

Proyecto Fin de Carrera



APLICACIÓN DE PROCESOS DE COAGULACIÓN FLOCULACIÓN EN LA REGENERACIÓN DE AGUAS DEPURADAS

Realizado por:
María Morales Gonzalo

Directora: M^a Peña Ormad Melero

Ingeniería Química.

Departamento de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente



Centro Politécnico Superior. Universidad de Zaragoza



Septiembre 2010

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría dar las gracias a...

A mis padres por su cariño, confianza y apoyo incondicional.

A José por su paciencia y comprensión en todos los aspectos desde el primer momento.

A Peña por haberme dado la oportunidad de realizar este proyecto y por su ayuda y disposición.

A las empresas que han colaborado con la proporción de coagulantes de forma altruista, para que este proyecto fuera llevado a cabo.

A Nati por su colaboración en el día a día.

A mis compañeros de laboratorio por toda su ayuda y apoyo.

A la Secretaría de Estado de Universidad e Investigación del Ministerio de Ciencia e Innovación, a la Diputación General de Aragón y a la Fundación Caixa Catalunya por la financiación de esta investigación a través del proyecto "Regeneración de aguas depuradas mediante procesos de oxidación avanzada (CTM2008-01876/TECNO)".

APLICACIÓN DE PROCESOS COAGULACIÓN FLOCULACIÓN EN LA REGENERACIÓN DE AGUAS DEPURADAS

RESUMEN

El aumento de la población actual implica un incremento en la demanda de agua, lo que conlleva la necesidad de reutilizar el agua. La regeneración del agua de salida de una Estación de Depuración de Aguas Residuales (EDAR) tiene lugar en la Estación Regeneradora de Aguas Residuales (ERAR). Es el Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, el que establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.

El tratamiento convencional al que se suele someter a las aguas para regenerarlas es el de precipitación química y desinfección. La precipitación química, consiste en una coagulación, floculación y decantación, y tiene como objetivo la eliminación de los sólidos en suspensión presentes, la reducción de la turbidez y el color, llevando a cabo la clarificación del agua. Dicho proceso debe ser capaz de mejorar las características del agua pero teniendo en cuenta que los costes deben poder ser asumibles por los posibles usuarios de este agua regenerada.

En este proyecto se lleva a cabo un análisis de la repercusión que tiene la utilización de diferentes coagulantes comerciales sobre la calidad del agua tratada y sobre los costes de tratamiento. En el presente proyecto se analizan cinco coagulantes distintos, dos de ellos basados en sales de aluminio como son el SAF 560 (sulfato de aluminio) y el PAC (policloruro de aluminio), otro coagulante de sales de hierro como es el $FeCl_3$ (cloruro de hierro), y el SAF 05670 (Al y Fe) basado tanto en sales de aluminio como de hierro. Así mismo también se analiza la efectividad de un coagulante fabricado a partir de un residuo del anodizado del aluminio (SAF 056), lo que justificaría su valorización.

Para cada uno de estos coagulantes se determinan variables de operación como dosis de coagulante y pH óptimo de trabajo mediante la utilización del equipo de laboratorio jar-test, midiendo en cada caso la repercusión que tienen en parámetros como: turbidez, sólidos en suspensión, presencia de metales tanto en las aguas clarificadas como en los fangos (Al, Fe, Sn, Ni, B, Si, Ca, Mg, etc.), índice volumétrico de fangos (IVL), V_{30} , velocidad de sedimentación, humedad de fangos y costes asociados.

En primer lugar, se puso en marcha una planta piloto en el laboratorio para producir un agua sintética similar a un agua residual real de salida de una EDAR. A partir de ésta se optimiza el tratamiento de coagulación – floculación. Se obtiene que el coagulante más efectivo es el $FeCl_3$ con una dosis de 15 mg/l y un pH 7. También se determina cual es el acondicionante del pH más efectivo ($Ca(OH)_2$) y se obtienen una serie de valores sobre los parámetros estudiados como son la eliminación de turbidez y de sólidos en suspensión, el V_{30} , el IVL y la velocidad de sedimentación.

A continuación, el estudio se complementa con un dimensionamiento de las instalaciones, a escala real, necesarias para llevar a cabo el proceso de regeneración del agua.

Finalmente se realiza un estudio económico para analizar los costes derivados del coagulante y del acondicionante seleccionados, así como los procedentes de la gestión de los fangos resultantes del proceso de regeneración del agua. Resultando la gestión de los fangos la que supone un mayor coste económico siendo posible la reducción del mismo con una mayor inversión inicial en las instalaciones.

Índice

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	9
2. REGENERACIÓN DEL AGUA.....	13
2.1 Marco legislativo	13
2.2 Estación regeneradora de aguas residuales (ERAR).....	15
2.3 Fundamento teórico de la coagulación-floculación.....	15
3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	17
3.1 Descripción de la planta piloto	17
3.2 Procedimiento de coagulación-floculación.....	18
3.2.1 Equipos	18
3.2.2 Reactivos.....	18
3.2.3 Parámetros indicadores.....	18
3.2.4 Aplicación del tratamiento de coagulación – floculación.....	19
3.2.5 Condiciones de operación	21
4. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN	23
4.1 Análisis de la influencia de variables	23
4.1.1 Estudio de la influencia del tipo y de la dosis de coagulante	23
4.1.2 Estudio de la influencia del pH en el rango efectivo de cada coagulante	23
4.2 Estudio comparativo	31
4.2.1 Estudio del tipo de coagulante	31
4.2.2 Estudio comparativo de los acondicionantes del pH	34
4.3 Estudio del SAF 056.....	36
5. DIMENSIONAMIENTO DE INSTALACIONES.....	39
5.1 Dimensionamiento de los tanques coagulación - floculación	39
5.2 Dimensionamiento del decantador	40
6. ESTUDIO ECONÓMICO	43
7. CONCLUSIONES	45
8. BIBLIOGRAFÍA	47

Anexos	51
Anexo I: Fichas técnicas de los coagulantes	55
Anexo II: Resultados de la experimentación	61
Experimentos de los coagulantes desechados	61
Experimentos realizados a los coagulantes escogidos en búsqueda del rango de dosis óptimo	65
Experimentos en el rango óptimo del SAF 560.....	68
Experimentos en el rango óptimo del SAF 056.....	71
Experimentos en el rango óptimo del SAF 05670.....	75
Experimentos en el rango óptimo del PAC	79
Experimentos en el rango óptimo del FeCl_3	82
Anexo III: Representaciones de los resultados	89
Anexo IV: Análisis de metales en el SAF 056.....	105
Anexo V: Origen del SAF 056.....	109
Anexo VI: Mecanismo de coagulación	117

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La repercusión social con respecto al uso del agua ha cambiado en los últimos años. Actualmente la población mundial es consciente de que el agua es un bien escaso, y por lo tanto mediante su reutilización se permite el incremento de recursos disponibles y se minimiza el impacto de su disposición ambiental. El aumento de la población implica un incremento en la demanda de agua, lo que ligado a la disminución que se está produciendo en los recursos hídricos provoca una necesidad de reutilizar el agua antes de su retorno al cauce hidráulico como una solución para aumentar los recursos existentes.

Las aguas que se reutilizan son aguas que ya han sido sometidas a un tratamiento de depuración en las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR). Posteriormente se les somete a un tratamiento adicional o complementario que permite adecuar su calidad al uso al que vaya a destinarse. Este tratamiento tiene lugar en unas instalaciones denominadas Estaciones Regeneradoras de Aguas Residuales (ERAR), la calidad final del agua regenerada debe cumplir lo establecido en el Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas (B.O.E., 2007). En la figura 1.1 se puede observar un esquema de una Estación de Regeneración de Aguas.

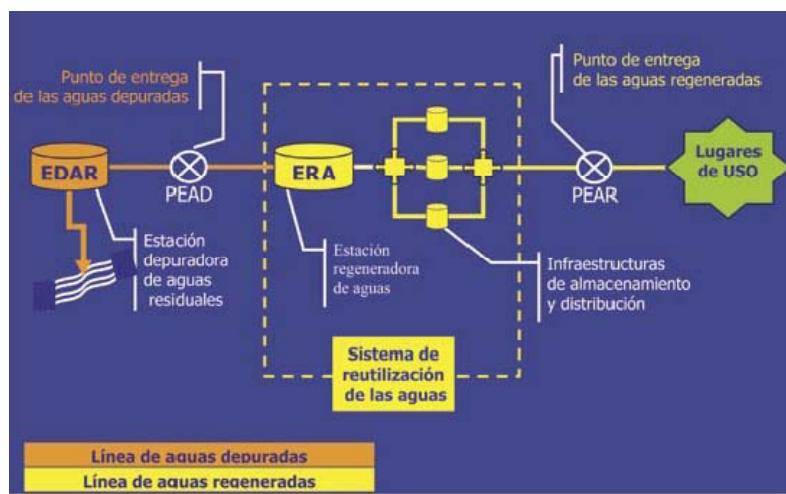


Figura 1.1 Esquema de regeneración de aguas residuales (Fuente: www.mma.es)

Es importante distinguir entre reutilización indirecta y directa. La primera se presenta en los sistemas de explotación interiores en los que las aguas residuales que se vierten en ríos o embalses, son diluidas con caudales circulantes y parcialmente reutilizadas en zonas aguas abajo. No ocurre lo mismo en zonas costeras donde las aguas residuales son vertidas al mar a través de cauces sin posibilidad de aprovechamiento. Por lo que, en las zonas costeras y en zonas interiores con problemas de abastecimiento, es donde más beneficio se puede obtener de la reutilización directa y planificada de agua residual. La figura 1.2 muestra los lugares en los que existen emplazamientos de reutilización directa en España. No todo son beneficios, la regeneración también tiene sus límites. Se tienen que garantizar caudales mínimos en los cauces de los ríos, los usuarios deben aceptar la situación, existen

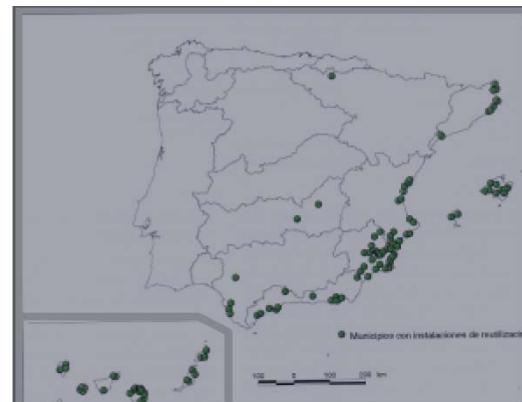


Figura 1.2 Emplazamientos planificados de reutilización en España en el año 2000 (Fuente: www.mma.es)

riesgos sanitarios además de los costes que este tratamiento genera; por lo que no todas las aguas depuradas deben o pueden depurarse (Jordán, 2008; López, 2010, Prats, 2003).

Uno de los objetivos fundamentales del Real Decreto 1620/2007 es aumentar el grado de utilización de aguas reutilizadas de unos 450 hm³ sobre un total de 3.400 hm³ de aguas depuradas en 2007, a 1.200 hm³ en 2015, lo que supondría triplicar dicha cantidad. Lo cierto es que las estimaciones en 2009 eran de un volumen de agua reutilizada de alrededor de 530 hm³, el cual, fue prácticamente alcanzado. La distribución de los diferentes usos del agua regenerada en España se muestra en la figura 1.3. El principal uso es el riego agrícola que supone un 50% del consumo total. Otras aplicaciones en la industria y en la acuicultura son menos empleadas.

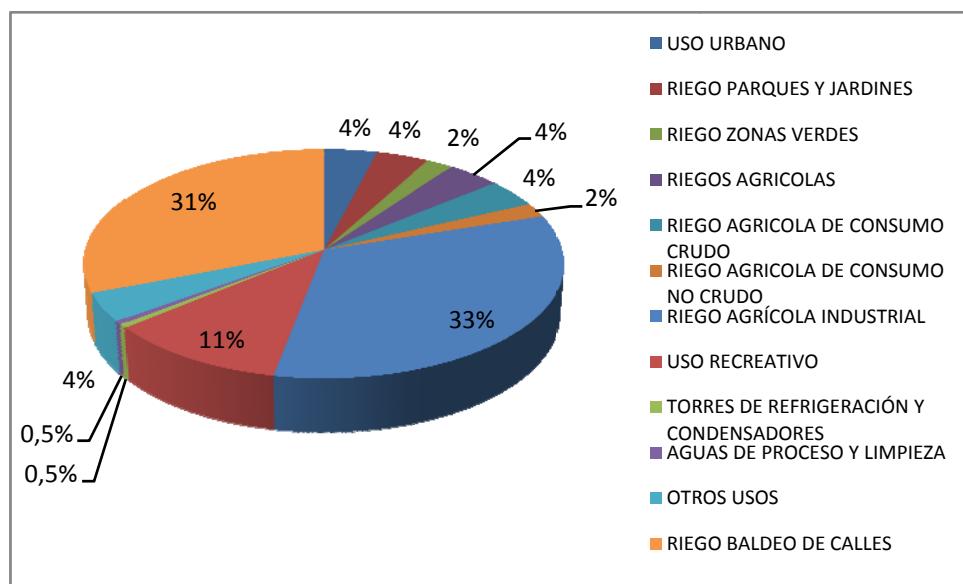


Figura 1.3 Distribución de los usos del agua regenerada en España (Fuente: www.mma.es, 2000)

En este proyecto fin de carrera se lleva a cabo un análisis de la repercusión que tiene la utilización de diferentes coagulantes comerciales sobre la calidad del agua regenerada y sobre los costes del tratamiento. Para adecuar la calidad en las ERARs se dispone de diferentes tratamientos, el aquí tratado es la coagulación - floculación, cuyo principal objetivo es la eliminación de la turbidez y de los sólidos en suspensión.

El principal objetivo de este estudio es la aplicación de la precipitación química como tratamiento de regeneración, buscando la optimización del mismo, el cual tiene que proporcionar un agua regenerada que cumpla los límites impuestos por el RD 1620/2007. Este tratamiento está formado por dos fases, una primera de coagulación y una segunda de floculación. La coagulación es la desestabilización de las partículas coloidales causadas por la adición de un reactivo químico llamado coagulante el cual, neutralizando sus cargas electrostáticas, hace que las partículas tiendan a unirse entre sí. La floculación es la aglomeración de partículas desestabilizadas en microflóculos y después en los flóculos más grandes que tienden a depositarse en el fondo de los sedimentadores. Hay una serie de factores que pueden influir en la coagulación - floculación como son la dosis de coagulante, el tiempo y el pH. El pH es un factor fundamental en acción desestabilizadora de las sustancias coagulantes y floculantes. Además los compuestos presentes en el agua pueden ser: sólidos en suspensión, partículas coloidales (< 1 micra) y sustancias disueltas.

De este modo, el objetivo principal se desglosa en los siguientes objetivos secundarios:

1. Realizar un estudio bibliográfico sobre los tratamientos de precipitación química, conocer coagulantes y dosis habituales.
2. Seleccionar los coagulantes a estudiar.
3. Optimizar la dosis de coagulante y el pH sobre la muestra sintética.
4. Aplicar el tratamiento de coagulación - floculación sobre la muestra sintética.
5. Estudiar la eliminación de turbidez y sólidos en suspensión para definir el tratamiento más adecuado.
6. Dimensionar instalaciones a escala real para este tratamiento.
7. Estimar costes derivados del tratamiento.

Para conseguir estos objetivos, se utiliza el agua de salida de la planta piloto que simula un agua de salida real de una EDAR. A partir de esta agua se optimiza el tratamiento de coagulación - floculación determinando la dosis de coagulante y el pH de trabajo. En el proyecto presente se analizan cinco coagulantes distintos, dos de ellos basados en sales de aluminio como son el SAF 560 (sulfato de aluminio) y el PAC (policloruro de aluminio), otro coagulante de sales de hierro como es el FeCl_3 (cloruro de hierro), y el SAF 05670 (Al y Fe) basado tanto en sales de aluminio como de hierro. Así mismo también se analiza la efectividad de un coagulante fabricado a partir de un residuo del anodizado del aluminio (SAF 056), lo que justificaría su valorización.

La evaluación de los cinco coagulantes nombrados se lleva a cabo estudiando la influencia de la dosis de coagulante y el pH sobre los siguientes parámetros: turbidez, sólidos en suspensión, presencia de metales tanto en las aguas clarificadas como en los fangos (Al, Fe, Sn, Ni, B, Si, Ca, Mg, etc.), índice volumétrico de fangos (IVL), V_{30} , velocidad de sedimentación, humedad de fangos y costes asociados. Optimizado el proceso se lleva a cabo el dimensionamiento de las instalaciones para desarrollar el tratamiento de regeneración de aguas procedentes de diversas EDARs a escala real, así como los costes asociados al tratamiento. Se determinan las condiciones para las cuales se obtiene la máxima eficacia de degradación al menor coste.

Con la realización de este proyecto se dispone del conocimiento de todos los parámetros necesarios para realizar la regeneración del agua de salida depuradora, se tiene datos de las cantidades necesarias de reactivos, de la dimensiones de las instalaciones así como de los costes asociados al tratamiento.

Este trabajo se ha realizado dentro del grupo consolidado de investigación aplicada "Calidad y Tratamiento de Aguas" perteneciente al IUCA (Instituto Universitario de Ciencias Ambientales) de la Universidad de Zaragoza en colaboración con NILSA. Forma parte del proyecto de investigación "Regeneración de aguas depuradas mediante procesos de oxidación avanzada (CTM2008-01876/TECNO)" financiado por la Secretaría de Estado de Universidad e Investigación del Ministerio de Ciencia e Innovación, la Diputación General de Aragón y la Fundación Caixa Catalunya.

2. REGENERACIÓN DEL AGUA

2.1 Marco legislativo

Las principales normas vigentes en España y en algunas comunidades autónomas sobre la regeneración de aguas son las siguientes:

- Texto refundido de la Ley de Aguas (RD 1/2001): Indica que el Gobierno debe promulgar una normativa que establezca las bases de la reutilización.
- Reglamento de Dominio Público Hidráulico (RD 849/1986).
- Normas de reutilización en Planes Hidrológicos de Cuenca: Tajo (1999) y Guadalquivir (1999).
- Normas y recomendaciones establecidas en algunas CC.AA: Cataluña (1994-2005), Baleares (1995-2001), Comunidad Valenciana (2004).
- Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre. Por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.

Las aguas residuales tienen tres orígenes: industrial, urbano y agrícola. Las industrias suelen depurar y/o regenerar sus aguas residuales. Las de origen agrícola son difíciles de canalizar por lo que no experimentan este tratamiento, consecuentemente, las procedentes de las ciudades son las que se regeneran en las ERAR. Dichas aguas van a la estación depuradora, a su salida pueden ser vertidas nuevamente a cauce público o pueden ir a la estación regeneradora para ser reutilizadas.

La Directiva 91/271/CEE sobre tratamiento de las aguas residuales urbanas define los sistemas de recogida, tratamiento y vertido de las aguas residuales urbanas, es decir, establece las medidas necesarias que se han de adoptar para garantizar que las aguas residuales urbanas reciban un tratamiento adecuado antes de su vertido. Esta directiva impone la calidad del agua de salida de la EDAR. El agua dirigida a la estación regeneradora es sometida a un tratamiento de afino, el cual proporciona un agua final que tiene que cumplir el Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, en el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. Este RD impone limitaciones para diversos parámetros físico-químicos (turbidez y sólidos en suspensión), parámetros microbiológicos y para el caso de sustancias peligrosas las normas de calidad ambiental que deben ser cumplidas. Estas limitaciones dependen del uso posterior del agua. El camino seguido por el agua regenerada es el que muestra la figura 2.1.

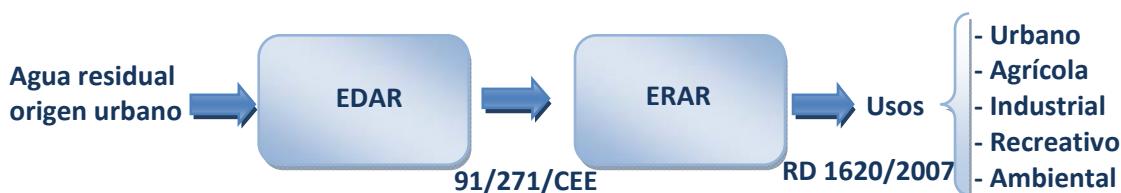


Figura 2.1 Trayecto del agua regenerada

Los usos a los que está destinada el agua regenerada son muy diversos y se encuentran enumerados en la tabla 2.1. Cada uno de los usos previstos lleva implícita unas exigencias de calidad, además existen una serie de usos prohibidos para el agua reutilizada, tabla 2.2.

Tabla 2.1 Usos del agua regenerada (Danés, 2008)

1. Uso urbano	1.1 Residencial: riego jardines privados, descarga de aparatos sanitarios 1.2 Servicios: riego zonas verdes, limpieza de calles, incendios
2. Uso agrícola	2.1 Riego de cultivos de productos comestibles en fresco para alimentación humana 2.2 Productos de consumo humano no fresco, pastos para consumo de animales, acuicultura 2.3 Cultivos leñosos, flores ornamentales, cultivos industriales no alimentarios
3. Uso industrial	3.1 Aguas de proceso y limpieza, otros usos industriales 3.2 Torres de refrigeración y condensadores evaporativos
4. Uso recreativo	4.1 Riego campos de golf 4.2 Estanques, caudales circulantes con acceso al público prohibido
5. Uso ambiental	5.1 Recarga de acuíferos por precolación 5.2 Recarga de acuíferos por inyección directa 5.3 Riego de bosques, zonas verdes no accesibles al público, silvicultura 5.4. Otros usos: mantenimiento de humedales, caudales mínimos

Tabla 2.2 Usos prohibidos del agua regenerada (Danés, 2008)

- Consumo humano, salvo situaciones de declaración de catástrofe en las que la autoridad sanitaria especificará los niveles de calidad exigidos a dichas aguas y los usos
- Usos propios de la industria alimentaria, salvo lo dispuesto para el uso de aguas de proceso y limpieza
- Uso en instalaciones hospitalarias y otros usos similares
- Cultivo de moluscos filtradores en acuicultura
- Uso recreativo como agua de baño
- Uso en torres de refrigeración y condensadores evaporativos, excepto lo previsto para uso industrial
- Uso en fuentes y láminas ornamentales en espacios públicos o interiores de edificios públicos
- Cualquier otro uso que la autoridad sanitaria considere un riesgo para la salud de las personas o un perjuicio para el medio ambiente

Según el RD 1620/2007, cuando se cree probable la presencia de metales en el agua regenerada, se deben analizar los metales presentes en la tabla 2.3 y se tienen que cumplir los límites indicados para poder ser reutilizada para uso agrícola.

Tabla 2.3 Metales a analizar en el agua regenerada (Fuente: RD 1620/2007)

Elemento Constituyente	Concentración máxima admisible (mg/l)
Boro	0,50
Arsénico	0,10
Berilio	0,10
Cadmio	0,01
Cobalto	0,05
Cromo	0,10
Cobre	0,20
Manganoso	0,20
Molibdeno	0,01
Níquel	0,20
Selenio	0,02
Vanadio	0,10

2.2 Estación regeneradora de aguas residuales (ERAR)

En la actualidad existen distintas tecnologías de regeneración de aguas residuales. Por un lado están los tratamientos intensivos como por ejemplo: filtros de anillas, biodiscos, bioreactores de membrana y sistemas físico-químicos. Por otro lado, destacar las tecnologías de filtración: filtros de membrana, microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, osmosis inversa, etc. Por último las encargadas de la desinfección: ozonización, dióxido de cloro, UV, etc. Debido a esta gran diversidad existen muchos tipos de ERAR (Guerrero et al, 2003; Koning, 2008).

El tipo de tratamiento más extendido en España es: físico-químico + decantación + filtro de arena + desinfección (Cl_2) (Jordán, 2008). La figura 2.2 muestra el esquema de la estación regeneradora de Arato (Vitoria), la cual, comprende parte del tratamiento estudiado en este proyecto. El efluente es captado a la salida de los decantadores secundarios de la EDAR municipal, pasa a través de una cámara de coagulación - floculación con decantación laminar, posteriormente por unos filtros de arena y finalmente llega a la balsa de cloración. La tabla 2.4 muestra la calidad del efluente regenerado.

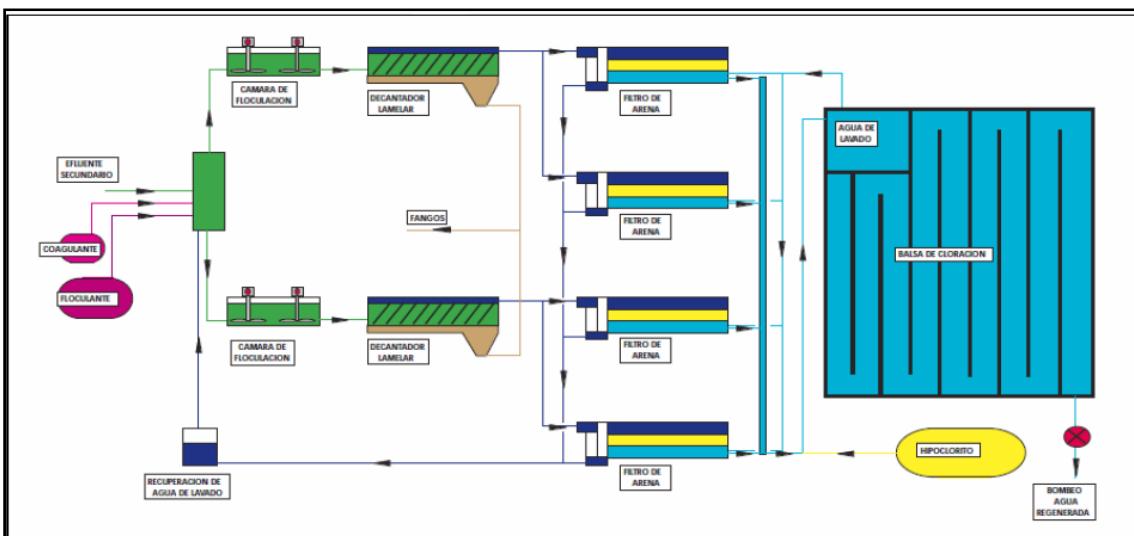


Figura 2.2 Esquema de funcionamiento de la planta de tratamiento terciario de Arato (Jordán, 2008)

Tabla 2.4 Calidad del efluente regenerado en la planta de tratamiento terciario de Arato

SS (mg/l)	Turbidez (NTU)	E. Coli (UFC/100)	Nematodos (Nº huevos/ 10L)	Costes explotación (€/m ³)
< 10	<5	<10	Ausencia	0,10-0,20

2.3 Fundamento teórico de la coagulación-floculación

La pequeña dimensión de las partículas coloidales presentes en un agua, así como la existencia de cargas negativas repartidas en su superficie, dan lugar a una gran estabilidad de las suspensiones coloidales por lo que es necesario desestabilizarlos para poder eliminarlos y ahí es donde entran en juego los coagulantes.

En el campo del tratamiento de aguas, la coagulación es, por definición, el fenómeno de desestabilización de las partículas coloidales, que puede conseguirse especialmente por medio de la neutralización de sus cargas eléctricas. Se llama coagulante al producto utilizado para esta neutralización. La agrupación de las partículas descargadas, al ponerse en contacto unas con otras, constituye la floculación, que da lugar a la formación de flóculos capaces de ser retenidos en una fase posterior del tratamiento del agua. Algunos productos pueden favorecer

la formación del flóculo; a éstos se les llama floculantes. La separación sólido-líquido, del flóculo formado y del agua, puede hacerse por filtración, por decantación o flotación, seguidas o no de filtración (Barrenechea, 2000).

Proceso de coagulación: Los coagulantes más utilizados son sales de aluminio o de hierro.

- Sulfato de aluminio: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 3 \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \rightarrow 3 \text{CaSO}_4 + 2 \text{Al(OH)}_3 + 6 \text{CO}_2$
- Sulfato de aluminio + cal: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 3 \text{Ca(OH)}_2 \rightarrow 3 \text{CaSO}_4 + 2 \text{Al(OH)}_3$
- Sulfato de aluminio + sosa cáustica: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 6 \text{NaOH} \rightarrow 2 \text{Al(OH)}_3 + 3 \text{Na}_2\text{SO}_4$
- Polímeros de aluminio: En ciertas condiciones, las sales de aluminio pueden condensarse, llegando a formarse polímeros capaces de coagular y flocular, como por ejemplo el policloruro básico de aluminio (PCBA).
- Cloruro férreo (líquido) $2 \text{FeCl}_3 + 3 \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \rightarrow 3 \text{CaCl}_2 + 2 \text{Fe(OH)}_3 + 6 \text{CO}_2$
- Cloruro férreo + cal: $2 \text{FeCl}_3 + 3 \text{Ca(OH)}_2 \rightarrow 3 \text{CaCl}_2 + 2 \text{Fe(OH)}_3$

A la hora de la elección del coagulante se deben tener en cuenta los siguientes factores: naturaleza y calidad del agua bruta, variación de la calidad del agua bruta, criterios de calidad y destino del agua tratada, tratamiento previsto después de la coagulación (coagulación sobre filtro, decantación), grado de pureza del reactivo y difusibilidad.

Proceso de floculación: El coagulante introducido da lugar a la formación del flóculo, pero es necesario aumentar su volumen su peso y sobre todo su cohesión. Los floculantes son los productos destinados para este fin. La sílice activada fue el primer floculante que se empleó, y sigue siendo, en la actualidad, el que mejores resultados puede dar. También existen floculantes minerales (algunas arcillas, blanco de Meudon o carbonato cálcico precipitado, carbón activo en polvo, arena fina, kieselguhr) y orgánicos.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1 Descripción de la planta piloto

Para la realización de los experimentos de regeneración del agua depurada se necesita agua de salida de depuradora. Conseguirla diariamente es prácticamente imposible, por lo que se instaló en el laboratorio del grupo de Calidad y Tratamiento de Aguas del departamento de Ingeniería Química y Tecnologías del Medioambiente una planta piloto de lodos activos como la que se puede ver en la figura 3.1. La planta consta de un reactor biológico y un decantador. El reactor tiene un sistema de aireación y agitación que suministra el oxígeno necesario a las bacterias encargadas de la depuración, además de homogeneizar los fangos activados. Las reacciones de oxidación y de síntesis celular aeróbicas se pueden expresar de forma genérica, como se puede ver a continuación:

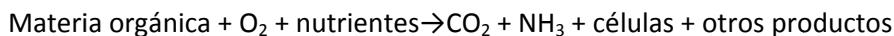


Figura 3.1 Planta piloto de lodos activos

El reactor es alimentado por agua residual sintética de caudal aproximado 1 l/h. A continuación pasa a un decantador donde se separa el fango biológico del agua. Parte de este se extrae del sistema y se recircula al reactor para mantener una concentración de microorganismos adecuada en él, aproximadamente entre 3.000 - 3.500 mg/L. El agua clarificada rebosa en el decantador y se recoge en una garrafa. El agua sintética de trabajo se prepara con agua destilada y los reactivos presentes en la tabla 3.1 obtenidos en la Directiva 82/243/CEE (C.O.D.E., 1982).

Tabla 3.1 Composición del agua sintética que alimenta la planta piloto de lodos activos

Reactivos	mg/L de agua
Glucosa	200
Peptona de carne	160
Extracto de carne	110
Urea $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	30
NaCl	7
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	4
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2
K_2HPO_4	28

3.2 Procedimiento de coagulación-floculación

3.2.1 Equipos

Se utiliza un Jar-test, de la marca SBS, en los experimentos (ver figura 3.2). Consta de seis palas las cuales tienen una velocidad de giro comprendida entre 10 r.p.m. y 275 r.p.m., así como de un controlador temporal.

