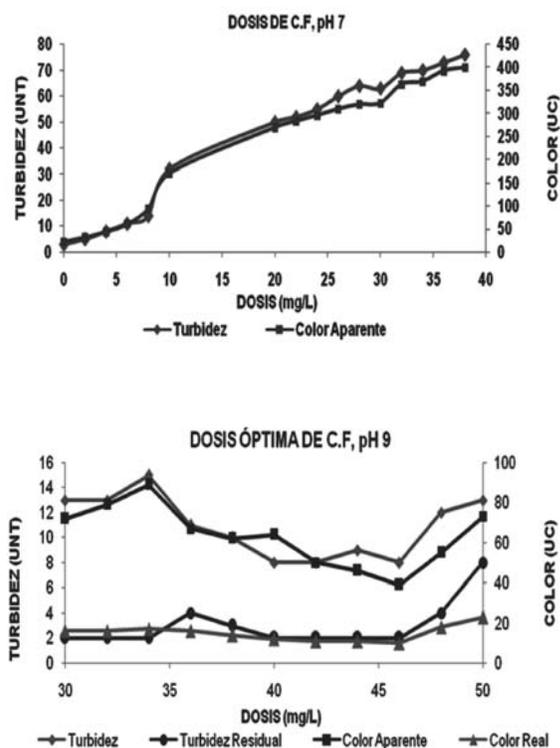


Figura 2. Comportamiento del cloruro férrico a pH 7 y 9 en el agua superficial de planta C.

6,9). En la figura 3, se observa que a dosis mayores de 100 mg/L, se produce un efecto de re-estabilización en las cargas de las partículas, ya que el exceso de coagulante se absorbe en la superficie, produciendo una carga invertida a la carga original, volviendo a repelerse hasta la completa resuspensión de los floc, aumentando los valores de color y turbidez. Para garantizar una óptima coagulación se trabajó a diferentes pH, siendo el pH óptimo de actuación de 6,06, obteniendo una dosis de 64 mg/L.

Pozo J

Sales de aluminio. Se alcanzaron valores en las dosis óptimas de 42 mg/L SA y 17 mg/L PAC (figura 4). El PAC presenta la ventaja de actuar a menores dosis que el SA, debido a que presenta mayor concen-

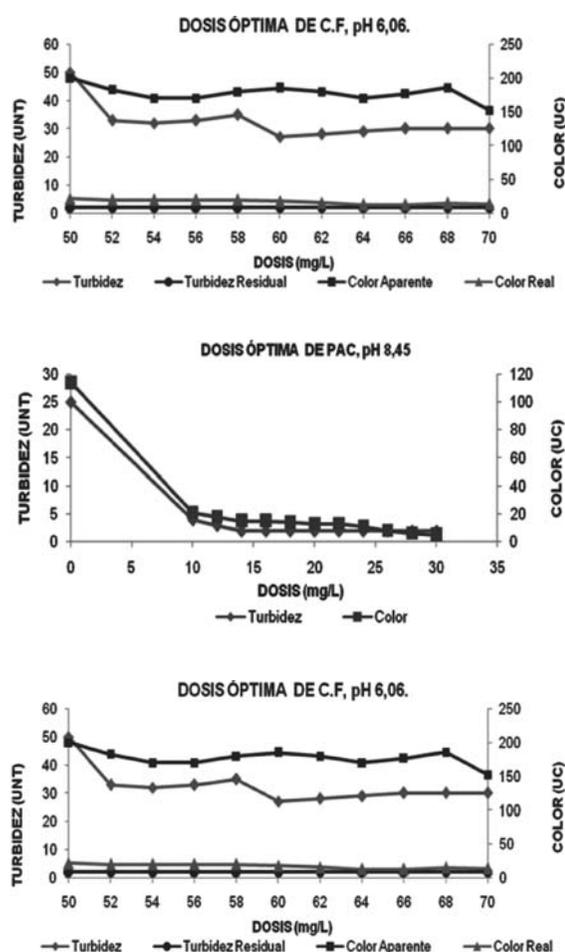


Figura 3. Dosis óptima del sulfato de aluminio, policloruro de aluminio y cloruro férrico en el agua subterránea de planta B.

tración de aluminio (PAC). Los hidróxidos de aluminio poliméricos, constituyen el 80% del aluminio total en solución hidrolizada. Esto permite, una mayor densidad de carga cationica en el medio, las cuales absorben las superficies en las partículas cargadas negativamente, neutralizando su carga y permitiendo su agregación (7), lo que trae como resultados un mayor poder coagulante y estabilidad del floc formado.

