

**DESEMPEÑO DEL PROCESO *ELECTROFLOX* EN AGUAS
RESIDUALES DE TINTAS.**



JULIÁN DAVID LEAL ACOSTA

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI
2011**

**DESEMPEÑO DEL PROCESO *ELECTROFLOX* EN AGUAS RESIDUALES DE
TINTAS.**

JULIÁN DAVID LEAL ACOSTA

**Trabajo de grado como requisito para optar al título de
Ingeniero Químico**

Director:

FIDERMAN MACHUCA MARTINEZ

Doctor en Ingeniería

Co Director:

NILSON MARRIAGA CABRALES

Magister en Ingeniería.

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI
2011**

AGRADECIMIENTOS

A todos aquellos que contribuyeron directa e indirectamente en la realización de este documento extendiendo mis más sinceros agradecimientos, en especial al grupo de investigación GAOX y más particularmente a:

Profesor Nilson Marriaga, por su continua disposición, paciencia y gran conocimiento; características admirables propias de un gran maestro.

Profesor Fiderman Machuca, por su confianza y positivismo en todo momento.

Ingeniera Dayana Donneys, por sus apreciaciones que sirvieron de faro en los momentos de desconocimiento.

Gloria Lasso, por proporcionar el espacio adecuado para la experimentación llenado siempre de su gran carisma y afabilidad.

A todos ustedes

Gracias.

CONTENIDOS

RESUMEN.....	1
OBJETIVOS	3
ANTECEDENTES.	4
MARCO TEÓRICO.....	6
1. ELECTROCOAGULACIÓN.....	6
2. QUÍMICA COLOIDAL.....	9
3. PROCESO ELECTROFLOX.....	10
METODOLOGÍA.....	14
1. CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE A TRATAR:	14
2. MÉTODO EXPERIMENTAL:	14
2.2. FLOCULACIÓN:	17
• Diseño experimental:	17
• Métodos y materiales:	18
2.3. OXIDACIÓN:	19
2.4. ANÁLISIS PRELIMINAR DE COSTOS:	19
3. MEDICIÓN DE VARIABLES:	20
4. EQUIPOS UTILIZADOS:	21
RESULTADOS Y ANÁLISIS.	23
1. CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE:	23
2. ELECTRODOSIFICACIÓN:	24
3. FLOCULACIÓN:	28
3.1. REDUCCIÓN DE COLOR.	29
3.2. REDUCCIÓN DE CARBONO ORGÁNICO TOTAL.	31
4. ANÁLISIS PRELIMINAR DE COSTOS:	32
CONCLUSIONES.....	37
REFERENCIAS.....	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del proceso de electrofloculación.	7
Figura 2. Diseño experimental para la etapa de ED.	15
Figura 3. Reactor para empleado para la disolución de hierro.	16
Figura 4. Esquema del montaje utilizado para la ectrodosificación.	17
Figura 5 Diseño experimental para la etapa de floculación.	18
Figura 6. Espectrofotometría de absorbancia del efluente a tratar.	24
Figura 7. Consumo eléctrico por intervalos para la etapa de dosificación de Fe^{+2} en H_2SO_4	25
Figura 8. Consumo eléctrico acumulado de los distintos ensayos en la etapa de ED.	26
Figura 9. Diagrama de pourbaix del hierro,	27
Figura 10. Evolución del ph a lo largo de las diferentes pruebas de ed.....	28
Figura 11. Evolución de la carga orgánica del sobre nadante como función de la cantidad de carga equivalente.	31
Figura 12. Comparación entre los costos de agentes consumibles del proceso electroflox y los dos procesos químicos coagulantes más comunes.	35

SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

Al = Aluminio.

BDD = mecanismo de Bockris, Drazic, Despic.

c = cantidad específica de carga suministrada.

Cl = Cloro.

COT = carbono orgánico total.

DQO = demanda química de oxígeno.

e^- = electrón.

EC = electrocoagulación.

ED = electrodisolución.

EF = Electroflux.

Fe = Hierro.

i = corriente eléctrica.

j = densidad de corriente.

J = conductividad eléctrica.

M = metal.

Mo = Molibdeno.

pH_0 = potencial de hidrógeno inicial.

pH = potencial de hidrógeno en el seno del fluido.

ppm = partes por millón.

λ = longitud de onda.

RESUMEN.

Se evaluó el desempeño del tratamiento electroquímico *ex situ*¹ de un efluente contaminado con tintas flexográficas desde el punto de vista técnico-económico manipulando las variables de densidad de corriente ($j=9.3 \text{ A/m}^2$ y $j=18.5 \text{ A/m}^2$) y pH inicial ($\text{pH}_0=1.0$ y $\text{pH}_0=3.0$) en la etapa de disolución anódica frente al consumo eléctrico, para la etapa de floculación se valoró la incidencia del pH de floculación ($\text{pH}=7.0$, $\text{pH}=9.0$ y $\text{pH}=11.0$) y la cantidad de carga eléctrica específica suministrada (c), expresada en culombios por litro (100 c/l , 200 c/l , y 300 c/l) en la reducción de color y la disminución del COT.

Mediante el tratamiento propuesto se logró reducir el color real del efluente en un 100% y el COT en un 97%. Con una cantidad de carga eléctrica específica 10 veces menor a estudios anteriores empleando procesos *in situ* de electrocoagulación.

El costo de los agentes coagulantes para tratamiento planteado se redujo en un 62% frente al costo de agentes coagulantes tradicionales en igual cantidad estequiométrica, sin embargo al incluir el costo de agentes controladores de pH, el valor total del tratamiento por Electroflux (\$1 011/m³) fue similar a los procesos químicos tradicionales.

Palabras Clave:

Electroflux, Electrocoagulación, Tratamiento de aguas residuales, tintas

¹ Para el caso del presente documento, se entenderá como tratamiento “*ex situ*” al proceso en donde la generación de los complejos coagulantes se realiza en un medio externo al efluente a tratar, mientras que “*in situ*” corresponderá al proceso de electrocoagulación directo sobre el efluente.

INTRODUCCIÓN.

La continua necesidad de optimizar los recursos de producción y el incesante incremento de la rigurosidad en la legislación ambiental, han servido de motor para la búsqueda de soluciones alternativas en el tratamiento de los desechos industriales, impulsando el avance de novedosas técnicas de manejo de efluentes, disposiciones sólidas y escapes gaseosos hacia el ambiente. Frente a estas crecientes necesidades, los métodos de tratamiento electroquímico y las técnicas de oxidación avanzada aparecen como una opción probable para tratar los efluentes líquidos de alto grado de contaminación manteniendo un equilibrio técnico-económico favorable debido principalmente a la menor necesidad de insumos químicos en comparación con los procesos convencionales de tratamiento.

Actualmente, las técnicas electroquímicas para el tratamiento de aguas residuales están empezando a ser consideradas nuevamente después de que su implementación había sido dificultada en años anteriores debido a los altos costos eléctricos y los inconvenientes de escalamiento del proceso a nivel industrial.

El propósito de este estudio consistió en evaluar la respuesta del proceso de tratamiento por electro floculación y oxidación de las aguas residuales provenientes de la industria gráfica contaminadas con tintas con el fin de reducir tanto su capacidad colorativa como su carga contaminante, para lo cual se propone un análisis técnico económico a nivel de laboratorio de las variables más representativas que pueda servir como plataforma para posteriores avances en la técnica.

OBJETIVOS

General:

Evaluar el desempeño del proceso Electrofloxx en la disminución del carbono orgánico total y del color real como tratamiento de aguas residuales contaminadas con tintas.

Específicos:

- Evaluar la capacidad de electrodisolución de los electrodos de hierro en la muestra a tratar.
- Identificar y analizar las variables con mayor incidencia en la eliminación de COT y color de los efluentes contaminados con tintas.
- Elaborar un análisis preliminar de los costos de los agentes coagulantes para el tratamiento mediante el proceso Electrofloxx.

ANTECEDENTES.

Desde 1888 se tienen reportes de estudios realizados en Londres por Webster para el uso de electrodos de hierro con el fin de solubilizados en solución, posteriormente, los avances de éste motivaron el estudio del proceso a lo largo de Inglaterra y el resto del mundo entre los que se destacan la producción de cloro y soda cáustica y el tratamiento de aguas negras logrando reducciones de hasta un 40% en la carga orgánica contaminante. A partir de 1906 se concede en Estados Unidos la primera patente como una técnica emergente para el uso de la electrocoagulación a nivel industrial, pero debido a problemas de tipo financieros y de incentivos a las empresas para la adopción de la técnica, la implementación de la misma se vio truncada y posteriormente rezagada por otro tipo de procesos más económicos. (Arango 2005)

Un amplio rango de técnicas ha sido probado en el tratamiento de efluentes contaminados con tintas. Probablemente los procesos biológicos (anaeróbicos y aeróbicos) son los más económicos (Shaw, Carliell y Weathely 2002), pero las tintas inhiben el desarrollo bacterial (Gergiou, Melidis y Aivasidis 2002); mientras que los procesos físico-químicos como la oxidación química, la floculación con alumbre y cloruros, así como la adsorción con carbones activados o polímeros requieren la constante adición de grandes cantidades de agentes químicos que elevan los costos del tratamiento.

La electrocoagulación de aguas de desecho contaminadas con tintas ha sido estudiada principalmente en los procesos textiles, los cuales poseen principalmente tintes reactivos (Alinzafi, y otros 2004) (Kioba, Orhan y Bayramoglu 2003). Estudios como los de (Do y Chen 1994) comparan desempeño de los electrodos de aluminio y hierro para la remoción del color de aguas residuales contaminadas con tintas llegando a la conclusión que el desempeño de uno u otro

electrodo viene dado por factores como el tipo de contaminación, así como la contaminación inicial de las muestras y la tasa de agitación de la misma.

(Zaroual, y otros 2005) evaluaron el desempeño del proceso del proceso de electrocoagulación con electrodos de hierro para el tratamiento de un efluente textil contaminado con tintas. Los resultados obtenidos alcanzaron reducciones de 100% en color y del 84% en la demanda química de oxígeno (DQO).

La tabla a continuación muestra algunos resultados obtenidos en el tratamiento de aguas residuales contaminadas con tintas.

Tabla 1. Estudios de remoción de color en tintas mediante electrocoagulación. Adaptado de (Mohammad y Muttumaru 2009)

Autor (año)	Corriente o densidad	Tipo de electrodos	Eficiencia (%)
Ibanez y otros. (1998)	-	Fe/Acero	85-99
Kim y otros. (2002)	1 – 4.5 A/m ²	Al, Fe, Acero inoxidable monopolar	95-99
Mollah y otros (2004)	4A	Acero al carbón	97-99
Golder y otros (2005)	1 – 30 mA/cm ²	Acero de construcción	Color 80-99 DQO 74-89

En el pasado, el impedimento para la implementación de la técnica electroquímica en el tratamiento de efluentes en el país correspondía principalmente al alto costo comparativo del consumo eléctrico frente sus equivalentes en insumos químicos mediante un proceso convencional de coagulación (Arboleda, Valencia y Medina 1984). Pero esta realidad ha venido cambiando de forma tal que Colombia se ha fortalecido tan ampliamente en su oferta de energía eléctrica, que es capaz de exportar este servicio hacia los países vecinos repercutiendo directamente en la disminución del precio del mismo.

MARCO TEÓRICO.

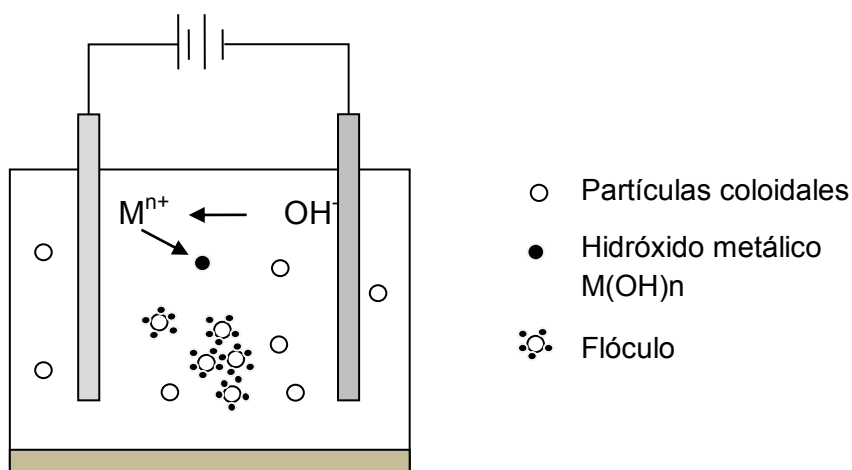
1. ELECTROCOAGULACIÓN.

La electrocoagulación (EC) es el proceso electroquímico por medio del cual, a partir de la disolución de un electrodo en una celda se produce la desestabilización de los coloides de una suspensión, posibilitando así la posterior separación mediante otras técnicas convencionales de separación sólido-líquido (flotación, decantación).

Mediante una diferencia de potencial eléctrico se permite el flujo de electrones a través de la celda con el fin de disolver el ánodo que generalmente está elaborado con placas de hierro o aluminio. La corriente eléctrica generada por la diferencia de voltaje promueve la reacción de disolución electroquímica del ánodo con lo que se consigue la generación in situ de iones en disolución.