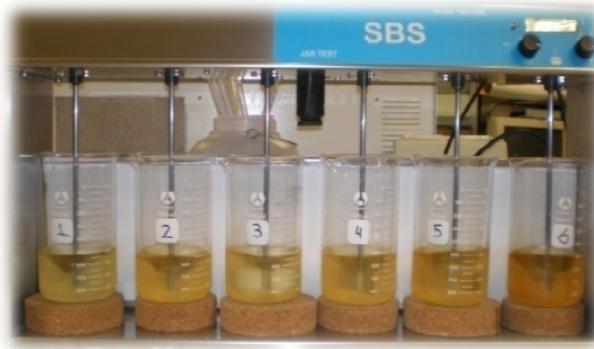


Figura 3.2 Jar-test utilizado en los experimentos de coagulación - floculación

3.2.2 Reactivos

Cal: Se usa calcio hidróxido natural ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), de la marca comercial Panreac, de una concentración aproximada de 0,03 g/ml para el acondicionamiento del pH.

NaOH: El hidróxido de sodio de concentración 0,1M, también de la marca comercial Panreac, es el otro reactivo usado para el acondicionamiento del pH.

Coagulantes: Tras una primera evaluación de varios coagulantes recibidos por distintas empresas, se estudian en este proyecto el sulfato de aluminio, el cloruro de hierro y el policloruro de aluminio, al ser los coagulantes más utilizados (Gonzalez et al, 2007; Kuan, 2009) (las fichas técnicas de todos los coagulantes se encuentran en el anexo I). Además, para este estudio se analiza la efectividad de un coagulante fabricado a partir de un residuo del anodizado del aluminio (SAF 056), y del SAF 05670 el cual se encuentra en fase experimental. Se ha estudiado el proceso de precipitación química, siguiendo las directrices de otros investigadores (Chen et al, 2010; Cheng et al, 2008; EPA, 2000; Illueca-Muñoz et al, 2008; Meza et al, 2002; Díaz et al, 2007).

Las características de los coagulantes utilizados se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Características de los cinco coagulantes utilizados en la experimentación

Coagulantes	Conc. Al^{3+} (mg/l)	Conc. Fe^{3+} (mg/l)	Densidad (g/ml)	Aspecto	Metales peligrosos
SAF 560	55.588	-	1,422	Líq. Transparente	No
SAF 056	43.729	-	1,325	Líq. denso amarillento	Si
SAF 05670	30.176	39.300	1,300	Líq. marrón con grumos	No
PAC	90.000	-	1,370	Líq. denso amarillento	No
FeCl_3	-	137.000	1,440	Líq. naranja oscuro	No

3.2.3 Parámetros indicadores

La tabla 3.3 muestra los parámetros utilizados en la caracterización de las muestras, la metodología analítica y la instrumentación usada.

Tabla 3.3 Parámetros físico-químicos analizados en el agua clarificada

Parámetro	Instrumento	Marca	Modelo	Error	Método normalizado
pH y temperatura	pH-metro	Crison	GLP 21	≤0.02 pH ≤ 0,3°C	4500-HB Standard Methods
Turbidimetría	Turbidímetro	Hanna	LP 2000	0,2 NTU	ISO 7027 Internacional Standards
Sólidos en suspensión	Fotómetro multiparámetro	Hartch Lange	DR 2800	-	2540D Standard Methods
Metales	Ionización en plasma de acoplamiento inductivo-espectrometría de masas	-	-	30%	3120B Standard Methods

3.2.4 Aplicación del tratamiento de coagulación – floculación

Los parámetros a evaluar como indicadores de la calidad del agua a regenerar son: turbidez, sólidos en suspensión, índice volumétrico de fangos (IVL), V_{30} , velocidad de sedimentación, presencia de metales (Al, Fe, Sn, Ni, B, Si, Ca, Mg, etc.) tanto en las aguas clarificadas como en los fangos, humedad de los fangos y costes asociados. El IVL y la V_{30} indican el volumen de fangos decantados con respecto a los sólidos en suspensión que inicialmente hay en el agua a tratar y el volumen de fangos con respecto al volumen de agua tratada, respectivamente. No se conoce un rango óptimo en el que el IVL se considere adecuado para este tipo de aguas ya depuradas, por lo que en este estudio se considera la diferencia obtenida entre los distintos valores del IVL. Además, se tiene en cuenta que el V_{30} sea inferior a un 30% debido a que este valor se cree el adecuado.

Los parámetros a determinar son la dosis óptima de coagulante y el pH del agua óptimo para el tratamiento. Debido a que el agua de salida de la planta piloto no contiene la cantidad de sólidos en suspensión necesaria para ver diferencias entre las dosis de los distintos coagulantes, se le añade una mayor cantidad de sólidos del propio reactor, hasta alcanzar una concentración aproximada de 28-35 mg/l, al ser esta última el máximo permitido a la salida de la EDAR. Los primeros ensayos que se realizan son para la elección de coagulante. Una vez seleccionado, se determina la dosis óptima de coagulante y el pH de trabajo, que son los que eliminan una mayor cantidad de sólidos en suspensión y turbidez del agua. Para poder comparar los coagulantes entre sí, se comparan las dosis de coagulante en mg/l de Al^{3+} y mg/l de Fe^{3+} .

Descripción del proceso:

En primer lugar se prepara la muestra a tratar, para lo cual se recoge el agua en un vaso de 2 litros y se le añade sólidos en suspensión hasta una concentración de 28-35 mg/l. Esta agua tiene que estar altamente homogeneizada, por lo que es agitada mediante un agitador magnético en una placa. A continuación, se distribuye en volúmenes de 300 ml en seis vasos de 1 litro. A cada muestra se le adiciona la cantidad de coagulante a estudiar y se le añade $Ca(OH)_2$ o $NaOH$ para el acondicionamiento del pH. Las seis muestras se colocan en el jar-test y se las somete al proceso de coagulación- floculación explicado en la tabla 3.4.

Dicha tabla muestra los parámetros de referencia y los escogidos para la experimentación.

Tabla 3.4 Parámetros operacionales del proceso coagulación - floculación

Bibliografía (Gonzalez et al, 2007; Kuan, 2009)			Experimentación	
Proceso	Tiempo (min)	Velocidad (r.p.m)	Tiempo (min)	Velocidad (r.p.m)
Coagulación	2-5	150-300	3	200
Floculación	10-15	30-50	15	40

Sobre el agua clarificada se miden los siguientes parámetros:

pH: El pH es la medida del grado de acidez o alcalinidad de un medio acuoso y se define como $-\log[H^+]$. Para la determinación del pH se utiliza un pH-metro marca CRISON, modelo GLP. La metodología empleada se basa en el método 4500-HB del *Standard Methods* (Eaton et al., 2005). Antes de la realización de la medida, el aparato debe ser calibrado. Para ello, se utiliza disoluciones tampón de pH 7,00 y 4,01 de la marca CRISON.

Turbidez: Se entiende como turbidez a la propiedad óptica de una muestra de dispersar o absorber la luz en lugar de transmitirla en línea recta. En otros términos, se define como la reducción de la transparencia de un líquido originada por la presencia de materias sin disolver. Para medir este parámetro se utiliza un turbidímetro Hanna LP 2000 (error ≤ 0.2 NTU), según la norma ISO 7027 (AENOR, 1999). Previamente a la medida, es necesario calibrar el instrumento con agua destilada. Los resultados se expresan en unidades nefelométricas de turbidez (NTU).

Sólidos en suspensión: La determinación de los sólidos en suspensión se realiza con un fotómetro multiparamétrico Hach Lange DR 2800 según el método 2540 D del *Standard Methods* (Eaton et al., 2005).

Metales pesados: La determinación de los metales pesados se realiza mediante la ionización en plasma de acoplamiento inductivo- espectrometría de masas según el método 3120B del *Standard Methods* (Eaton et al., 2005).

Sobre el fango generado se miden los siguientes parámetros:

Volumen: La medida del volumen ocupado por los fangos se realiza según el método 2710 C del *Standard Methods* (Eaton et al., 2005).

Humedad: Se entiende como humedad del fango la cantidad de agua que contiene. Para medir este parámetro se realiza por diferencia de peso entre el fango húmedo y seco, según la norma UNE 32-002.

V_{30} : Este parámetro indica el volumen ocupado por los fangos con respecto al total del agua clarificada. Se mide en ml/l.

Índice volumétrico de lodos (IVL): Se encuentra relacionado con el parámetro de la V_{30} , al calcularse al dividir la V_{30} entre los sólidos en suspensión totales, sus unidades son ml/mg.

Los parámetros analizados más comunes en este proceso son la turbidez y los sólidos en suspensión. El pH y la dosis óptima de coagulante para obtener un porcentaje de eliminación de turbidez determinado, según la bibliografía (Delgado et al, 2003; El Samrani et al, 2004) para el tratamiento de regeneración, son los que se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Condiciones óptimas de operación según bibliografía (Gonzalez et al, 2007; Kuan, 2009)

Coagulante	Sulfato de aluminio	Cloruro de hierro	Policloruro de aluminio
pH	6-7	8-9	6-7
Dosis óptima (mg/l)	20 - 30	60 – 100	10 – 20
Eliminación de turbidez (%)	30 - 40	50 – 60	<80

3.2.5 Condiciones de operación

Los experimentos realizados se dividen en tres bloques y a cada uno se le asigna un número del 1 al 77 para un mejor análisis. Los experimentos comprendidos entre el 1 y el 16, corresponden a los realizados con los coagulantes desechados. Los del 17 al 26 son los realizados para llevar a cabo la búsqueda del rango de dosis de coagulante óptimo (ver tabla 3.6). Por último, los del 27 al 77 son los experimentos realizados en el rango de dosis de coagulantes escogidos para calcular el pH y la dosis óptima (ver tabla 3.7) (Ver anexo II).

Tabla 3.6 Condiciones de operación de los experimentos realizados para la búsqueda de la dosis óptima de coagulante

Experimentos	Coagulante	pH natural	SS _i (mg/l)	Turbidez _i (NTU)	Dosis (mg/l)
17-18	SAF 560	7-8	28-35	80-300	3-185
19	SAF 056	7-8	28-35	80-300	3-25
20-22	SAF 05670	7-8	28-35	80-300	3-50
23	FeCl ₃	7-8	28-35	80-300	3-40
24-26	PAC	7-8	28-35	80-300	3-25

Tabla 3.7 Condiciones de operación de los experimentos realizados para la dosis de coagulante óptima

Experimentos	Coagulante	pH natural	SS _i (mg/l)	Turbidez _i (NTU)	Dosis (mg/l)	Reactivos	pH
27-34	SAF 560	7-8	28-35	80-300	5 y 10	Ca(OH) ₂ o NaOH	6-11
35-46	SAF 056	7-8	28-35	80-300	5-10	Ca(OH) ₂ o NaOH	6-11
47-57	SAF 05670	7-8	28-35	80-300	10-20	Ca(OH) ₂ o NaOH	6-11
58-65	PAC	7-8	28-35	80-300	10 y 15	Ca(OH) ₂ o NaOH	6-11
66-77	FeCl ₃	7-8	28-35	80-300	5-15	Ca(OH) ₂ o NaOH	6-11

4. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

4.1 Análisis de la influencia de variables

4.1.1 Estudio de la influencia del tipo y de la dosis de coagulante

Una vez seleccionados los coagulantes se determina la dosis más efectiva de estos, es decir, la menor cantidad de coagulante que más sólidos en suspensión y turbidez elimina. Para ello se estudian los efectos de diferentes dosis sobre el agua a regenerar, los resultados se incluyen en las figuras 4.1 y 4.2, donde se representan el porcentaje de turbidez y de sólidos en suspensión eliminados para distintas concentraciones de los coagulantes.

El porcentaje de eliminación de los coagulantes sigue la misma tendencia en ambas representaciones, lo cual tiene sentido ya que los propios sólidos crean turbidez en el agua, siendo más efectiva la eliminación de turbidez que de sólidos en suspensión. Por el contrario, no todos los coagulantes siguen la misma directriz, es decir, algunos son más efectivos cuanto mayor es su concentración como es el caso del PAC o del SAF 05670 pero a otros les ocurre lo contrario, como al SAF 560. Los coagulantes eliminan más de un 95% en turbidez y en sólidos en suspensión en su rango de dosis efectivo, resultando buenos coagulantes. En la tabla 4.1 se muestra el rango que se considera efectivo para cada coagulante.

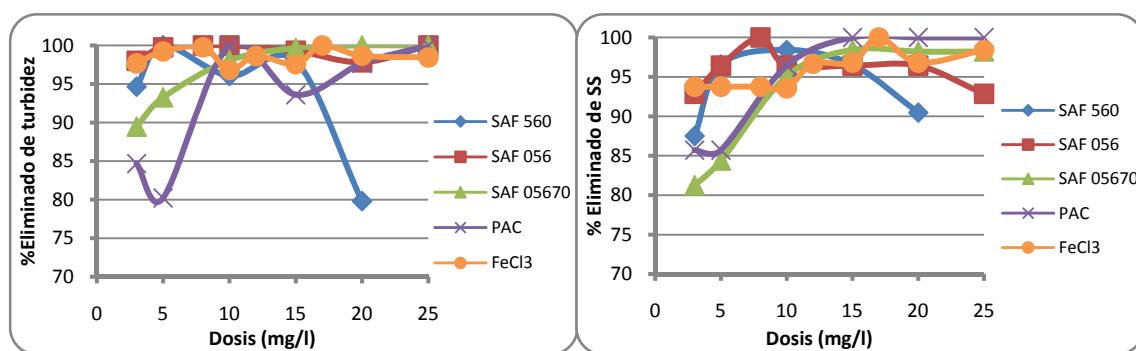


Figura 4.1 Eliminación de turbidez producida por los cinco coagulantes en función de la dosis utilizada

Figura 4.2 Eliminación de sólidos en suspensión producida por los cinco coagulantes en función de la dosis utilizada

Tabla 4.1 Rango efectivo de dosis de coagulante en la eliminación de turbidez y de sólidos en suspensión

Coagulante	SAF 560	SAF 056	SAF 05670	FeCl ₃	PAC
Dosis (mg/l)	5-10	5-10	10-20	5-15	10-15

4.1.2 Estudio de la influencia del pH en el rango efectivo de cada coagulante

En este apartado se analiza la influencia del pH acondicionado con $Ca(OH)_2$ o $NaOH$, para cada uno de los coagulantes en su rango efectivo.

En primer lugar se usa $Ca(OH)_2$ con una concentración de 0,03 g/ml, en la dosis efectiva de cada coagulante. Se compara el efecto del pH a las distintas concentraciones sobre los parámetros: sólidos en suspensión, turbidez, IVL y V_{30} ; siendo los dos primeros los más importantes a tener en cuenta.

En la tabla 4.2 se muestran las condiciones de operación y en la 4.3 los resultados obtenidos de distintos experimentos para cada coagulante en el rango de dosis efectivo para la elección de la dosis de coagulante óptima (Ver anexo III).

Tabla 4.2 Condiciones de operación de los experimentos usando como acondicionante del pH Ca(OH)_2

Coagulantes	pH natural	SS_i (mg/l)	Turbidez _i (NTU)	Dosis (mg/l)	pH
SAF 560	7-8	28-35	80-300	5 y 10	6-11
SAF 056	7-8	28-35	80-300	5-10	6-11
SAF 05670	7-8	28-35	80-300	10-20	6-11
FeCl_3	7-8	28-35	80-300	5-15	6-11
PAC	7-8	28-35	80-300	10 y 15	6-11

Tabla 4.3 Resultados obtenidos de la elección de la dosis óptima de coagulante usando como acondicionante del pH Ca(OH)_2

Coagulantes	Evolución del % de eliminación de SS y NTU en función del pH	Evolución del IVL en función del pH	Evolución de la V_{30} en función del pH	Dosis elegida
SAF 560	La dosis de 10 mg/l de Al^{3+} en el agua a tratar es más efectiva que la de 5 mg/l al eliminar una mayor cantidad. (Figura III.1)	El IVL a 10 mg/l es mayor que con 5 mg/l. La diferencia mostrada por ambas dosis es muy pequeña. (Figura III.2)	La V_{30} sigue la misma tendencia que el IVL. (Figura III.3)	La dosis de 10 mg/l es la escogida al ser la más efectiva.
SAF 056	La concentración de 10 mg/l de Al^{3+} del coagulante es la más efectiva, aunque todas tienen un rendimiento muy similar. (Figura III.4)	El IVL a 10 mg/l es el más alto. (Figura III.5)	La V_{30} sigue la misma tendencia que el IVL. (Figura III.6)	La dosis seleccionada es 10 mg/l al producir una mayor eliminación.
SAF 05670	La concentración de 10 mg/l de Al^{3+} y Fe^{3+} es la más adecuada. (Figura III.7)	Para una dosis de 10 mg/l, su IVL se encuentra entre el de 20 mg/l y el de 15 mg/l. (Figura III.8)	La V_{30} sigue la misma tendencia que el IVL. (Figura III.9)	La dosis de 10 mg/l es la escogida al proporcionar una mayor eliminación.
FeCl_3	La concentración de 15 mg/l de Fe^{3+} es la que produce un mayor rendimiento de eliminación de sólidos y turbidez. (Figura III.10)	Al aumentar el pH, el IVL aumenta y cuanto mayor es la dosis de coagulante mayor es el IVL lo cual no interesa. (Figura III.11)	La V_{30} sigue la misma tendencia que el IVL. (Figura III.12)	La dosis escogida es 15 mg/l al ser la más efectiva.
PAC	La dosis de 15 mg/l es la que produce un mayor rendimiento de eliminación. (Figura III.13)	La dosis de 15 mg/l proporciona un mayor IVL. (Figura III.14)	La V_{30} sigue la misma tendencia que el IVL. (Figura III.6)	Se selecciona 15 mg/l al proporcionar una mayor eliminación.

La tabla 4.4 muestra las dosis escogidas como óptimas para cada coagulante.

Tabla 4.4 Dosis seleccionadas para cada coagulante, usando como acondicionante del pH Ca(OH)_2

Coagulante	SAF 560	SAF 056	SAF 05670	FeCl_3	PAC
Dosis (mg/l)	10	10	10	15	15

Una vez escogida la dosis de coagulante (tabla 4.4) se analiza la influencia del pH sobre la dosis seleccionada considerando los parámetros: sólidos en suspensión, turbidez, índice volumétrico de sólidos (IVL), V_{30} y la velocidad de sedimentación, para seleccionar el pH óptimo.

Sólidos en suspensión y turbidez

La figura 4.3 representa el efecto de la variación de pH sobre la eliminación de la turbidez para la dosis de coagulante indicada en la tabla 4.4. La figura 4.4 es la correspondiente para la eliminación de sólidos en suspensión. Destacar que según el pH aumenta de 6 a 11, el rendimiento de los coagulantes disminuye, esto es así debido a que al aumentar el pH se está añadiendo un exceso de cal que no ayuda a la coagulación – floculación por lo que los sólidos no decantan. La eliminación de los sólidos es inferior a la de turbidez. Se considera pH óptimo para los cinco coagulantes el mismo, pH 7. A este pH todos eliminan por encima de un 90%, pero ninguno destaca por encima del resto, solamente el SAF 560 sufre una menor disminución del rendimiento de eliminación con el aumento del pH.

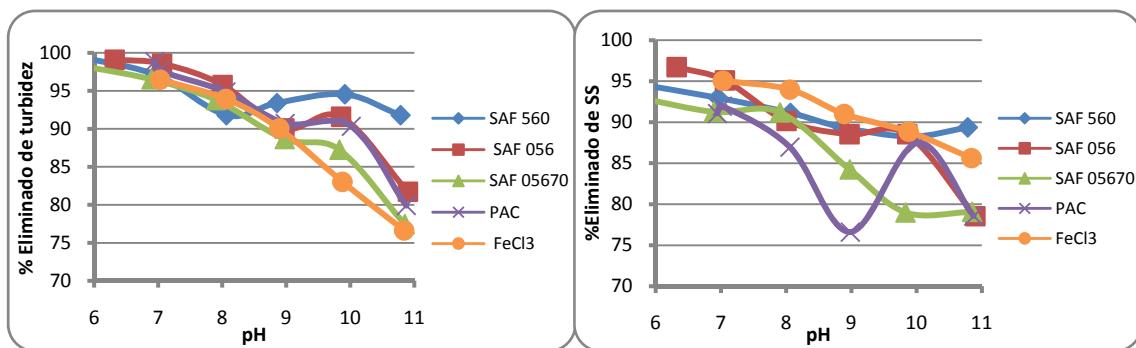


Figura 4.3 Influencia de la variación de pH con Ca(OH)_2 sobre la eliminación de la turbidez

Figura 4.4 Influencia de la variación de pH con Ca(OH)_2 sobre la eliminación de sólidos en suspensión

IVL y V_{30}

La figura 4.5 representa la variación que produce el aumento del pH sobre el IVL, y la figura 4.6 sobre la V_{30} , para las dosis de coagulante de la tabla 4.4. El comportamiento de estos coagulantes no sigue el mismo patrón, para algunos el IVL aumenta con el incremento del pH (SAF 560), para otros disminuye (SAF 056, PAC) y para otros se mantiene constante (SAF 05670, FeCl_3). Tanto la variación del IVL como la de la V_{30} con el pH, poseen la misma forma al depender entre sí.

Como se ha comentado en el apartado 3.2.4, no se tienen datos de referencia del IVL en este tipo de aguas, por lo que los datos obtenidos de él no proporcionan una conclusión clara. En cuanto a los valores de la V_{30} se encuentran entre 30 ml/l y 40 ml/l, lo cual supone un 3-4% de volumen de fangos con respecto a un litro de agua clarificada. Se ha estimado el límite en un 30% y el volumen aquí obtenido es muy inferior a este límite por lo que la sedimentación obtenida es realmente buena.

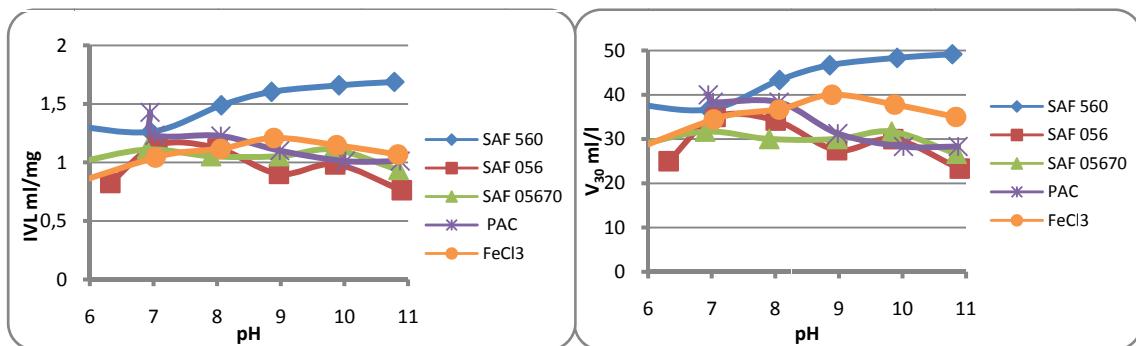


Figura 4.5 Influencia de la variación de pH con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sobre IVL

Figura 4.6 Influencia de la variación de pH con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sobre V_{30}

Puede darse el caso de que si la cantidad de fangos decantada es pequeña sea debido a que no han sedimentado todos los sólidos en suspensión que debieran. Esta situación no es deseable por lo que se representa el IVL y la turbidez en función del pH para poder observar este efecto para cada coagulante, estas representaciones son las que se comentan posteriormente.

Para el SAF 560 (figura III.16) al aumentar el pH el IVL aumenta y la turbidez eliminada disminuye; como ambas situaciones no son deseables, pH 7 es en el que el coagulante actúa de manera más efectiva al dar lugar a un menor IVL y una mayor eliminación. En el caso de SAF 056 (figura III.17) se observa que aunque al aumentar el pH el IVL disminuye también lo hace el porcentaje eliminado de turbidez, por lo que el pH 7 resulta ser el óptimo al eliminar una mayor turbidez. Para el caso del SAF 05670 (figura III.18), el FeCl_3 (figura III.19) y el PAC (figura III.20), sucede lo mismo que para el coagulante SAF 056, que al aumentar el pH el IVL disminuye y la turbidez eliminada también, por lo que para los tres el pH 7 es en el que el coagulante actúa de forma más efectiva, aunque esto suponga que el IVL sea ligeramente mayor.

De las figuras III.16 – III.20, se deduce que el pH óptimo de trabajo es pH 7 para los cinco coagulantes. También destacar que el IVL para el SAF 560 aumenta con el pH debido a que al añadir una mayor cantidad de cal el volumen de lodos decantados se ve aumentado. Para el resto de coagulantes, lo que sucede cuando el pH aumenta es que el fenómeno coagulación - floculación no se produce como debiese, por lo que muchos sólidos quedan en suspensión. Consecuentemente el IVL disminuye al no decantar estos sólidos y la turbidez en el agua clarificada aumenta por el mismo hecho.

Velocidad de sedimentación

La figura 4.7 muestra la velocidad de sedimentación de los fangos que se consigue tras el uso de cada coagulante en función del pH del agua. Como se aprecia, generalmente se encuentra comprendida entre 0,2 y 0,3 cm/s, pero no se puede decir que siga una tendencia determinada. La velocidad de sedimentación con los coagulantes SAF 560 y SAF 056 es algo inferior a las demás y las de FeCl_3 y SAF 05670 ligeramente superior. Según datos bibliográficos (WEF-ASCE, 1998) la velocidad de sedimentación debe ser superior o igual a 6 m/h. La velocidad aquí obtenida se encuentra entre 7,2 m/h y 10,8 m/h, es decir, superior a la considerada como óptima por lo que la sedimentación es realmente rápida.

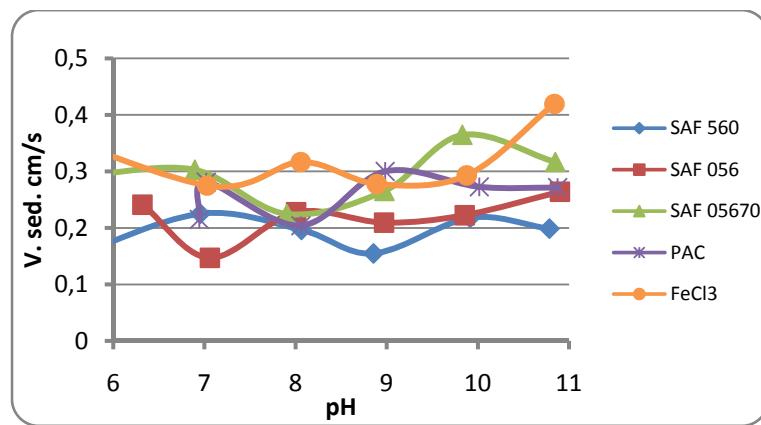


Figura 4.7 Influencia de la variación de pH con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sobre la velocidad de sedimentación

En la tabla 4.5 se observan las condiciones de operación que se consideran las más adecuadas en cada caso. Destacar que tanto para el FeCl_3 como para el PAC la dosis necesaria es mayor, lo que no implica una mayor cantidad de coagulante a añadir (tabla 4.6). Esto es así debido a que la concentración de los metales (Al^{3+} y Fe^{3+}) en cada coagulante es distinta, por lo que el volumen necesario también lo es. El pH óptimo resultante (pH 7), es el mismo para los cinco coagulantes. Para alcanzar este pH, la cantidad de cal de concentración 0,03 g/ml a añadir no es elevada, debido a que el pH que posee el agua una vez adicionado el coagulante se encuentra entre 5,5 y 6,5 (exceptuando el caso del FeCl_3). Esta cantidad también depende de otros parámetros como son el pH inicial del agua, la acidez del coagulante y la dosis necesaria (tabla 4.6).

Tabla 4.5 Condiciones de operación seleccionadas para cada uno de los coagulantes cuando el acondicionante del pH es $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Coagulante	SAF 056	SAF 056	SAF 05670	FeCl_3	PAC
Dosis (mg/l)	10	10	10	15	15
pH	7	7	7	7	7

Tabla 4.6 Volumen de coagulante y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ necesarios para alcanzar las condiciones de operación seleccionadas en función del coagulante utilizado

	pH _i agua	pH aprox. del agua con coagulante	Dosis de coagulante (mg/l)	Volumen de coagulante (ml/l agua)	Volumen medio de cal (ml/l agua)
SAF 560	7 - 8	5,91	10	0,18	1,08
SAF056	7 - 8	6,32	10	0,23	1,13
SAF05670	7 - 8	5,75	10	0,14	1,42
PAC	7 - 8	6,97	15	0,08	0,33
FeCl_3	7 - 8	3,89	15	0,11	1,42

4. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

De forma análoga se estudia la influencia del pH, usando $NaOH$ 0,1 M, para escoger la dosis más efectiva en cada uno de los coagulantes. Se compara el efecto del pH a las distintas dosis sobre los parámetros: sólidos en suspensión, turbidez, IVL y V_{30} .

En la tabla 4.7 se muestran las condiciones de operación y en la 4.8 los resultados obtenidos de distintos experimentos para cada coagulante en el rango de dosis efectivo para la elección de la concentración de coagulante óptima (ver anexo III).

Tabla 4.7 Condiciones de operación de los experimentos usando como acondicionante del pH $NaOH$

Coagulantes	pH natural	SS_i (mg/l)	Turbidez _i (NTU)	Dosis (mg/l)	pH
SAF 560	7-8	28-35	80-300	5 y 10	6-11
SAF 056	7-8	28-35	80-300	5-10	6-11
SAF 05670	7-8	28-35	80-300	10-20	6-11
FeCl ₃	7-8	28-35	80-300	5-15	6-11
PAC	7-8	28-35	80-300	10 y 15	6-11

Tabla 4.8 Resultados obtenidos de la elección de la dosis óptima de coagulante usando como acondicionante del pH $NaOH$

Coagulantes	Evolución del % de eliminación de SS y NTU en función del pH	Evolución del IVL en función del pH	Evolución de la V_{30} en función del pH	Dosis elegida
SAF 560	La concentración de 5 mg/l de Al^{3+} en el agua a tratar es más efectiva que la de 10 mg/l. (Figura III.21)	Las 5 mg/l de Al^{3+} del coagulante dan lugar a un menor IVL. (Figura III.22)	La V_{30} sigue la misma tendencia que el IVL. (Figura III.23)	La dosis seleccionada de 5 mg/l da lugar a un menor IVL y proporciona una mayor eliminación.
SAF 056	La concentración de 10 mg/l es la más efectiva. (Figura III.24)	Con una dosis de 10 mg/l se genera un IVL más elevado que con las otras dosis estudiadas. (Figura III.25)	La V_{30} sigue la misma tendencia que el IVL. (Figura III.26)	Se escoge la dosis de 10 mg/l al producir una mayor eliminación.
SAF 05670	La concentración de 15 mg/l de Al^{3+} y Fe^{3+} es la más adecuada. (Figura III.27)	La dosis de 15 mg/l da lugar a un IVL intermedio, entre el generado por una dosis de 10 mg/l y el de una de 20 mg/l. (Figura III.28)	La V_{30} sigue la misma tendencia que el IVL. (Figura III.29)	Se escoge 15 mg/l al producir una mayor eliminación.
FeCl ₃	La concentración de 15 mg/l de Fe^{3+} es la que produce un mayor rendimiento de eliminación. (Figura III.30)	Al no producirse un volumen de fangos medible no se puede realizar esta representación.	Al no producirse un volumen de fangos medible no se puede realizar esta representación.	Se escoge 15 mg/l al producir una mayor eliminación.

Tabla 4.8 Resultados obtenidos de la elección de la dosis óptima de coagulante usando como acondicionante del pH NaOH

Coagulantes	Evolución del % de eliminación de SS y NTU en función del pH	Evolución del IVL en función del pH	Evolución de la V_{30} en función del pH	Dosis elegida
PAC	La dosis de 15 mg/l es la más efectiva. (Figura III.31)	El IVL a 15 mg/l es ligeramente superior que a 10 mg/l. (Figura III.32)	La V_{30} sigue la misma tendencia que el IVL. (Figura III.33)	La dosis seleccionada es 15 mg/l al ser la que produce un mayor rendimiento de eliminación.