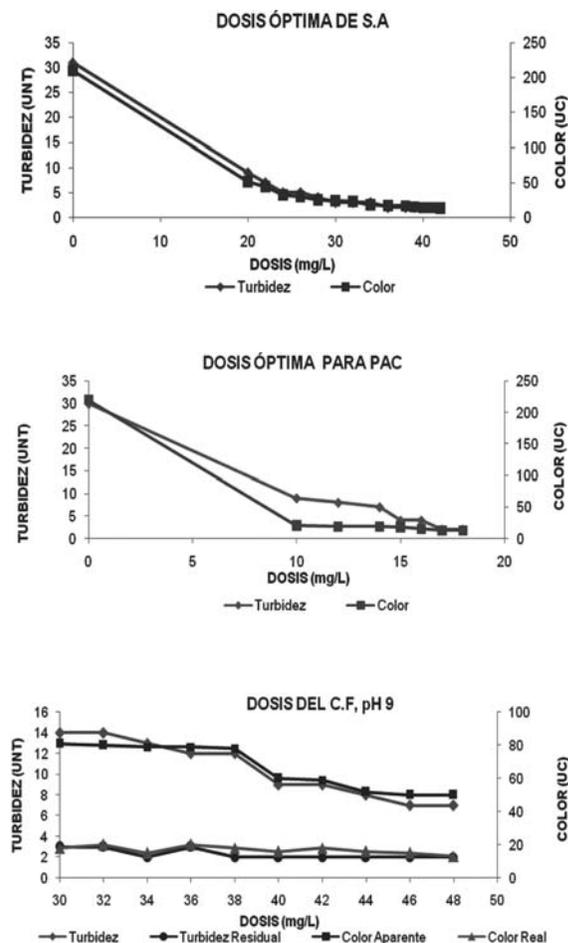


Figura 4. Dosis óptima del sulfato de aluminio, policloruro de aluminio y cloruro férrico en el agua subterránea del pozo J.

Cloruro férrico. Se obtuvo un comportamiento similar a lo ocurrido en planta C, donde el pH óptimo de coagulación fue de 9, obteniendo como dosis óptima 48 mg/L, (figura 4), por debajo de este pH se incrementa el color y la turbidez del agua, observando floculos inestables y con poco tamaño.

Características del proceso de clarificación

Tiempo de Aparición del floc (TAF), tamaño del floc producido (TFP) y tiempo de sedimentación (TS). Los menores TAF señalados en la tabla 2, fueron obtenidos por las aguas, de Planta C y pozo J, haciendo uso del CF ya que el ajuste de pH, origina un aumento de la alcalinidad, y la misma actúa como una fuerza amortiguadora, que permite una rápida formación de las especies hidratadas de hierro responsables en la coagulación (2). La concentración de hierro en el coagulante, le imparte un mayor peso específico a floc, depositándose fácil y completamente, tales características clasifican al floc con un valor de 8, de acuerdo al Índice de Willcomb (1). Ambas características permiten obtener TS más cortos, parámetro importante en el diseño de los sedimentadores, ya que se reducen las dimensiones de los mismos.

Las sales de aluminio presentaron resultados distintos en el agua de planta C, cuya tendencia es formar un floc liviano, con lenta aparición y sedimentación (índice 4) como consecuencia de una baja turbidez y un bajo contenido de materia orgánica. Las aguas subterráneas debido a la presencia de hierro originan floc más pesados y fáciles de sedimentar.

El CF es el que aporta una mayor cantidad de sólidos suspendidos totales (SST), a diferencias de las sales de aluminio, como consecuencia de los residuales de hierro en el agua tratada. Este comportamiento se

presentó en los 3 casos estudiados. Los estudios realizados por Castillo y col (2000), demostraron que una mayor cantidad de SST, encarece la última unidad del proceso de clarificación (filtración), ya que se disminuyen las corridas de filtración y aumentan la frecuencia de retrolavados, produciendo mayores costos a nivel operativo, debido al mantenimiento, pérdida de material filtrante, entre otros (4).

El índice de langelier (I.L) es un indicativo de la tendencia agresiva o incrustante del agua. En las plantas B y C estos valores (0,06 y 0,057 respectivamente), son ligeramente positivos, lo cual favorece la formación de una capa protectora en las tuberías y equipos metálicos (tabla 1). Resultados opuestos ocurren en el pozo J, cuyo valor negativo (-0,63) (tabla 1), describe un agua con tendencia agresiva que puede ocasionar problemas de corrosión en las tuberías e instalaciones. Este valor coincide con lo reportado por Aponte (2009), en la Costa Oriental del Estado Zulia (16).

El tratamiento aplicado corresponde a la adición de cal en diferentes dosis combinado con el coagulante, considerando la capacidad de coagulación que presenta la cal. Las dosis re-calculadas de coagulante bajo estas condiciones son (38 mg/L S.A y 12 mg/L PAC) más 30 mg/L de cal en ambos casos (tabla 3). Se conservó la dosis de CF más 52 mg/L de cal, lo cual sitúa a este coagulante en desventaja con los otros, puesto que no se reduce la dosis de coagulante y se requiere 1,7 veces más de estabilizante.