Al igual que en la coagulación convencional, en la electrocoagulación se obtienen:

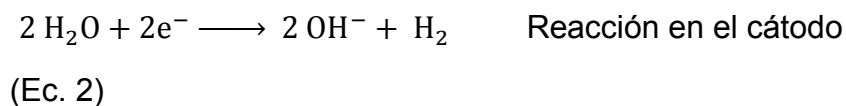
- Hidróxidos insolubles sobre los cuales quedan retenidos los contaminantes.
- Hidroxocomplejos catiónicos o aniónicos, que desestabilizan las fuerzas de repulsión electrostáticas de la materia coloidal con lo que se promueve la formación de agregados más grandes que se conocen como “flocs”, y que precipitan debido a su mayor peso.



Adaptado de (Holt, Geoffrey y Mitchell 1999)

Figura 1. Esquema del proceso de electrofloculación.

Las reacciones electroquímicas que se producen en la EC son:



Los hidróxidos metálicos que se forman serían entonces:



Estos hidróxidos metálicos hacen las veces de contra iones de las partículas orgánicas de carga principalmente negativa que se unen a la partícula orgánica disminuyendo la carga neta del aglomerado hasta que las fuerzas de Van der Waals prevalecen y se generan los flóculos que precipitan o flotan según el caso.

Los principales factores que afectan el proceso de EC son:

- Densidad de corriente:

El suministro de corriente eléctrica al sistema es la fuerza impulsora que determina la cantidad de iones metálicos que son desprendidos del ánodo de sacrificio. Cuando la densidad de corriente es demasiado alta se produce una pasivación del electrodo que inhibe las reacciones electroquímicas que se producen en este, además de la elevación en la temperatura del ánodo debido a la transformación de la energía eléctrica en térmica disminuyendo la eficiencia energética del proceso.

- Conductividad de la suspensión:

La conductividad eléctrica de la muestra tratada favorece de forma directa el transporte electrónico. En algunas ocasiones la presencia de NaCl contribuye tanto en la elevación de esta propiedad, así como en la reducción de los efectos adversos sobre los electrodos por iones orgánicos como HCO_3^- y el SO_4^- .

- pH:

Se ha encontrado que a pH ácidos se favorece la generación de los cationes metálicos vía electrolítica, mientras que los pH alcalinos favorecen la generación y precipitación de los complejos metálicos insolubles vía química. No obstante, el consumo energético a pH neutral es mayor que en los dos casos anteriores.

- Temperatura:

El incremento de la eficiencia del proceso con la elevación de temperatura se le ha atribuido a la destrucción de la capa de óxido del metal de la superficie del ánodo.

- Material del electrodo:

El material del electrodo de sacrificio determina la característica de los iones disueltos en el efluente a tratar, los materiales más frecuentes para el proceso de EC son el Fe y el Al. Aunque el comportamiento de los iones de estos dos metales en el proceso electroquímico es similar, la utilización de uno u otro viene determinada en la mayoría de los casos por factores económicos.

2. QUÍMICA COLOIDAL.

Los coloides son pequeñas partículas en suspensión (tamaño entre 10^{-6} y 10^{-3} mm) que están presentes en gran variedad de aguas y efluentes industriales. Pueden clasificarse como impurezas insolubles, al igual que las sustancias húmicas y los microorganismos.

Estas partículas pueden permanecer suspendidas por largos periodos de tiempo cuando se encuentran contenidos en el seno de una solución acuosa. Los tiempos de sedimentación están directamente relacionados con el peso de las partículas que a su vez está relacionado con su tamaño; En otras palabras, las partículas de mayor tamaño son más pesadas y precipitan a mayor velocidad. Debido a la naturaleza microscópica de las partículas coloidales son los factores estabilizadores de las partículas los que dominan el comportamiento de la suspensión.

Entre los factores estabilizadores que influyen a estas partículas se encuentran todas las fuerzas que generan repulsión entre las mismas. En general, las partículas coloidales presentan cargas negativas cuando se encuentran contenidas en soluciones debidas principalmente a la ionización de sus grupos funcionales y a la hidratación de las partículas con lo que se generan fuerzas electrostáticas de repulsión entre los coloides adyacentes

que son mayores a las fuerzas de atracción entre las mismas y estabilizan la solución.

3. PROCESO ELECTROFLOX.

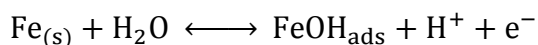
El proceso Electrofloxx (EF) constituye una variación al proceso tradicional de floculación en la medida que este se puede definir mediante tres etapas consecutivas e independientes:

- Electro dosificación de Hierro:

Esta etapa corresponde a la disolución de hierro mediante una vía electrolítica con el fin de alcanzar concentraciones elevadas de iones Fe^{+2} en agua a partir de la corrosión acelerada y controlada de electrodos de sacrificio, las reacciones electroquímicas que ocurren en los electrodos² están favorecidas por medios ácidos, por lo que el pH de la solución acuosa supone una variable determinante en el desarrollo de esta etapa del proceso.

El mecanismo de disolución anódica del hierro ha sido propuesto para los sitios de la interfase Fe-H₂O en lo que se conoce en la literatura como el mecanismo de Bockris, Drazic, Despic (BDD).

En primera instancia, las moléculas de hierro de la interfase del electrodo de sacrificio reaccionan con las moléculas de agua adyacentes generando un hidróxido adsorbido en la superficie del mismo.



(Ec. 4)

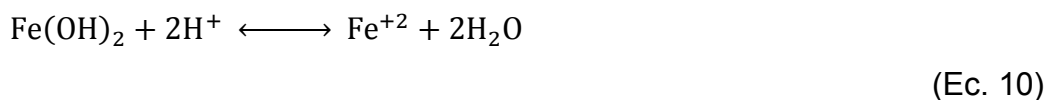
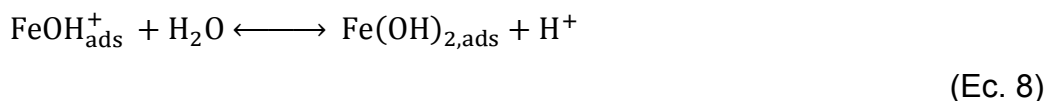
² Véase (Ec. 1) y (Ec. 2) en la página 7 del presente documento.



En este punto pueden ocurrir dos situaciones, en primer lugar, el ion adsorbido puede sufrir una desorción hacia el seno del fluido donde posteriormente reacciona para producir el ion ferroso.



Por otra parte, el ion adsorbido puede volver a reaccionar con el agua para producir hidróxido ferroso adsorbido que posteriormente se desorbe y reacciona con hidrógeno para igualmente producir el ion ferroso.



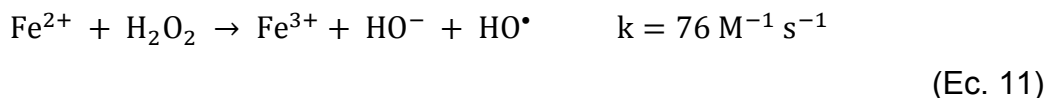
(Vukovic 1996-b) y (Bojinov, Betova y Raicheff 1998) proponen mecanismos similares al BDD en sus estudios sobre los mecanismos de dosificación de electrodos de hierro en ácido sulfúrico y la influencia de

elementos como el Mo y Cl en los agentes adsorbidos en la superficie de los mismos.

- Oxidación:

Mediante un mecanismo de oxidación avanzada tipo Fenton es posible reaccionar los cationes ferrosos producidos en la etapa de dosificación.

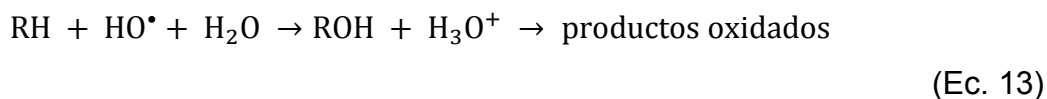
A partir de la adición de peróxido de hidrógeno a la solución de hierro disuelto se generan radicales hidroxilo ($\text{OH}\cdot$) de alto poder de oxidación.



Una vez formados los radicales hidroxilos, estos pueden reaccionar por dos vías alternativas: En la primera, los cationes ferrosos aún presentes se oxidan produciendo cationes férricos.



Mientras que en la segunda, los radicales hidroxilos atacan la materia orgánica oxidándola.

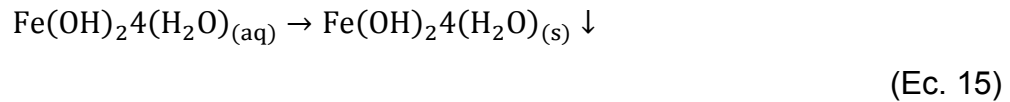
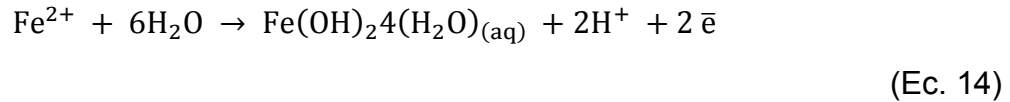


- Coagulación:

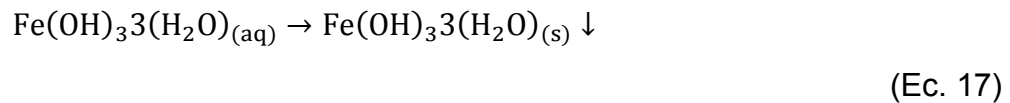
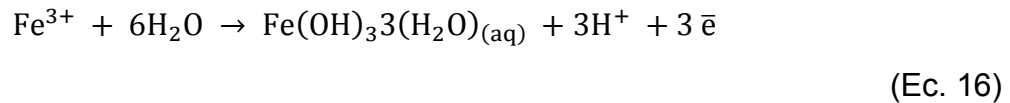
En un medio básico, los iones férricos (y ferrosos que aún pudieran permanecer) se hidrolizan obteniéndose como resultado hidróxidos

y poli-hidróxidos que son insolubles en el medio acuoso por lo que se sedimentan atrapando a su paso las partículas coloidales contaminantes suspendidas.

Para los iones ferrosos:



Para los iones férricos:



Los complejos metálicos que se forman en la etapa de coagulación desestabilizan las partículas coloidales contaminantes mediante adsorción química o física con lo que se benefician las fuerzas de interacción de Van der Waals, debido a esta, se permite la aglomeración de los compuestos formados que se precipitan debido a su propio peso capturando a su paso más partículas coloidales suspendidas, esta técnica se conoce como barrido.

METODOLOGÍA.

1. CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE A TRATAR:

El efluente utilizado se obtuvo de la planta de producción de la empresa Bico Internacional S.A., una empresa perteneciente al grupo Carvajal S.A. ubicada en Yotoco - Valle y cuya actividad industrial principal consiste en la producción y distribución de productos de papelería, para lo que requiere el uso de tintas flexo-gráficas que se componen principalmente de la mezcla de pigmentos de aminas y tenso activos en un medio acuoso. Este efluente corresponde al mismo utilizado por (Rios y Valencia 2010) y estuvo almacenado en un tanque cerrado y sin exposición a la luz directa por alrededor de 1 año por lo que antes de su utilización se agitó de forma vigorosa con el fin de homogenizarlo.

La caracterización y las pruebas de evaluación fueron llevadas a cabo en el laboratorio de docencia e investigación de la escuela de ingeniería química de la Universidad del Valle con el uso de los equipos y técnicas con las que este espacio ofrece.

2. MÉTODO EXPERIMENTAL:

2.1.ELECTRODOSIFICACIÓN:

- Diseño experimental:

Para la ED de los ánodos de Fe en agua acidificada con H_2SO_4 se empleó un arreglo experimental factorial 2^2 , en donde cada una de las

variables controladas (pH_0 y j) se evaluó a dos niveles. En el caso del pH inicial se fijaron los valores $\text{pH}_0=1.0$ y $\text{pH}_0=3.0$, mientras que para la densidad de corriente se emplearon valores de $j=9.3 \text{ A/m}^2$ y $j=18.5 \text{ A/m}^2$ (estos últimos fueron seleccionados ya que corresponden a corrientes eléctricas de $i=0.5 \text{ A}$ e $i=1.0 \text{ A}$ respectivamente para el área superficial de 0.054 m^2). Las variables de respuesta tomadas fueron el voltaje de la celda (v), el potencial de hidrógeno en el seno del fluido (pH) y la conductividad eléctrica (J).

Los ensayos experimentales se realizaron de forma aleatoria y antes de cada corrida se prepararon los electrodos de trabajo bajo las mismas condiciones de abrasión para contribuir con la homogeneidad de las muestras.