La tabla 4.9 muestra las dosis escogidas como óptimas para cada coagulante.

Tabla 4.9 Dosis seleccionadas para cada coagulante, usando como acondicionante del pH NaOH

Coagulante	SAF 560	SAF 056	SAF 05670	FeCl ₃	PAC
Dosis (mg/l)	5	10	15	15	15

Una vez escogida la dosis óptima para cada coagulante, se muestra la influencia del pH sobre los parámetros: sólidos en suspensión, turbidez, índice volumétrico de sólidos (IVL), V_{30} y la velocidad de sedimentación. Según este estudio se selecciona el pH óptimo.

Sólidos en suspensión y turbidez

La figura 4.8 muestra el efecto de la variación de pH sobre la eliminación de la turbidez para la dosis de coagulante indicada en la tabla 4.9. La representación de la figura 4.9 es la correspondiente para la eliminación de sólidos en suspensión. Se observa que al aumentar el pH de 6 a 11, el porcentaje de eliminación en ambas figuras disminuye. La eliminación de sólidos en suspensión es menos efectiva. Se considera pH 7 como el más idóneo. El efecto es muy similar al del uso de la cal para el acondicionamiento del pH. La eliminación de sólidos en suspensión y de turbidez, a pH 7, se encuentra entre un 85% y un 95%. No se observa que ningún coagulante destaque sobre los demás, aunque si un elevado descenso del rendimiento de eliminación a partir de pH 8-9.

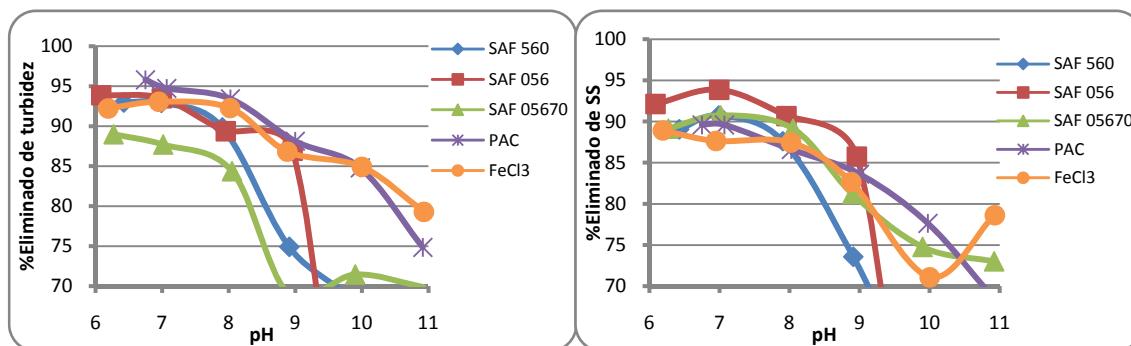


Figura 4.8 Influencia de la variación de pH con NaOH sobre la eliminación de la turbidez

Figura 4.9 Influencia de la variación del pH con NaOH sobre la eliminación de sólidos en suspensión

IVL y V_{30}

La figura 4.10 presenta la variación que produce el pH sobre el IVL, y la figura 4.11 sobre la V_{30} , para las dosis de coagulante de la tabla 4.10. La tendencia que se aprecia es que el IVL disminuye al aumentar el pH. Esto es debido a que los sólidos no decantan.

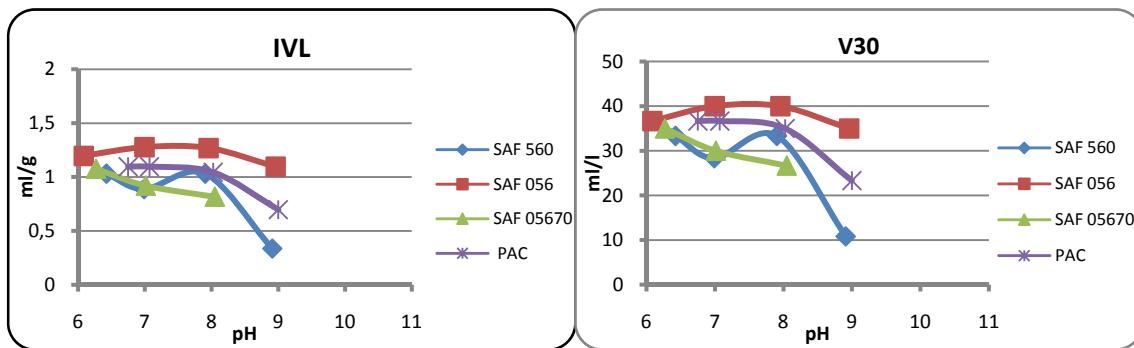


Figura 4.10 Influencia de la variación de pH con NaOH sobre IVL

Figura 4.11 Influencia de la variación de pH con NaOH sobre V_{30}

En estas representaciones no se encuentra el FeCl_3 debido a que, como ya se ha comentado, con este coagulante no se obtiene un volumen de fangos medible. La representación del IVL y la V_{30} a partir de pH 9 no es posible porque no se obtiene un volumen medible de fangos. La V_{30} obtenida, hasta pH 8, da lugar a un 3-4% de volumen de fangos sedimentados con respecto a un litro de agua clarificada. Sucede lo mismo que con el uso del $\text{Ca}(\text{OH})_2$, por lo que se obtiene una buena sedimentación al obtener un volumen del fangos por debajo del 30%.

Para observar este hecho con más detenimiento, se representa en la misma gráfica el IVL y el porcentaje de eliminación de turbidez en función del pH. Las representaciones para cada coagulante, excepto para el FeCl_3 , son: SAF 560 (figura III.34), SAF 056 (figura III.35), SAF 05670 (figura III.36), PAC (figura III.37). Lo que sucede, de forma generalizada, es que según aumenta el pH disminuye rápidamente el IVL así como el porcentaje de eliminación de turbidez. La justificación de este comportamiento se encuentra en que muchos coagulantes necesitan de la cal para coagular. A pH 7, es donde se obtiene una mayor eliminación de turbidez y de sólidos en el agua clarificada.

Velocidad de sedimentación

La figura 4.12 muestra la velocidad de sedimentación de los fangos que se consigue tras el uso de cada coagulante en función del pH del agua. Se encuentra comprendida entre 0,1 y 0,2 cm/s (equivalente a 3,6 m/h y 7,2 m/h), pero no se puede decir que sigan una directriz determinada. La velocidad de sedimentación con los coagulantes SAF 05670 y SAF 056 es algo inferior a las demás. En este caso la velocidad de sedimentación es ligeramente inferior a la obtenida con el uso del $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

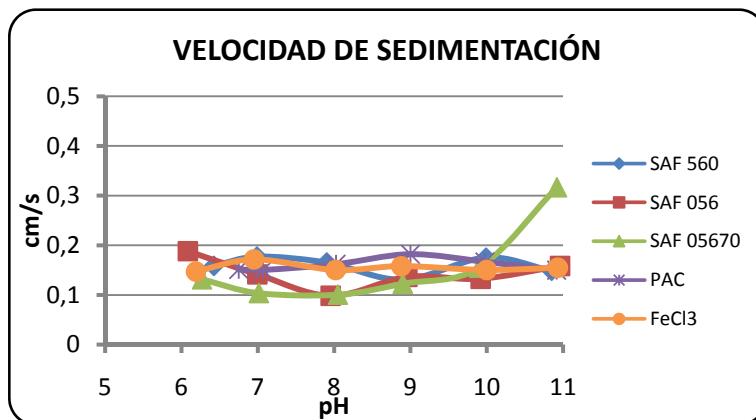


Figura 4.12 Influencia de la variación de pH, con NaOH, en la velocidad de sedimentación de los fangos

La tabla 4.10 muestra las condiciones de operación elegidas cuando se trabaja con $NaOH$ para el acondicionamiento del pH. El pH óptimo resultante (pH 7), es el mismo para todos los coagulantes. Es decir, es el resultado que también se obtiene si se usa cal para el acondicionamiento del pH. En la tabla 4.11 aparece el volumen de la disolución de $NaOH$ 0,1M a añadir para alcanzar el pH necesario, así como el volumen de coagulante a añadir.

Tabla 4.10 Condiciones de operación seleccionadas para cada uno de los coagulantes cuando el acondicionante del pH es $NaOH$

Coagulante	SAF 056	SAF 056	SAF 05670	$FeCl_3$	PAC
Dosis (mg/l)	5	10	15	15	15
pH	7	7	7	7	7

Tabla 4.11 Volumen de coagulante y $NaOH$ necesarios para alcanzar las condiciones de operación seleccionadas en función del coagulante utilizado

Coagulante	pH _i agua	pH aprox. del agua con coagulante	Dosis de coagulante (mg/l)	Volumen de coagulante (ml/l agua)	Volumen medio de $NaOH$ (ml/l agua)
SAF 560	(7-8)	6,43	5	0,09	0,50
SAF056	(7-8)	6,09	10	0,23	1,17
SAF05670	(7-8)	6,27	15	0,22	1,08
PAC	(7-8)	6,19	15	0,08	0,75
FeCl3	(7-8)	6,75	15	0,11	0,33

4.2 Estudio comparativo

4.2.1 Estudio del tipo de coagulante

En este apartado se presenta la comparativa entre los cinco coagulantes utilizados usando como acondicionantes del pH $Ca(OH)_2$ o $NaOH$.

En primer lugar, se muestra el resultado obtenido al usar $Ca(OH)_2$ como acondicionante del pH. La figura 4.13 presenta la efectividad en la eliminación de turbidez y de sólidos en suspensión con las condiciones de operación indicadas en la tabla 4.5 para cada coagulante.

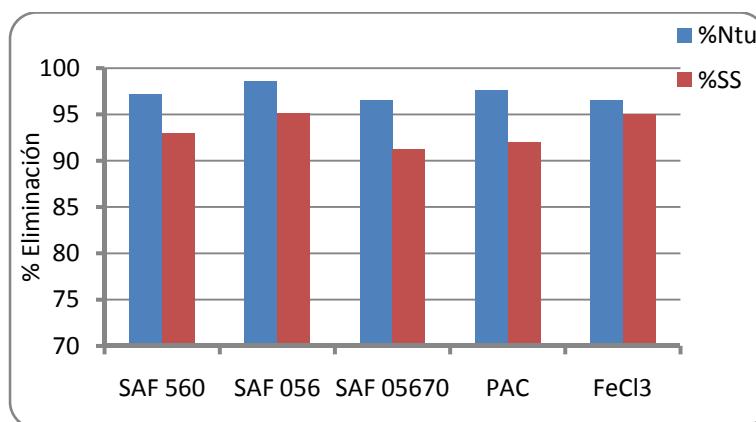


Figura 4.13 Eliminación de turbidez y de sólidos en suspensión en función del coagulante a pH 7. Usando $Ca(OH)_2$ como acondicionante del pH

Los coagulantes estudiados son realmente efectivos, ya que todos eliminan por encima de un 95% la turbidez y de un 90% los sólidos en suspensión. La eliminación de turbidez es mayor que la de sólidos en todos los casos. En base a estos dos parámetros estudiados, el coagulante que parece destacar es el SAF 056. El SAF 05670 resulta ser el menos efectivo, aún así elimina una gran cantidad de turbidez y de sólidos en suspensión. Para el caso del SAF 056 al ser un residuo del anodizado y contener metales pesados, se hace un estudio complementario en el apartado 4.3. Por otro lado, no se obtiene una diferencia clara entre el sulfato de aluminio (SAF 560) y el cloruro de hierro ($FeCl_3$), aunque este último, produce una eliminación más similar en sólidos y en turbidez que el SAF 560.

La figura 4.14 muestra el V_{30} obtenido en función del coagulante utilizado, con las condiciones de operación de la tabla 4.5. El volumen de fangos obtenidos se encuentra entre 3% y 4% del agua clarificada total, este dato quiere decir que la sedimentación realizada es perfecta. El V_{30} del SAF 560 y del PAC son ligeramente superiores a los demás y el del $FeCl_3$ es el de menor valor.

En la figura 4.15 se presenta la velocidad de sedimentación de los fangos en función del coagulante empleado, con las condiciones de operación mostradas en la tabla 4.5. Esta velocidad se encuentra entre 0,2 cm/s y 0,3 cm/s, es decir, 7,2 m/h y 10,8 m/h; al ser superior a la velocidad considerada como óptima, 6m/h, la sedimentación es realmente efectiva.

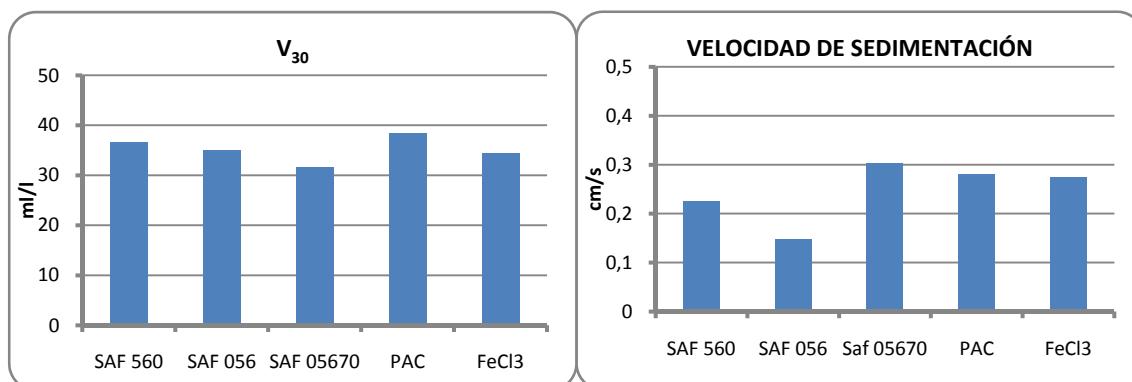


Figura 4.14 V_{30} obtenido en función del coagulante empleado a pH 7. Usando $Ca(OH)_2$ como acondicionante del pH

Figura 4.15 Velocidad de sedimentación de los fangos en función del coagulante empleado a pH 7. Usando $Ca(OH)_2$ como acondicionante del pH

Tras las comparativas anteriores, seleccionar un único coagulante resulta complicado al ser todos realmente efectivos. Por un lado el $FeCl_3$ se puede considerar uno de los mejores, ya que el V_{30} generado por él es uno de los menores y su rendimiento de eliminación, tanto de turbidez como de sólidos en suspensión, se encuentra en torno al 95%, en ambos parámetros. Por otro lado, el SAF 056 es el más efectivo en la eliminación pero el que más lento sedimenta, aún así para una altura de calado de 2 metros y un tiempo de residencia de 2 horas (parámetros estándar) el fango tiene tiempo suficiente para sedimentar.

Tras haber analizado los resultados obtenidos con el uso del $Ca(OH)_2$ como acondicionante del pH, se muestra la comparativa entre los distintos coagulantes cuando se usa $NaOH$. La figura 4.16 presenta la efectividad de eliminación de turbidez y de sólidos en suspensión a las condiciones de operación de la tabla 4.10.

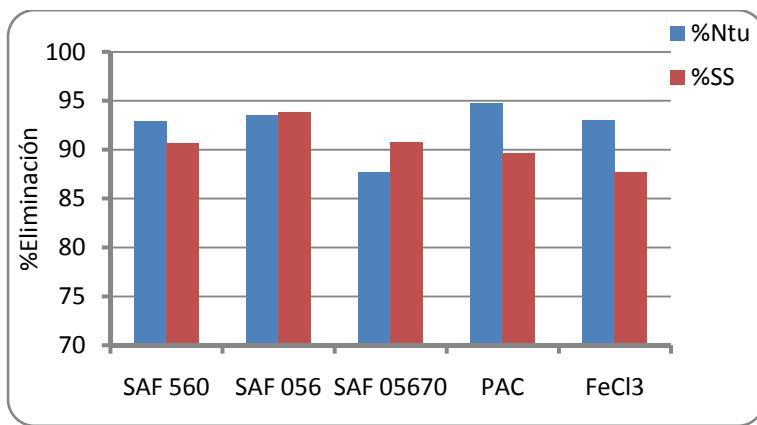


Figura 4.16 Eliminación de turbidez y de sólidos en suspensión en función del coagulante a pH 7. Usando NaOH como acondicionante del pH

El rendimiento de eliminación, tanto de turbiedad como de sólidos en suspensión, se encuentra entre un 85% y 95%, siendo inferior la eliminación de estos últimos. No existe una clara diferencia entre los coagulantes, lo cual también sucede con el uso del $\text{Ca}(\text{OH})_2$. El hecho de que el FeCl_3 y el SAF 05670 son tan efectivos como el resto es debido a que la coagulación con NaOH cuando se encuentra presente el hierro no es eficaz. El que resulta ser más efectivo cuando se usa NaOH es el SAF 056 con un 94% de eliminación aproximadamente. En este caso sí que se obtiene una mayor diferencia entre el sulfato de aluminio (SAF 560) y el cloruro de hierro (FeCl_3), al resultar mejor el primero.

La figura 4.17 muestra el V_{30} obtenido haciendo uso de cada coagulante, con las condiciones de operación de la tabla 4.10. Para el FeCl_3 no se puede representar debido a que como ya se ha comentado, cuando se usa este coagulante los sólidos en suspensión no llegan a decantarse haciendo imposible el cálculo de IVL y de V_{30} . En todos los casos, el volumen de fangos obtenidos es del 3 - 4% lo que da lugar a una buena sedimentación.

En la figura 4.18 se presenta la velocidad de sedimentación de los fangos en función del coagulante empleado, con las condiciones de operación mostradas en la tabla 4.10. Todos los coagulantes poseen una velocidad comprendida entre 0,1 y 0,2 cm/s (equivalente a 3,6 m/h y 7,2 m/h), velocidades siempre próximas a la óptima de 6 m/h. Aunque el SAF 056 provoca una mejor eliminación, su V_{30} es el mayor y su velocidad de sedimentación una de las menores.

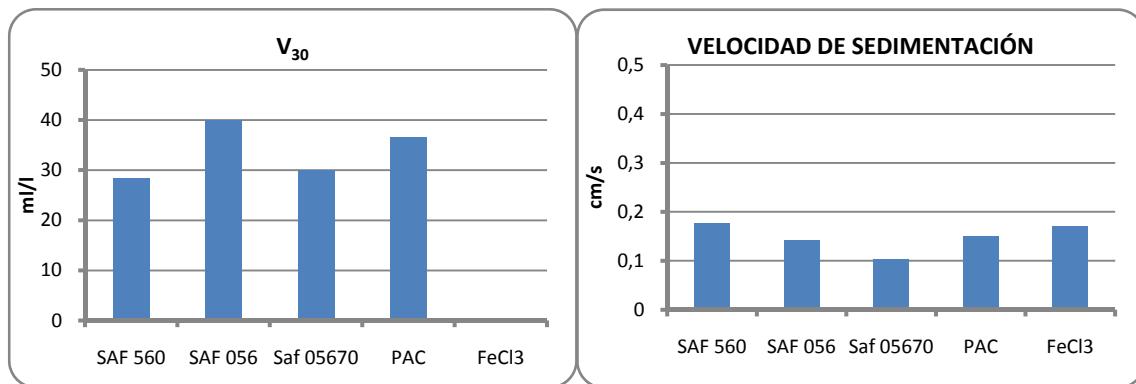


Figura 4.17 V_{30} obtenido en función del coagulante empleado a pH 7. Usando NaOH como acondicionante del pH

Figura 4.18 Velocidad de sedimentación de los fangos en función del coagulante empleado a pH 7. Usando NaOH como acondicionante del pH

El FeCl_3 no puede ser considerado dentro de las posibles elecciones al no producir un volumen de fangos decantados medibles, así pues, el SAF 056 es el más apropiado al eliminar una mayor cantidad de turbidez y de sólidos en suspensión, aunque el SAF 560 y el PAC tienen prácticamente la misma efectividad.

4.2.2 Estudio comparativo de los acondicionantes del pH

Las figura 4.19 y 4.20 muestran el porcentaje de eliminación de turbidez y el de sólidos en suspensión, respectivamente, en función del coagulante utilizado, tanto al usar $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y NaOH como acondicionantes del pH.

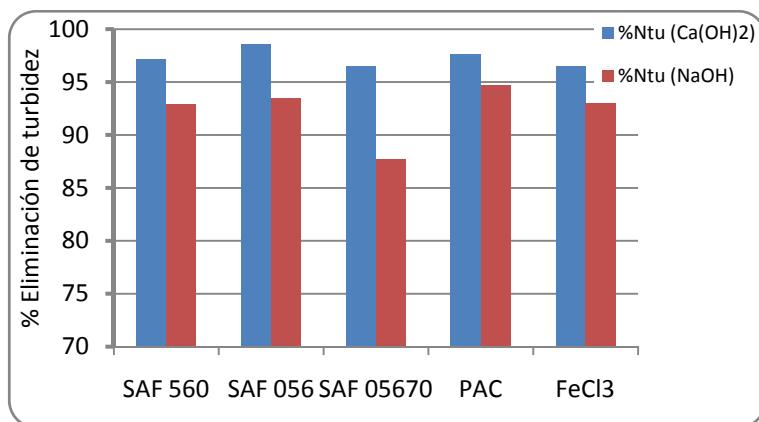


Figura 4.19 Eliminación de turbidez a pH 7 en función del coagulante

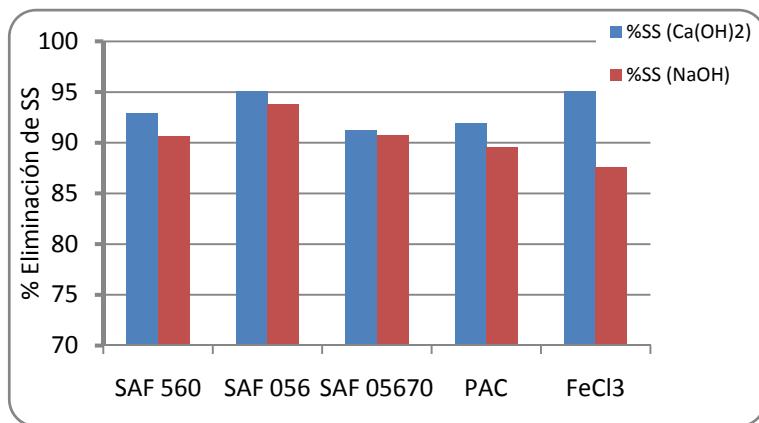
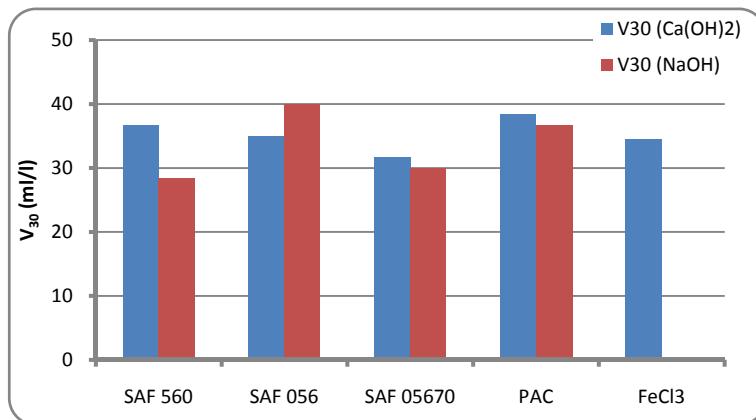


Figura 4.20 Eliminación de sólidos en suspensión a pH 7 en función del coagulante

En ambas figuras, se aprecia que la eliminación de turbidez y de sólidos en suspensión es más efectiva con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que con NaOH . La mayor diferencia se produce en el SAF 05670 y en el FeCl_3 , debido a su contenido en hierro. El contraste en el rendimiento de eliminación, de los parámetros comentados, es mayor en la turbidez que en los sólidos en suspensión. Es realmente complicado elegir que coagulante es más efectivo, pero si se puede destacar el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ como el mejor acondicionante del pH.

Continuando con el análisis de los parámetros de los coagulantes, la figura 4.21 muestra el V_{30} obtenido en función del coagulante utilizado, usando $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y NaOH como acondicionantes del pH.

Figura 4.21 V_{30} obtenido a pH 7 en función del coagulante empleado

Exceptuando el caso del SAF 056, el V_{30} que se obtiene con el uso de Ca(OH)_2 , es superior al que se logra con el NaOH. Esto viene provocado porque se produce una mayor sedimentación de los sólidos en suspensión usando Ca(OH)_2 . No interesa que el V_{30} sea superior al 30%, ya que indica que hay que gestionar una mayor cantidad de fangos lo que repercute económicamente en el tratamiento. Los resultados obtenidos indican que el V_{30} en todos los casos se encuentra entre el 3-4%.

Sin embargo, haciendo uso del NaOH lo que sucede es que estos no sedimentan y se quedan en el agua clarificada, con lo que el agua no sería apta para su reutilización. De esta comparativa se observa que cuando se usa el Ca(OH)_2 el que da lugar a un menor V_{30} es el SAF 05670 y cuando se usa el NaOH resulta ser el SAF 560.

El último de los parámetros a analizar es la velocidad de sedimentación de los fangos en función del coagulante utilizado, haciendo uso del Ca(OH)_2 y de NaOH. Los resultados se muestran en la figura 4.22.

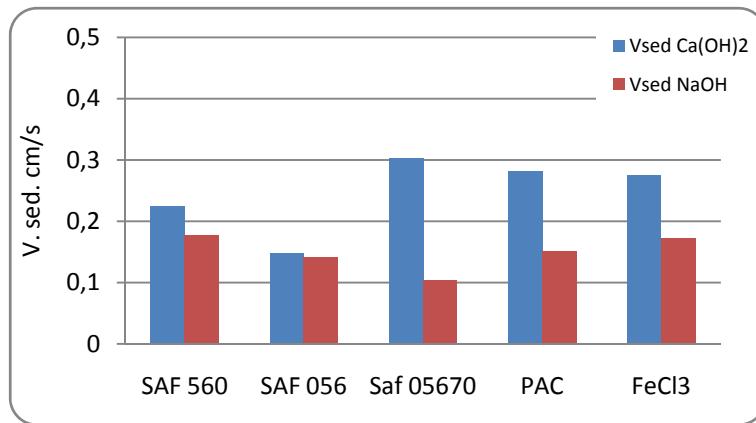


Figura 4.22 Velocidad de sedimentación de los fangos a pH 7 en función del coagulante utilizado

En todos los casos la velocidad de sedimentación es mayor usando Ca(OH)_2 que NaOH. Para el caso del Ca(OH)_2 , se encuentra entre 0,2 y 0,3 cm/s y entre 0,1 y 0,2 cm/s para el NaOH. El hecho de que los fangos decanten más rápido es importante para el dimensionamiento del decantador, es decir, cuanto más tardan en decantar mayor es el tiempo que se emplea en la sedimentación, lo que aumenta los costes.

Concluyendo, el acondicionante del pH más apropiado es el Ca(OH)_2 . El coagulante que destaca ligeramente sobre los demás es el FeCl_3 . Elimina más sólidos en suspensión y turbidez, además de proporcionar uno de los menores V_{30} y una de las mayores velocidades de sedimentación.

4.3 Estudio del SAF 056

Como se ha comentado en el apartado 4.2.2, se ha realizado un estudio especial para el uso del coagulante SAF 056 ya que al estar fabricado a partir de un residuo del anodizado del aluminio y contener metales pesados es necesario determinar el destino de estos. Su uso como coagulante justificaría su valorización. Debido a la presencia de distintos metales pesados en el SAF 056, anexo IV, es necesario analizar la presencia de los mismos en el agua clarificada una vez usado el coagulante. La tabla 4.12 muestra, de manera resumida, los metales presentes, en cantidad significativa, tanto en el coagulante como en el agua clarificada y en el fango resultante.

Los metales presentes en una mayor cantidad en el SAF 056 son: Al, Sn, Fe, Mg, P y Ca. Según el análisis realizado al agua clarificada, la cantidad presente de Sn, Fe y P es muy reducida, con la importancia que esto supone. Por otro lado, se detectó que el Mg y el Ca, se ven aumentados con respecto a su cantidad en el SAF 056, al encontrarse presentes en el agua. El metal presente en una mayor concentración en el SAF 056 es el aluminio, pero la mayor parte de él acaba en el fango.

El agua regenerada de este estudio, contiene algunos de los metales presentes en la tabla 2.3, pero todos en cantidades menores. Consecuentemente, el agua es apta para su reutilización.

Por último no hay que olvidar los metales presentes en el fango, cuya gestión como residuo peligroso o no peligroso es importante, repercutiendo directamente en los costes.

Según la ORDEN MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos, los lodos procedentes de un tratamiento de regeneración de las aguas se clasifican con el código 19 08 05 lodos del tratamiento de aguas residuales urbanas. En el caso que nos ocupa el lodo generado tras el uso del SAF 056 contiene los metales presentes en la tabla 4.12. En el anexo 2 de la ORDEN MAM/304/2002, se estable el procedimiento por el cual se clasifica un residuo como peligroso o no peligroso. Dicho anexo indica que el lodo tiene que contener una sustancia clasificada como tóxica y/o cancerígena y/o nociva con una concentración superior al 0,1%, para ser considerado como peligroso.

Para este estudio se añaden las dos últimas columnas de la tabla 4.12, en las que se indican los gramos y el porcentaje de metal por kilogramo de materia seca. Tras analizar el fango, solamente el aluminio supera esta concentración pero al no ser tóxico, cancerígeno o nocivo, el fango resultante de la regeneración se clasifica como residuo no peligroso.

4. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

Tabla 4.12 Metales presentes en el SAF 056, así como en el agua clarificada por él y en el fango resultante del tratamiento de regeneración

Metales	Conc. en el coagulante (mg/l)	Metales en el agua reg. (mg)	Conc. en el agua reg (mg/l)	Metales en el fango (mg)	g/kg m.s en el fango	% de metales en el fango
Al	40.700	3,43E-01	1,14	2,45	1,06E+02	1,06E+01
Ni	36,8	0	0,00	2,52E-03	1,10E-01	1,10E-02
Sn	339	6,36E-04	2,12E-03	2,26E-02	9,81E-01	9,81E-02
Fe	146	-		9,97E-03	4,34E-01	4,34E-02
Na	-	6,16	2,05E+01	-	-	-
Mg	143	5,40E-01	1,80	-	-	-
Si	55,4	6,55E-02	2,18E-01	-	-	-
P	85,1	1,54E-01	5,13E-01	-	-	-
K	-	4,07	1,36E+01	-	-	-
Ca	400	8,58	2,86E+01	-	-	-
B	42,2	4,64E-03	1,55E-02	-	-	-
Mn	13,2	2,55E-03	8,50E-03	-	-	-
Cu	7,29	2,74E-03	9,13E-03	-	-	-
Zn	8,27	1,87E-03	6,23E-03	-	-	-
Ti	3,39	1,12E-03	3,73E-03	-	-	-
V	2,35	6,63E-04	2,21E-03	-	-	-
Cr	3,31	0	0,00	2,27E-04	9,86E-03	9,86E-04
Ga	2,01	7,20E-05	2,40E-04	6,57E-05	2,86E-03	2,86E-04

5. DIMENSIONAMIENTO DE INSTALACIONES

En este apartado se presentan los resultados del dimensionamiento de las instalaciones que deberían utilizarse en el tratamiento de regeneración de aguas procedentes de diversas EDARs a escala real. Se consideran distintos números de habitantes equivalentes para el dimensionamiento y así obtener diferentes dimensiones de las instalaciones en función del tamaño de la población, tabla 5.1.