Tabla 2
Características del floc

Características del Proceso de Clarificación	Planta C			Planta B			Bajo Grande		
	CF	PAC	SA	CF	PAC	SA	CF	PAC	SA
Dosis Optima (mg/L)	40	8	16	64	20	32	48	17	42
TAF (min)	3	5	9	10	5	2	2	3	3
Índice de Willcomb	8	4	4	6	6	8	8	6	6
TS (min)	CML	10	21	10	25	12	CML	7	7

CML: culminada la mezcla lenta.

Tabla 3
Estabilización química con cal para el pozo J

Producto	Dosis (mg/L)	Cal (mg/L)	I.L	Color (UC)	Turbidez (UNT)
SA	38	30	0,02	12	2
PAC	12	30	0,09	12	2
CF	48	52	0,01	13	2

Conclusiones

- Las muestras de agua crudas estudiadas difieren en cuanto a sus características físico-químicas. Para el caso de Planta C el color determinado fue de 23 UC, único parámetro que se encontraba fuera de los valores aceptados. El agua de la Planta B y el Pozo J, presentan altos valores de: color (110 y 257 UC) y turbidez (20 y 37 UNT) a causa de las altas concentraciones de hierro presentes en las mismas (2,58 y 1,62 mg/L).
- Las sales de aluminio son las que presentan un mejor rendimiento a los valores de pH naturales de las aguas estudiadas, a excepción del PAC que requirió un aumento de pH en Planta B. Para el CF su desempeño es favorecido a pH 8-9.
- El CF posee las siguientes desventajas: Requiere que se ajusten los valores de pH en los tipos de agua estudiados; colorea el agua y genera la mayor cantidad de sólidos suspendidos en comparación a los otros coagulantes. Sin embargo, este coagulante origina las mejores características de tiempo de aparición y sedimentación del floc.
- El sulfato de aluminio resultó el producto que alcanzó los criterios de selección, por no requerir la adición de otros estabilizantes químicos reduciendo los costos de tratamiento en comparación con el cloruro férrico y Policloruro de aluminio los cuales requirieron ajustes de pH.

Referencias bibliográficas

1. ARBOLEDA J. *Teoría y Práctica de la Purificación del Agua*. Acodal. Colombia. Tercera edición. Tomo I. 30, 31, 55, 163-175 pp. 1992.
2. WALTER W. *Control de la calidad del agua procesos fisicoquímicos*. Editorial Reverte S.A.Barcelona. Primera edición.192, 193,197 pp. 1979.
3. PÉREZ J. *Selección de procesos de tratamiento de Agua*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. 12 p.1995.
4. CASTILLO J., BRACHO N., VARGAS L., ROMERO N., ALDANA G. *Rev Téc Ing Univ Zulia* 23(3). 169-178 pp. 2000.
5. DOMINGUEZ F. Optimización del proceso de clarificación de la planta de potabilización B. (Para obtener el título de Ingeniero Químico). Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. Maracaibo. 88 pp. 2000.
6. BLACK A., SANGLEY G., WHITTLE G., MAULDING J. Stoichiometry of the coagulation of colour-causing organic compounds with ferric sulphate. *AWWA* 55 (10). 1347-1366 pp. 1963.
7. CARDENAS Y. *Tratamiento de aguas Coagulación y floculación*. Sedapal Lima, pp. 32-33. 2000.
8. BERON F., IDROBO J., LATORRE J. *Seminario Internacional: Visión Integral en el Mejoramiento de la Calidad del Agua!*. Instituto Cinara. Universidad Javeriana. Cali. 2005. Disponible en línea: <http://objetos.univalle.edu.co/files/Optimiza>

- cion_del_funcionamiento_de_plantas_de_potabilizacion_de_agua.pdf.
9. STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. APHA.AWWA. WPCF. EDITION 20. 1999.
 10. GACETA OFICIAL DE LA REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA. Número 36.395. 1-8 pp. 1998.
 11. ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD. **Guía para el mejoramiento de la calidad del agua a nivel casero**. Perú, 5-6 p. 2005.
 12. SAWYER. C., MCCARTY. P., PARKIN. G. **Química para ingeniería ambiental**. Editorial Mc Grawhill. 4ta edición. México. 475, 476, 625 pp. 2001.
 13. ROMERO J. **Calidad del agua**. Editorial escuela colombiana de Ingeniería. 1era edición. Colombia. 275-277 pp. 1999.
 14. MORALES F; VALDEZ R. **Purificación de agua subterránea a escala piloto para su consumo como agua mineral**. (Para obtener el título de Ingeniero Químico). Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. Maracaibo. 90 p. 2010.
 15. PAVON S., CHAVEZ C., HOYOS C. **Planta potabilizadora para pequeñas comunidades**. Centro interamericano de recursos del agua. México. 1-12 pp. 2007.
 16. APONTE J., BRACHO N., VARGAS L. XXXII CONGRESO DE AIDIS. 1-7. PUNTA CANA (SANTO DOMINGO) 2009.