Finalmente se realizó una réplica a las condiciones de $\text{pH}_0=3.0$ y $j=18.5 \text{ A/m}^2$ ya que este punto presentó una respuesta diferente en el comportamiento de las variables de respuesta

A continuación se presenta el esquema del diseño experimental empleado para la etapa de ED:

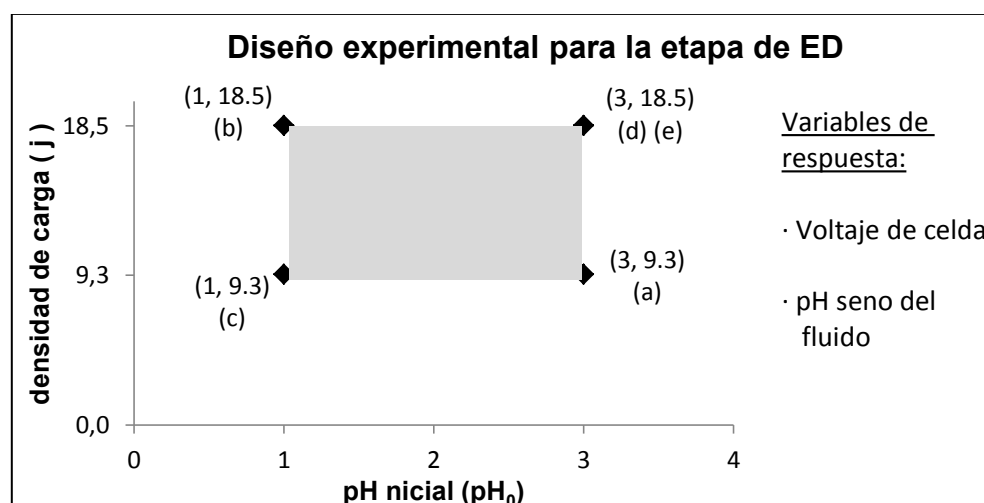


Figura 2. Diseño experimental para la etapa de ED.

- Métodos y materiales:

Para el montaje de esta etapa se empleó un reactor electroquímico de 800 ml, provisto de 12 electrodos de acero al carbón con una separación de 5 milímetros entre sí y organizados en dos arreglos monopolares de 6 electrodos por arreglo.

Mediante el uso de un inversor de polaridad se alternó el flujo de la corriente eléctrica suministrada a la celda cada cinco minutos con el fin de mantener un desgaste parejo de los electrodos a lo largo de los ensayos. Todas las pruebas fueron sometidas a una carga eléctrica total de 5000 c/l.

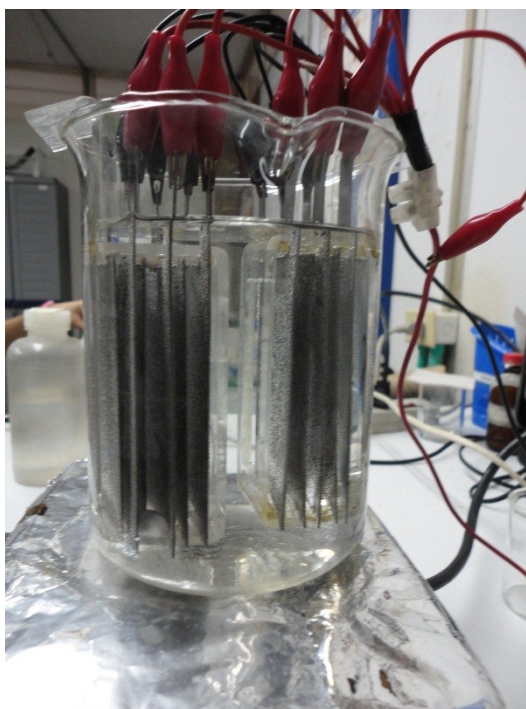


Figura 3. Reactor para empleado para la disolución de hierro.

La ED se llevó a cabo en agua destilada y acidificada con H_2SO_4 con el fin de promover el ambiente propicio para la corrosión controlada de los ánodos de sacrificio.

Se tomaron datos de voltaje, pH y conductividad eléctrica cada 1000 c/l con la finalidad de evaluar la evolución de estas variables a lo largo del proceso, y mediante los datos adquiridos se calculó el consumo eléctrico; los datos fueron analizados para determinar las mejores condiciones experimentales en esta etapa del proceso.

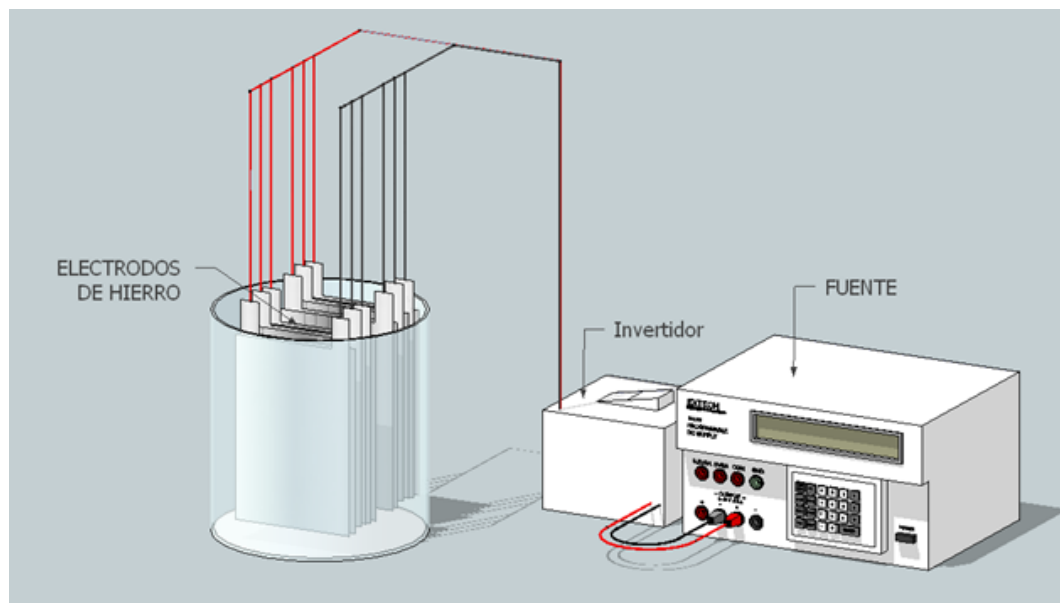


Figura 4. Esquema del montaje utilizado para la electrodosificación.

2.2.FLOCULACIÓN:

- Diseño experimental:

Se preparó un diseño de tipo factorial 3^2 en donde se propuso evaluar los efectos de la cantidad de hierro disuelto (expresado como carga eléctrica específica suministrada) y del pH de floculación sobre el COT y la absorbancia del sobrenadante a las longitudes de onda

representativas. Cada uno de los factores se evaluó a tres niveles de forma aleatoria y con una réplica.

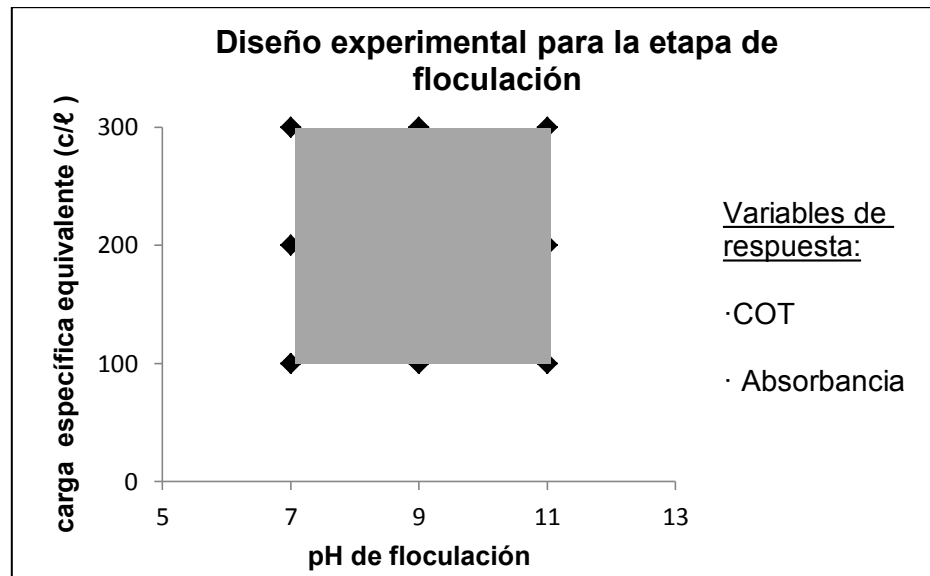


Figura 5. Diseño experimental para la etapa de floculación.

- Métodos y materiales:

La etapa de floculación consistió en el tratamiento de 50 ml del efluente diluido en una relación 1:30 con agua destilada con el fin de hacer los resultados comparables al estudio anteriormente realizado por (Rios y Valencia 2010). Además, de esta forma se facilitó la extracción del sobrenadante generado.

A partir de las soluciones concentradas obtenidas de la etapa de ED (5000 c/l), se adicionaron las especies coagulantes generadas *ex-situ* al efluente a tratar para obtener soluciones con concentraciones equivalentes a 100, 200 y 300 c/l como parámetros de evaluación. El efecto del pH se valoró mediante la adición controlada de una solución al 10% p/v de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Preliminarmente mediante un análisis visual se encontró que con valores de $\text{pH} > 7.0$ se obtenía un efluente limpio después de la floculación, por lo que se tomó este nivel como límite inferior para la evaluación de la remoción de contaminantes presentes.

Los datos de absorbancia en las longitudes de onda representativas y COT se utilizaron como variables de respuesta para la evaluación de la efectividad de la etapa.

2.3.OXIDACIÓN:

En casos de niveles elevados de materia orgánica en los efluentes a tratar, la adición de peróxido de hidrógeno contribuye a la oxidación del Fe^{+2} a Fe^{+3} , mediante un proceso de reacción tipo Fenton en donde se producen cantidades significativas de radicales libres tipo hidroxilo que contribuyen a la oxidación de la materia orgánica presente.

Esta etapa del proceso fue obviada en el presente estudio ya que se obtuvieron resultados satisfactorios sin la necesidad de recurrir al mismo.

2.4.ANÁLISIS PRELIMINAR DE COSTOS:

Se elaboró un análisis de los costos de las sustancias utilizadas en el proceso EF a escala de laboratorio de los efluentes tratados y se comparó con los costos de dos procesos químicos de floculación con equivalente cantidad estequiométrica de hierro.

Se tomaron como base para el análisis las condiciones de $pH_0=2.68$ y $j=9.3 \text{ A/m}^2$ para la etapa de dosificación y 300 c/l a $pH=7.0$ para la etapa de floculación, esto debido a que estas dos condiciones reunieron respuestas satisfactorias en ambas etapas con la menor cantidad de reactivos para la modificación del pH.

Para los procesos de floculación química se analizó el costo de la misma cantidad de hierro presente como sulfato ferroso ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) y como cloruro férrico ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), se omitieron en el análisis los costos de la agitación, personal, transporte y demás ya que estos son influenciados por la escala de implementación de la técnica así como el diseño de los equipos y las condiciones de operación.

3. MEDICIÓN DE VARIABLES:

- pH:

Las mediciones del potencial de hidrógeno se realizaron mediante un multi-parámetro Eijkelkamp modelo 18.50.SA provisto de un electrodo para medición de pH calibrado con soluciones buffer de $pH=4.0$, $pH=7.0$ y $pH=11.0$. En las pruebas de ED se evitó realizar la medición directamente dentro del reactor con el fin de prevenir que lecturas pudieran sufrir errores debido al flujo eléctrico dentro del reactor, para ello se sacó una muestra del seno del fluido en un vaso a parte donde se realizó la medida y posteriormente se devolvió la muestra al reactor con el fin de mantener constante el volumen dentro de este.

- conductividad eléctrica:

La conductividad eléctrica se determinó mediante el mismo equipo multi-parámetro provisto de un electrodo de doble anillo para la

medición de conductividad y calibrado con soluciones de hidróxido de potasio de 0.01 M y 0.1 M. Al igual que con el pH, la medición se realizó por fuera del reactor devolviendo el fluido al mismo después de la medida.

- carbono orgánico total:

Esta variable se determinó mediante un equipo de análisis de carbono total automatizado marca Shimadzu® TOC-VCPH de alta sensibilidad que emplea el método de oxidación catalítica a alta temperatura para la generación de CO₂ y posteriormente usa un análisis por infrarrojo no dispersivo (NDIR) para su cuantificación.

4. EQUIPOS UTILIZADOS:

- reactor de electrodosificación:

Elaborado con un vaso de precipitado con capacidad para 1000 ml y que se llenó en un 80% con agua destilada acidificada con H₂SO₄, se le adaptaron dos soportes acrílicos para los electrodos que fueron acomodados en dos arreglos monopolares de 6 electrodos cada uno con lo que se obtenía un área anódica efectiva total de 0.054 m².

- fuente eléctrica:

Fuente eléctrica programable marca Extech® modelo 382280, las características se encuentran contempladas a continuación:

Tabla 2. Características de la fuente eléctrica utilizada en las pruebas.

Especificaciones	Rango
Voltaje de salida	0 – 40 voltios
Corriente de salida	0-5 Amperios
Alimentación	AC 110 Voltios, 60 Hz
Precisión	V = 0.05% ± 9 mV. A = 0.2% ± 9 mA

RESULTADOS Y ANÁLISIS.

1. CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE:

Las características físicas del efluente tratado se midieron en el laboratorio y los resultados se presentan en la tabla:

Tabla 3. Características físicas del efluente tratado

Variable	Valor	Unidad	Técnica / Equipo
Potencial de hidrógeno	5.6	(pH)	Eijkelkamp 8.50.SA- pH
Conductividad eléctrica	105.4	(mS/m)	Eijkelkamp 8.50.SA- c
Turbiedad	768	(NTU)	NTU
DQO	258 000	(mg/l)	Reflujo cerrado
COT	45 800	(mg/l)	Oxidación catalítica - Infrarojo
Sólidos totales	8 940	(mg/l)	SST 103°C- 105°C

Un análisis de absorbancia dentro del rango de longitudes de onda del espectro visible encontró un valle significativo en $\lambda=438\text{nm}$ y una cresta en $\lambda=629\text{ nm}$, estos valores se tomaron como característicos a lo largo del trabajo para la determinación de la reducción de color.

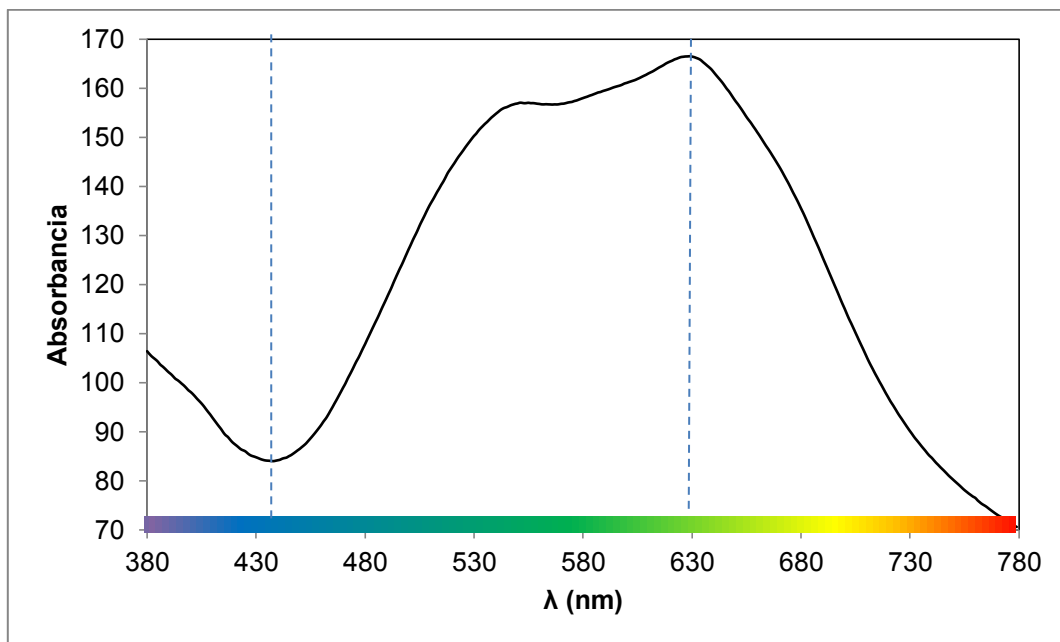


Figura 6. Espectrofotometría de absorbancia del efluente a tratar.

2. ELECTRODOSIFICACIÓN:

El consumo eléctrico del proceso fue tomado como variable de respuesta para el proceso de dosificación, teniendo como meta un consumo inferior a 1.0 kWh/m^3 . En los resultados de la Figura 7 resalta a la vista el incremento en el consumo eléctrico del proceso a partir de los 2000 c/l para las condiciones más altas de pH inicial y de densidad de carga ($\text{pH}=2.4$ y $j=18.5 \text{ A/m}^2$), el cual llega a duplicar y hasta triplicar el consumo en comparación a los demás ensayos.

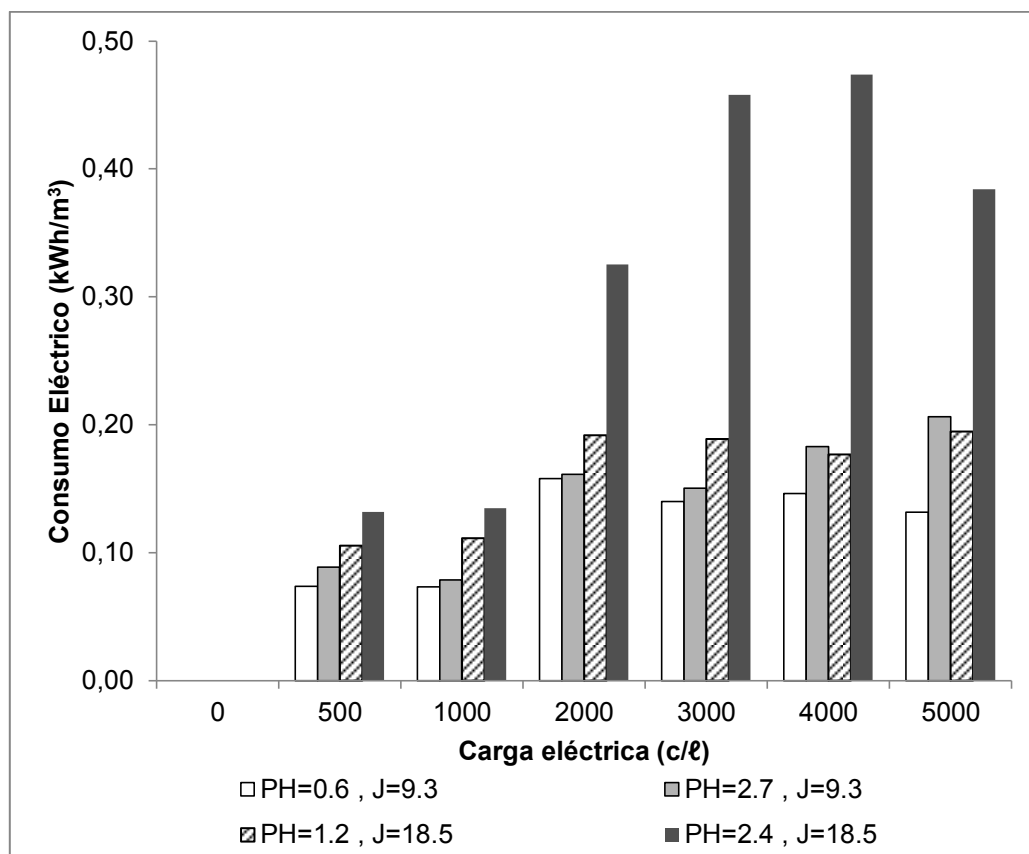


Figura 7. Consumo eléctrico por intervalos para la etapa de dosificación de Fe^{+2} en H_2SO_4

Un análisis del consumo total acumulado de los diferentes ensayos evidencia la desviación del límite interpuesto como ideal por parte de la corrida con las condiciones de pH y densidad de carga más altas (2.4 UpH y 18.5 A/m²), mientras que las demás combinaciones cumplieron con la condición de consumo máximo (1.0 kWh/m³) sin diferencias significativas entre las mismas.

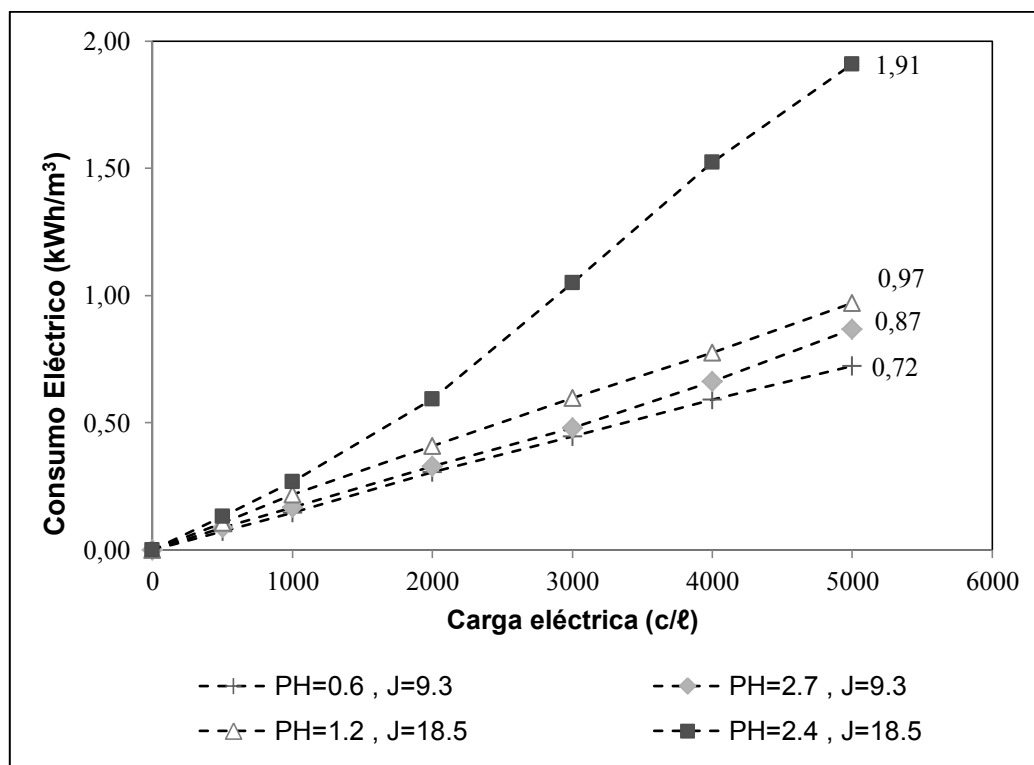


Figura 8. Consumo eléctrico acumulado de los distintos ensayos en la etapa de ED.

Este comportamiento puede ser explicado por la formación de una capa pasivante en la superficie de los electrodos del último ensayo ($pH_0=2.4$, $j=18.5 \text{ A/m}^2$) que “aisló” eléctricamente al mismo, lo que repercutió directamente en el incremento en la diferencia de potencial eléctrico necesario en la celda para mantener el flujo de corriente eléctrica constante, que a su vez se manifestó en el incremento en el consumo eléctrico total.

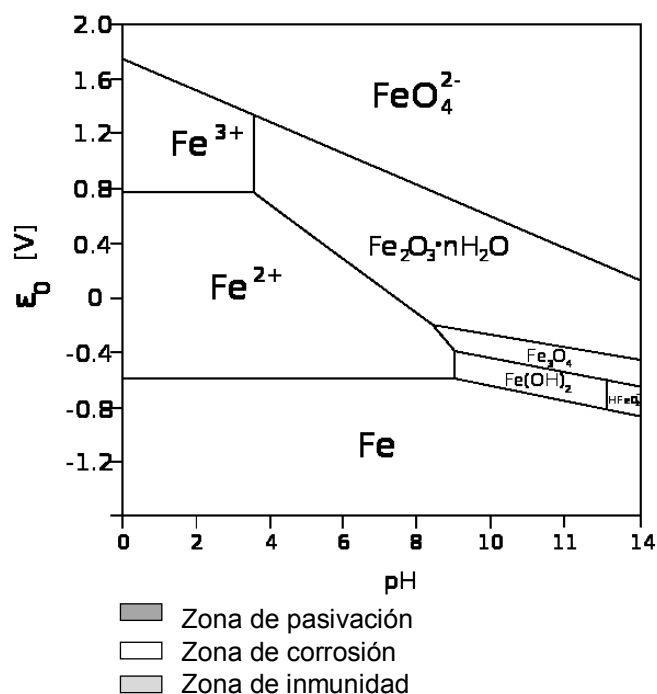


Figura 9. Diagrama de Pourbaix del Hierro, adaptado de (Früh s.f.)

El diagrama de Pourbaix del hierro muestra que a pH inferiores a 3.0 y potenciales estándar inferiores a 1.6 V se producen corrosiones “limpias” del electrodo, en las que se forman casi de forma exclusiva iones ferricos y ferrosos; mientras que al incrementarse el valor del pH (y dependiendo del voltaje de celda) se pueden llegar a producir especies insolubles en la superficie de los electrodos que los aíslan electricamente.

Un seguimiento del pH a lo largo de los diferentes ensayos demostró que el único de estos que se alejó del valor de seguridad para la disolución “limpia” del electrodo corresponde precisamente a el mismo que disparó su consumo eléctrico ($\text{pH}_0=2.4$ y $j=18.5 \text{ A/m}^2$) con lo que se le puede atribuir que la causa de la desviación correspondió a la formación de dichas especies.