Tabla 5.1 Caudales tratados

Habitantes equivalentes	3.000	10.000	50.000	100.000	500.000	700.000
Dotaciones (l/d·h eq)	340	340	330	280	270	270
Q (m ³ /d)	1.020	3.400	16.500	28.000	135.000	189.000

5.1 Dimensionamiento de los tanques coagulación - floculación

Para el dimensionamiento tanto del tanque de coagulación como el de floculación se predefine el tiempo de ambos procesos, 3 y 15 minutos respectivamente en base a diversos autores (Meza et al, 2002; Díaz et al, 2007). Además se establece una altura de tanque 2,5 metros para todos los casos estudiados, debido a que según los parámetros de diseño estipulados para estos tanques (WEF-ASCE, 1998) la altura se suele encontrar entre 2 y 3 metros. Una vez conocida el área del tanque, se supone una anchura del mismo y se obtiene su longitud. A la hora de tratar grandes caudales las dimensiones de los tanques requeridos serían excesivas por lo que es recomendable tratar el caudal en varios tanques más pequeños paralelamente, como es el caso de los tres caudales mayores estudiados que se muestran en la tabla 5.2. Esta tabla muestra los resultados del dimensionamiento del tanque de coagulación en función del caudal a tratar.

Tabla 5.2 Dimensiones del tanque de coagulación en función del caudal a tratar

Tanque de coagulación (3 minutos)								
Hab. eq.	Dotación (l/d·h eq)	Q (m ³ /d)	Nº tanques	Volumen / tanque (m ³)	H (m)	Área (m ²)	Long. (m)	Anchura (m)
3.000	340	1.020	1	2,13	2,5	0,85	0,85	1
10.000	340	3.400	1	7,08	2,5	2,83	2,83	1
50.000	330	16.500	1	34,37	2,5	13,75	4,58	3
100.000	280	28.000	2	29,17	2,5	11,67	3,89	3
500.000	270	135.000	3	93,75	2,5	37,50	7,50	5
700.000	270	189.000	3	131,25	2,5	52,50	10,50	5

La tabla 5.3 muestra los resultados del dimensionamiento del tanque de floculación.

Tabla 5.3 Dimensiones del tanque de floculación en función del caudal a tratar

Tanque de floculación (15 minutos)								
Hab. eq.	Dotación (l/d·h eq)	Q (m ³ /d)	Nº tanques	Volumen /tanque (m ³)	H (m)	Área (m ²)	Long (m)	Anchura (m)
3.000	340	1.020	1	10,63	2,5	4,25	2,13	2
10.000	340	3.400	1	35,42	2,5	14,17	4,72	3
50.000	330	16.500	1	171,88	2,5	68,75	13,75	5
100.000	280	28.000	3	91,22	2,5	38,9	12,96	3
500.000	270	135.000	5	281,25	2,5	112,5	18,75	6
700.000	270	189.000	7	281,25	2,5	112,5	18,75	6

De igual forma que con el tanque de coagulación, se obtienen dimensiones que podrían ser excesivas para los tres caudales mayores por lo que también se estudia la instalación de más de un tanque. A pesar de esto, en los tres casos no se obtienen unas dimensiones coherentes incluso haciendo uso de 3, 5 y 7 tanques respectivamente. Las dimensiones tan elevadas son debidas al excesivo tiempo de floculación requerido. Se debe tener en cuenta, que no se han realizado experimentos para tratar de reducir el tiempo necesario en la floculación, que permitieran disminuir el volumen necesario en las instalaciones.

5.2 Dimensionamiento del decantador

En este tratamiento el decantador que se utiliza es de tipo circular al ser el más habitual en este tipo de tratamientos. Se estima una altura de bajo vertedero o calado de 2 metros y un tiempo de retención de 2 horas. La altura de bajo vertedero estipulada en los parámetros de diseño de un decantador (WEF-ASCE, 1998) se encuentra entre 2 y 3,5 metros, en este caso se escoge la menor al considerar esta dimensión suficiente.

El tiempo de retención estipulado es igual o mayor a 2 horas. La tabla 5.4 muestra el tiempo y la velocidad empleados por los fangos en decantar una altura de 2 metros, al ser esta inferior a 2 horas se escoge este límite como tiempo de retención. Conocido el caudal a tratar, el tiempo de retención y la altura de calado, se calculan las dimensiones del decantador así como la carga superficial y la carga de vertedero. La carga superficial debe ser inferior a 1,3 m³/m²·h y la carga de vertedero menor que 40 m³/m·h para que el fango no sea arrastrado.

La velocidad de sedimentación que se muestra en la tabla se obtiene experimentalmente, como se explica en el apartado 3.2.4 y el tiempo es el resultante de la división de la velocidad entre la distancia recorrida.

Tabla 5.4 Parámetros experimentales de la sedimentación del fango en función del coagulante

	V sed (cm/s)	t sed 2m (h)
SAF 560	0,17	0,32
SAF 056	0,15	0,38
SAF 05670	0,30	0,18
PAC	0,21	0,26
FeCl ₃	0,24	0,23

En la tabla 5.5 se encuentran las dimensiones de los decantadores empleados en función del caudal de agua a tratar así como la carga superficial y la de vertedero. Estas dos últimas en todos los casos son inferiores a $1,3 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{h}$ y a $40 \text{ m}^3 / \text{m} \cdot \text{h}$ respectivamente para evitar el arrastre de los fangos.

Tabla 5.5 Dimensiones del decantador en función del caudal a tratar

Q (m³/h)	42,5	141,7	687,5	1.166,7	5.625,0	7.875,0
T de retención (h)	2	2	2	2	2	2
H decantador (m)	2	2	2	2	2	2
Vol. decantador (m³)	85,0	283,3	1.375,0	2.333,3	11.250,0	15.750,0
Área (m²)	42,5	141,7	687,5	1.166,7	5.625,0	7.875,0
Radio (m)	3,7	6,7	14,8	19,3	42,3	50,1
Longitud (m)	23,1	42,2	92,9	121,1	265,9	314,6
Carga superficial (m³/m²·h)	1	1	1	1	1	1
Carga vertedero (m³/m·h)	1,8	3,4	7,4	9,6	21,2	25,0

El volumen de los dos últimos casos el volumen del decantador resulta excesivo, por lo que sería recomendable la instalación de dos decantadores.

6. ESTUDIO ECONÓMICO

En este apartado se trata desde el punto de vista económico la regeneración del agua. Se tienen en cuenta tres fuentes de gastos: los coagulantes, el acondicionante del pH (Ca(OH)_2) y la gestión de los fangos generados en el tratamiento.

Coagulantes

La tabla 6.1 muestra el precio de cada coagulante así como el coste total de este en función de la cantidad a añadir por m^3 de agua. El precio del SAF 056, del PAC y del FeCl_3 han sido proporcionados por la empresa que los comercializa y los precios de los restantes han sido estimados en base a precios de coagulantes similares.

Tabla 6.1 Coste de los coagulantes utilizados

Coagulante	m^3 coag/ m^3	Precio coag. (€/Ton)	Coste (€/ m^3)
SAF 560	0,000180	120	0,03
SAF 056	0,000228	110	0,03
SAF 05670	0,000143	120	0,02
PAC	0,000083	250	0,03
FeCl_3	0,000110	110	0,02

Destacar que el PAC resulta ser el más caro, pero al ser inferior su cantidad a añadir, queda equiparado con los demás coagulantes. El coste es muy similar en todos los coagulantes, encontrándose entre 0,02 y 0,03 €/ m^3 .

Acondicionante del pH, Ca(OH)_2

La tabla 6.2 muestra el coste de Ca(OH)_2 necesaria en €/ m^3 de agua para el tratamiento, siendo el coste de la cal 0,15 €/kg.

Tabla 6.2 Coste del acondicionante del pH, Ca(OH)_2 , según la cantidad necesaria para cada coagulante

Coagulante	Vol. cal medio (ml)/l de agua	Densidad Ca(OH)_2 (kg/l)	Kg/m^3	Coste (€/ m^3)
SAF 560	1,083	0,02268	0,02457	0,00368
SAF056	1,125	0,03526	0,03966	0,00595
SAF05670	1,417	0,02488	0,03525	0,00529
PAC	0,333	0,02580	0,00860	0,00129
FeCl_3	1,417	0,02488	0,03525	0,00529

El coste de la Ca(OH)_2 a añadir apenas supone un gran importe. El volumen de Ca(OH)_2 necesario para alcanzar el pH de trabajo, 7, es muy similar en los cinco coagulantes; exceptuando el caso del PAC que resulta ser algo menor lo cual repercute directamente en el coste.

Gestión de los fangos

El destino de los fangos generados en este tratamiento de coagulación – floculación para la regeneración del agua es el vertedero, para ello tienen que tener una humedad inferior al 60% y como en este estudio la humedad se encuentra en torno al 99% es necesario disminuirla hasta el 60% usando un filtro banda. Las características de los fangos resultantes de la aplicación del tratamiento coagulación-floculación con los coagulantes son las que se

muestran en la tabla 6.3. El coste de la deposición en vertedero del fango es de 0,12 €/kg y el estimado para un filtro banda es de unos 14.000€ (Oficinas Aguamarket).

Tabla 6.3 Coste de la gestión de fangos en función del coagulante

Coagulante	%Humedad	m.s (g)/ l de agua	Peso fango (g) /l de agua	Vol. del fango (ml)/l de agua	Densidad (kg/l)	Coste (€/m ³)
SAF 056	60	0,077	0,192	0,136	1,41	0,023
SAF 560	60	0,167	0,417	0,123	3,39	0,05
SAF 05670	60	0,120	0,300	0,154	1,95	0,036
PAC	60	0,230	0,575	0,192	2,98	0,069
FeCl ₃	60	0,210	0,525	0,308	1,70	0,063

Según la tabla 6.3 el coste de gestión del fango cuando se usa SAF 056 y SAF 05670 es inferior que en los otros tres casos, esto es así porque la cantidad de fango generada es menor. En el apartado 4.3 se ha determinado que el fango resultante del uso SAF 056 no es peligroso por lo que el coste de su gestión es igual que la de los demás.

A modo de resumen se muestran las figuras 6.1 y 6.2, las cuales representan la influencia en el coste de cada parámetro así como el coste global por m³ de agua, respectivamente.

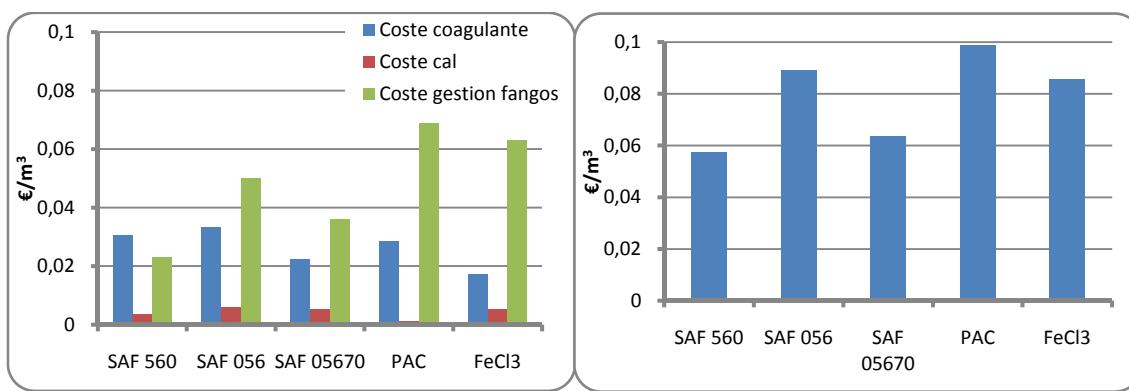


Figura 6.1 Influencia del coste de los tres parámetros estudiados en función del coagulante

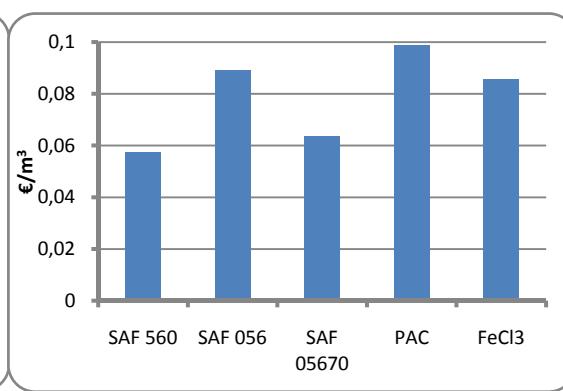


Figura 6.2 Coste total del tratamiento de regeneración en función del coagulante

En la figura 6.1 se observa que la deposición del fango en el vertedero es el parámetro, de los tres estudiados, que más coste ocasiona exceptuando el caso del uso del SAF 560. El coste de la cal necesaria no es elevado en ninguno de los casos y muy similar en las cinco opciones de coagulante. El coagulante supone un coste intermedio, al ser superior al del Ca(OH)₂ pero inferior al de la gestión del fango, solamente usando el coagulante SAF 560 el coste del coagulante supera al del fango.

La figura 6.2 muestra el coste total según el coagulante que se use, siendo el máximo para el PAC al ser su gestión de fangos la de mayor coste. Seguidamente se encuentra el SAF 056 en el que la influencia del coste del coagulante y de la gestión del fango se encuentra equiparada. Los menores costes totales son los del SAF 560 y el SAF 05670.

7. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones obtenidas tras la realización de este proyecto son las siguientes:

- El agua de salida de la planta piloto de lodos activos que va a ser regenerada, posee una concentración de sólidos en suspensión cercana a 10 mg/l y una turbidez de 20 NTU, muy inferiores a las detectadas habitualmente en aguas de salida de plantas reales. En consecuencia, y con el fin de reproducir las condiciones reales de la misma se adicionan fangos procedentes del reactor hasta una concentración final próxima a 35 mg/l por ser esta el límite a la salida de las EDARs.
- Los parámetros más importantes a analizar en el agua clarificada son la turbidez y los sólidos en suspensión, al ser estos los mejores indicadores de la diferencia en la efectividad de los distintos coagulantes.
- Todos los coagulantes ensayados resultan efectivos en la eliminación de sólidos en suspensión y de turbidez en la regeneración del agua.
- Se recomienda la utilización del FeCl_3 en una dosis de 15 mg/l de Fe^{3+} y un pH del agua de 7. El FeCl_3 es el coagulante que elimina una mayor cantidad de sólidos en suspensión y turbidez, además de proporcionar el menor V_{30} y una de las mayores velocidades de sedimentación. El V_{30} obtenido genera un 3,5% de volumen de fangos decantados, lo que significa que la sedimentación es realmente efectiva al ser este valor muy inferior al 30%, que es el límite considerado como admisible. La velocidad promedio con la que sedimentan los fangos es de 10,08 m/h, una velocidad muy elevada, siendo la óptima de 6 m/h, por lo que la sedimentación se produce rápidamente.
- El uso de las sales de hierro como coagulante es más apropiado que las de aluminio, al ser el FeCl_3 el coagulante más efectivo.
- El SAF 056 genera una elevada eliminación de turbiedad y de sólidos en suspensión en el agua clarificada (superior al 95%). Además, se genera un volumen de fangos muy inferior al 30% y una velocidad de sedimentación inferior a 6 m/h. Debido a que la concentración de metales procedentes del SAF 056 en el agua clarificada es inferior a la indicada por el RD 1620/2007, se la considera apta para su reutilización y por consiguiente, es apropiado el uso de este residuo como coagulante.
- El fango resultante de la utilización del SAF 056 como coagulante, es un residuo no peligroso, por lo que su gestión es igual que la de los fangos generados cuando se utilizan el resto de los coagulantes y por lo tanto, no se ve incrementado su precio de gestión.
- Las condiciones de operación seleccionadas para el tratamiento coagulación - floculación – decantación son diferentes para cada etapa del proceso. Para la coagulación el tiempo empleado es de 3 minutos y la velocidad de 200 r.p.m. Para la floculación es un proceso más largo y lento, se realiza durante 15 minutos a una velocidad de 40 r.p.m. Por último, se decanta durante 30 minutos antes de analizar el agua clarificada.

- Las condiciones de operación relacionadas a los coagulantes son la dosis y el pH. En cuanto a la dosis, cuando el acondicionante del pH es el Ca(OH)_2 , la seleccionada es 10 mg/l para el SAF 560, el SAF 056 y el SAF 05670 y 15 mg/l para el PAC y el FeCl_3 . Si se usa NaOH la dosis para el SAF 560 son 5 mg/l, para el SAF 056 es de 10 mg/l y para los restantes es 15 mg/l. Finalmente el pH seleccionado para todos los coagulantes es pH 7.
- Como acondicionante del pH se escoge el Ca(OH)_2 , al eliminar una mayor cantidad de turbidez y de sólidos en suspensión que el NaOH en el proceso de coagulación.
- Si el caudal de agua a tratar es muy elevado, se recomienda la instalación de más de un tanque, tanto en la coagulación como en la floculación, debido a que las dimensiones, en el caso del uso de un solo tanque, son excesivas.
- El coste total del tratamiento de coagulación – floculación, haciendo uso del FeCl_3 , es de 0,086 € por m^3 de agua a regenerar, un valor intermedio si se compara con el resto de los coagulantes. El mayor coste del proceso es el derivado de la gestión de los fangos.
- Para reducir el coste total de este tratamiento es recomendable realizar una mayor inversión inicial en las instalaciones para una buena gestión del fango, con el objetivo de que este vaya a vertedero lo más deshidratado posible. No solo hasta el límite estipulado por los vertederos, sino tanto como sea posible técnicamente para así ver reducidos los costes del tratamiento ya que no se puede influir sobre los otros dos parámetros (cantidad de coagulante y Ca(OH)_2 necesaria).

8. BIBLIOGRAFÍA

- Aznar, D.A.; *"Tratamientos primarios"*.
- B.O.E.; 2007. *Real Decreto 1620/2007* de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de aguas depuradas. BOE nº 294 de 08.12.2007.
- Cajigas, A.; *"Gestión integral y sectorial"* Asociación Tecnológica para el Tratamiento del Agua (2008).
- Castillo, R.; Herrera, M.; Méndez, I.; *"Determinación de parámetros de diseño de un tratamiento fisicoquímico de aguas residuales"*.
- Choo, K.H; Choi, S.J.; Hwang, E.D.; *"Effect of coagulant types on textile wastewater reclamation in a combined coagulation/ultrafiltration system"*. Desalination 202 (2007).
- D.O.C.E., *Directiva 82/243/CEE* del Consejo referente a la aproximación de las legislaciones de los Estados Miembros relativas a los métodos de control de la biodegradabilidad de los tensoactivos aniónicos. D.O.C.E, nº L 109 de 22.04.1982.
- D.O.C.E.; 2000/60/CE, *Decisión 2455/2001* por la que se aprueba la lista de sustancias prioritarias en el ámbito de la política de aguas. D.O.C.E nº L 331 de 15.12.2001.
- D.O.C.E.; *Directiva 91/271/CEE* del consejo, de 21 de Mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. D.O.C.E, nº L 135 de 30.05.1991.
- D.O.C.E.; *Directiva Marco del Agua*
- Danés, C.; *"Curso de formación para técnicos asesores de explotaciones agrarias. Normativa sobre calidad de aguas"*. Ministerio de medio ambiente (2008).
- Delgado, S.; Díaz, F.; Otero, N.; *"Behaviour of inorganic coagulants in secondary effluents from a conventional wastewater treatment plant"*. Elsevier (2003).
- Diaz, A.; Rincon, N.; Escorihuela, A.; Fernandez, N.; Chacin, E.; Forster, C.F.; *"A preliminary evaluation of turbidity removal by natural coagulants indigenous to Venezuela"*. Process Biochemistry (1999).
- DRACE Medioambiente; *"Estación regeneradora de aguas residuales. Viveros de la Villa"*.
- Eaton, A.D.; Clesceri, L.S.; Rice, E.W.; Greenberg, A.E.; Franson, M.A.H.; *"Standard Methods for the examination of water and wastewater"*, 21th Edition. APA- AWWA-WEF.ISBN 0875530478 (2005).
- El Samrani, A.G.; Lartiges, B.S.; Montarg"es-Pelletier, E.; Kazpard, V.; Barr"esa, O.; Ghanbaja, J.; *"Clarification of municipal sewage with ferric chloride: the nature of coagulant species"*. Water Research 38 (2004).

- Exall, K.; Vanloon, G.; "Effects of raw water conditions on solution-state aluminum speciation during coagulant dilution". Water Research 37, 3341–3350 (2003).
- Gabelich, G.J.; Yun, T.; Coffey, B.; "Effects of aluminum sulfate and ferric chloride coagulant residuals on polyamide membrane performance". Desalination 150 (2002).
- Gonzalez, T.; Dominguez, J.; Beltrán-Heredia, J.; Garcia, H.; Sanchez-Lavado, F.; "Aluminium sulfate as coagulant for highly polluted cork processing wastewater: evaluation of settleability parameters and design of a clarifier-thickener unit". Science Direct (2006).
- Guerrero, L.; Ortega, J.M.; Sanz, J.; "Tratamientos de regeneración de aguas residuales depuradas para la recarga de acuíferos. Filtración granular y sistemas integrados de membranas". Tecnología de la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros: países mediterráneos (2003).
- Harold, W.; Gonzaga, B.; Contreras, N.; "Determinación del coagulante que permita la máxima remoción de fosfatos en agua cruda del río otún". Scientia et Technica Año XIII, No 34, Mayo de 2007. Universidad Tecnológica de Pereira (2007).
- Huerga, E.; "Desarrollo de alternativas de tratamiento de aguas residuales industriales mediante el uso de tecnologías limpias dirigidas al reciclaje y/o valoración de contaminantes" (2005).
- Illueca-Muñoz, J.; Mendoza-Roca, J.A.; Iborra-Clar, A.; Bes-Piá, A.; Fajardo-Montañana, V.; Martínez-Francisco, F.J.; Bernácer-Bonora, I.; "Study of different alternatives of tertiary treatments for wastewater reclamation to optimize the water quality for irrigation reuse". Science Direct (2008).
- Imene Bekri-Abbes, I.; Bayoudh, S.; Baklouti, M.; "A technique for purifying wastewater with polymeric flocculant produced from waste plastic". Science Direct (2007).
- Jordán, Y.; "Regeneración de aguas residuales urbanas para su reutilización" (2008).
- Koning, J.; Bixio, D.; Karabelas, A.; Salgot, M.; Schäfer, A.; "Characterisation and assessment of water treatment technologies for reuse". Science Direct (2006).
- Lee, B.; Choo, K.H.; Chang, D.; Choi, S.J.; "Optimizing the coagulant dose to control membrane fouling in combined coagulation/ultrafiltration systems for textile wastewater reclamation". Chemical Engineering Journal 155 (2009).
- Lian Yang, Z.; Yu Gao, B.; Yan Yue, Q.; Wang, Y.; "Effect of pH on the coagulation performance of al-based coagulants and residual aluminum speciation during the treatment of humic acid–kaolin synthetic water"; Journal of Hazardous Materials (2008).
- López, F.; "El control de vertidos de aguas residuales en Aragón". Instituto aragonés del agua (2010).

- Meza Pérez, A.; Briones Méndez, R.; Ilangovan, K.; *“Floculación-coagulación como postratamiento del efluente de un reactor anaerobio que trata vinazas tequileras”* (Coordinación de Bioprocessos Ambientales, Instituto de Ingeniería, UNAM).
- Moussas, P.A.; Zouboulis, A.I.; *“A new inorganic-organic composite coagulant, consisting of Polyferric Sulphate (PFS) and Polyacrylamide (PAA)”*. Water Research 43 (2009).
- Poulin, E.; Blais, J.F.; Mercier, G.; *“Transformation of red mud from aluminium industry into a coagulant for wastewater treatment”*. Hydrometallurgy 92 (2008).
- Prats Rico, D.; *“Concepto generales sobre reutilización. Calidad del agua y usos posibles”* (2000).
- Sanz, J.; Guerrero L.; Ortega, J.M.; Ferrer, C.; Miguel, D.; Martínez, F.; Morenilla, J.J.; Bernácer, I.; *“Aplicación del nuevo proceso actidisc para la regeneración de efluentes secundarios”*. VEOLIA Water Solutions & Technologies.
- Shi, Y.; Fan, M.; Brown, R.C.; Sung, S.; Van Leeuwen, J.; *“Comparison of corrosivity of polymeric sulfate ferric and ferric chloride as coagulants in water treatment”*. Chemical Engineering and Processing 43, 955–964 (2004).
- Ting, C.; Baoyu, G.; Qinyan, Y.; *“Effect of dosing method and pH on color removal performance and floc aggregation of polyferric chloride-polyamine dual-coagulant in synthetic dyeing wastewater treatment”*. Science Direct (2010).
- United States Environmental Protection Agency; *“Wastewater Technology Fact Sheet Chemical Precipitation”* (2000).
- Water Environment Federation; *“Design of Municipal Wastewater Treatment Plants”*. 4th. ed. WEF-ASCE (1998).
- Wei, J.C.; Gao, B.Y.; Yue, Q.Y.; Wang, Y.; *“Strength and regrowth properties of polyferric-polymer dual-coagulant flocs in surface water treatment”* Journal of Hazardous Materials (2010).
- Wen Po, Ch.; Fung Hwa, Ch.; Chun Chang, L.; Ruey Fang, Y.; *“A study on the removal of organic substances from low-turbidity and low-alkalinity water with metal-polysilicate coagulants”*. Science Direct (2008).
- Wen-Hui, K.; Ching-Yao, H.; *“Chemical evidences for the optimal coagulant dosage and pH adjustment of silica removal from chemical mechanical polishing (CMP) wastewater”*. Science Direct (2009).
- www.mma.es, página principal del ministerio del Medio Ambiente y Medio rural y Marino.

Anexos

Anexo I

Fichas técnicas de los coagulantes

Anexo I: Fichas técnicas de los coagulantes

SAF 560 (Safloc)

Tabla I.1 Ficha técnica del SAF 560 (Safloc)

Disolución de sulfato de aluminio enriquecido en Al ₂ O ₃	
Densidad	1,422 g/cm ³ (T [°] 26 [°] C)
pH	1,3
%Al ₂ O ₃ libre	0,51
% Al ₂ O ₃ total	10,50

SAF 056 (Safloc)

Tabla I.2 Ficha técnica del SAF 056 (Safloc)

Sulfato de aluminio calidad industrial	
Densidad	1,325 g/cm ³ (T [°] 26 [°] C)
pH	2,2
%Al ₂ O ₃ libre	0,11
% Al ₂ O ₃ total	8,26
Fe	200 mg/l (máx.)
Otros metales (Cu, Ni, Zn, Mn)	300 mg/l (máx.)

SAF 05670 (Safloc)

Tabla I.3 Ficha técnica del SAF 05670 (Safloc)

Formulación de sulfato de aluminio y cloruro de hierro	
Sulfato de Aluminio	68,5%
FeCl ₃	28,5%
Urea	3%
% Al ₂ O ₃ total	5,7
% Fe (III)	3,93

PAC (Cinca)

Tabla I.4 Ficha técnica del PAC (Cinca)

Policloruro de aluminio 18%	
Densidad	1,37 g/ml (T [°] 15-20 [°] C)
pH	3,7
%Al ₂ O ₃	17
Turbidez	5
Viscosidad a 25 [°] C (cP)	40
% Cloruro	21

FeCl₃ (Cinca)Tabla I.5 Ficha técnica del FeCl₃ (Cinca)

Cloruro férrico 40%	
Densidad	1,44 g/ml (T [°] 15-20 [°] C)
% Acidez libre, HCl	0,5
% Cloruro	27

Al₂SO₃ (Cinca)Tabla I.6 Ficha técnica del Al₂SO₃ (Cinca)

Sulfato de aluminio en solución	
Densidad	1,33 g/ml (T [°] 15-20 [°] C)
% Al ₂ O ₃	8,2
Turbidez	5

SAL 8,2% (Kemira)

Tabla I.7 Ficha técnica del SAL 8,2% (Kemira)

Sulfato de aluminio líquido 8,2%	
Densidad	1,33 g/cm ³ (T [°] 25 [°] C)
pH	3,5
% Al ₂ O ₃	8,2
Viscosidad a 25 [°] C (cP)	20

Cloruro férrico (Kemira)

Tabla I.8 Ficha técnica del cloruro férrico (Kemira)

Cloruro férrico	
Densidad	1,44 g/cm ³ (T [°] 25 [°] C)
pH	2
Viscosidad a 25 [°] C (cP)	10
% Cloruros	26
% FeCl ₃	39,8
% Hierro férrico	13,7
% Hierro ferroso	<0,5

Ferriclar (Kemira)

Tabla I.9 Ficha técnica del Ferriclar (Kemira)

Sulfato férrico	
Densidad	1,60 g/cm ³ (T [°] 25 [°] C)
pH	2
Riqueza, %Fe ₂ (SO ₄) ₃	46
% Hierro III	12,9

PAX-18 (Kemira)

Tabla I.10 Ficha técnica del PAX-18 (Kemira)

Policloruro de aluminio	
Densidad	1,36 g/cm ³ (T ^º 25ºC)
pH	4,0
%Al ₂ O ₃	17,5
Viscosidad a 25ºC (cP)	<60
% Cloruros	21

DKfloc RI-105 (ACIdEKA)

Tabla I.11 Ficha técnica del Dkfloc RI-105 (Acideka)

Cloruro férrico	
Densidad	1,412 g/cm ³ (T ^º 20ºC)
% Riqueza en Fe ³⁺	12
% Cloruro férrico	30-40

CE-289 (Derypol)

Tabla I.12 Ficha técnica del C-289 (Derypol)

Policloruro de aluminio 10%	
Densidad	1,38g/cm ³ (T ^º 20ºC)
pH	0,5-1,5
Viscosidad (cP)	150

AC 50 (Derypol)

Tabla I.13 Ficha técnica del AC 50 (Derypol)

Policloruro de aluminio 10%	
Densidad	1,27g/cm ³ (T ^º 20ºC)
pH	1,0-3,0
Viscosidad (cP)	200-1500

Anexo II

Resultados de la experimentación

Anexo II: Resultados de la experimentación

Experimentos de los coagulantes desechados

Tabla II.1 Experimento 1

EXP. 1											
Coagulante (Acideka)	Dilución	Exp.	Volumen (ml)	Concentración (mg/l)	pH _i	NTU _i	S _s _i	pH _f	NTU _f	S _s _f	
Dkfloc	No	1	1	400	6,77	16,8	-	1,94	0	-	
Dkfloc	No	2	0,05	20	7,14	101	7,25	15,68	125	7	
Dkfloc	No	3	0,15	60	7,34	108	6,84	1,21	23	0	
Dkfloc	1:100	4	3,75	15	7,27	121	26	4	13,28	3	
Dkfloc	1:100	5	2,5	10	7,27	121	26	5,92	0	1	
Dkfloc	1:100	6	1,25	5	7,27	121	26	6,67	0	3	

Tabla II.2 Experimento 2

EXP. 2											
Coagulante (Acideka)	Dilución	Exp.	Volumen (ml)	Concentración (mg/l)	pH _i	NTU _i	S _s _i	pH _f	NTU _f	S _s _f	
Dkfloc	1:100	1	6,25	25	7,39	163	29	6,48	0	0	
Dkfloc	1:100	2	5	20	7,39	163	29	6,76	1,16	1	
Dkfloc	1:100	3	3,75	15	7,39	163	29	6,94	5,8	0	
Dkfloc	1:100	4	2,5	10	7,39	163	29	7,14	13,41	1	
Dkfloc	1:100	5	1,25	5	7,39	163	29	7,35	21,49	2	
Dkfloc	1:100	6	0,75	3	7,39	163	29	7,45	30,43	3	

Tabla II.3 Experimento 3

EXP. 3									
Coagulante (Kemira)	Dilución	Exp.	Volumen (ml)	Concentración (mg/l)	pH _i	NTU _i	pH _f	NTU _f	
PAX-18	No	1	1	308,8	6,68	17,09	3,74	0	
PAX-18	No	2	0,215	80	7,32	15,56	3,97	4,88	
PAX-18	No	3	0,108	40	7,05	13,39	4,39	3,88	
PAX-18	No	4	0,065	20	7,5	8,02	7,45	0	
PAX-18	No	5	0,032	10	7,52	6,55	7,2	0	
PAX 18	No	6	0,065	20	6,83	180	21	6,27	

Tabla II.4 Experimento 4

EXP. 4											
Coagulante (Kemira)	Dilución	Exp.	Volumen (ml)	Concentración (mg/l)	pH _i	NTU _i	S _s _i	pH _f	NTU _f	S _s _f	
PAX 18	5:250	1	1,6	10	6,76	187	29	5,94	0	0	
PAX 18	5:250	2	0,8	5	6,76	187	29	6,69	0	1	
PAX 18	5:250	3	2,45	15	7,28	159	29	4,91	5,72	1	
PAX 18	5:250	4	1,6	10	7,28	159	29	6,12	0	0	
PAX 18	5:250	5	0,8	5	7,28	159	29	6,7	0	1	
PAX 18	5:250	6	0,486	3	6,76	187	32	6,1	10,88	5	

ANEXO II: RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

Tabla II.5 Experimento 5

EXP. 5											
Coagulante (Kemira)	Dilución	Exp.	Volumen (ml)	Concentración (mg/l)	pH_i	NTU_i	Ss_i	pH_f	NTU_f	Ss_f	
Sal 8,2%	No	1	1	144,7	6,68	16,77	-	3,48	0	-	
Sal 8,2%	No	2	0,46	80	6,97	12,82	-	3,78	4,72	-	
Sal 8,2%	No	3	0,23	40	6,9	12,71	-	3,92	8	-	
Sal 8,2%	No	4	0,138	20	7,54	10,6	-	7,08	0	-	
Sal 8,2%	No	5	0,069	10	7,58	5,4	-	7,48	0	-	
Sal 8,2%	No	6	0,138	20	6,83	180	21	5,57	0	1	

Tabla II.6 Experimento 6

EXP. 6											
Coagulante (Kemira)	Dilución	Exp.	Volumen (ml)	Concentración (mg/l)	pH_i	NTU_i	Ss_i	pH_f	NTU_f	Ss_f	
Sal 8,2%	No	1	0,069	10	6,83	180	21	6,02	0	2	
Sal 8,2%	1:100	2	17,3	25	7,08	116	27	3,95	0	0	
Sal 8,2%	1:100	3	13,8	20	7,08	116	27	3,97	0	0	
Sal 8,2%	1:100	4	10,36	15	7,08	116	27	4,1	0	0	
Sal 8,2%	1:100	5	6,9	10	7,08	116	27	4,25	0	0	
Sal 8,2%	1:100	6	3,45	5	7,08	116	27	5,76	0	0	

Tabla II.7 Experimento 7

EXP. 7											
Coagulante (Kemira)	Dilución	Exp.	Volumen (ml)	Concentración (mg/l)	pH_i	NTU_i	Ss_i	pH_f	NTU_f	Ss_f	
Ferriclar	No	1	1	433,3	6,78	9,28	-	2,39	0	-	
Ferriclar	No	2	0,046	20	7,14	114	7,5	35	245	0	
Ferriclar	No	3	0,1385	60	7,34	118	7,29	42,24	380	44	
Ferriclar	1:100	4	3,45	15	7,27	121	26	4,56	0	1	
Ferriclar	1:100	5	2,3	10	7,27	121	26	5,9	0	2	
Ferriclar	1:100	6	1,15	5	7,27	121	26	6,6	4,55	4	

Tabla II.8 Experimento 8

EXP. 8											
Coagulante (Kemira)	Dilución	Exp.	Volumen (ml)	Concentración (mg/l)	pH_i	NTU_i	Ss_i	pH_f	NTU_f	Ss_f	
Ferriclar	1:100	1	5,81	25	7,42	104	28	6,7	11,26	2	
Ferriclar	1:100	2	4,65	20	7,42	104	28	6,75	10,42	2	
Ferriclar	1:100	3	3,49	15	7,42	104	28	7,61	6,68	3	
Ferriclar	1:100	4	2,32	10	7,42	104	28	7,11	5,78	4	
Ferriclar	1:100	5	1,16	5	7,42	104	28	7,24	7,98	4	
Ferriclar	1:100	6	0,69	3	7,42	104	28	7,22	16,04	6	

ANEXO II: RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

Tabla II.9 Experimento 9

EXP. 9											
Coagulante (Derypol)	Dilución	Exp.	Volumen (ml)	Concentración (mg/l)	pH_i	NTU_i	Ss_i	pH_f	NTU_f	Ss_f	
CE-289	No	1	0,5		6,69	236	24	6,55	0	5	
CE-289	No	2	0,15		6,69	236	24	4,2	0	3	
CE-289	No	3	0,1		6,69	236	24	4,61	0	3	
CE-289	1:100	4	3	15	6,76	169	30	4,88	0	0	
CE-289	1:100	5	1,5	10	6,76	169	30	5,95	4,58	2	
CE-289	1:100	6	0,9	5	6,76	169	30	6,24	9,96	4	

Tabla II.10 Experimento 10

EXP. 10											
Coagulante (Derypol)	Dilución	Exp.	Volumen (ml)	Concentración (mg/l)	pH_i	NTU_i	Ss_i	pH_f	NTU_f	Ss_f	
CE-289	1:100	1	12	40	6,89	146	29	4,04	21,19	5	
CE-289	1:100	2	9	30	6,89	146	29	4,03	14,46	3	
CE-289	1:100	3	6	20	6,89	146	29	4,25	7,98	1	
CE-289	1:100	4	3	10	6,89	146	29	5,46	0,69	1	
CE-289	1:100	5	4,5	15	6,8	164	27	5,45	0	0	
CE-289	1:100	6	3	10	6,8	164	27	6,45	0	0	

Tabla II.11 Experimento 11

EXP. 11											
Coagulante (Derypol)	Dilución	Exp.	Volumen (ml)	Concentración (mg/l)	pH_i	NTU_i	Ss_i	pH_f	NTU_f	Ss_f	
AC-50	1:100	1	3	15	6,76	169	30	5,96	42,45	10	
AC-50	1:100	2	1,5	10	6,76	169	30	6,11	37,19	9	
AC-50	1:100	3	0,9	5	6,76	169	30	5,86	31,56	7	
AC-50	1:100	4	6	20	6,89	146	29	5,73	35,76	7	
AC-50	1:100	5	0,9	3	6,89	146	29	6,62	12,36	5	
AC-50	1:100	6	10,5	35	6,79	144	30	4,88	36,4	7	

Tabla II.12 Experimento 12

EXP. 12											
Coagulante (Derypol)	Dilución	Exp.	Volumen (ml)	Concentración (mg/l)	pH_i	NTU_i	Ss_i	pH_f	NTU_f	Ss_f	
AC-50	1:100	1	9	30	6,79	144	30	5,06	26,15	7	
AC-50	1:100	2	7,5	25	6,79	144	30	5,53	22,79	7	
AC-50	1:100	3	1,5	5	6,79	144	30	6,52	13,7	4	
AC-50	1:100	4	0,9	3	6,79	144	30	6,78	0,74	2	
AC-50	1:100	5	0,6	2	6,79	144	30	6,79	13,1	4	

ANEXO II: RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

Tabla II.13 Experimento 13

EXP. 13											
Coagulante (Cinca)	Dilución	Exp.	Volumen (ml)	Concentración (mg/l)	pH _i	NTU _i	S _{s_i}	pH _f	NTU _f	S _{s_f}	
Sulf Al 8,2%	1:100	1	13,8	20	6,90	130	28	3,79	7,63	0	
Sulf Al 8,2%	1:100	2	10,4	15	6,90	130	28	3,81	5,69	1	
Sulf Al 8,2%	1:100	3	6,91	10	6,90	130	28	3,95	2,81	0	
Sulf Al 8,2%	1:100	4	5,53	8	6,90	130	28	4,07	3,25	0	
Sulf Al 8,2%	1:100	5	3,45	5	6,90	130	28	5,14	4,30	0	
Sulf Al 8,2%	1:100	6	2,07	3	6,90	130	28	5,92	5,53	1	

Tabla II.14 Experimento 14

EXP. 14											
Coagulante (Cinca)	Dilución	Exp.	Volumen (ml)	Concentración (mg/l)	pH _i	NTU _i	S _{s_i}	pH _f	NTU _f	S _{s_f}	
Sulf Al 8,2%	1:100	1	13,8	20	6,84	231	29	3,78	0	1	
Sulf Al 8,2%	1:100	2	10,4	15	6,84	231	29	3,84	0	1	
Sulf Al 8,2%	1:100	3	6,91	10	6,84	231	29	3,96	0	1	
Sulf Al 8,2%	1:100	4	5,53	8	6,84	231	29	4,27	0	1	
Sulf Al 8,2%	1:100	5	3,45	5	6,84	231	29	5,35	0	1	
Sulf Al 8,2%	1:100	6	2,07	3	6,84	231	29	6,35	0,66	1	

Tabla II.15 Experimento 15

EXP.15											
Coagulante (Kemira)	Dilución	Exp.	Volumen (ml)	Concentración (mg/l)	pH _i	NTU _i	S _{s_i}	pH _f	NTU _f	S _{s_f}	
Cloruro Fe 40%	1:100	1	4,35	20	6,82	139	32	5,6	0	1	
Cloruro Fe 40%	1:100	2	3,26	15	6,82	139	32	6,23	0,88	1	
Cloruro Fe 40%	1:100	3	2,2	10	6,82	139	32	6,43	0,61	2	
Cloruro Fe 40%	1:100	4	1,74	8	6,82	139	32	6,63	0,33	2	
Cloruro Fe 40%	1:100	5	1,09	5	6,82	139	32	6,73	1,08	2	
Cloruro Fe 40%	1:100	6	0,65	3	6,82	139	32	6,75	3,22	2	

Tabla II.16 Experimento 16

EXP. 16											
Coagulante (Kemira)	Dilución	Exp.	Volumen (ml)	Concentración (mg/l)	pH _i	NTU _i	S _{s_i}	pH _f	NTU _f	S _{s_f}	
Cloruro Fe 40%	1:100	1	8,71	40	6,87	147	31	3,22	9,54	1	
Cloruro Fe 40%	1:100	2	7,63	35	6,87	147	31	3,33	9,24	1	
Cloruro Fe 40%	1:100	3	6,54	30	6,87	147	31	3,53	8,18	1	
Cloruro Fe 40%	1:100	4	5,45	25	6,87	147	31	3,75	4,53	1	
Cloruro Fe 40%	1:100	5	4,35	20	6,87	147	31	5,73	5,86	2	
Cloruro Fe 40%	1:100	6	3,26	15	6,87	147	31	6,32	9,8	2	

ANEXO II: RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

Experimentos realizados a los coagulantes escogidos en búsqueda del rango de dosis óptimo

Tabla II.17 Experimento 17

EXP. 17									
Coagulante (Safloc)	Dilución	Exp.	Volumen (ml)	Concentración (mg/l)	pH_i	NTU_i	pH_f	NTU_f	
SAF 560	no	1	1	185,3	6,80	17,63	2,89	168	
SAF 560	no	2	0,360	80	6,88	17,13	2,90	106	
SAF 560	no	3	0,179	40	7,10	18,48	3,43	18,14	
SAF 560	no	4	0,108	20	7,20	8,48	7,46	2,70	
SAF 560	no	5	0,054	10	7,38	7,57	7,55	1,14	
SAF 560	no	6	1	185,3	6,80	17,63	2,89	168	

Tabla II.18 Experimento 18

EXP. 18											
Coagulante (Safloc)	Dilución	Exp.	Volumen (ml)	Concentración (mg/l)	pH_i	NTU_i	Ss_i	pH_f	NTU_f	Ss_f	
SAF 560	no	1	0,108	20	6,83	180	21	3,94	15,23	2	
SAF 560	no	2	0,054	10	6,83	180	21	4,35	1,26	1	
SAF 560	5:250	3	4,05	15	6,76	187	29	4,24	7,65	1	
SAF 560	5:250	4	2,69	10	6,76	187	29	5,36	0,00	0	
SAF 560	5:250	5	1,35	5	6,76	187	29	6,45	0,00	1	
SAF 560	5:250	6	4,05	15	7,28	159	29	4,37	11,71	1	

Tabla II.19 Experimento 19

EXP. 19											
Coagulante (Safloc)	Dilución	Exp.	Volumen (ml)	Concentración (mg/l)	pH_i	NTU_i	Ss_i	pH_f	NTU_f	Ss_f	
SAF 056	5:250	1	8,57	25	7,33	133	28	3,98	0,00	2	
SAF 056	5:250	2	6,86	20	7,33	133	28	4,05	2,90	1	
SAF 056	5:250	3	5,15	15	7,33	133	28	4,16	0,91	1	
SAF 056	5:250	4	3,43	10	7,33	133	28	4,36	0,00	1	
SAF 056	1:100	5	1,71	5	7,33	133	28	6,00	0,00	1	
SAF 056	5:250	6	1,01	3	7,33	133	28	6,45	2,65	2	

Tabla II.20 Experimento 20

EXP. 20											
Coagulante (Safloc)	Dilución	Exp.	Volumen (ml)	Concentración (mg/l)	pH_i	NTU_i	Ss_i	pH_f	NTU_f	Ss_f	
SAF 05670	no	1	1,00	25	6,72	15,62	-	2,36	0,00	-	
SAF 05670	5:250	2	3,24	15	6,76	187	32	4,01	1,25	1	
SAF 05670	5:250	3	2,15	10	6,76	187	32	4,32	5,97	2	
SAF 05670	5:250	4	1,08	5	6,76	187	32	5,42	12,62	5	
SAF 05670	5:250	5	0,65	3	6,76	187	32	5,99	19,71	6	
SAF 05670	1:100	6	10,80	50	6,49	149	26	3,32	0,63	0	

ANEXO II: RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

Tabla II.21 Experimento 21

EXP. 21											
Coagulante (Safloc)	Dilución	Exp.	Volumen (ml)	Concentración (mg/l)	pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	
SAF 05670	1:100	1	8,65	40	6,49	149	26	3,39	0,00	0	
SAF 05670	1:100	2	7,50	35	6,49	149	26	3,48	0,71	0	
SAF 05670	1:100	3	6,48	30	6,49	149	26	3,51	0,00	0	
SAF 05670	1:100	4	5,40	25	6,49	149	26	3,59	0,00	0	
SAF 05670	1:100	5	4,32	20	6,49	149	26	3,69	0,00	0	
SAF 05670	5:250	6	5,40	25	7,01	143	28	4	0,00	1	

Tabla II.22 Experimento 22

EXP. 22											
Coagulante (Safloc)	Dilución	Exp.	Volumen (ml)	Concentración (mg/l)	pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	
SAF 560	5:250	1	2,69	10	7,28	159	29	5,55	0	0	
SAF 560	5:250	2	1,35	5	7,28	159	29	6,48	0	1	
SAF 560	5:250	3	0,8	3	6,76	187	32	5,99	10	4	
SAF 05670	5:250	4	4,32	20	7,01	143	28	4,13	0	1	
SAF 05670	5:250	5	3,24	15	7,01	143	28	4,43	0	0	
SAF 05670	5:250	6	2,15	10	7,01	143	28	5,57	0,96	1	

Tabla II.23 Experimento 23

EXP. 23											
Coagulante (Safloc)	Dilución	Exp.	Volumen (ml)	Concentración (mg/l)	pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	
FeCl ₃	No	1	0,04	20	7,14	100	6,97	29	467	46	
FeCl ₃	No	2	0,122	60	7,34	100	4,36	46,8	500	26	
FeCl ₃	1:100	3	5,47	25	5,8	160	30	3,39	4,46	3	
FeCl ₃	1:100	4	4,38	20	5,8	160	30	3,42	4,04	4	
FeCl ₃	1:100	5	3,28	15	5,8	160	30	3,5	4,07	3	
FeCl ₃	1:100	6	2,19	10	5,8	160	30	3,71	2,23	1	

Tabla II.24 Experimento 24

EXP. 24											
Coagulante (Safloc)	Dilución	Exp.	Volumen (ml)	Concentración (mg/l)	pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	
PAC	1:100	1	4,55	25	6,81	140	28	4,65	2,18	2	
PAC	1:100	2	3,64	20	6,81	140	28	4,79	1,01	2	
PAC	1:100	3	2,7	15	6,81	140	28	5,56	0,26	1	
PAC	1:100	4	1,84	10	6,81	140	28	6,17	1,05	2	
PAC	1:100	5	0,91	5	6,81	140	28	6,65	10,58	7	
PAC	1:100	6	0,55	3	6,81	140	28	6,63	10,91	9	

ANEXO II: RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

Tabla II.25 Experimento 25

EXP. 25											
Coagulante (Safloc)	Dilución	Exp.	Volumen (ml)	Concentración (mg/l)	pH _i	NTU _i	S _s _i	pH _f	NTU _f	S _s _f	
PAC	1:100	1	3,64	20	7,48	169	31	7,25	0	1	
PAC	1:100	2	2,7	15	7,48	169	31	7,3	0	1	
PAC	1:100	3	2,18	12	7,48	169	31	7,41	0	1	
PAC	1:100	4	1,82	10	7,48	169	31	7,46	2,43	2	
PAC	1:100	5	0,91	5	7,48	169	31	7,49	0	0	
PAC	1:100	6	0,55	3	7,48	169	31	7,51	3,05	1	

Tabla II.26 Experimento 26

EXP. 26											
Coagulante (Safloc)	Dilución	Exp.	Volumen (ml)	Concentración (mg/l)	pH _i	NTU _i	S _s _i	pH _f	NTU _f	S _s _f	
PAC	1:100	1	4,55	25	6,84	133	28	4,48	0,00	0	
PAC	1:100	2	3,64	20	6,84	133	28	4,79	3,09	0	
PAC	1:100	3	2,7	15	6,84	133	28	5,88	8,49	0	
PAC	1:100	4	1,84	10	6,84	133	28	6,30	0,00	1	
PAC	1:100	5	0,91	5	6,84	133	28	6,73	26,31	4	
PAC	1:100	6	0,55	3	6,84	133	28	6,76	20,37	4	

Experimentos en el rango óptimo del SAF 560

Tabla II.27 Experimento 27

EXP.27	Cal 0,02268 g/ml												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	S _s _i	pH _f	NTU _f	S _s _f	V _{cal} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)	
1:100	1	2,7	5	6,96	115	29	5,85	15,2	4	-	11	0,188	
1:100	2	2,7	5	6,96	115	29	7,1	7,2	3	4	8	0,231	
1:100	3	2,7	5	6,96	115	29	7,9	12,43	6	13	10	0,130	
1:100	4	2,7	5	6,96	115	29	8,9	26,18	8	15	8	0,300	
1:100	5	2,7	5	6,96	115	29	9,85	14,6	7	35	8,5	0,429	
1:100	6	2,7	5	6,96	115	29	10,72	45,81	10	60	6	0,375	

Tabla II.28 Experimento 28

EXP.28	Cal 0,02268 g/ml												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	S _s _i	pH _f	NTU _f	S _s _f	V _{cal} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)	
1:100	1	2,7	5	6,66	157	30	5,79	2,15	2	-	10	0,091	
1:100	2	2,7	5	6,66	157	30	6,81	0	2	4	8	0,188	
1:100	3	2,7	5	6,66	157	30	7,78	6,02	3	5	7,5	0,250	
1:100	4	2,7	5	6,66	157	30	8,82	10,21	2	15	6,5	0,750	
1:100	5	2,7	5	6,66	157	30	9,91	3,25	3	23	10	0,188	
1:100	6	2,7	5	6,66	157	30	10,81	24,11	4	42	12	0,200	

Tabla II.29 Experimento 29

EXP.29	Cal 0,02268 g/ml												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	S _s _i	pH _f	NTU _f	S _s _f	V _{cal} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)	
1:100	1	5,4	10	6,82	140	30	5,11	0	2	-	11	0,200	
1:100	2	5,4	10	6,82	140	30	7,11	1,12	2	7	12	0,200	
1:100	3	5,4	10	6,82	140	30	8	0	1	18	15	0,250	
1:100	4	5,4	10	6,82	140	30	8,86	0	2	11	16	0,095	
1:100	5	5,4	10	6,82	140	30	9,85	0	2	-	17	0,200	
1:100	6	5,4	10	6,82	140	30	10,87	0	1	-	17	0,167	

ANEXO II: RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

Tabla II.30 Experimento 30

EXP.30		Cal 0,02268 g/ml												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	V _{cal} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)		
1:100	1	5,4	10	7,29	221	28	6	0,89	1	-	12	0,100		
1:100	2	5,4	10	7,29	221	28	6,8	1,17	1	6	10	0,250		
1:100	3	5,4	10	7,29	221	28	8,13	6,16	2	9	11	0,143		
1:100	4	5,4	10	7,29	221	28	8,85	8,24	3	-	12	0,214		
1:100	5	5,4	10	7,29	221	28	9,98	11,07	4	-	12	0,236		
1:100	6	5,4	10	7,29	221	28	10,7	17,47	4	-	12,5	0,231		

Tabla II.31 Experimento 31

EXP.31		NaOH 0,1M												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	V _{NaOH} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)		
1:100	1	2,7	5	7,21	109	30	6,42	9,41	4	-	10	0,15		
1:100	2	2,7	5	7,21	109	30	6,95	8,03	3	3	10	0,167		
1:100	3	2,7	5	7,21	109	30	7,91	10,42	4	4	10	0,143		
1:100	4	2,7	5	7,21	109	30	8,93	25,3	9	11	3,5	0,150		
1:100	5	2,7	5	7,21	109	30	10,08	39,4	15	23	-	0,214		
1:100	6	2,7	5	7,21	109	30	10,86	50	16	35	-	0,167		

Tabla II.32 Experimento 32

EXP.32		NaOH 0,1M												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	V _{NaOH} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)		
1:100	1	2,7	5	7,03	123	35	6,43	6,7	3	-	10	0,167		
1:100	2	2,7	5	7,03	123	35	7,03	8,37	3	3	7	0,188		
1:100	3	2,7	5	7,03	123	35	7,9	13,23	4	5	10	0,188		
1:100	4	2,7	5	7,03	123	35	8,89	33,16	8	11	3	0,111		
1:100	5	2,7	5	7,03	123	35	9,9	37,08	14	22	-	0,136		
1:100	6	2,7	5	7,03	123	35	10,84	61	18	36	-	0,130		

ANEXO II: RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

Tabla II.33 Experimento 33

EXP.33		NaOH 0,1M												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	V _{NaOH} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)		
1:100	1	5,4	10	7,6	109	29	6,55	8,13	3	-	12	0,107		
1:100	2	5,4	10	7,6	109	29	7,12	8,06	4	5	12	0,143		
1:100	3	5,4	10	7,6	109	29	8,12	9,08	4	8	10	0,158		
1:100	4	5,4	10	7,6	109	29	8,92	13,2	7	15	7	0,136		
1:100	5	5,4	10	7,6	109	29	9,87	31,55	10	28	-	0,143		
1:100	6	5,4	10	7,6	109	29	10,91	47,69	13	43	-	0,176		

Tabla II.34 Experimento 34

EXP.34		NaOH 0,1M												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	V _{NaOH} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)		
1:100	1	5,4	10	7,44	109	30	6,59	3,3	3	-	12	0,100		
1:100	2	5,4	10	7,44	109	30	7,01	11,55	3	4	14	0,130		
1:100	3	5,4	10	7,44	109	30	8,13	21,98	4	8	11	0,115		
1:100	4	5,4	10	7,44	109	30	9	24,51	8	14	5	0,150		
1:100	5	5,4	10	7,44	109	30	10,02	49,45	14	28	-	0,130		
1:100	6	5,4	10	7,44	109	30	10,89	49,22	18	43	-	0,125		

Experimentos en el rango óptimo del SAF 056

Tabla II.35 Experimento 35

EXP.35	Cal 0,03526 g/ml			pH _i	NTU _i	S _s _i	pH _f	NTU _f	S _s _f	V _{cal} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)									
1:100	1	3,45	5	7,39	180	32	6,65	0	2	-	8	0,25
1:100	2	3,45	5	7,39	180	32	7,12	1,55	1	3	7	0,130
1:100	3	3,45	5	7,39	180	32	7,96	3,27	2	5	7	0,187
1:100	4	3,45	5	7,39	180	32	8,97	4,87	2	5	6	0,15
1:100	5	3,45	5	7,39	180	32	9,93	6,35	1	25	8,5	0,15
1:100	6	3,45	5	7,39	180	32	10,82	3,26	2	50	5	0,232

Tabla II.36 Experimento 36

EXP.36	Cal 0,03526 g/ml			pH _i	NTU _i	S _s _i	pH _f	NTU _f	S _s _f	V _{cal} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)									
1:100	1	3,45	5	7,56	130	35	7,09	2,48	2	-	11	0,132
1:100	2	3,45	5	7,56	130	35	7,15	2,79	3	-	10	0,204
1:100	3	3,45	5	7,56	130	35	8	10,09	6	10	11	0,230
1:100	4	3,45	5	7,56	130	35	8,87	18,32	7	17	8	0,375
1:100	5	3,45	5	7,56	130	35	10,01	13,37	5	26	9	0,231
1:100	6	3,45	5	7,56	130	35	10,8	23,38	7	65	9	0,307

Tabla II.37 Experimento 37

EXP.37	Cal 0,03526 g/ml			pH _i	NTU _i	S _s _i	pH _f	NTU _f	S _s _f	V _{cal} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)									
1:100	1	5,5	8	7,75	141	28	6,9	0	1	-	8,5	0,188
1:100	2	5,5	8	7,75	141	28	7,05	0	1	1	9	0,118
1:100	3	5,5	8	7,75	141	28	8,02	6,76	1	5	7	0,185
1:100	4	5,5	8	7,75	141	28	8,95	15,83	3	7	7	0,175
1:100	5	5,5	8	7,75	141	28	9,8	2,65	1	11	6	0,150
1:100	6	5,5	8	7,75	141	28	11,09	7,05	2	35	4	0,333

ANEXO II: RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

Tabla II.38 Experimento 38

EXP.38	Cal 0,03526 g/ml												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	V _{cal} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)	
1:100	1	5,5	8	6,67	155	32	6,04	2,62	2	-	10	0,300	
1:100	2	5,5	8	6,67	155	32	6,88	2,55	2	13	10	0,273	
1:100	3	5,5	8	6,67	155	32	8,08	9,98	4	20	10	0,281	
1:100	4	5,5	8	6,67	155	32	8,84	16,35	4	39	9	0,255	
1:100	5	5,5	8	6,67	155	32	9,83	10,68	4	70	9	0,200	
1:100	6	5,5	8	6,67	155	32	10,87	30,97	5	-	7	0,221	

Tabla II.39 Experimento 39

EXP.39	Cal 0,03526 g/ml												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	V _{cal} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)	
1:100	1	6,85	10	6,86	304	30	5,96	1,74	1	-	10	0,182	
1:100	2	6,85	10	6,86	304	30	7	0	1	9	11	0,136	
1:100	3	6,85	10	6,86	304	30	8,06	1,41	3	13	10,5	0,279	
1:100	4	6,85	10	6,86	304	30	8,97	2,92	3	22	8,5	0,205	
1:100	5	6,85	10	6,86	304	30	9,87	7,07	3	37	9	0,214	
1:100	6	6,85	10	6,86	304	30	10,92	52	9	-	6	0,295	

Tabla II.40 Experimento 40

EXP.40	Cal 0,03526 g/ml												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	V _{cal} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)	
1:100	1	6,85	10	7,58	132	31	6,68	1,61	1	-	5	0,3	
1:100	2	6,85	10	7,58	132	31	7,12	3,74	2	5	10	0,158	
1:100	3	6,85	10	7,58	132	31	7,95	10,53	3	13	10	0,176	
1:100	4	6,85	10	7,58	132	31	8,97	24,93	4	25	8	0,214	
1:100	5	6,85	10	7,58	132	31	9,84	19,11	4	45	9	0,231	
1:100	6	6,85	10	7,58	132	31	10,88	25,65	4	60	8	0,233	

Tabla II.41 Experimento 41

EXP.41	NaOH 0,1M												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	V _{NaOH} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)	
1:100	1	3,45	5	7,19	126	33	6,49	11,77	5	-	8	0,097	
1:100	2	3,45	5	7,19	126	33	7,07	10,47	4	3	6	0,150	
1:100	3	3,45	5	7,19	126	33	8,16	16,68	5	6	4	0,125	
1:100	4	3,45	5	7,19	126	33	8,92	23,92	9	12	4	0,094	
1:100	5	3,45	5	7,19	126	33	9,94	32,43	11	25	-	0,150	
1:100	6	3,45	5	7,19	126	33	10,86	60	19	38	-	0,150	

ANEXO II: RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

Tabla II.42 Experimento 42

EXP.42		NaOH 0,1M			pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	V _{NaOH} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)										
1:100	1	3,45	5	7,07	109	29	6,64	12,52	6	-	8	0,167	
1:100	2	3,45	5	7,07	109	29	6,96	11,9	5	2	6	0,188	
1:100	3	3,45	5	7,07	109	29	8,01	14,39	6	5	6	0,120	
1:100	4	3,45	5	7,07	109	29	8,96	23,65	13	10	3	0,150	
1:100	5	3,45	5	7,07	109	29	9,88	40,32	11	26	-	0,143	
1:100	6	3,45	5	7,07	109	29	10,91	64	18	37	-	0,136	

Tabla II.43 Experimento 43

EXP.43		NaOH 0,1M			pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	V _{NaOH} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)										
1:100	1	5,5	8	6,89	92	33	6,18	6,88	4	-	8	0,097	
1:100	2	5,5	8	6,89	92	33	7,04	8,97	4	6	6	0,150	
1:100	3	5,5	8	6,89	92	33	8,04	17,11	4	9	4	0,125	
1:100	4	5,5	8	6,89	92	33	8,95	28,75	7	17	4	0,094	
1:100	5	5,5	8	6,89	92	33	9,89	51	17	30	-	0,150	
1:100	6	5,5	8	6,89	92	33	10,94	57	22	48	-	0,150	

Tabla II.44 Experimento 44

EXP.44		NaOH 0,1M			pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	V _{NaOH} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)										
1:100	1	5,5	8	7,06	91	32	6,35	10,06	5	-	9	0,111	
1:100	2	5,5	8	7,06	91	32	7,04	15,78	5	5	8	0,100	
1:100	3	5,5	8	7,06	91	32	7,98	20,02	6	8	6	0,097	
1:100	4	5,5	8	7,06	91	32	8,99	39,66	17	18	-	0,115	
1:100	5	5,5	8	7,06	91	32	9,86	48,48	19	33	-	0,111	
1:100	6	5,5	8	7,06	91	32	10,87	59	21	50	-	0,150	

ANEXO II: RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

Tabla II.45 Experimento 45

EXP.45		NaOH 0,1M			pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	V _{NaOH} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)										
1:100	1	6,85	10	7,27	83	34	6,07	4,89	3	-	8	0,200	
1:100	2	6,85	10	7,27	83	34	6,94	5,18	3	7	12	0,157	
1:100	3	6,85	10	7,27	83	34	7,93	12,26	4	9	13	0,100	
1:100	4	6,85	10	7,27	83	34	9,01	12,36	5	15	13	0,136	
1:100	5	6,85	10	7,27	83	34	9,91	60	19	31	-	0,150	
1:100	6	6,85	10	7,27	83	34	11,01	59	22	45	-	0,150	

Tabla II.46 Experimento 46

EXP.46		NaOH 0,1M			pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	V _{NaOH} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)										
1:100	1	6,85	10	7,25	90	29	6,1	5,73	2	-	14	0,176	
1:100	2	6,85	10	7,25	90	29	7,05	6,11	1	7	12	0,125	
1:100	3	6,85	10	7,25	90	29	7,98	5,83	2	9	11	0,097	
1:100	4	6,85	10	7,25	90	29	8,91	10,13	4	15	8	0,136	
1:100	5	6,85	10	7,25	90	29	9,93	48,26	20	30	-	0,115	
1:100	6	6,85	10	7,25	90	29	10,91	59	20	45	-	0,167	