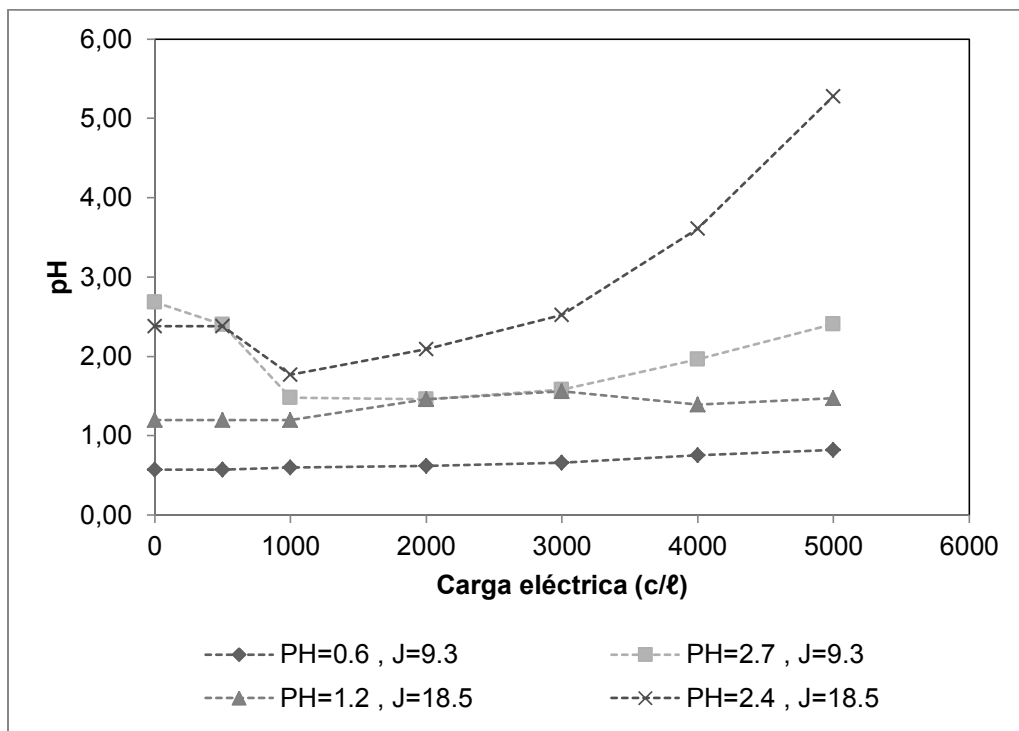


Figura 10. Evolución del pH a lo largo de las diferentes pruebas de ED

(Vuckovic 1996-a) estudió el efecto del pH en la disolución anódica de electrodos de hierro en ácido sulfúrico sobre los potenciales de corrosión, llegando a la conclusión que dentro del rango de valores de pH entre 0.6 y 4.5, el efecto del potencial de hidrógeno es directamente proporcional al potencial de corrosión, por lo tanto, a valores bajos de pH se favorece la disolución frente al consumo eléctrico desde el punto de vista electroquímico.

3. FLOCULACIÓN:

Para el proceso de floculación se empleó la solución de 5000 c/ℓ que se obtuvo al realizar el tratamiento de disolución a las condiciones de pH inicial $pH_0=2.68$ y $j=9.3 \text{ A/m}^2$. Ya que al final de la prueba el valor de su potencial de hidrógeno se encontraba más elevado con respecto a las

demás, pero sin haber generado precipitados. Mediante la adición de una solución al 10% p/v de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se modificó el pH de la solución a diferentes valores para generar los flóculos a partir de los complejos de hierro solubilizado en la etapa de ED.

3.1. REDUCCIÓN DE COLOR.

Mediante una espectrofotometría de absorbancia dentro del rango de longitudes de onda visibles, se elaboró un perfil característico del efluente a tratar³ encontrándose una cresta significativa en $\lambda=438$ nm y un valle en $\lambda=629$ nm, estos picos fueron considerados durante el estudio como particulares para el efluente a tratar y el valor de los mismos sirvieron como base para la determinación de la remoción de color del efluente. La reducción de color se determinó como un promedio entre del porcentaje de disminución de los valores de absorbancia en las longitudes de onda los picos característicos antes y después del tratamiento.

$$\% \text{ reducción de color} = 100 \times \frac{1}{2} \left[\left(\frac{A_0^{438} - A^{438}}{A_0^{438}} \right) + \left(\frac{A_0^{629} - A^{629}}{A_0^{629}} \right) \right]$$

(Ec. 18)

Donde:

A_0^{438} Absorbancia inicial de la tinta en $\lambda=438$ nm.

A_0^{629} Absorbancia inicial de la tinta en $\lambda=629$ nm.

A^{438} Absorbancia final del sobrenadante en $\lambda=438$ nm.

A^{629} Absorbancia final del sobrenadante en $\lambda=629$ nm.

³ Véase Figura 6 en la página 24 del presente documento.

Los valores de porcentaje de reducción de color superaron en todos los casos el 99.8% para las floculaciones con concentraciones equivalentes de carga de 100, 200 y 300 c/l a partir de valores de pH superiores a 7.0 (datos en el Anexo 2).

El pH de floculación no tuvo ninguna influencia significativa para valores de pH superiores a 7.0 en la disminución de la cantidad de color del sobrenadante, por lo tanto se puede sugerir este valor de pH como adecuado para la etapa ya que supone el menor consumo de Ca(OH)_2 y corresponde a un valor neutral de acidez del desecho.

Idealmente, una mayor cantidad de carga eléctrica suministrada producirá un mayor número de iones de hierro, con lo que se eleva la concentración de las especies floculantes formadas que finalmente atraparán un número superior de partículas coloidales suspendidas repercutiendo directamente en una mayor remoción de color del efluente.

Los resultados obtenidos son comparables a los obtenidos por (Rios y Valencia 2010), que haciendo uso de los mismos efluentes alcanzaron valores de reducción de más del 99% mediante un proceso in-situ de EF también con electrodos de hierro aunque con un consumo eléctrico 10 veces mayor.

(Ciorba, y otros 2000) estudiaron los efectos de algunos surfactantes sobre los electrodos de una celda electroquímica mediante voltametrías, y concluyeron que tanto las variables de operación como la presencia de dichos compuestos pueden llegar a estimular o inhibir los procesos electródicos según las interacciones presentes la interface electrodo-electrolito.

La presencia de compuestos con un comportamiento anfifílico en el efluente tratado hace que se dificulten los procesos de dosificación del electrodo de sacrificio en la interface con lo que se puede explicar la diferencia en el consumo eléctrico entre los procesos in situ y ex situ de dosificación del electrodo de sacrificio.

3.2. REDUCCIÓN DE CARBONO ORGÁNICO TOTAL.

La carga orgánica de las muestras fue examinada a partir de la medición del carbono presente en las mismas mediante un equipo de análisis de carbono orgánico total.

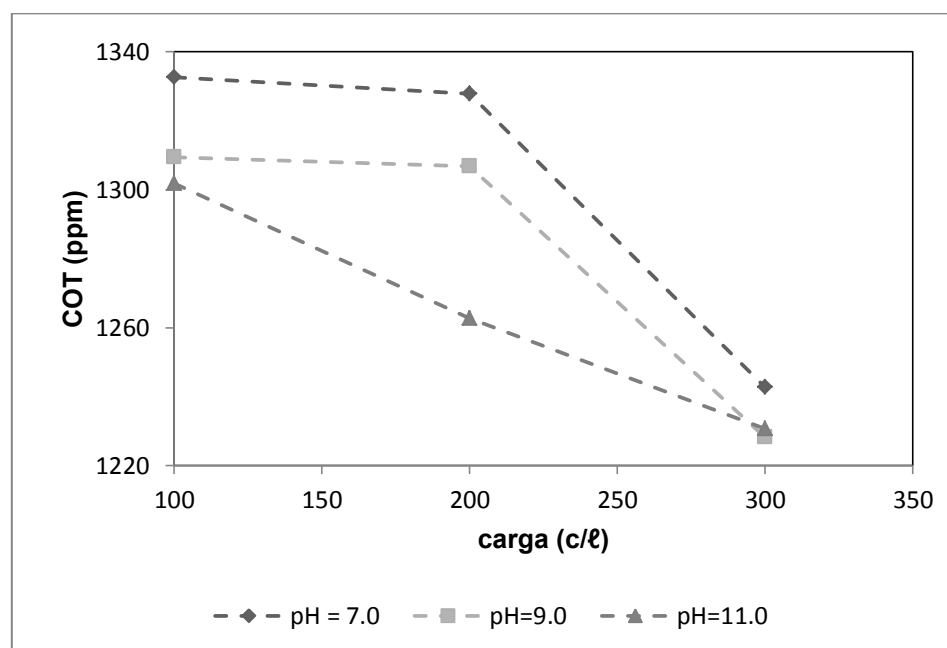


Figura 11. Evolución de la carga orgánica del sobre nadante como función de la cantidad de carga equivalente.

La carga orgánica muestra un desempeño directamente proporcional a la cantidad de carga eléctrica equivalente que se le suministra al efluente y al potencial de hidrógeno del momento de la floculación, sin

embargo, la diferencia entre las medidas de COT para las tres pruebas en el valor de carga equivalente de 300 c/l no supera los 12 ppm, con lo que se puede deducir que la cantidad de hierro disuelto en la etapa de floculación tiene mayor influencia que el pH sobre la disminución de la carga orgánica.

Todas las pruebas a partir de pH=7.0, mostraron un desempeño superior al 97% en la eliminación del contaminante con un comportamiento prácticamente independiente de las variables de floculación para condiciones (pH>7.0 y C>100 c/l)

4. ANÁLISIS PRELIMINAR DE COSTOS:

La cantidad de hierro suministrada en la etapa de floculación se calculó mediante la ley de electrólisis de Faraday:

$$m_{Fe} = \frac{Q}{q * n_{Fe}} * \frac{M_{Fe}}{N_A}$$

(Ec. 19)

Donde:

m_{Fe} = masa de Fe^{+2} desprendida del electrodo (g).

Q = Carga eléctrica aplicada (C)

q = Carga del electrón ($1,602 \cdot 10^{-19}$ c/ $\bar{e}$)

n_{Fe} = Número de valencia de Fe^{+2} (2 $\bar{e}$ / Ion)

M = Masa molar del hierro (55.847 g/mol)

N_A = Número de Avogadro ($6,022 \cdot 10^{23}$ Ion/mol)

El valor obtenido de la masa de hierro suministrada se empleó como base para los cálculos de consumo de floculantes químicos en igual cantidad estequiométrica, los valores de consumo eléctrico, cantidad de

H₂SO₄ y cantidad de Ca(OH)₂ corresponden a los valores obtenidos experimentalmente para las condiciones de pH₀=2.7 y j=9.3 A/m² para la etapa de dosificación y 300 c/l a pH=7.0 para la etapa de floculación del proceso electroquímico.

Tabla 4, Costo de materiales para el proceso de EF.

Materia prima	Precio⁴	Consumo	Costo
Electricidad	\$ 240 / kW·h	0.06 kW·h / m ³	\$ 14 / m ³
H₂SO₄	\$ 900 / kg	0.45 kg / m ³	\$ 405 / m ³
Ca(OH)₂	\$ 300 / kg	1.4 kg / m ³	\$ 420 / m ³
Electrodos de Fe	\$ 2000 / kg	0.086 kg / m ³	\$ 172 / m ³
TOTAL			\$ 1 011 / m³

El costo del material del electrodo y el consumo eléctrico del proceso estudiado representan el 19% del costo total de los agentes en el tratamiento propuesto, mientras que los agentes modificadores de pH (H₂SO₄ y Ca(OH)₂) tienen la mayor incidencia en dicho costo.

En comparación con el proceso químico de coagulación con los dos compuestos con base en hierro más comúnmente utilizados (FeSO₄ y FeCl₃), se puede observar que el costo de los compuestos químicos del proceso planteado en este documento es similar al costo teórico de los procesos convencionales de tratamiento químico, sin embargo el costo de los agentes coagulantes del proceso EF a las condiciones estudiadas

⁴ Datos de precios tomados del mercado local en el año 2011

representa solamente entre el 32% y el 43% del costo de los agentes químicos convencionales.

Tabla 5, Costo de materiales para procesos de coagulación química equivalentes.

Materia prima	Precio⁴	Consumo	Costo
Ca(OH)₂	\$ 300 / kg	1.4 kg / m ³	\$ 420 / m ³
FeSO₄·7H₂O	\$ 950 / kg	0.45 kg / m ³	\$ 428 / m ³
TOTAL			\$ 848 / m³
Ca(OH)₂	\$ 300 / kg	1.4 kg / m ³	\$ 420 / m ³
FeCl₃·6H₂O	\$ 1400 / kg	0.42 kg / m ³	\$ 590 / m ³
TOTAL			\$ 1 010 / m³

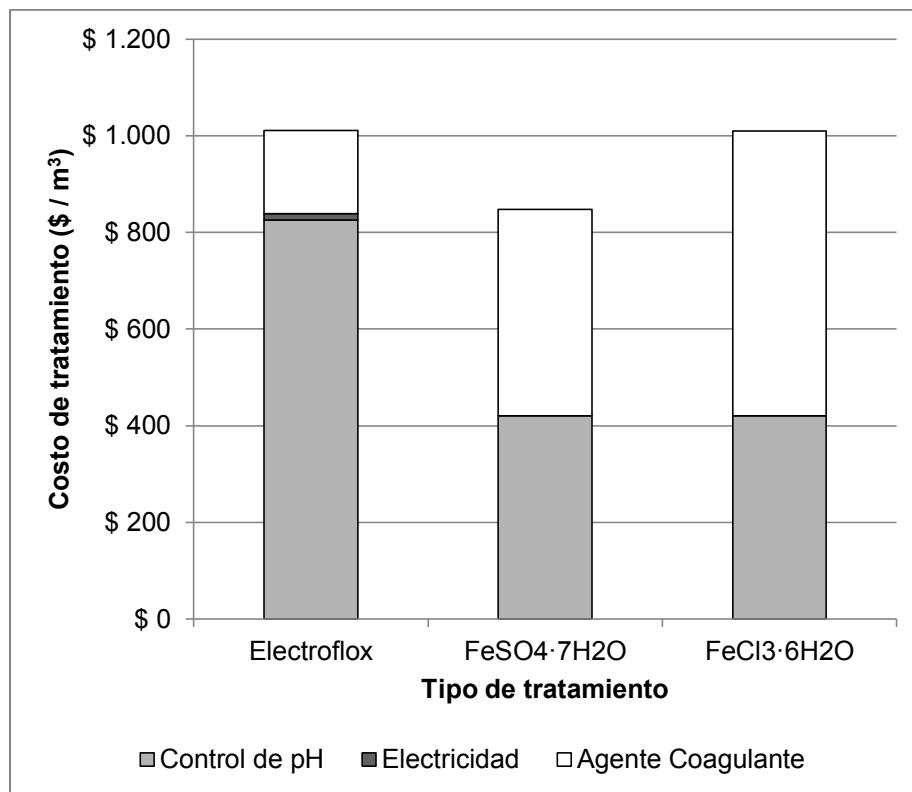


Figura 12. Comparación entre los costos de agentes consumibles del proceso Electroflux y los dos procesos químicos coagulantes más comunes.