Experimentos en el rango óptimo del SAF 05670

Tabla II.47 Experimento 47

EXP.47		Cal 0,02488 g/ml			pH _i	NTU _i	S _s _i	pH _f	NTU _f	S _s _f	V _{cal} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)										
1:100	1	4,32	10	7,02	189	29	5,64	2,2	2	-	9	0,329	
1:100	2	4,32	10	7,02	189	29	6,88	7,36	4	7	10	0,231	
1:100	3	4,32	10	7,02	189	29	7,8	8,37	2	8	9	0,176	
1:100	4	4,32	10	7,02	189	29	9,15	18,93	5	11	9	0,231	
1:100	5	4,32	10	7,02	189	29	9,85	22,89	7	35	10	0,375	
1:100	6	4,32	10	7,02	189	29	10,81	43,2	8	45	8	0,333	

Tabla II.48 Experimento 48

EXP.48		Cal 0,02488 g/ml			pH _i	NTU _i	S _s _i	pH _f	NTU _f	S _s _f	V _{cal} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (ppm)										
1:100	1	4,32	10	7,17	218	28	5,86	4,59	2	-	8	0,260	
1:100	2	4,32	10	7,17	218	28	6,91	6,68	2	10	9	0,375	
1:100	3	4,32	10	7,17	218	28	8,01	17,47	3	20	9	0,273	
1:100	4	4,32	10	7,17	218	28	8,8	27,66	4	30	9	0,300	
1:100	5	4,32	10	7,17	218	28	9,81	29,2	5	45	9	0,354	
1:100	6	4,32	10	7,17	218	28	10,89	48,41	4	55	8	0,300	

Tabla II.49 Experimento 49

EXP.49		Cal 0,02488 g/ml			pH _i	NTU _i	S _s _i	pH _f	NTU _f	S _s _f	V _{cal} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)										
1:100	1	6,5	15	7,63	112	34	5,79	9,64	3	-	10	0,290	
1:100	2	6,5	15	7,63	112	34	7	7,72	3	4	10	0,250	
1:100	3	6,5	15	7,63	112	34	7,9	19,27	4	15	9	0,231	
1:100	4	6,5	15	7,63	112	34	8,83	33,83	6	20	9	0,359	
1:100	5	6,5	15	7,63	112	34	9,92	59	8	38	5	0,273	
1:100	6	6,5	15	7,63	112	34	10,79	57	7	-	6	0,187	

ANEXO II: RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

Tabla II.50 Experimento 50

EXP.50	Cal 0,02488 g/ml												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	V _{cal} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)	
1:100	1	8,65	20	8,06	91	29	4,55	17,53	3	-	8	0,278	
1:100	2	8,65	20	8,06	91	29	6,94	2,02	2	15	11	0,375	
1:100	3	8,65	20	8,06	91	29	7,97	5,37	2	20	10	0,267	
1:100	4	8,65	20	8,06	91	29	8,8	9,54	3	29	12	0,233	
1:100	5	8,65	20	8,06	91	29	9,82	19,57	4	47	9	0,375	
1:100	6	8,65	20	8,06	91	29	10,84	10	2	-	8	0,273	

Tabla II.51 Experimento 51

EXP.51	Cal 0,02488 g/ml												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	V _{cal} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)	
1:100	1	8,65	20	7,96	104	32	4,64	20,63	3	-	8	0,158	
1:100	2	8,65	20	7,96	104	32	7,07	5,68	3	12	13	0,333	
1:100	3	8,65	20	7,96	104	32	8,18	14,19	4	16	10	0,273	
1:100	4	8,65	20	7,96	104	32	8,83	20,49	5	30	11	0,375	
1:100	5	8,65	20	7,96	104	32	9,82	34,28	6	50	9	0,400	
1:100	6	8,65	20	7,96	104	32	11,2	48,5	3	-	9	0,428	

Tabla II.52 Experimento 52

EXP.52	NaOH 0,1M												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	V _{NaOH} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)	
1:100	1	4,3	10	7,71	92	30	6,65	20,64	6	-	4	0,150	
1:100	2	4,3	10	7,71	92	30	7,03	28,57	5	3	4	0,200	
1:100	3	4,3	10	7,71	92	30	8,02	26,4	7	5	4	0,187	
1:100	4	4,3	10	7,71	92	30	8,89	37,45	12	10	-	0,200	
1:100	5	4,3	10	7,71	92	30	9,85	46,39	17	26	-	0,167	
1:100	6	4,3	10	7,71	92	30	10,86	38,18	12	40	-	0,300	

ANEXO II: RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

Tabla II.53 Experimento 53

EXP.53		NaOH 0,1M												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	S _s _i	pH _f	NTU _f	S _s _f	V _{NaOH} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)		
1:100	1	4,3	10	7,67	105	32	6,52	24,05	4	-	8	0,158		
1:100	2	4,3	10	7,67	105	32	6,96	21,67	5	3	6	0,200		
1:100	3	4,3	10	7,67	105	32	7,97	25,57	6	6	5	0,167		
1:100	4	4,3	10	7,67	105	32	8,95	38,24	9	14	-	0,150		
1:100	5	4,3	10	7,67	105	32	9,81	46,1	14	31	-	0,200		
1:100	6	4,3	10	7,67	105	32	10,88	34,31	7	43	-	0,231		

Tabla II.54 Experimento 54

EXP.54		NaOH 0,1M												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	S _s _i	pH _f	NTU _f	S _s _f	V _{NaOH} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)		
1:100	1	6,5	15	7,27	83	31	6,24	12,44	4	-	10	0,120		
1:100	2	6,5	15	7,27	83	31	7,05	16,78	3	7	8	0,100		
1:100	3	6,5	15	7,27	83	31	8,05	22,71	4	10	7	0,107		
1:100	4	6,5	15	7,27	83	31	8,89	39,35	8	19	-	0,120		
1:100	5	6,5	15	7,27	83	31	9,88	40,43	12	37	-	0,143		
1:100	6	6,5	15	7,27	83	31	10,9	40,36	14	57	-	0,300		

Tabla II.55 Experimento 55

EXP.55		NaOH 0,1M												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	S _s _i	pH _f	NTU _f	S _s _f	V _{NaOH} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)		
1:100	1	6,5	15	7,06	116	34	6,3	8,17	3	-	11	0,143		
1:100	2	6,5	15	7,06	116	34	6,98	5,09	3	6	10	0,107		
1:100	3	6,5	15	7,06	116	34	8,05	4,55	3	10	9	0,094		
1:100	4	6,5	15	7,06	116	34	8,91	16,81	4	19	6	0,125		
1:100	5	6,5	15	7,06	116	34	9,92	9,72	4	39	-	0,167		
1:100	6	6,5	15	7,06	116	34	10,94	13,41	3	56	-	0,333		

ANEXO II: RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

Tabla II.56 Experimento 56

EXP.56		NaOH 0,1M												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	V _{NaOH} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)		
1:100	1	8,65	20	7,1	91	28	6,08	18,79	3	-	13	0,150		
1:100	2	8,65	20	7,1	91	28	7,1	16,67	2	9	11	0,214		
1:100	3	8,65	20	7,1	91	28	8,06	23,72	3	13	9	0,167		
1:100	4	8,65	20	7,1	91	28	8,87	36,18	6	24	5	0,158		
1:100	5	8,65	20	7,1	91	28	9,91	41,04	10	45	-	0,187		
1:100	6	8,65	20	7,1	91	28	10,91	45,43	7	70	-	0,150		

Tabla II.57 Experimento 57

EXP.57		NaOH 0,1M												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	V _{NaOH} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)		
1:100	1	8,65	20	7,28	93	32	6,08	8,89	3	-	14	0,136		
1:100	2	8,65	20	7,28	93	32	7,12	21,21	4	9	12	0,167		
1:100	3	8,65	20	7,28	93	32	7,93	21,93	4	13	10	0,150		
1:100	4	8,65	20	7,28	93	32	8,93	35,69	10	24	6	0,143		
1:100	5	8,65	20	7,28	93	32	9,91	45,32	12	45	-	0,125		
1:100	6	8,65	20	7,28	93	32	10,93	26,59	9	70	-	0,214		

Experimentos en el rango óptimo del PAC

Tabla II.58 Experimento 58

EXP.58	Cal 0,0258 g/ml			pH _i	NTU _i	S _s _i	pH _f	NTU _f	S _s _f	V _{cal} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)									
1:100	1	1,67	10	7,22	116	29	7,02	3,04	3	-	10	0,167
1:100	2	1,67	10	7,22	116	29	7,13	6,01	4	-	10,5	0,148
1:100	3	1,67	10	7,22	116	29	8,05	3,82	3	8	11	0,194
1:100	4	1,67	10	7,22	116	29	9,07	2,98	4	13	9	0,333
1:100	5	1,67	10	7,22	116	29	9,86	6,41	3	32	9,5	0,302
1:100	6	1,67	10	7,22	116	29	10,92	10,37	4	58	5,5	0,347

Tabla II.59 Experimento 59

EXP.59	Cal 0,0258 g/ml			pH _i	NTU _i	S _s _i	pH _f	NTU _f	S _s _f	V _{cal} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)									
1:100	1	1,67	10	6,94	233	30	6,57	4,6	4	-	10	0,150
1:100	2	1,67	10	6,94	233	30	7,24	12,62	6	3	8	0,193
1:100	3	1,67	10	6,94	233	30	8,03	20,96	7	8	8	0,300
1:100	4	1,67	10	6,94	233	30	9,06	15,22	6	12	10	0,200
1:100	5	1,67	10	6,94	233	30	9,85	24,97	5	25	9	0,375
1:100	6	1,67	10	6,94	233	30	10,89	24,25	4	55	9	0,375

Tabla II.60 Experimento 60

EXP.60	Cal 0,0258 g/ml			pH _i	NTU _i	S _s _i	pH _f	NTU _f	S _s _f	V _{cal} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)									
1:100	1	2,5	15	7,69	116	28	7,06	2,09	2	-	13	0,300
1:100	2	2,5	15	7,69	116	28	7,19	3,82	2	-	11	0,375
1:100	3	2,5	15	7,69	116	28	8,19	2,75	3	13	11	0,250
1:100	4	2,5	15	7,69	116	28	9,07	10,9	3	-	9,5	0,300
1:100	5	2,5	15	7,69	116	28	10,13	17	3	33	8	0,273
1:100	6	2,5	15	7,69	116	28	10,85	32,12	7	60	8	0,343

ANEXO II: RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

Tabla II.61 Experimento 61

EXP.61		Cal 0,0258 g/ml			pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	V _{cal} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)										
1:100	1	2,5	15	7,67	216	28	6,83	1,08	3	-	11	0,130	
1:100	2	2,5	15	7,67	216	28	6,93	1,48	3	-	12	0,187	
1:100	3	2,5	15	7,67	216	28	8,15	10,68	6	12	11	0,158	
1:100	4	2,5	15	7,67	216	28	9,03	12,99	4	17	9	0,300	
1:100	5	2,5	15	7,67	216	28	9,9	10,08	4	36	9	0,273	
1:100	6	2,5	15	7,67	216	28	10,9	26,98	5	60	9	0,200	

Tabla II.62 Experimento 62

EXP.62		NaOH 0,1M			pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	V _{NaOH} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)										
1:100	1	1,65	10	7,13	95	28	6,97	6,89	4	-	8	0,150	
1:100	2	1,65	10	7,13	95	28	6,97	7,09	5	-	8	0,150	
1:100	3	1,65	10	7,13	95	28	7,93	8,79	6	4	9	0,143	
1:100	4	1,65	10	7,13	95	28	8,93	19,04	9	15	-	0,136	
1:100	5	1,65	10	7,13	95	28	9,84	44,7	17	30	-	0,167	
1:100	6	1,65	10	7,13	95	28	10,96	53	19	48	-	0,150	

Tabla II.63 Experimento 63

EXP.63		NaOH 0,1M			pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	V _{NaOH} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (ppm)										
1:100	1	1,65	10	7,23	94	29	6,94	6,09	3	-	8	0,136	
1:100	2	1,65	10	7,23	94	29	7,05	6,7	5	1	8	0,158	
1:100	3	1,65	10	7,23	94	29	8,09	7,45	6	5	8,5	0,143	
1:100	4	1,65	10	7,23	94	29	8,95	10,9	8	15	6	0,150	
1:100	5	1,65	10	7,23	94	29	9,89	22,02	9	30	-	0,150	
1:100	6	1,65	10	7,23	94	29	10,91	24,15	10	50	-	0,143	

ANEXO II: RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

Tabla II.64 Experimento 64

EXP.64		NaOH 0,1M			pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	V _{NaOH} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)										
1:100	1	2,5	15	7,5	97	35	6,77	4,04	4	-	11	0,167	
1:100	2	2,5	15	7,5	97	35	7,11	6,01	4	2	11	0,143	
1:100	3	2,5	15	7,5	97	35	7,93	6,97	5	5	11	0,136	
1:100	4	2,5	15	7,5	97	35	9	12,17	6	16	7	0,176	
1:100	5	2,5	15	7,5	97	35	9,97	14,94	8	29	-	0,167	
1:100	6	2,5	15	7,5	97	35	10,94	22,36	10	50	-	0,150	

Tabla II.65 Experimento 65

EXP.65		NaOH 0,1M			pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	V _{NaOH} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)										
1:100	1	2,5	15	7,33	83	32	6,73	3,51	3	-	11	0,136	
1:100	2	2,5	15	7,33	83	32	7,03	3,61	3	2	11	0,158	
1:100	3	2,5	15	7,33	83	32	8,12	4,95	4	6	10	0,187	
1:100	4	2,5	15	7,33	83	32	9	9,3	5	15	7	0,187	
1:100	5	2,5	15	7,33	83	32	9,98	12,45	7	30	-	0,167	
1:100	6	2,5	15	7,33	83	32	10,89	22,6	11	50	-	0,150	

Experimentos en el rango óptimo del FeCl₃

Tabla II.66 Experimento 66

EXP.66		Cal 0,02488 g/ml												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	V _{cal} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)		
1:100	1	1,1	5	7,16	143	28	6,62	15,58	3	-	4	0,191		
1:100	2	1,1	5	7,16	143	28	6,89	11,26	2	4	5	0,250		
1:100	3	1,1	5	7,16	143	28	7,99	21,73	2	7	6	0,152		
1:100	4	1,1	5	7,16	143	28	8,89	17,54	2	9	9	0,296		
1:100	5	1,1	5	7,16	143	28	9,84	19,47	1	14	9	0,297		
1:100	6	1,1	5	7,16	143	28	10,85	15,07	1	45	9	0,300		

Tabla II.67 Experimento 67

EXP.67		Cal 0,02488 g/ml												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	V _{cal} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)		
1:100	1	1,1	5	7,46	171	34	6,87	15,5	5	-	4	0,231		
1:100	2	1,1	5	7,46	171	34	6,94	12,8	4	3	6	0,250		
1:100	3	1,1	5	7,46	171	34	8,02	15,9	5	7	6	0,176		
1:100	4	1,1	5	7,58	164	31	8,88	9,21	4	8	6,5	0,300		
1:100	5	1,1	5	7,58	164	31	9,99	24,22	6	14	9	0,300		
1:100	6	1,1	5	7,58	164	31	10,88	15,78	4	16	8	0,250		

Tabla II.68 Experimento 68

EXP.68		Cal 0,02488 g/ml												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	Ss _i	pH _f	NTU _f	Ss _f	V _{cal} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)		
1:100	1	2,2	10	7,28	201	28	6,57	8,27	4	-	8,5	0,158		
1:100	2	2,2	10	7,28	201	28	7,09	7,02	3	4	9	0,300		
1:100	3	2,2	10	7,28	201	28	8,13	9,75	4	7	8,5	0,200		
1:100	4	2,2	10	7,28	201	28	9,11	10,18	2	14	10	0,306		
1:100	5	2,2	10	7,28	201	28	9,98	10,66	2	19	10,5	0,273		
1:100	6	2,2	10	7,28	201	28	10,82	7,86	1	35	11	0,369		

ANEXO II: RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

Tabla II.69 Experimento 69

EXP.69		Cal 0,02488 g/ml												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	S _s _i	pH _f	NTU _f	S _s _f	V _{cal} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)		
1:100	1	2,2	10	7,9	132	32	6,37	5,77	2	-	9	0,226		
1:100	2	2,2	10	7,9	132	32	6,97	4,61	1	3	9	0,289		
1:100	3	2,2	10	7,9	132	32	7,99	12,6	3	6	9	0,154		
1:100	4	2,2	10	7,78	175	30	9,2	12,17	2	10	9	0,236		
1:100	5	2,2	10	7,78	175	30	9,82	16,69	3	11	9,5	0,287		
1:100	6	2,2	10	7,78	175	30	10,78	30,65	3	25	8,5	0,182		

Tabla II.70 Experimento 70

EXP.70		Cal 0,02488 g/ml												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	S _s _i	pH _f	NTU _f	S _s _f	V _{cal} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)		
1:100	1	3,3	15	6,79	116	31	3,69	28,4	3	-	3	0,500		
1:100	2	3,3	15	6,79	116	31	6,99	3,38	1	9	10	0,300		
1:100	3	3,3	15	6,79	116	31	8,03	4,02	2	12	12	0,333		
1:100	4	3,3	15	6,79	116	31	8,91	11,18	2	17	11	0,333		
1:100	5	3,3	15	6,79	116	31	9,89	23,2	4	19	11	0,252		
1:100	6	3,3	15	6,79	116	31	10,84	39,12	7	40	11,5	0,410		

Tabla II.71 Experimento 71

EXP.71		Cal 0,02488 g/ml												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	S _s _i	pH _f	NTU _f	S _s _f	V _{cal} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)		
1:100	1	3,3	15	6,97	126	33	3,67	23,27	3	-	3	0,333		
1:100	2	3,3	15	6,97	126	33	7,17	2,52	1	9	9	0,250		
1:100	3	3,3	15	6,97	126	33	8,2	9,69	1	10	10	0,300		
1:100	4	3,3	15	6,97	126	33	8,86	14,43	3	16	11	0,222		
1:100	5	3,3	15	6,97	126	33	9,83	25,88	3	23	12	0,333		
1:100	6	3,3	15	6,97	126	33	10,82	23,75	3	45	11	0,428		

ANEXO II: RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

Tabla II.72 Experimento 72

EXP.72		NaOH 0,1M												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	S _s _i	pH _f	NTU _f	S _s _f	V _{NaOH} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)		
1:100	1	1,1	5	7,34	103	33	6,96	38,72	11	-	-	0,143		
1:100	2	1,1	5	7,34	103	33	7,11	27,96	10	1	-	0,130		
1:100	3	1,1	5	7,34	103	33	8,14	30,98	13	4	-	0,143		
1:100	4	1,1	5	7,34	103	33	8,9	31,91	14	10	-	0,150		
1:100	5	1,1	5	7,34	103	33	9,94	36,43	13	23	-	0,136		
1:100	6	1,1	5	7,34	103	33	10,93	37,43	16	40	-	0,187		

Tabla II.73 Experimento 73

EXP.73		NaOH 0,1M												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	S _s _i	pH _f	NTU _f	S _s _f	V _{NaOH} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)		
1:100	1	1,1	5	7,39	104	35	6,97	27,91	9	-	-	0,158		
1:100	2	1,1	5	7,39	104	35	6,95	29,97	10	-	-	0,143		
1:100	3	1,1	5	7,39	104	35	8,02	24,43	8	4	-	0,187		
1:100	4	1,1	5	7,39	104	35	9,01	30,55	12	12	-	0,158		
1:100	5	1,1	5	7,39	104	35	9,93	30,61	9	25	-	0,167		
1:100	6	1,1	5	7,39	104	35	10,93	42,56	11	42	-	0,150		

Tabla II.74 Experimento 74

EXP.74		NaOH 0,1M												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	S _s _i	pH _f	NTU _f	S _s _f	V _{NaOH} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)		
1:100	1	2,2	10	7,46	100	33	6,55	19,23	7	-	-	0,130		
1:100	2	2,2	10	7,46	100	33	6,98	20,41	8	3	-	0,158		
1:100	3	2,2	10	7,46	100	33	8,08	28,15	7	6	-	0,158		
1:100	4	2,2	10	7,46	100	33	8,95	29,71	8	11	-	0,167		
1:100	5	2,2	10	7,46	100	33	9,95	29,15	9	23	-	0,187		
1:100	6	2,2	10	7,46	100	33	10,92	30,1	9	37	-	0,158		

ANEXO II: RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

Tabla II.75 Experimento 75

EXP.75		NaOH 0,1M												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	S _s _i	pH _f	NTU _f	S _s _f	V _{NaOH} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)		
1:100	1	2,2	10	7,35	118	35	6,54	16,85	6	-	-	0,15		
1:100	2	2,2	10	7,35	118	35	6,98	22,54	8	3	-	0,187		
1:100	3	2,2	10	7,35	118	35	8	25,25	8	6	-	0,130		
1:100	4	2,2	10	7,35	118	35	8,98	24,43	7	12	-	0,158		
1:100	5	2,2	10	7,35	118	35	9,95	30,23	10	24	-	0,150		
1:100	6	2,2	10	7,35	118	35	10,96	37,54	10	41	-	0,200		

Tabla II.76 Experimento 76

EXP.76		NaOH 0,1M												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	S _s _i	pH _f	NTU _f	S _s _f	V _{NaOH} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)		
1:100	1	3,3	15	7,32	125	30	6,19	11,73	4	-	9	0,136		
1:100	2	3,3	15	7,32	125	30	7	10,52	3	4	10	0,176		
1:100	3	3,3	15	7,32	125	30	8,06	9,19	4	8	8	0,158		
1:100	4	3,3	15	7,32	125	30	8,86	18,91	6	13	6	0,158		
1:100	5	3,3	15	7,32	125	30	10,05	19,51	5	25	-	0,158		
1:100	6	3,3	15	7,32	125	30	10,96	19,99	4	45	-	0,143		

Tabla II.77 Experimento 77

EXP.77		NaOH 0,1M												
Dilución	Exp.	Vol. (ml)	Conc. (mg/l)	pH _i	NTU _i	S _s _i	pH _f	NTU _f	S _s _f	V _{NaOH} (gotas)	Vol. fangos (ml)	V sed. (cm/s)		
1:100	1	3,3	15	7,45	123	34	6,19	7,6	3	-	11	0,158		
1:100	2	3,3	15	7,45	123	34	6,9	6,73	5	5	10	0,167		
1:100	3	3,3	15	7,45	123	34	7,98	9,98	4	8	8	0,143		
1:100	4	3,3	15	7,45	123	34	8,9	13,8	5	14	7	0,158		
1:100	5	3,3	15	7,45	123	34	9,95	17,9	14	25	-	0,143		
1:100	6	3,3	15	7,45	123	34	10,9	31,25	10	45	-	0,167		

Anexo III

Representaciones de los resultados

Anexo III: Representaciones de los resultados

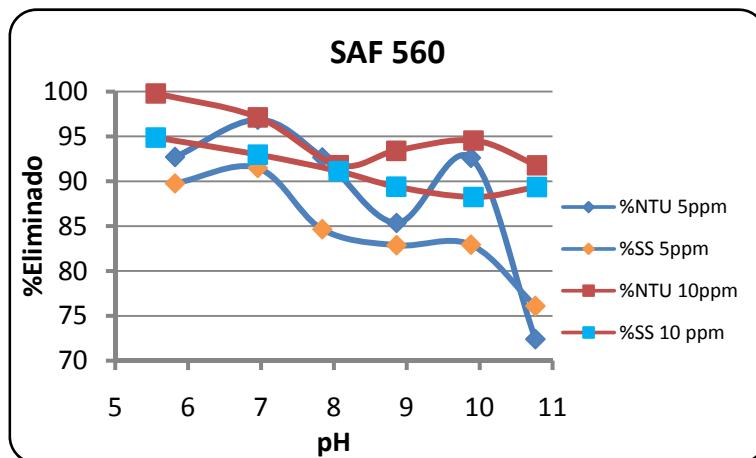


Figura III.1 Eliminación de turbidez y sólidos en suspensión

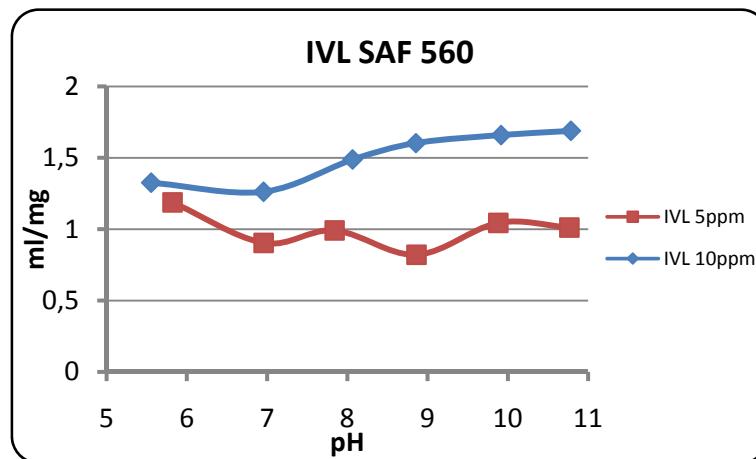


Figura III.2 IVL en función del pH

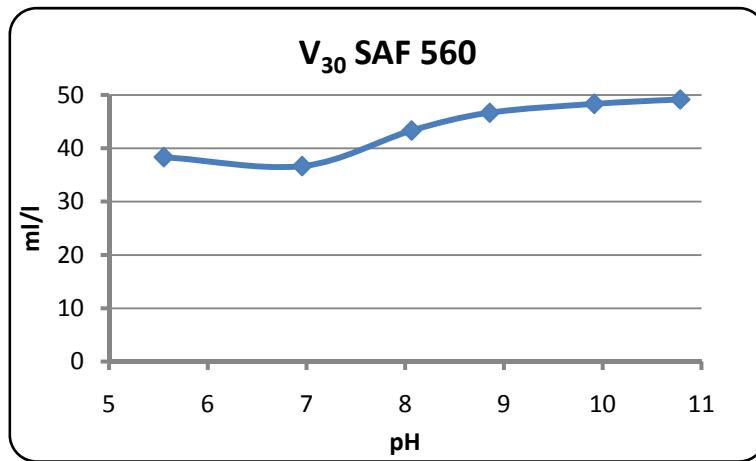


Figura III.3 V_{30} en función del pH

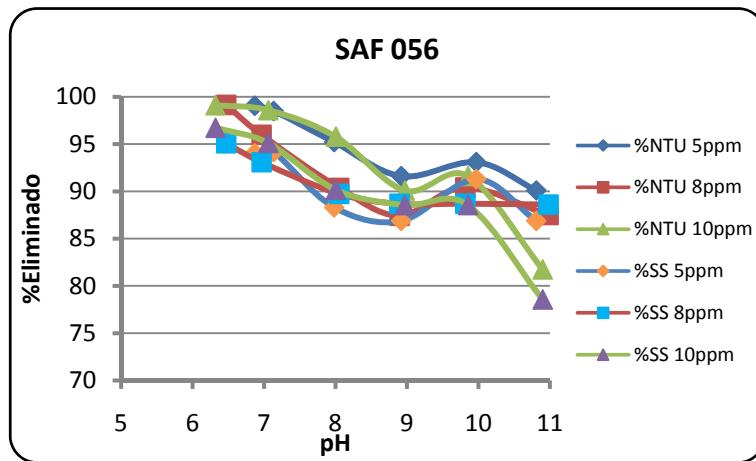


Figura III.4 Eliminación de turbidez y sólidos en suspensión

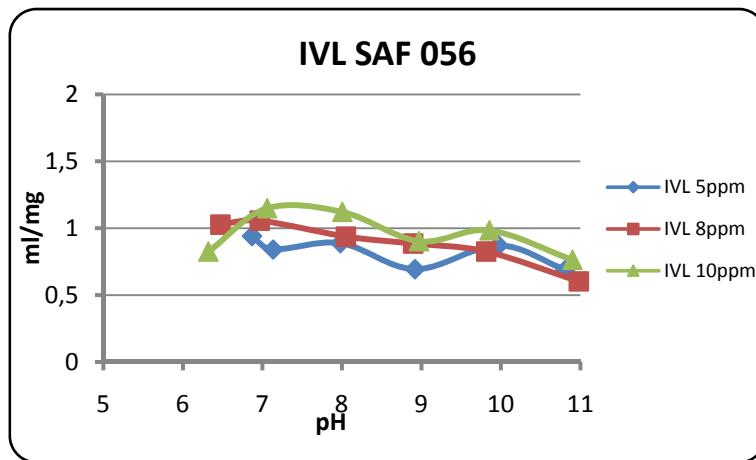


Figura III.5 IVL en función del pH

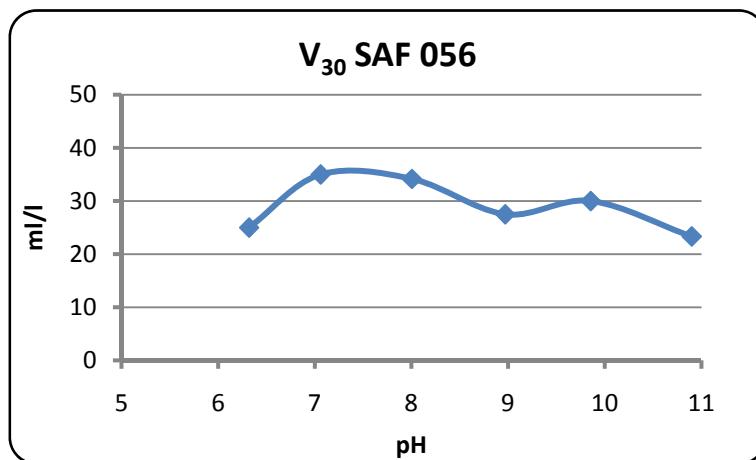


Figura III.6 V_{30} en función del pH

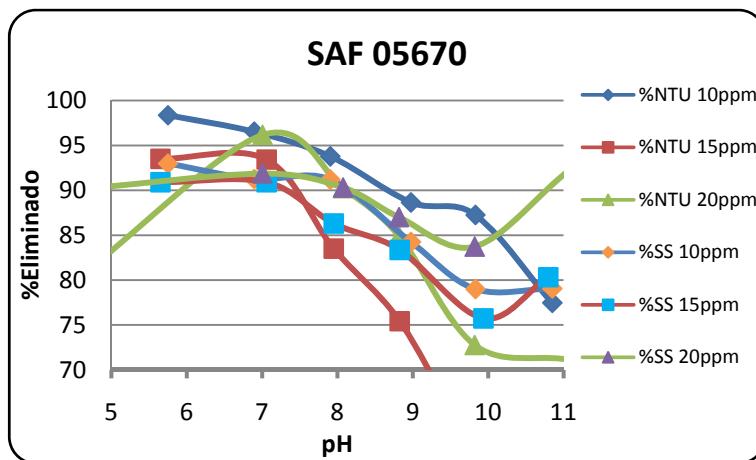


Figura III.7 Eliminación de turbidez y sólidos en suspensión

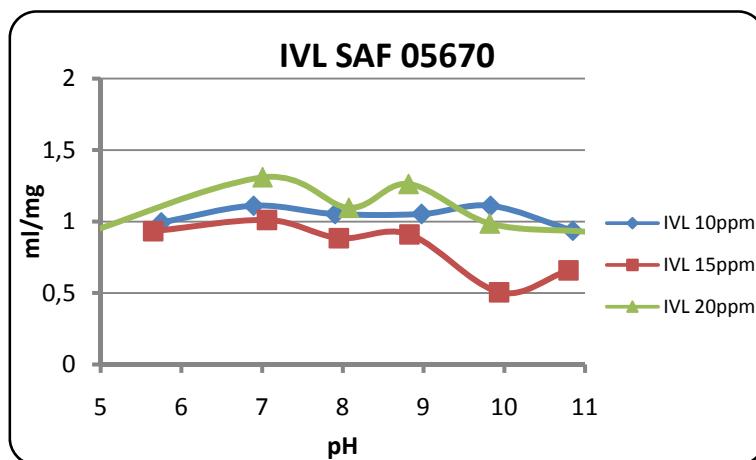


Figura III.8 IVL en función del pH

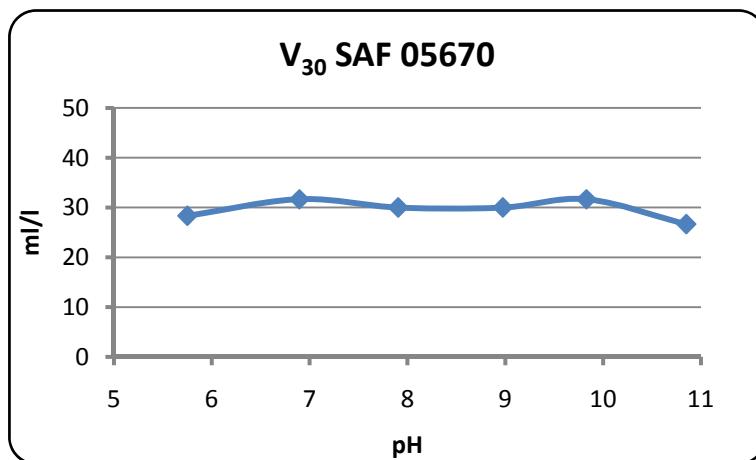


Figura III.9 V₃₀ en función del pH

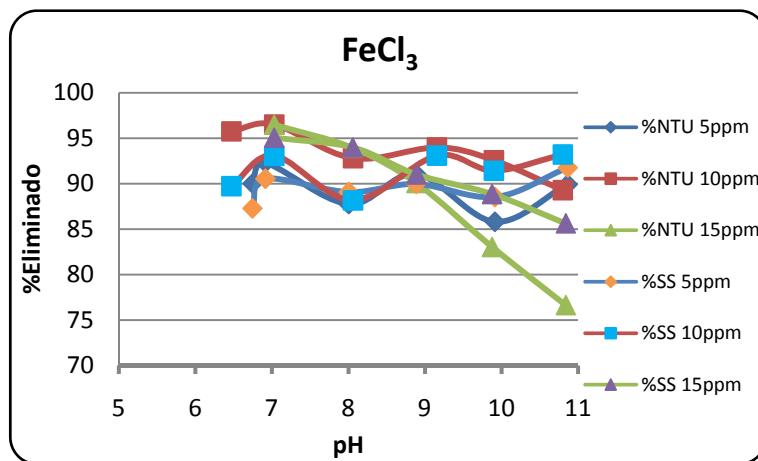


Figura III.10 Eliminación de turbidez y sólidos en suspensión

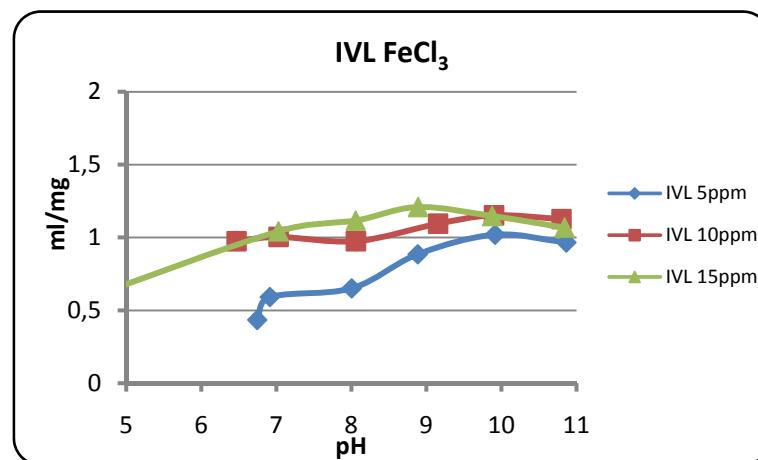


Figura III.11 IVL en función del pH

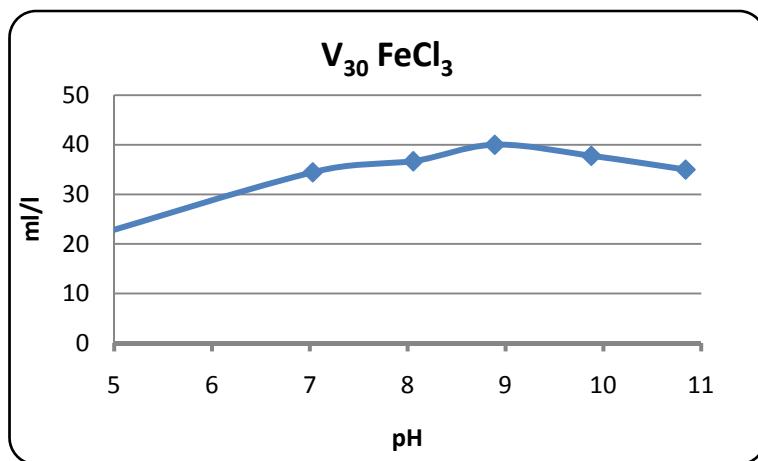


Figura III.12 V₃₀ en función del pH

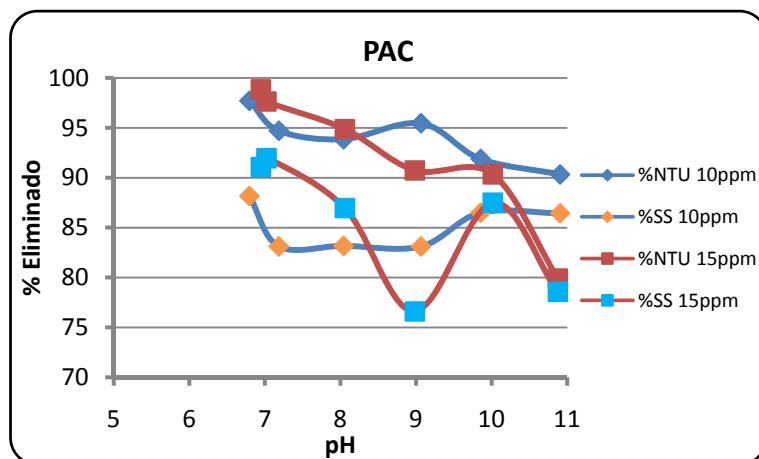


Figura III.13 Eliminación de turbidez y sólidos en suspensión

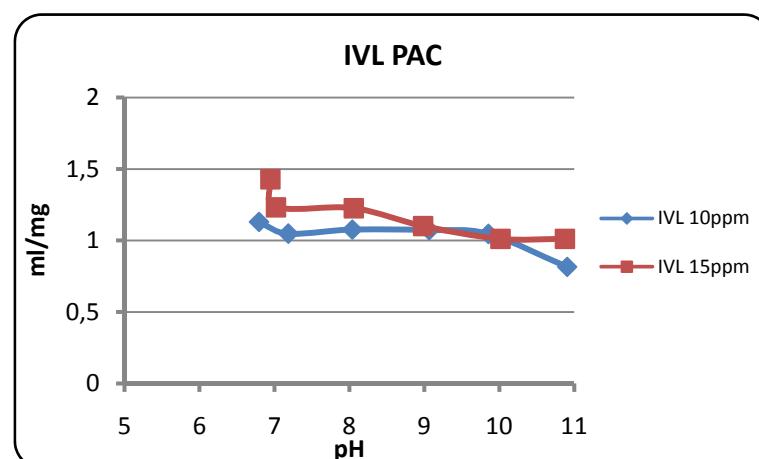


Figura III.14 IVL en función del pH

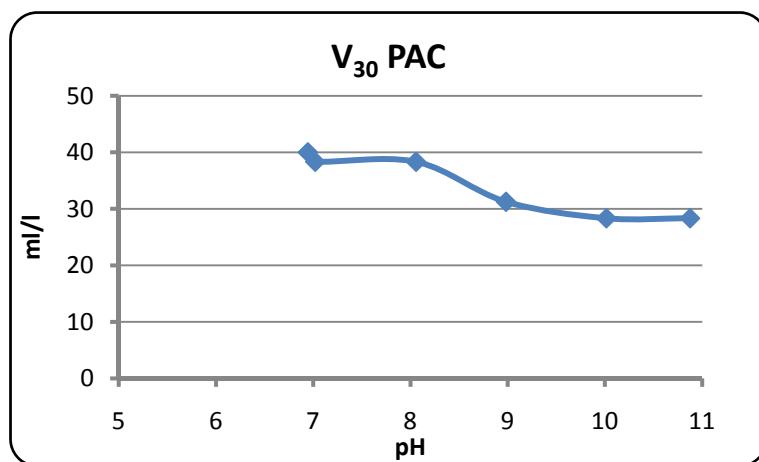


Figura III.15 V₃₀ en función del pH

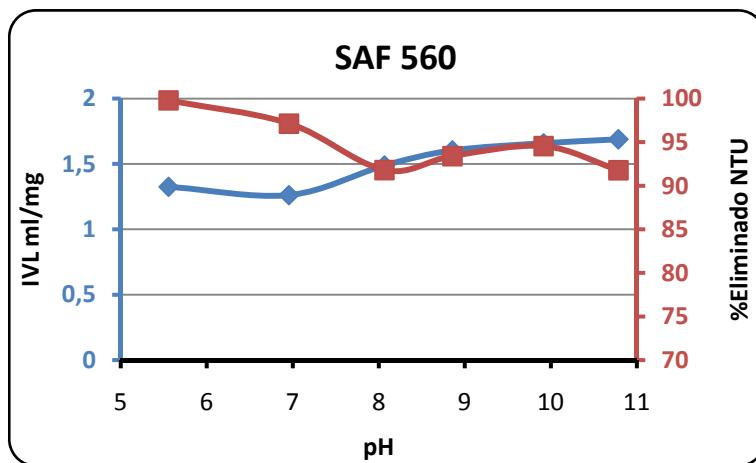


Figura III.16 IVL y eliminación de turbidez en función del pH

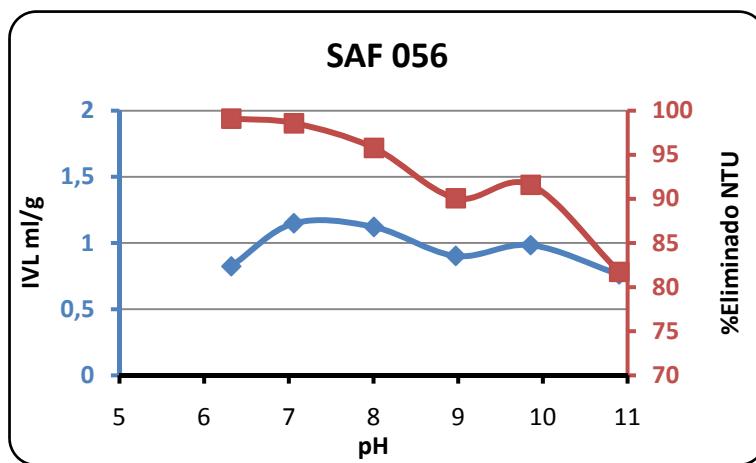


Figura III.17 IVL y eliminación de turbidez en función del pH

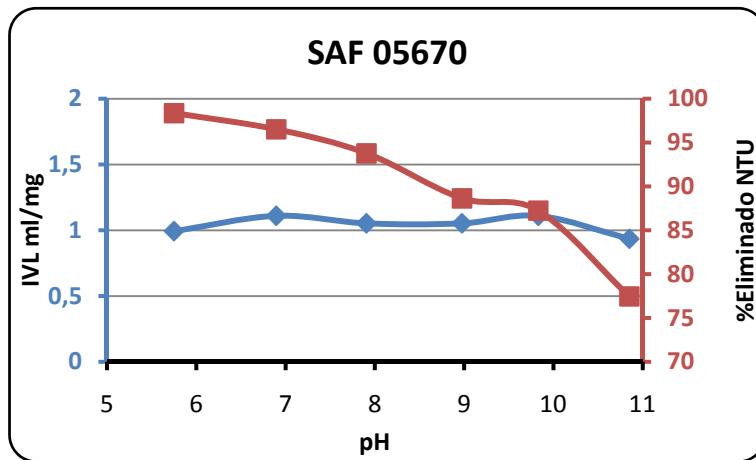


Figura III.18 IVL y eliminación de turbidez en función del pH

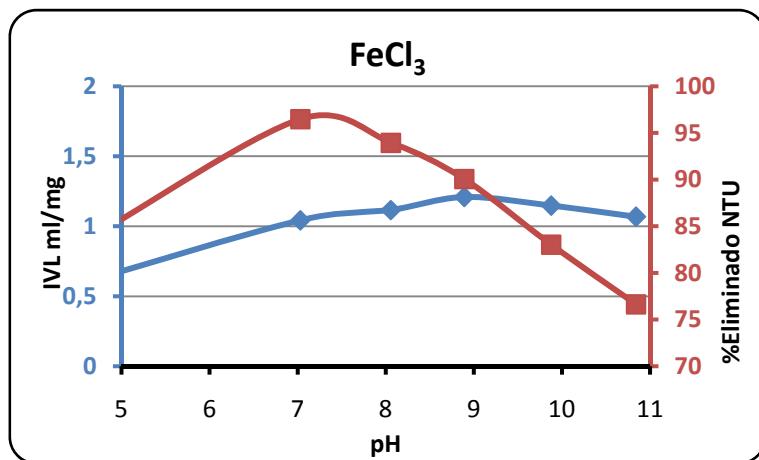


Figura III.19 IVL y eliminación de turbidez en función del pH

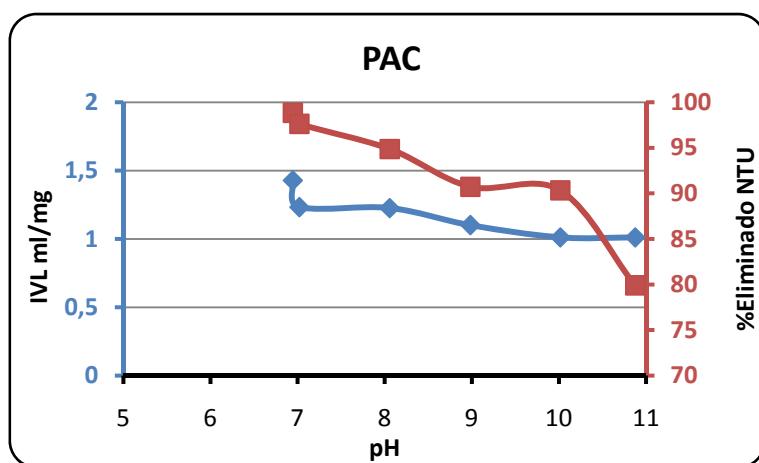


Figura III.20 IVL y eliminación de turbidez en función del pH

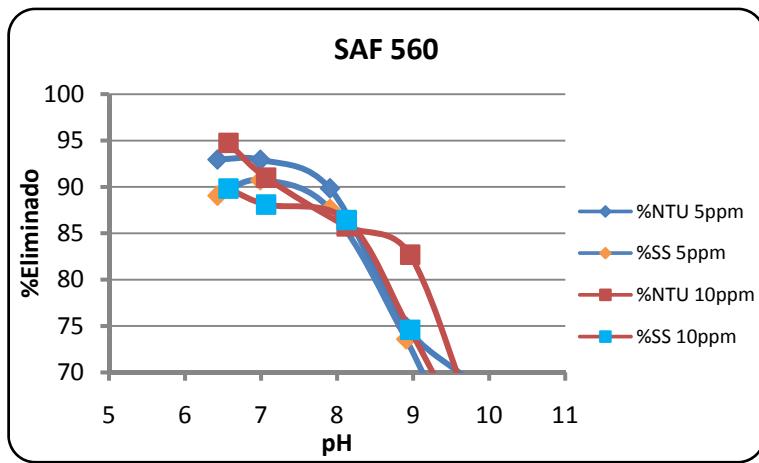


Figura III.21 Eliminación de turbidez y sólidos en suspensión

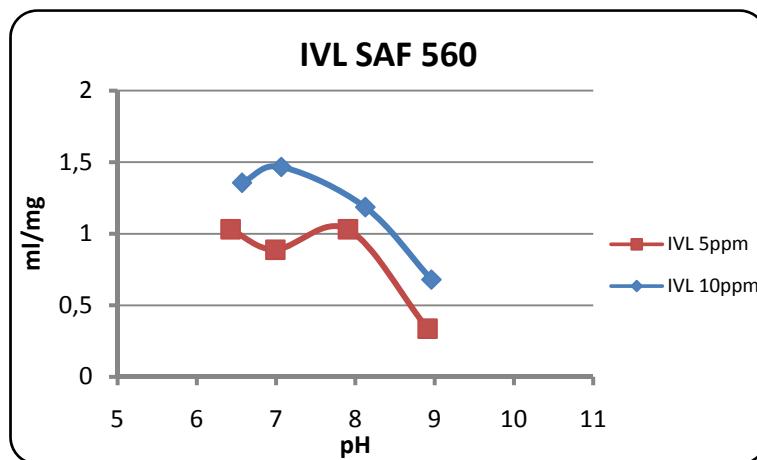


Figura III.22 IVL en función del pH

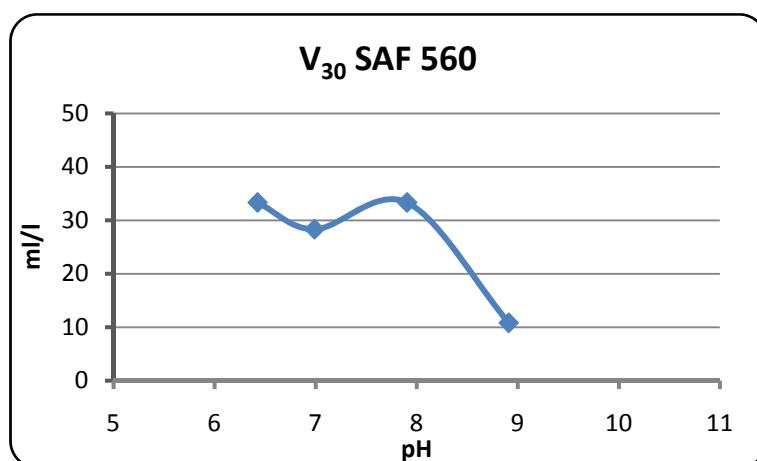


Figura III.23 V₃₀ en función del pH

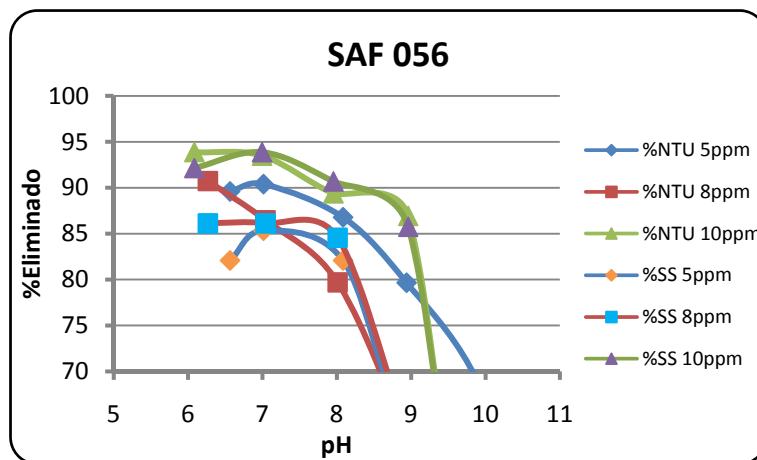


Figura III.24 Eliminación de turbidez y sólidos en suspensión

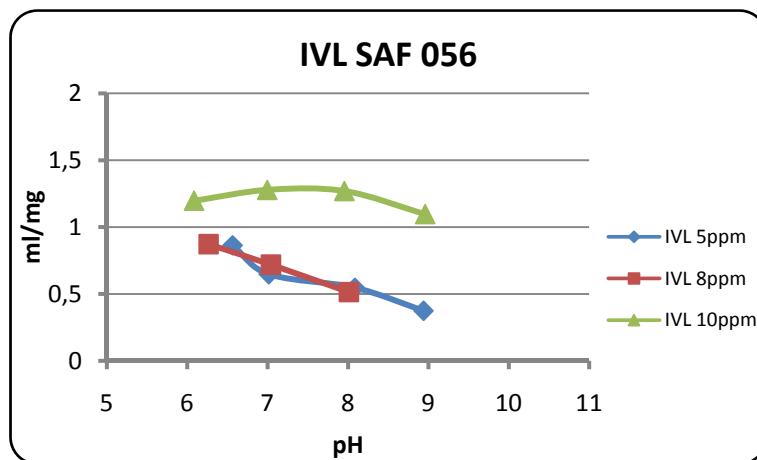


Figura III.25 IVL en función del pH

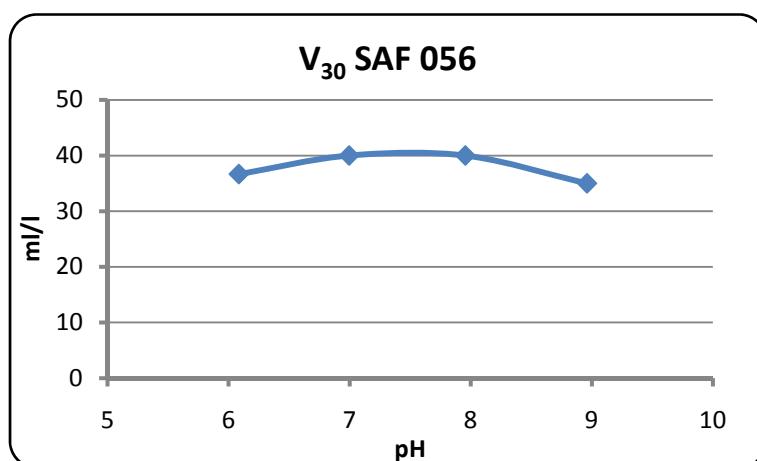


Figura III.26 V₃₀ en función del pH

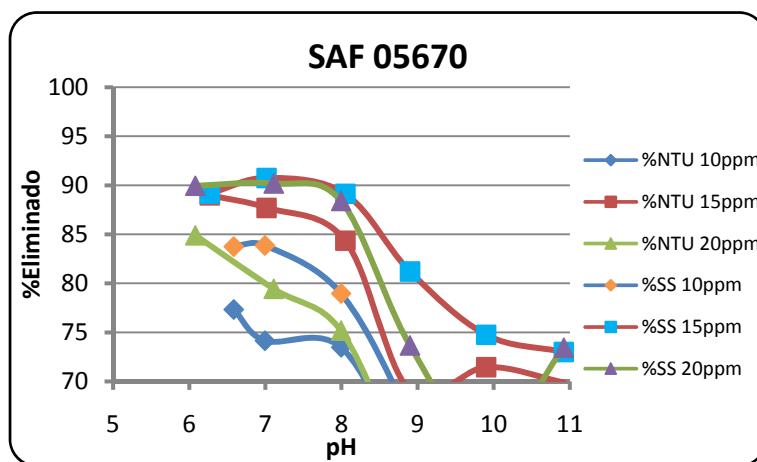


Figura III.27 Eliminación de turbidez y sólidos en suspensión

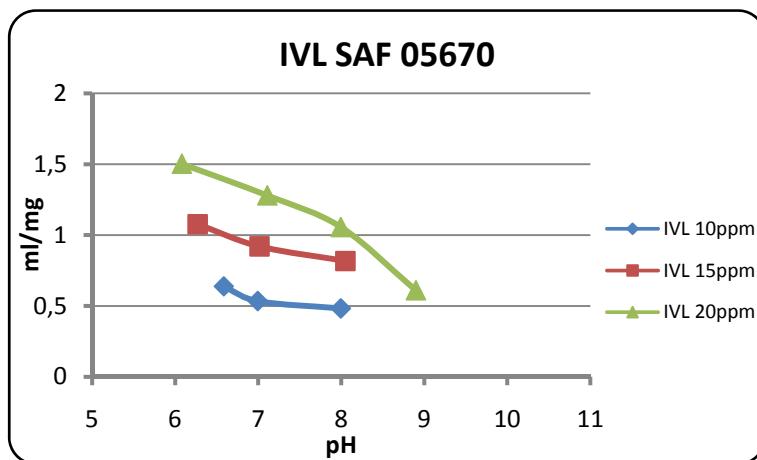


Figura III.28 IVL en función del pH

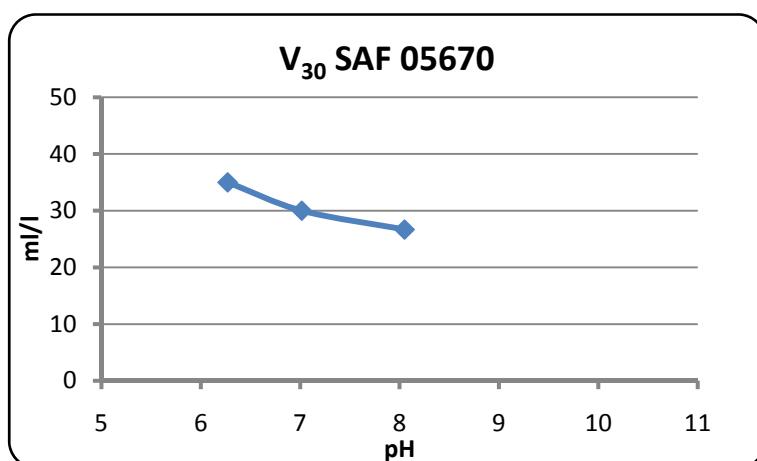


Figura III.29 V₃₀ en función del pH

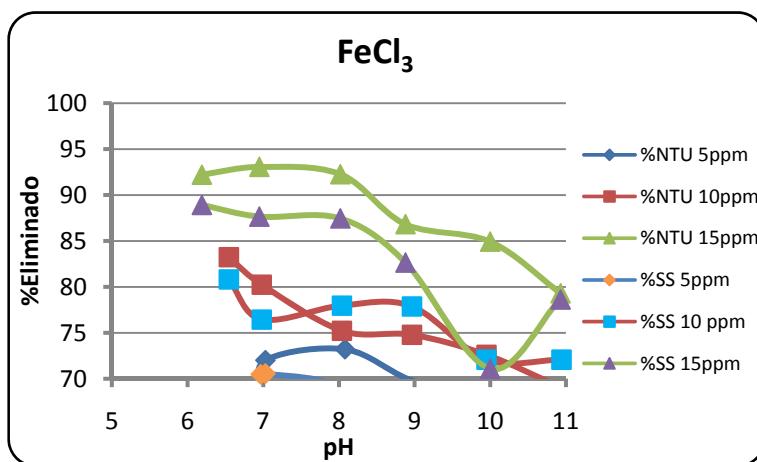


Figura III.30 Eliminación de turbidez y sólidos en suspensión

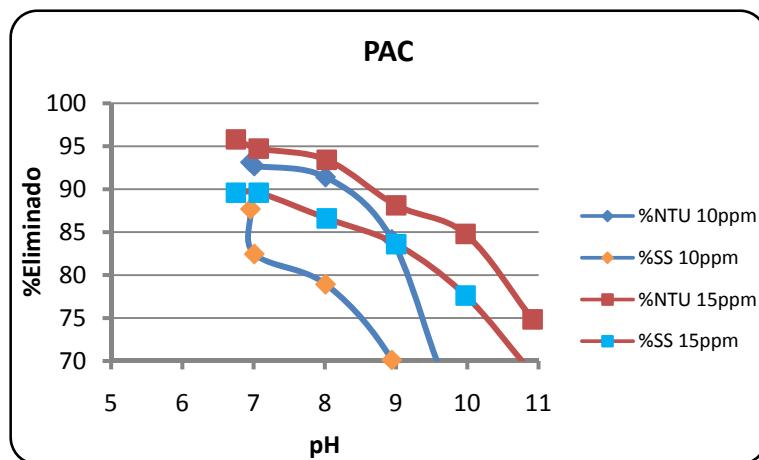


Figura III.31 Eliminación de turbidez y sólidos en suspensión

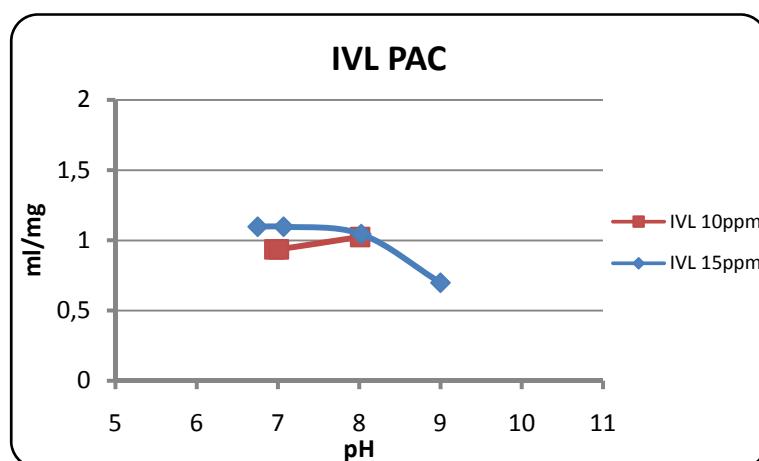


Figura III.32 IVL en función del pH

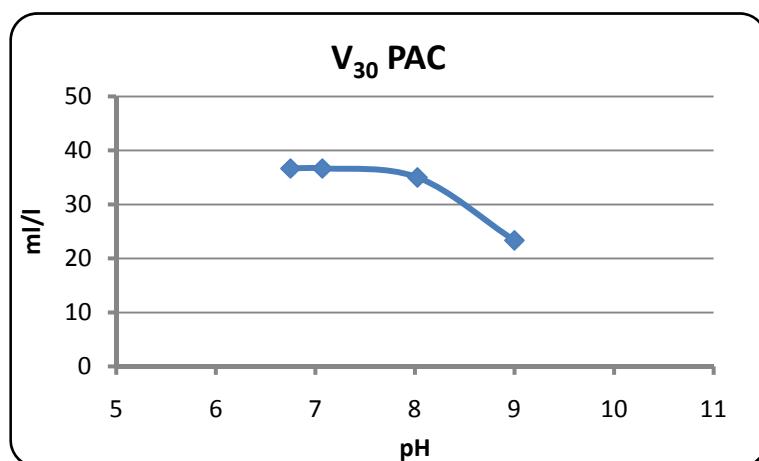


Figura III.33 V_{30} en función del pH

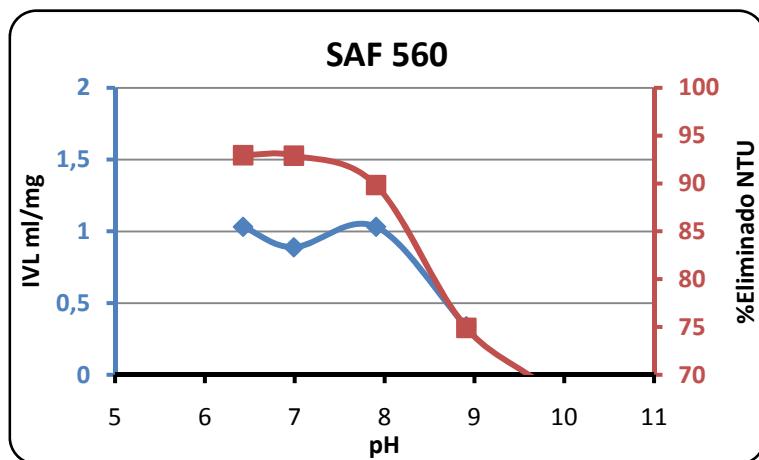


Figura III.34 IVL y eliminación de turbidez en función del pH

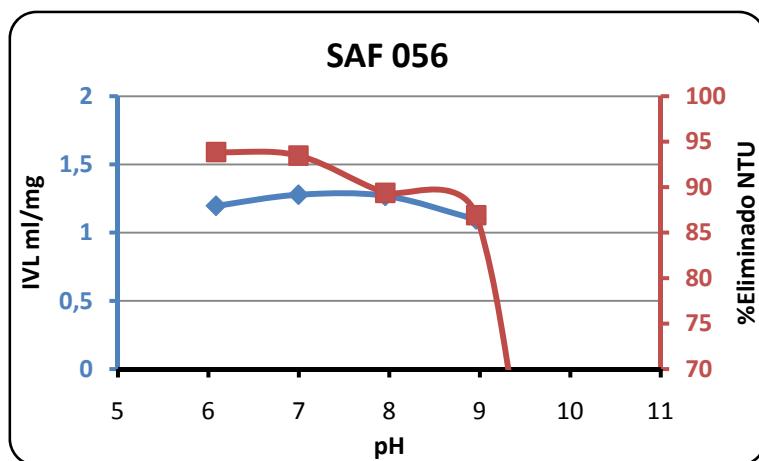


Figura III.35 IVL y eliminación de turbidez en función del pH

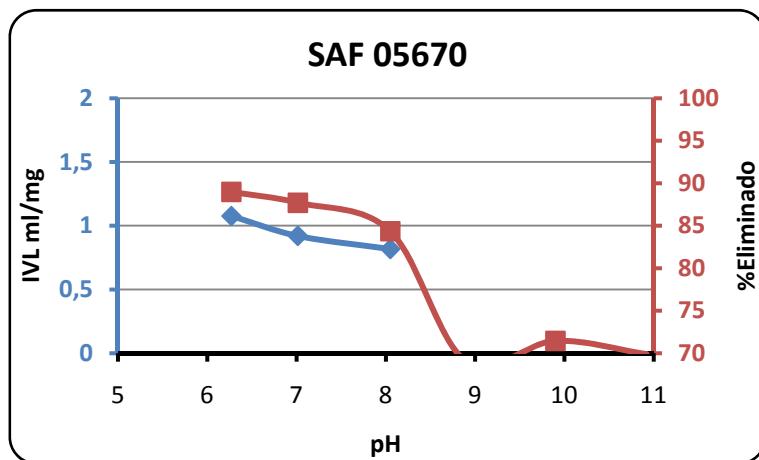


Figura III.36 IVL y eliminación de turbidez en función del pH

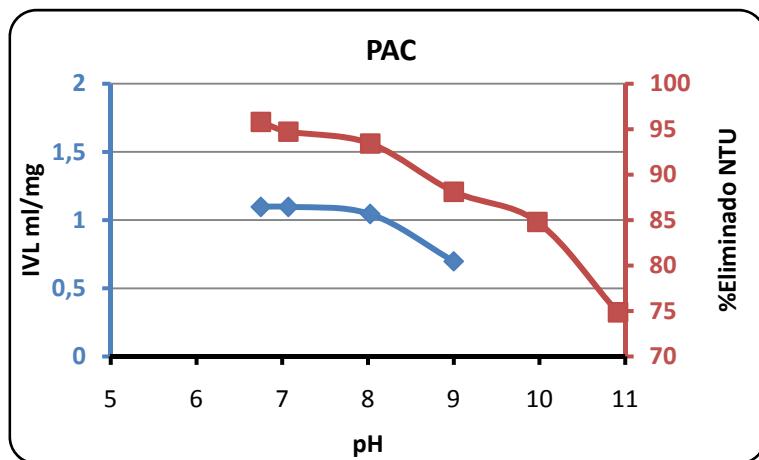


Figura III.37 IVL y eliminación de turbidez en función del pH

Anexo IV

Análisis de metales en el SAF 056

Anexo IV: Análisis de metales en el SAF 056

Tabla IV.1 Metales presentes en el coagulante SAF 056 así como en el agua regenerada por él