(Bayramoglu, y otros 2004) analizaron los costos de operación para el tratamiento de aguas residuales ácidas de la industria textil mediante un proceso de coagulación con electrodos de aluminio y hierro. Para densidades de corriente entre $j=50 \text{ A/m}^2$ y $j=200 \text{ A/m}^2$ y tiempos de operación entre 5 y 30 minutos concluyeron que el costo de operación es menor con los electrodos de hierro (0.1 US\$/kg DQO) en comparación con los electrodos de aluminio (0.3 US\$/kg DQO), y que el consumo del electrodo correspondía entre el 50% (para Fe) y el 80% (para Al) del costo total del tratamiento.

(Arboleda, Valencia y Medina 1984) realizaron un estudio comparativo entre los procesos de EC y coagulación convencional para el tratamiento de aguas residuales en Colombia encontrando que para esa

época los costos de operación del proceso de EC (sin tener en cuenta costos de personal ni mantenimiento) era 6.7 veces mayor a su contraparte química.

CONCLUSIONES.

Por medio del proceso EF aplicado al tratamiento de aguas residuales contaminadas con tintas se logró una reducción del 100% en el color y un 97% en la carga orgánica con un consumo eléctrico de tan sólo 0.06 kW-h/m³.

A pH₀=2.4 y j=18.5 A/m² se elevó el consumo energético de la etapa de disolución anódica, este efecto se le atribuyó a la formación de especies insolubles en la superficie del electrodo de sacrificio que lo aislaron eléctricamente.

A las condiciones de cantidad de carga y pH de floculación evaluadas en el estudio se obtuvieron respuestas similares para todos los valores de reducción de color y COT, por lo tanto estos parámetros por si solos nos constituyeron un factor determinante para la estimación de las mejores condiciones de operación y fue necesario incluir factores como la menor cantidad de consumo de agentes controladores de pH.

El costo de los compuestos consumibles en el proceso EF a escala de laboratorio para los efluentes con tintas fue de \$1 011 /m³ (0.5 US\$ / m³) en donde el 19% del costo total del tratamiento corresponde al consumo eléctrico y de material de los electrodos de hierro.

REFERENCIAS.

- Akbal, Feryal, y Selva Camci. «Comparison of Electrocoagulation and Chemical Coagulation for Heavy Metal Removal.» *Chemical Engineering & Tecnology*, 2010: 1655-1664.
- Alinzafi, A., M. Khemis, M. N. Pons, y J. P. Leclerc. «Electrocoagulation of reactive textile dyes and textile wastewater.» *Chemical Engineerin and Processing* 44 (June 2004): 461-470.
- Arango, Alvaro. «La electrocoagulació: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales.» *Revista Lasallista de Investigación* II, nº 001 (Enero-Junio 2005): 49-56.
- Arboleda, Jorge, Guillermo Valencia, y Luis Eduardo Medina. «Coagulación y electrocoagulación de aguas residuales.» (Asociación Colombiana de Ingenieria Sanitaria y Ambiental (ACODAL)) 27, nº 120 (1984).
- Bayramoglu, Mahmut, Mehmet Kobya, Orhan Taner Can, y Mustafa Sozbir. «Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater.» *Separation and purification tecnology*, 2004: 117-125.
- Bojinov, M, I Betova, y R Raicheff. «Influence of pH on the anodic dissolution mechanism of Fe-Mo alloys in sulphate solutions.» *Electrochimica Acta* 44 (1998): 721-734.
- Ciorba, George, Ciprian Radovan, Ilie Vlaicu, y Laura Pitulice. «Correlation between organic component and electrode material: consequences on removal of surfactants from wastewater.» *Electrochimica Acta*, 2000: 297-303.
- Do, J. S., y M. L. Chen. «Decolourization of dye-containing solutions by electrocoagulation.» *Journal of Applied Electrochemistry* 24, nº 8 (1994): 785-790.

- Fröh, Andel. s.f.
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Pourbaix_Diagram_of_Iron.svg
(último acceso: Octubre de 2011).
- Gergiou, D., P. Melidis, y A. Aivasidis. «Use of a microbial sensor: inhibition effect of azo-reactive dyes on activated sludge.» *Bioprocess Biosystems Engineering* 25 (2002): 79-83.
- Holt, Peter, Barton Geoffrey, y Cynthia Mitchell. «Electrocoagulation as a wastewater treatment.» *Third Annual Australian Environment Engineering Research Event*. Castlemaine , 1999.
- Kioba, Mehmet, Taner Orhan, y Mahmut Bayramoglu. «Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes.» *Journal of Hazardous Materials* 100 (junio 2003): 163-178.
- Mohammad, M., y Sivakumar Muttumaru. «Review of pollutants removed by electrocoagulation an electrocoagulation/flotation processes.» *Journal of Environmental Management* 90 (2009): 1663-1679.
- Rios, Yeison, y Julián Andrés Valencia. *ELECTROCOAGULACIÓN DE AGUAS CONTAMINADAS CON TINTAS FLEXOGRÁFICAS COMBINADO CON OXIDACIÓN POR ADICIÓN DE H₂O₂*. Cali: Universidad del Valle, 2010.
- Shaw, C. B., A. D. Carliell, y A. D. Weathely. «Anaerobic/Aerobic treatment of coloured textile effluents using sequencing batch reactors.» *Water Research* 36 (2002): 1193-2001.
- Vuckovic, Milovan. «Influence of pH on the dissolution kinetics of iron in sulphuric acid solution.» *Hydrometallurgy*, 1996-a: 79-93.
- Vukovic, M. «Anodic dissolution of Amco iron in 0.5 M H₂SO₄ in the presence of adsorbed choride ions.» *Hydrometallurgy*, 1996-b: 387-398.
- Zaroual, Z, M Azzi, N Saib, y E Chainet. «Contribution to the study of electrocoagulation mechanism in basic textileeffluent.» *Elsevier*, 2005.

ANEXOS

Anexo 1. Datos de la etapa de electrodisolución

CONDICIONES INICIALES PH=1.0 , j=9.3

PH (UpH) 0,57 V (Volts) 0,52 A anódica (m2) 0,054
 i (Amp) 0,5 Cond (mS) 105,4 J (Amp/m2) 9,259
 Vol (L) 0,8

						Consumo Eléctrico	
Tiempo	Carga		Potencial	PH	Conductividad	Intervalo	Acumulado
(s)	(coulombs)	(c/L)	(Volts)	(UpH)	(mS)	(kWh/m3)	(kWh/m3)
0	0	0	0,520	0,57	105,40	0,00	0,00
800	400	500	0,530	0,57	104,70	0,07	0,07
1600	800	1000	0,528	0,60	97,12	0,07	0,15
3200	1600	2000	0,569	0,62	93,54	0,16	0,31
4800	2400	3000	0,504	0,66	84,63	0,14	0,45
6400	3200	4000	0,527	0,75	84,43	0,15	0,59
8000	4000	5000	0,474	0,82	86,43	0,13	0,72

CONDICIONES INICIALES PH=3.0 , j=9.3

PH (UpH) 2,68 V (Volts) 0,74 A anódica (m2) 0,054
 i (Amp) 0,5 Cond (mS) 16,08 J (Amp/m2) 9,259
 Vol (L) 0,8

						Consumo Eléctrico	
Tiempo	Carga		Potencial	PH	Conductividad	Intervalo	Acumulado
(s)	(coulombs)	(c/L)	(Volts)	(UpH)	(mS)	(kWh/m3)	(kWh/m3)
0	0	0	0,74	2,68	16,08	0	0
800	400	500	0,637	2,4	20,83	0,09	0,09
1600	800	1000	0,566	1,48	11,56	0,08	0,17
3200	1600	2000	0,581	1,46	13,9	0,16	0,33
4800	2400	3000	0,542	1,58	10,43	0,15	0,48
6400	3200	4000	0,658	1,96	10,2	0,18	0,66
8000	4000	5000	0,742	2,41	8,3	0,21	0,87

CONDICIONES INICIALES PH=1.0 , j=18.5

PH (UpH) 1,2 V (Volts) 1,1 A anódica (m2) 0,054
 i (Amp) 1 Cond (mS) 83,74 J (Amp/m2) 18,519
 Vol (L) 0,8

						Consumo Eléctrico	
Tiempo	Carga		Potencial	PH	Conductividad	Intervalo	Acumulado
(s)	(coulombs)	(c/L)	(Volts)	(UpH)	(mS)	(kWh/m3)	(kWh/m3)
0	0	0	1,1	1,2	83,74	0	0
400	400	500	0,759	1,2	78,37	0,11	0,11
800	800	1000	0,801	1,2	81,91	0,11	0,22
1600	1600	2000	0,691	1,46	70,83	0,19	0,41
2400	2400	3000	0,68	1,56	66,5	0,19	0,60
3200	3200	4000	0,636	1,39	61,61	0,18	0,77
4000	4000	5000	0,7013	1,47	56,34	0,19	0,97

Anexo 1. Datos de la etapa de electrodisolución

CONDICIONES INICIALES

PH=3.0 , J=18.5

PH (UpH)	2,61	Cond (mS)	2,011				
i (Amp)	1	Vol (L)	0,8	J (Amp/m2)	18,519		
A anódica (m2)	0,054						
V (Volts)	2,247						
Replica 1							
Consumo Eléctrico							
Tiempo	Carga		Potencial	PH	Conductividad	Intervalo	Acumulado
(s)	(coulombs)	(c/L)	(Volts)	(UpH)	(mS)	(kWh/m3)	(kWh/m3)
0	0	0	1,916	2,610	2,011	0,00	0,00
400	400	500	1,378	2,489	12,016	0,19	0,19
800	800	1000	1,292	1,903	9,137	0,18	0,37
1600	1600	2000	1,390	1,800	6,451	0,39	0,76
2400	2400	3000	1,900	2,508	3,665	0,53	1,28
3200	3200	4000	2,111	3,622	1,260	0,59	1,87
4000	4000	5000	1,201	5,292	1,349	0,33	2,20

CONDICIONES INICIALES

PH=3.0 , J=18.5

PH (UpH)	2,38	Cond (mS)	2,051				
i (Amp)	1	Vol (L)	0,8	J (Amp/m2)	18,519		
A anódica (m2)	0,054						
V (Volts)	2,247						
Replica 2							
Consumo Eléctrico							
Tiempo	Carga		Potencial	PH	Conductividad	Intervalo	Acumulado
(s)	(coulombs)	(c/L)	(Volts)	(UpH)	(mS)	(kWh/m3)	(kWh/m3)
0	0	0	2,247	2,380	2,051	0,00	0,00
400	400	500	0,950	2,380	12,218	0,13	0,13
800	800	1000	0,971	1,772	9,584	0,13	0,27
1600	1600	2000	1,171	2,090	6,206	0,33	0,59
2400	2400	3000	1,649	2,519	2,888	0,46	1,05
3200	3200	4000	1,706	3,611	2,400	0,47	1,52
4000	4000	5000	1,383	5,281	2,490	0,38	1,91

Anexo 2. Datos de la etapa de floculación

COLOR

		Replica 1		Replica 2		Promedio	
		Abs	Abs	Abs	Abs	Abs	Abs
C/l	pH	$\lambda = 438 \text{ nm}$	$\lambda = 629 \text{ nm}$	$\lambda = 438 \text{ nm}$	$\lambda = 629 \text{ nm}$	$\lambda = 438 \text{ nm}$	$\lambda = 629 \text{ nm}$
100	7	1,458	0,254	0,067	0,067	0,763	0,161
100	9	1,475	0,283	0,030	0,013	0,753	0,148
100	11	1,075	0,121	0,059	0,009	0,567	0,065
200	7	1,169	0,209	0,153	0,144	0,661	0,177
200	9	1,006	0,097	0,032	0,011	0,519	0,054
200	11	0,969	0,076	0,024	0,005	0,497	0,041
300	7	0,358	0,259	0,048	0,015	0,203	0,137
300	9	0,083	0,047	0,052	0,019	0,068	0,033
300	11	0,185	0,125	0,022	0,003	0,104	0,064

TOC

		replica1	replica2	promedio
		TOC	TOC	TOC
C/l	pH	(ppm)	(ppm)	(ppm)
100	7	1301,8	1330,6	1316,2
100	9	1309,4	1318,4	1313,9
100	11	1332,6	1301,0	1316,8
200	7	1327,8	1306,2	1317,0
200	9	1306,8	1309,8	1308,3
200	11	1262,8	1266,6	1264,7
300	7	1242,8	1230,0	1236,4
300	9	1228,2	1234,6	1231,4
300	11	1230,8	1220,4	1225,6

Anexo 3. Fotografías



Imagen 1. Efluente sin tratar. Imagen tomada de (Rios y Valencia 2010)



Imagen 2. Efluente tratado con 100 c/l. (Tomada por Julián Leal)

Anexo 3. Fotografías

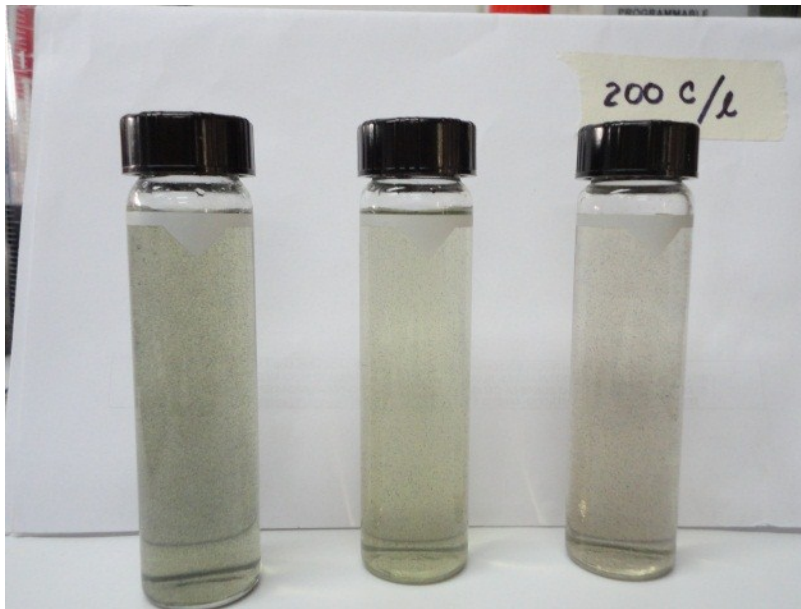


Imagen 3. Efluente tratado con 200 c/l. (Tomada por Julián Leal)

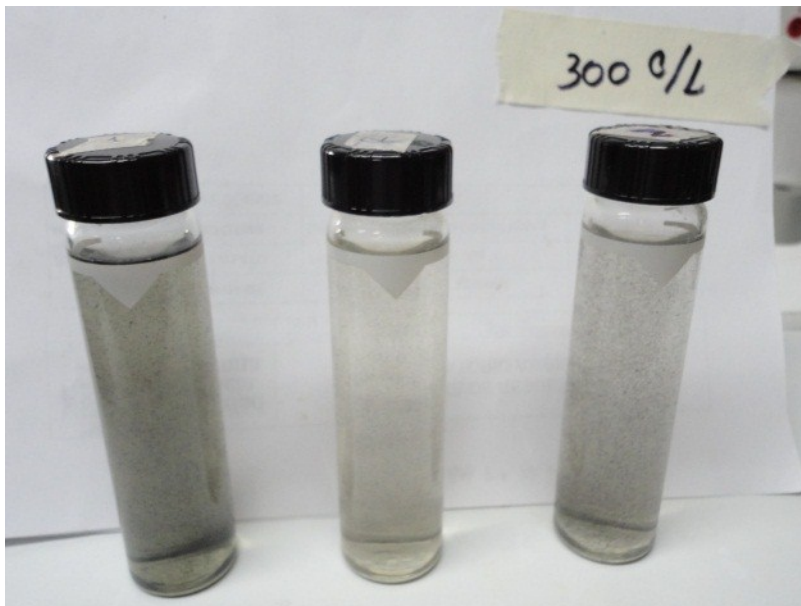


Imagen 4. Efluente tratado con 300 c/l (Tomada por Julián Leal)

Anexo 4. Datos de absorbancia para la construcción de la gráfica Disoluciones 1:500 y 1:1000

λ nm	Lectura 1:1000	Lectura 1:500	Abs. Real 1:1000	Abs Real 1:500	Abs Promedio
380	0,05798	0,30978	57,98	154,89	106,435
381	0,05779	0,30806	57,79	154,03	105,91
382	0,05759	0,30655	57,59	153,275	105,4325
383	0,05756	0,30511	57,56	152,555	105,0575
384	0,05763	0,30353	57,63	151,765	104,6975
385	0,05756	0,30199	57,56	150,995	104,2775
386	0,05722	0,30046	57,22	150,23	103,725
387	0,05713	0,29921	57,13	149,605	103,3675
388	0,05704	0,29781	57,04	148,905	102,9725
389	0,05699	0,29613	56,99	148,065	102,5275
390	0,05681	0,29482	56,81	147,41	102,11
391	0,05687	0,29326	56,87	146,63	101,75
392	0,05669	0,29176	56,69	145,88	101,285
393	0,05658	0,2901	56,58	145,05	100,815
394	0,05664	0,28888	56,64	144,44	100,54
395	0,05667	0,28737	56,67	143,685	100,1775
396	0,05659	0,28596	56,59	142,98	99,785
397	0,05649	0,28464	56,49	142,32	99,405
398	0,05637	0,28302	56,37	141,51	98,94
399	0,05618	0,28149	56,18	140,745	98,4625
400	0,05623	0,28006	56,23	140,03	98,13
401	0,05614	0,27855	56,14	139,275	97,7075
402	0,056	0,2769	56	138,45	97,225
403	0,05585	0,27516	55,85	137,58	96,715
404	0,05579	0,27345	55,79	136,725	96,2575
405	0,05568	0,27177	55,68	135,885	95,7825
406	0,05554	0,26993	55,54	134,965	95,2525
407	0,05536	0,2679	55,36	133,95	94,655
408	0,05522	0,26585	55,22	132,925	94,0725
409	0,05504	0,26401	55,04	132,005	93,5225
410	0,05486	0,26186	54,86	130,93	92,895
411	0,05463	0,25995	54,63	129,975	92,3025
412	0,05438	0,25806	54,38	129,03	91,705
413	0,05428	0,25592	54,28	127,96	91,12
414	0,05409	0,25406	54,09	127,03	90,56
415	0,05367	0,2522	53,67	126,1	89,885
416	0,05351	0,25038	53,51	125,19	89,35
417	0,05359	0,24884	53,59	124,42	89,005
418	0,05338	0,24716	53,38	123,58	88,48
419	0,05316	0,24553	53,16	122,765	87,9625

420	0,05313	0,24406	53,13	122,03	87,58
421	0,05309	0,24275	53,09	121,375	87,2325
422	0,05298	0,24147	52,98	120,735	86,8575
423	0,05284	0,24025	52,84	120,125	86,4825
424	0,05289	0,2393	52,89	119,65	86,27
425	0,05292	0,23846	52,92	119,23	86,075
426	0,05269	0,23743	52,69	118,715	85,7025
427	0,05249	0,23645	52,49	118,225	85,3575
428	0,05243	0,23569	52,43	117,845	85,1375
429	0,05249	0,23502	52,49	117,51	85
430	0,05249	0,23439	52,49	117,195	84,8425
431	0,05246	0,23376	52,46	116,88	84,67
432	0,05237	0,23318	52,37	116,59	84,48
433	0,05231	0,2327	52,31	116,35	84,33
434	0,05228	0,23232	52,28	116,16	84,22
435	0,05234	0,23196	52,34	115,98	84,16
436	0,05238	0,23177	52,38	115,885	84,1325
437	0,0524	0,23154	52,4	115,77	84,085
438	0,05244	0,23135	52,44	115,675	84,0575
439	0,05258	0,2314	52,58	115,7	84,14
440	0,05273	0,23148	52,73	115,74	84,235
441	0,05286	0,23163	52,86	115,815	84,3375
442	0,05312	0,23196	53,12	115,98	84,55
443	0,05322	0,23227	53,22	116,135	84,6775
444	0,05325	0,23262	53,25	116,31	84,78
445	0,05353	0,23311	53,53	116,555	85,0425
446	0,05374	0,23358	53,74	116,79	85,265
447	0,05399	0,2343	53,99	117,15	85,57
448	0,05424	0,23506	54,24	117,53	85,885
449	0,05455	0,23581	54,55	117,905	86,2275
450	0,05479	0,23659	54,79	118,295	86,5425
451	0,05508	0,2375	55,08	118,75	86,915
452	0,05534	0,23845	55,34	119,225	87,2825
453	0,05563	0,2395	55,63	119,75	87,69
454	0,05606	0,24068	56,06	120,34	88,2
455	0,0564	0,242	56,4	121	88,7
456	0,05678	0,24332	56,78	121,66	89,22
457	0,05716	0,24471	57,16	122,355	89,7575
458	0,05757	0,24614	57,57	123,07	90,32
459	0,05795	0,24767	57,95	123,835	90,8925
460	0,05838	0,24922	58,38	124,61	91,495

Anexo 4. Datos de absorbancia para la construcción de la gráfica

Disoluciones 1:500 y 1:1000

461	0,05888	0,25089	58,88	125,445	92,1625
462	0,0592	0,25253	59,2	126,265	92,7325
463	0,05968	0,25438	59,68	127,19	93,435
464	0,06033	0,25623	60,33	128,115	94,2225
465	0,06088	0,25819	60,88	129,095	94,9875
466	0,06142	0,26035	61,42	130,175	95,7975
467	0,06198	0,26239	61,98	131,195	96,5875
468	0,06252	0,2646	62,52	132,3	97,41
469	0,06303	0,26688	63,03	133,44	98,235
470	0,0636	0,26906	63,6	134,53	99,065
471	0,06413	0,27119	64,13	135,595	99,8625
472	0,06483	0,27362	64,83	136,81	100,82
473	0,06538	0,27589	65,38	137,945	101,6625
474	0,06592	0,27821	65,92	139,105	102,5125
475	0,06654	0,28065	66,54	140,325	103,4325
476	0,06714	0,28307	67,14	141,535	104,3375
477	0,06758	0,28529	67,58	142,645	105,1125
478	0,06821	0,28772	68,21	143,86	106,035
479	0,06879	0,29033	68,79	145,165	106,9775
480	0,06927	0,29291	69,27	146,455	107,8625
481	0,06992	0,29547	69,92	147,735	108,8275
482	0,07047	0,29808	70,47	149,04	109,755
483	0,07108	0,30064	71,08	150,32	110,7
484	0,07162	0,30331	71,62	151,655	111,6375
485	0,07214	0,30592	72,14	152,96	112,55
486	0,07269	0,30844	72,69	154,22	113,455
487	0,07329	0,31122	73,29	155,61	114,45
488	0,0739	0,31396	73,9	156,98	115,44
489	0,07448	0,3165	74,48	158,25	116,365
490	0,07506	0,31921	75,06	159,605	117,3325
491	0,07559	0,32205	75,59	161,025	118,3075
492	0,07607	0,32484	76,07	162,42	119,245
493	0,07677	0,32776	76,77	163,88	120,325
494	0,07735	0,33063	77,35	165,315	121,3325
495	0,07791	0,33345	77,91	166,725	122,3175
496	0,07846	0,33618	78,46	168,09	123,275
497	0,07892	0,33884	78,92	169,42	124,17
498	0,07945	0,3418	79,45	170,9	125,175
499	0,08003	0,34471	80,03	172,355	126,1925
500	0,0806	0,34753	80,6	173,765	127,1825
501	0,08109	0,35033	81,09	175,165	128,1275

502	0,08162	0,35327	81,62	176,635	129,1275
503	0,08202	0,35605	82,02	178,025	130,0225
504	0,08244	0,35884	82,44	179,42	130,93
505	0,08304	0,36179	83,04	180,895	131,9675
506	0,08351	0,36455	83,51	182,275	132,8925
507	0,08389	0,36728	83,89	183,64	133,765
508	0,08435	0,37009	84,35	185,045	134,6975
509	0,08478	0,37286	84,78	186,43	135,605
510	0,08513	0,37549	85,13	187,745	136,4375
511	0,08537	0,37798	85,37	188,99	137,18
512	0,08571	0,38046	85,71	190,23	137,97
513	0,08611	0,38298	86,11	191,49	138,8
514	0,08632	0,38548	86,32	192,74	139,53
515	0,08659	0,38809	86,59	194,045	140,3175
516	0,08681	0,39052	86,81	195,26	141,035
517	0,08717	0,3932	87,17	196,6	141,885
518	0,08755	0,39594	87,55	197,97	142,76
519	0,08768	0,39833	87,68	199,165	143,4225
520	0,08783	0,40067	87,83	200,335	144,0825
521	0,08797	0,40298	87,97	201,49	144,73
522	0,0882	0,40536	88,2	202,68	145,44
523	0,08836	0,40768	88,36	203,84	146,1
524	0,08842	0,40991	88,42	204,955	146,6875
525	0,08853	0,41212	88,53	206,06	147,295
526	0,0887	0,41434	88,7	207,17	147,935
527	0,08876	0,41664	88,76	208,32	148,54
528	0,08881	0,41885	88,81	209,425	149,1175
529	0,0889	0,42105	88,9	210,525	149,7125
530	0,08894	0,42317	88,94	211,585	150,2625
531	0,0889	0,42511	88,9	212,555	150,7275
532	0,08902	0,42723	89,02	213,615	151,3175
533	0,08902	0,42923	89,02	214,615	151,8175
534	0,08893	0,4312	88,93	215,6	152,265
535	0,08891	0,43303	88,91	216,515	152,7125
536	0,08881	0,4348	88,81	217,4	153,105
537	0,08878	0,43669	88,78	218,345	153,5625
538	0,08879	0,43845	88,79	219,225	154,0075
539	0,0887	0,44011	88,7	220,055	154,3775
540	0,08859	0,44186	88,59	220,93	154,76
541	0,0885	0,44345	88,5	221,725	155,1125
542	0,08846	0,44502	88,46	222,51	155,485