Metales	Conc. de metales en el coagulante (mg/l)	M.C.D. (mg/kg)	Conc. De metales en el agua regenerada (ng/ml)	M.C.D (ng/ml)
Li	2,93	0,024	2,85	0,09
Be	<MCD	0,081	<MCD	0,11
B	42,23	0,022	15,45	0,93
Na	<MCD	5,223	20539,4	32,75
Mg	142,8	0,242	1801,6	0,13
Al	40720	-	1142,6	116,26
Si	55,41	28,05	218,4	3,68
P	85,34	73,7	513,9	81,76
K	<MCD	36,85	13562,9	49,94
Ca	400,4	35,15	28600,8	73,33
Sc	<MCD	6,303	-	1,57
Ti	3,39	0,648	3,74	0,82
V	2,35	0,006	2,21	0,09
Cr	3,31	0,169	<MCD	0,78
Mn	13,19	0,133	8,5	0,08
Fe	145,6	0,001	-	-
Co	0,42	0,01	0,34	0,01
Ni	36,82	0,331	<MCD	6,7
Cu	7,29	0,024	9,14	0,01
Zn	8,27	1,229	6,22	0,4
Ga	2,01	0,006	0,24	0,05
Ge	<MCD	0,006	<MCD	0,04
As	0,032	0,012	<MCD	0,48
Se	<MCD	6,059	1,06	0,24
Rb	<MCD	0,008	2,37	0,06
Sr	0,225	0,01	240,6	0,04
Y	0,007	0,004	-	-
Zr	0,369	0,004	<MCD	0,34
Nb	<MCD	0,004	<MCD	0,01
Mo	0,095	0,004	0,2	0,06
Ru	<MCD	0,004	<MCD	0,03
Rh	-	-	<MCD	0,01
Pd	<MCD	0,016	<MCD	0,06
Ag	0,017	0,01	<MCD	0
Cd	<MCD	0,014	<MCD	0,08
In	0,46	0,02	<MCD	0,1
Sn	338,7	0,004	2,12	0,27
Sb	0,056	0,038	0,09	0,07
Te	<MCD	0,101	<MCD	0,01
I	-	-	5,4	0,88

ANEXO IV: ANÁLISIS DE METALES EN EL SAF 056

Tabla IV.1 Metales presentes en el coagulante SAF 056 así como en el agua regenerada por él

Metales	Conc. de metales en el coagulante (mg/l)	M.C.D. (mg/kg)	Conc. De metales en el agua regenerada (ng/ml)	M.C.D (ng/ml)
Cs	<MCD	0,004	0,11	0,01
Ba	<MCD	0,02	5,49	0,13
La	0,056	0,014	0,03	0,01
Ce	0,018	0,01	0,08	0,01
Pr	0,002	0,001	<MCD	0,01
Nd	0,003	0,002	<MCD	0,01
Sm	<MCD	0,002	<MCD	0,01
Eu	<MCD	0,002	<MCD	0,01
Gd	<MCD	0,004	<MCD	0,01
Tb	<MCD	0,001	<MCD	0,01
Dy	<MCD	0,002	<MCD	0,01
Ho	<MCD	0,001	<MCD	0,01
Er	<MCD	0,001	<MCD	0,01
Tm	<MCD	0,002	<MCD	0,01
Yb	<MCD	0,004	0,09	0,05
Lu	<MCD	0,001	<MCD	0,01
Hf	0,013	0,004	<MCD	0,01
Ta	<MCD	0,002	<MCD	0,01
W	0,016	0,002	<MCD	0,25
Re	<MCD	0,002	<MCD	0,01
Os	<MCD	0,006	<MCD	0,01
Ir	<MCD	0,002	<MCD	0,01
Pt	<MCD	0,01	<MCD	0,06
Au	<MCD	0,014	<MCD	0,01
Hg	<MCD	0,022	<MCD	0,15
Tl	0,004	0,002	<MCD	0,01
Pb	0,055	0,016	0,015	0,01
Bi	0,013	0,002	<MCD	0,09
Th	<MCD	0,006	<MCD	0,01
U	0,038	0,001	0,12	0,01

Anexo V

Origen del SAF 056

Anexo V: Origen del SAF 056

Para conocer el posible origen del SAF 056 se parte de dos puntos conocidos. Uno es que es fabricado a partir de un residuo del anodizado del aluminio. El otro es que es conocida su composición en metales pesados. Por lo que, para conocer su origen, previamente se explicará en qué consiste el proceso por el que es obtenido.

La anodización es un proceso electrolítico que convierte la superficie metálica en un recubrimiento de óxido insoluble. Estos recubrimientos ofrecen protección contra la corrosión, superficies decorativas, una base para el pintado y otros procesos y propiedades eléctricas y mecánicas especiales. El aluminio es el material de anodizado utilizado con mayor frecuencia. A continuación se muestran dos esquemas (figura V.1 y figura V.2), muy similares, que reflejan de forma clara todas las operaciones del proceso:

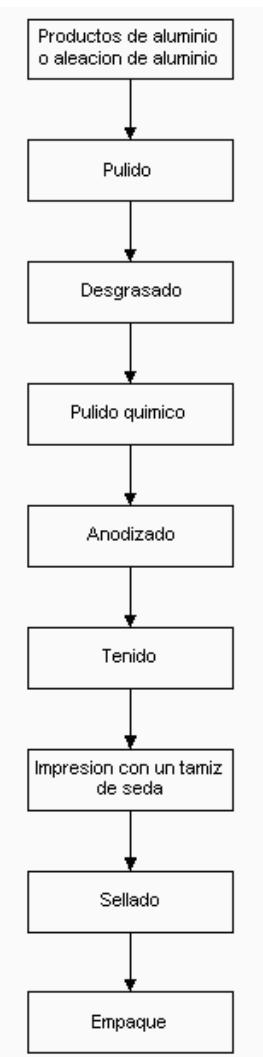


Figura V.1
Esquema 1 del anodizado

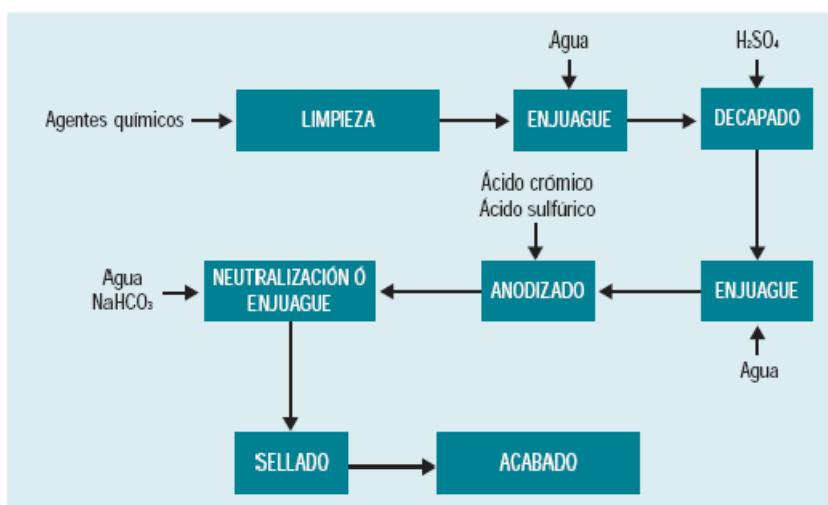


Figura V.2 Esquema 2 del anodizado

Se procede a explicar más detalladamente en qué consisten cada una de las etapas del proceso de anodizado.

1. Pulido / Limpieza: Debido a que el aluminio y su aleación son metales activos y de fácil oxidación, es necesario remover esta capa de oxidación. Por este motivo, el aluminio pasa a través de un proceso de pulido con un aceite lubricante.

2. *Desengrasado*: Los productos pulidos son colocados en una solución de desengrasado, ácida o básica, a altas temperaturas para disolver cualquier sobrante o remanente en su superficie así como eliminar todo tipo de grasa, ya sea de origen mineral o vegetal en la pieza.

3. *Enjuague*: Despues del desengrasado, los productos son lavados y enjuagados en agua fresca.

4. *Decapado o matizado*: Este proceso se realiza para eliminar todo tipo de óxidos generados en los tratamientos previos. Este proceso usa sosa cáustica (NaOH) como decapante en una concentración entre 50 y 240 g/L. El baño se encuentra a una temperatura entre 50 – 60°C.

5. *Pulido químico*: Los productos son colocados dentro de una solución de ácido fosfórico (H_3PO_4). Durante este proceso se genera la calidad reflejante del aluminio anodizado.

6. *Neutralizado*: Se realiza para detener el ataque de la sosa, eliminar óxido de los componentes de aleación y blanquear los perfiles. Se suele realizar con ácido nítrico al 50% en agua y a temperatura ambiente.

7. *Enjuague*: Los productos vuelven a ser lavados y enjuagados

8. *Anodizado*: En esta etapa se realiza el tratamiento anódico que se le da a la pieza, donde se genera una capa de óxido de aluminio sobre la misma. El baño es una celda galvánica en la cual el ánodo es el perfil y por lo tanto va a ser oxidado, lo que se logra sumergiéndolo en una solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) de concentración entre 180 y 200 g/L. El baño debe mantenerse a una temperatura de 19 - 21°C, por lo cual se requiere refrigeración. El anodizado del aluminio se lleva a cabo, mayoritariamente con ácido sulfúrico, aunque en ocasiones pueden utilizarse otro tipo de soluciones como el ácido fosfórico o crómico, siendo esta última aplicación cada vez menos utilizada y en aplicaciones muy concretas. A continuación se detallan las condiciones de trabajo de este tipo de anodizados de aluminio

8.1 Anodizado de aluminio con ácido sulfúrico:

Tabla V.1 Condiciones de trabajo del anodizado del aluminio con ácido sulfúrico

Concentración ácido sulfúrico	< 200 g/l ± 10 g/l
Aluminio	5-15 g/l
Cloruros	< 100g/l
Temperatura	< 21 °C para 5,10 µm < 20 °C para 15,20,25 µm
Densidad de corriente A/ dm ²	1.2-2.0 Amp/dm ² para 5,10 µm 1.4-2.0 Amp/dm ² para 15 µm 1.5-2.0 Amp/dm ² para 20,25 µm

8.2 Anodizado de aluminio con ácido fosfórico: El anodizado con ácido fosfórico se utiliza como tratamiento previo a posteriores recubrimientos. Este tipo de anodizado aporta porosidad a la superficie, resistencia a la oxidación (hidratación) e incrementa la dureza.

Tabla V.2 Condiciones de trabajo del anodizado con ácido fosfórico

Temperatura	10-20 °C
Concentración electrolito	100-150 g/L
Tiempo	El necesario según espesor

9. *Coloreado*: Los productos son lavados e introducidos en un tanque para ser coloreados. El coloreado del producto es realizado por distintos procesos.

9.1 *Coloración por inmersión*: la más utilizada con una ampliada gama de colores.

Tabla V.3 Características coloración por inmersión

Producto	Concentración (mg/l)
Colorantes	0,05 -30 en función del color deseado

9.2 *Coloración electrolítica*: el anodizado se lleva a cabo en una solución de ácido que contiene sales de metal y se le aplica corriente alterna. Esto provoca que el metal penetre 1-5 µm en el interior del poro de la alúmina. Se obtiene el color característico del metal usado. El electrolito más usado hoy en día es a base de sulfato de estaño. Se utilizan también sales de níquel, de cobre y permanganato.

Tabla V.4 Características coloración electrolítica

Producto	Concentración (g/l)
Sal de níquel	5-8
Sal de cobre	4-5
Sal de estaño	3-4

9.3 *Coloración por interferencia*: es una técnica especial basada en el principio de coloración electrolítica, con una modificación previa de la capa anódica antes de la deposición electrolítica. El aspecto se produce por la interferencia de 2 capas finas: la capa de metal depositada electroquímicamente en el fondo de los poros y la interfase de óxido de aluminio modificada por debajo.

9.4 *Coloración integral*: en este caso el óxido de aluminio se colorea durante el proceso de anodizado debido a las características de la aleación de aluminio utilizada. Esta técnica está siendo totalmente reemplazada por la coloración electrolítica.

10. *Secado y sellado*: Despues que la tinta ha secado, el producto es remojado en una solución selladora durante 15 minutos, completando de esta manera el proceso. Su función es mejorar la resistencia a la oxidación. El proceso consiste en el cierre de los poros formados durante el anodizado, por transformación química del óxido mediante temperatura o la acción de sustancias químicas. A continuación se describen los métodos de sellado:

10.1 *Sellado en caliente*: Sellado por termo-hidratación: se realiza con agua desmineralizada a una temperatura superior a 96 °C: los poros del óxido de aluminio se hidratan, formándose AlO(OH) (bohemita) y así produciéndose el cierre de éstos. El proceso consiste en sumergir las piezas en agua desionizada durante 3-4 minutos por micra de grosor. El pH del baño es de 6-6,5, y puede contener aditivos antipolvo y reguladores de pH. La termo-hidratación también puede realizarse con vapor de agua, siendo en este caso la temperatura mínima del vapor saturado.

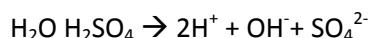
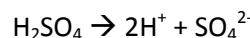
10.2 *Sellado a media temperatura*: La temperatura y el tiempo son inferiores a los del sellado caliente, la temperatura está entre 60 y 85 °C, y el tiempo entre 2 a 5,5 minutos por micra. Están formulados con sales de níquel y aditivos orgánicos.

10.3 *Sellado en frío*: Sellado por impregnación:

- Primera fase: impregnación y cierre de los poros de la capa anódica por reacción entre el óxido de aluminio y un baño en cuya composición se encuentran níquel y fluoruros. La temperatura de trabajo es entre 25 y 30 °C. El tiempo de tratamiento es de 0,8 a 1,2 minutos por micra, y el pH es de 6-6.5.
- Segunda fase: una vez sellado y lavado, la superficie tratada se sumerge en agua desionizada a 60 °C durante un tiempo de 0,8 a 1,2 minutos por micra.

Una vez conocidas las etapas del anodizado se explican algunas de las reacciones involucradas en ellas.

El ácido sulfúrico sufre un proceso de disociación al ser mezclado con el agua:



Durante el anodizado ocurren varios procesos a la vez, uno es la oxidación del aluminio con la formación en su superficie de una película dura de óxido, otro es la disolución del metal en el electrolito y el desprendimiento de oxígeno del ánodo, además se puede apreciar el desprendimiento de hidrógeno en el cátodo.

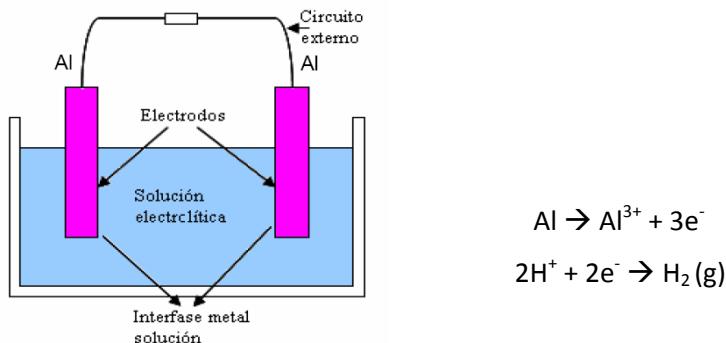


Figura V.3 Anodizado

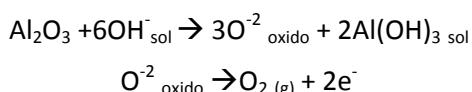
Por otro lado se sabe que el aluminio suele encontrarse aleado, los principales componentes de esta aleación son:

- Cromo (Cr): Aumenta la resistencia mecánica cuando está combinado con otros elementos Cu, Mn, Mg.
- Cobre (Cu): Incrementa las propiedades mecánicas pero reduce la resistencia a la corrosión.
- Hierro (Fe): Incrementa la resistencia mecánica.
- Magnesio (Mg): Tiene alta resistencia tras el conformado en frío.
- Manganeso (Mn): Incrementa las propiedades mecánicas y reduce la calidad de embutición.
- Silicio (Si): Combinado con magnesio (Mg), tiene mayor resistencia mecánica.
- Titanio (Ti): Aumenta la resistencia mecánica.
- Zinc (Zn): Reduce la resistencia a la corrosión.

En el horno de retención se efectúan ajustes en la aleación, mediante la adición de metales requeridos: Si, Cu, Mg, Sn, Zn o Ti, Cr, Fe, Mn, Ni.

La consecuencia resultante de estas aleaciones es que, al igual que el aluminio se oxida también lo hacen todos los metales que sean capaces de oxidarse por su poder oxidativo con los que se encuentra aleado.

Los iones (SO_4^{2-} y OH^-) restantes se dirigen hacia el ánodo. Como ya se ha comentado, en el ánodo el electrodo es oxidado ya que por efecto de la corriente el Al pierde 3 electrones. Cada uno de los procesos que se dan en el ánodo pueden explicarse si se tiene en cuenta que la solución electrolítica es acuosa, de tal manera que son iones hidroxilo en solución (OH^-) provenientes del agua los que al ser atraídos hacia el ánodo se disocian formando O^{2-} e iones H^+ . Los iones Al^{3+} generados por la oxidación del aluminio, debido a la presencia de medio ácido, son empujados hacia fuera tal que la capa del electrolito adjunta al ánodo se satura con iones del metal. Estos iones Al^{3+} y los iones O^{2-} generados anteriormente se combinan para formar la película de óxido Al_2O_3



Una vez es conocido el proceso del anodizado y los metales presentes en el coagulante SAF 056 (Anexo IV) así como su ficha técnica (Anexol), se busca el origen de los mismos. De los metales contenidos en el coagulante destacar por su concentración los mostrados en la tabla V.4.

Tabla V.4 Metales del SAF 056

Metal	Concentración (mg/kg)
Aluminio (Al)	40.700
Calcio (Ca)	400,4
Estaño (Sn)	338,7
Hierro (Fe)	145,6
Magnesio (Mg)	142,81
Fósforo (P)	85,34
Silicio (Si)	55,41
Boro (B)	42,23
Níquel (Ni)	36,82

El aluminio es el que se encuentra en una mayor concentración, al ser el metal que sufre el anodizado. Por otro lado tenemos el hierro, el magnesio y el silicio, los tres pueden encontrarse aleados con el aluminio y sufrir una oxidación a la vez que el aluminio.

El fósforo puede proceder del pulido químico, ya que las piezas se introducen en ácido fosfórico en esta parte del proceso, o del propio anodizado porque aparte del ácido sulfúrico también se usa ácido fosfórico como disolución.

El origen del boro puede ser que la disolución del anodizado sea de ácido bórico (H_3BO_3). El estaño es muy probable que proceda de la coloración electrolítica, al ser muy común el realizarla con sales de estaño. El sellado se realiza en agua y a veces se le añade sales de níquel o puede encontrarse aleado con el propio aluminio.

La conclusión final que se obtiene de este estudio es que el origen más probable del SAF 056 sea el agua de limpieza tras la coloración debido a que tendría un pH ácido al realizarse en medio ácido y una elevada cantidad de estaño.

Anexo VI

Mecanismo de coagulación

Anexo VI: Mecanismo de coagulación

Las suspensiones coloidales, presentes en el agua a regenerar, están sujetas a ser estabilizadas y desestabilizadas. Entre las fuerzas de estabilización o repulsión podemos mencionar las siguientes:

- La carga de las partículas.
- La hidratación, que generalmente es importante para los coloides hidrofílicos, aunque tienen menor importancia en este caso.

Los factores de atracción o desestabilización son los siguientes:

- La gravedad.* Es insignificante en la desestabilización de las partículas coloidales y, por lo tanto, no se tratará con mayor detalle.
- El movimiento browniano.* Permite que las partículas entren en contacto, lo que constituye un requerimiento para la desestabilización.
- La fuerza de Van der Waals.* Una fuerza débil de origen eléctrico, postulada por primera vez por el químico holandés Johans Diderick van der Waals. Es un factor muy importante, pues constituye la principal fuerza atractiva entre las partículas coloidales. Estas fuerzas siempre atractivas, que decrecen rápidamente con la distancia, se deben a la interacción de dipolos permanentes o inducidos en las partículas.

El sistema coloidal no presenta carga eléctrica “líquida” debido a que la carga de superficie negativa es balanceada con los iones de carga contraria presentes en el agua. Como la superficie de la partícula es negativa, hay un cúmulo de iones positivos en la región de interfaz (sólido-liquido) que forman, junto con la carga negativa de la partícula, la doble capa eléctrica, también denominada *capa compacta*. Los iones negativos se aproximan a la capa compacta y atraen iones positivos; así se forma la *capa difusa*, que engloba a la primera. En realidad, la capa difusa resulta de la atracción de iones positivos, de la repulsión electrostática de iones negativos (con la misma carga de la partícula) y la difusión térmica.

Se han propuesto varios modelos para explicar la doble capa eléctrica. Quizás el modelo que explica mejor este fenómeno es el de doble capa difusa de Stern-Gouy, figura VI.1

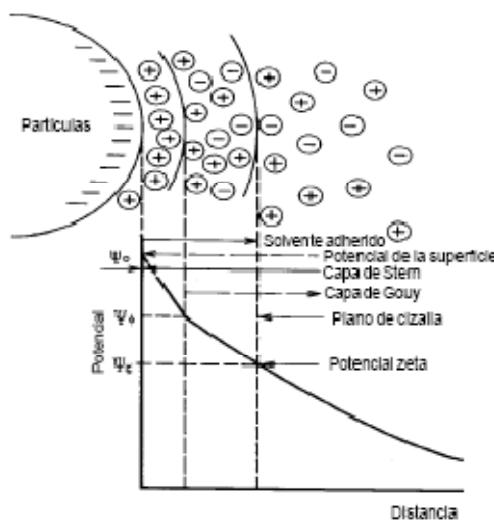


Figura VI.1 Doble capa difusa de Stern-Gouy

En este modelo hay tres potenciales de interés:

- 1) El potencial ψ_0 en la superficie coloidal. Es un potencial eléctrico creado por la presencia del coloide en el agua, que disminuye con la distancia, a partir de la superficie del mismo, donde es máximo. Se le denomina potencial de Nernst.
- 2) El potencial ψ_ϕ (Phi), en el interior de la superficie de la doble capa, donde comienza la capa difusa.
- 3) El potencial ψ_ζ (Zeta) en el plano de cizalla.

Las partículas coloidales, las sustancias húmicas y algunos microorganismos presentan una carga negativa en el agua, lo cual impide la aproximación de las mismas. En el tratamiento del agua será necesario alterar esta fuerza iónica mediante la adición de sales de aluminio o de hierro o de polímeros sintéticos que provoquen el fenómeno de la coagulación.

Actualmente se considera la coagulación como resultado de la acción de cuatro mecanismos:

1. Compresión de capa difusa
2. Adsorción y neutralización
3. Barrido
4. Adsorción y formación del puente

1. Compresión de la doble capa

La introducción de un electrolito indiferente en un sistema coloidal causa un incremento de la densidad de cargas en la capa difusa y disminución de la “esfera” de influencia de las partículas, y ocurre la coagulación por compresión de la capa difusa. Concentraciones elevadas de iones positivos y negativos (fuerza iónica grande) en el agua acarrean un incremento del número de iones en la capa difusa que, para mantenerse eléctricamente neutra, necesariamente tiende a reducir su volumen, de modo tal que las fuerzas de Van der Waals sean dominantes, y se elimine la estabilización electrostática. Cabe destacar dos aspectos interesantes sobre ese mecanismo de coagulación:

- a) La concentración del electrolito que causa la coagulación es prácticamente independiente de la concentración de coloides en el agua.
- b) Es imposible causar la reestabilización de las partículas coloidales con la adición de mayores cantidades de electrolitos debido a que ha ocurrido una reversión de la carga de las mismas, que pasa a ser positiva.

A los electrolitos responsables de la desestabilización se les denomina contraiones. Las concentraciones de Na^+ , Ca^{2+} y Al^{3+} que se requieren para desestabilizar un coloide con carga negativa varían aproximadamente en la proporción de 900:30:1.

Cabe destacar que si bien este mecanismo puede explicar la acción de iones de sodio y calcio, que son iones indiferentes, no es válido para la acción del aluminio, porque este último no es un electrolito indiferente, sino que reacciona tanto con el agua como con la alcalinidad.

Por tanto, el modelo físico de doble capa presenta limitaciones para explicar el fenómeno de coagulación.

2 Adsorción y neutralización de la carga

La desestabilización de una dispersión coloidal consiste en las interacciones entre coagulante-coloide, coagulante-solvente y coloide-solvente. El efecto de adsorción y neutralización de la carga se encuentra estrechamente ligado al de compresión de la doble capa.

Este fenómeno se explica claramente si se toman en cuenta las reacciones que ocurren al agregar sal de aluminio al agua. Los complejos hidroxilados (monómeros, dímeros, polímeros), formados con dosis bajas de Al (III), pueden ser adsorbidos por los coloides, lo que provoca la desestabilización. Si se agrega más Al (III) al agua, los coloides pueden reestabilizarse con carga positiva.

3 Captura en un precipitado de hidróxido metálico o captura por barrido

Cuando la dosis de un coagulante de sales metálicas en solución como el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y FeCl_3 excede el producto de solubilidad de sus hidróxidos metálicos como el $\text{Al}(\text{OH})_3$ y el $\text{Fe}(\text{OH})_3$, se produce una precipitación rápida de los hidróxidos gelatinosos que explica el fenómeno de remoción de turbiedad. En este caso, las partículas coloidales son envueltas por los precipitados y, como este mecanismo no depende de la neutralización de la carga de los coloides, la condición óptima de la coagulación puede no corresponder a aquella donde es mínimo el potencial zeta. En este caso, la presencia de otros aniones, aparte de los hidróxidos, particularmente el sulfato, es efectiva para aumentar la velocidad de precipitación.

Por otro lado, puesto que las partículas coloidales pueden servir como núcleos para formar precipitados, un aumento en la concentración de partículas coloidales puede favorecer la precipitación.

4 Adsorción y puente interparticular

La coagulación puede realizarse también usando una variedad significativa de compuestos orgánicos sintéticos y naturales caracterizados por grandes cadenas moleculares, que gozan de la propiedad de presentar sitios ionizables a lo largo de la cadena y de actuar como coagulantes.

Se ha observado que muchas veces los polímeros con carga negativa son efectivos para coagular coloides con carga negativa, fenómeno que no puede ser explicado de acuerdo con modelos basados en la neutralización de cargas. Se ha desarrollado la teoría del “puente” que, al menos, explica cualitativamente este fenómeno.

La teoría de La Mer:

Reacción 1. Un polímero tiene ciertos grupos que interaccionan con la superficie de las partículas coloidales y se deja que el resto de la molécula se extienda hacia la solución.

Reacción 2. Si una segunda partícula con algunos sitios de adsorción vacíos entra en contacto con los segmentos extendidos, puede realizarse una unión. El polímero sirve de puente en el complejo partícula-polímero-partícula.

Reacción 3. Si no se dispone de una segunda partícula, los segmentos dispersos del polímero pueden eventualmente adsorberse en otros lados de la partícula original, lo que hace imposible que el polímero sirva de puente y se produce la reestabilización de las partículas.

Reacción 4. El modelo de puente puede explicar cualitativamente la reestabilización como resultado de la saturación de las superficies coloidales por el polímero, sin dejar lugar para la formación de puentes interparticulares.

Reacciones 5 y 6. En algunos casos, los sistemas coloidales desestabilizados pueden ser reestabilizados por medio de agitación intensa, debido a que se rompen las uniones polímero-superficie, y ocurre una adsorción secundaria de los fragmentos de los flóculos.

CINÉTICA O ETAPAS DE LA COAGULACIÓN

- 1) Hidrólisis de los iones metálicos multivalentes y su consecuente polimerización hasta llegar a especies hidrolíticas multinucleadas.
- 2) Adsorción de las especies hidrolíticas en la interfaz de la solución sólida para lograr la desestabilización del coloide.
- 3) Aglomeración de las partículas desestabilizadas mediante un puente entre las partículas que involucra el transporte de estas y las interacciones químicas.
- 4) Aglomeración de las partículas desestabilizadas mediante el transporte de las mismas y las fuerzas de Van der Waals.
- 5) Formación de los flóculos.
- 6) Precipitación del hidróxido metálico.

Algunas de estas etapas ocurren secuencialmente. Otras coinciden parcialmente y otras incluso pueden ocurrir simultáneamente. Se puede suponer que las diferentes etapas de la reacción pueden resultar controlables en un cierto porcentaje, bajo diversas condiciones químicas.

MECANISMOS DE COAGULACIÓN PREDOMINANTES

La coagulación mediante sales inorgánicas se produce predominantemente por medio de dos mecanismos:

- 1) Adsorción de las especies hidrolíticas por el coloide, lo que provoca la neutralización de la carga.
- 2) Cagulación de barrido, en la que se producen las interacciones entre el coloide y el hidróxido precipitado.