Anexo 4. Datos de absorbancia para la construcción de la gráfica

Disoluciones 1:500 y 1:1000

543	0,08835	0,44643	88,35	223,215	155,7825
544	0,08809	0,44778	88,09	223,89	155,99
545	0,08778	0,44894	87,78	224,47	156,125
546	0,0876	0,4501	87,6	225,05	156,325
547	0,08745	0,45122	87,45	225,61	156,53
548	0,08722	0,45222	87,22	226,11	156,665
549	0,08702	0,45316	87,02	226,58	156,8
550	0,08676	0,45399	86,76	226,995	156,8775
551	0,08659	0,45491	86,59	227,455	157,0225
552	0,08621	0,4556	86,21	227,8	157,005
553	0,08577	0,45616	85,77	228,08	156,925
554	0,08551	0,4568	85,51	228,4	156,955
555	0,08533	0,4574	85,33	228,7	157,015
556	0,08496	0,45782	84,96	228,91	156,935
557	0,08473	0,45833	84,73	229,165	156,9475
558	0,0844	0,4588	84,4	229,4	156,9
559	0,08406	0,45918	84,06	229,59	156,825
560	0,08376	0,45959	83,76	229,795	156,7775
561	0,08342	0,45996	83,42	229,98	156,7
562	0,08321	0,46034	83,21	230,17	156,69
563	0,08302	0,46083	83,02	230,415	156,7175
564	0,08279	0,4612	82,79	230,6	156,695
565	0,08253	0,46165	82,53	230,825	156,6775
566	0,08226	0,46207	82,26	231,035	156,6475
567	0,08211	0,46254	82,11	231,27	156,69
568	0,08192	0,46284	81,92	231,42	156,67
569	0,08177	0,46333	81,77	231,665	156,7175
570	0,08163	0,46397	81,63	231,985	156,8075
571	0,08145	0,46442	81,45	232,21	156,83
572	0,08138	0,46494	81,38	232,47	156,925
573	0,08136	0,46548	81,36	232,74	157,05
574	0,08122	0,46609	81,22	233,045	157,1325
575	0,0811	0,4666	81,1	233,3	157,2
576	0,08109	0,46729	81,09	233,645	157,3675
577	0,08098	0,46793	80,98	233,965	157,4725
578	0,08098	0,46861	80,98	234,305	157,6425
579	0,08102	0,46921	81,02	234,605	157,8125
580	0,08104	0,4698	81,04	234,9	157,97
581	0,08105	0,4704	81,05	235,2	158,125
582	0,08102	0,47102	81,02	235,51	158,265
583	0,08109	0,47163	81,09	235,815	158,4525

584	0,08109	0,4722	81,09	236,1	158,595
585	0,08113	0,47281	81,13	236,405	158,7675
586	0,08118	0,4734	81,18	236,7	158,94
587	0,08125	0,47397	81,25	236,985	159,1175
588	0,08121	0,4744	81,21	237,2	159,205
589	0,0813	0,47495	81,3	237,475	159,3875
590	0,08133	0,47543	81,33	237,715	159,5225
591	0,08134	0,47594	81,34	237,97	159,655
592	0,08141	0,47639	81,41	238,195	159,8025
593	0,08151	0,47687	81,51	238,435	159,9725
594	0,08162	0,47734	81,62	238,67	160,145
595	0,08168	0,47777	81,68	238,885	160,2825
596	0,08171	0,4782	81,71	239,1	160,405
597	0,08176	0,47861	81,76	239,305	160,5325
598	0,08188	0,47906	81,88	239,53	160,705
599	0,08209	0,47955	82,09	239,775	160,9325
600	0,08214	0,47995	82,14	239,975	161,0575
601	0,08226	0,48036	82,26	240,18	161,22
602	0,08235	0,48077	82,35	240,385	161,3675
603	0,08243	0,4812	82,43	240,6	161,515
604	0,08253	0,48161	82,53	240,805	161,6675
605	0,08267	0,48215	82,67	241,075	161,8725
606	0,08281	0,48267	82,81	241,335	162,0725
607	0,08301	0,48318	83,01	241,59	162,3
608	0,08319	0,48369	83,19	241,845	162,5175
609	0,08337	0,48416	83,37	242,08	162,725
610	0,08362	0,48468	83,62	242,34	162,98
611	0,08379	0,4852	83,79	242,6	163,195
612	0,08397	0,4857	83,97	242,85	163,41
613	0,08418	0,48633	84,18	243,165	163,6725
614	0,08443	0,48694	84,43	243,47	163,95
615	0,08464	0,48759	84,64	243,795	164,2175
616	0,08481	0,48817	84,81	244,085	164,4475
617	0,08498	0,48883	84,98	244,415	164,6975
618	0,08527	0,48943	85,27	244,715	164,9925
619	0,08546	0,48996	85,46	244,98	165,22
620	0,0856	0,49049	85,6	245,245	165,4225
621	0,08572	0,49097	85,72	245,485	165,6025
622	0,08592	0,49152	85,92	245,76	165,84
623	0,08603	0,4919	86,03	245,95	165,99
624	0,08617	0,49236	86,17	246,18	166,175

Anexo 4. Datos de absorbancia para la construcción de la gráfica

Disoluciones 1:500 y 1:1000

625	0,08627	0,49275	86,27	246,375	166,3225
626	0,08627	0,49298	86,27	246,49	166,38
627	0,08626	0,49323	86,26	246,615	166,4375
628	0,08621	0,49339	86,21	246,695	166,4525
629	0,08624	0,49347	86,24	246,735	166,4875
630	0,08611	0,49344	86,11	246,72	166,415
631	0,08597	0,49329	85,97	246,645	166,3075
632	0,08578	0,49301	85,78	246,505	166,1425
633	0,08557	0,49275	85,57	246,375	165,9725
634	0,08528	0,49232	85,28	246,16	165,72
635	0,08482	0,49167	84,82	245,835	165,3275
636	0,08443	0,49097	84,43	245,485	164,9575
637	0,08406	0,49017	84,06	245,085	164,5725
638	0,08369	0,4894	83,69	244,7	164,195
639	0,08324	0,48862	83,24	244,31	163,775
640	0,08266	0,48759	82,66	243,795	163,2275
641	0,08212	0,48651	82,12	243,255	162,6875
642	0,08162	0,4854	81,62	242,7	162,16
643	0,08115	0,48428	81,15	242,14	161,645
644	0,08061	0,48317	80,61	241,585	161,0975
645	0,08003	0,48186	80,03	240,93	160,48
646	0,07942	0,48056	79,42	240,28	159,85
647	0,07896	0,47937	78,96	239,685	159,3225
648	0,07835	0,47794	78,35	238,97	158,66
649	0,07774	0,47646	77,74	238,23	157,985
650	0,07719	0,47499	77,19	237,495	157,3425
651	0,07674	0,47362	76,74	236,81	156,775
652	0,07625	0,47212	76,25	236,06	156,155
653	0,0757	0,47063	75,7	235,315	155,5075
654	0,07512	0,46906	75,12	234,53	154,825
655	0,07455	0,46744	74,55	233,72	154,135
656	0,07407	0,46599	74,07	232,995	153,5325
657	0,07367	0,46452	73,67	232,26	152,965
658	0,07315	0,46288	73,15	231,44	152,295
659	0,07269	0,46126	72,69	230,63	151,66
660	0,0722	0,45955	72,2	229,775	150,9875
661	0,07176	0,45782	71,76	228,91	150,335
662	0,07126	0,45601	71,26	228,005	149,6325
663	0,07079	0,45413	70,79	227,065	148,9275
664	0,0703	0,45233	70,3	226,165	148,2325
665	0,06992	0,45056	69,92	225,28	147,6

666	0,0695	0,44868	69,5	224,34	146,92
667	0,06906	0,44669	69,06	223,345	146,2025
668	0,06863	0,44472	68,63	222,36	145,495
669	0,06819	0,44269	68,19	221,345	144,7675
670	0,06776	0,44064	67,76	220,32	144,04
671	0,06734	0,43843	67,34	219,215	143,2775
672	0,06683	0,4362	66,83	218,1	142,465
673	0,06639	0,43379	66,39	216,895	141,6425
674	0,06598	0,43141	65,98	215,705	140,8425
675	0,06551	0,42896	65,51	214,48	139,995
676	0,06499	0,42636	64,99	213,18	139,085
677	0,06454	0,42381	64,54	211,905	138,2225
678	0,06416	0,4212	64,16	210,6	137,38
679	0,06371	0,41849	63,71	209,245	136,4775
680	0,06323	0,41571	63,23	207,855	135,5425
681	0,06279	0,41295	62,79	206,475	134,6325
682	0,06235	0,40997	62,35	204,985	133,6675
683	0,06181	0,40697	61,81	203,485	132,6475
684	0,06131	0,40393	61,31	201,965	131,6375
685	0,06082	0,4008	60,82	200,4	130,61
686	0,06027	0,39775	60,27	198,875	129,5725
687	0,05983	0,39476	59,83	197,38	128,605
688	0,05936	0,39171	59,36	195,855	127,6075
689	0,05887	0,38852	58,87	194,26	126,565
690	0,05836	0,38525	58,36	192,625	125,4925
691	0,05789	0,38206	57,89	191,03	124,46
692	0,05743	0,37888	57,43	189,44	123,435
693	0,05695	0,37566	56,95	187,83	122,39
694	0,05649	0,37245	56,49	186,225	121,3575
695	0,05598	0,36929	55,98	184,645	120,3125
696	0,0555	0,36613	55,5	183,065	119,2825
697	0,05502	0,36298	55,02	181,49	118,255
698	0,05452	0,35966	54,52	179,83	117,175
699	0,05406	0,35638	54,06	178,19	116,125
700	0,05363	0,35332	53,63	176,66	115,145
701	0,05313	0,35013	53,13	175,065	114,0975
702	0,05266	0,34695	52,66	173,475	113,0675
703	0,05229	0,34406	52,29	172,03	112,16
704	0,05185	0,34113	51,85	170,565	111,2075
705	0,05136	0,3382	51,36	169,1	110,23
706	0,0509	0,33527	50,9	167,635	109,2675

Anexo 4. Datos de absorbancia para la construcción de la gráfica Disoluciones 1:500 y 1:1000

707	0,05043	0,33232	50,43	166,16	108,295
708	0,05006	0,32935	50,06	164,675	107,3675
709	0,04964	0,32639	49,64	163,195	106,4175
710	0,04916	0,32344	49,16	161,72	105,44
711	0,04869	0,32054	48,69	160,27	104,48
712	0,04829	0,31784	48,29	158,92	103,605
713	0,04794	0,31517	47,94	157,585	102,7625
714	0,04753	0,3125	47,53	156,25	101,89
715	0,04718	0,31001	47,18	155,005	101,0925
716	0,04678	0,30748	46,78	153,74	100,26
717	0,04646	0,30501	46,46	152,505	99,4825
718	0,04607	0,30251	46,07	151,255	98,6625
719	0,04565	0,30009	45,65	150,045	97,8475
720	0,04533	0,29767	45,33	148,835	97,0825
721	0,04495	0,29526	44,95	147,63	96,29
722	0,04471	0,293	44,71	146,5	95,605
723	0,04442	0,29076	44,42	145,38	94,9
724	0,04402	0,2886	44,02	144,3	94,16
725	0,04366	0,28644	43,66	143,22	93,44
726	0,04343	0,28435	43,43	142,175	92,8025
727	0,04312	0,28232	43,12	141,16	92,14
728	0,04279	0,28032	42,79	140,16	91,475
729	0,04248	0,27832	42,48	139,16	90,82
730	0,04218	0,27638	42,18	138,19	90,185
731	0,04192	0,27446	41,92	137,23	89,575
732	0,04161	0,27252	41,61	136,26	88,935
733	0,0414	0,27074	41,4	135,37	88,385
734	0,04117	0,26904	41,17	134,52	87,845
735	0,04088	0,26736	40,88	133,68	87,28
736	0,04062	0,2657	40,62	132,85	86,735
737	0,04039	0,26407	40,39	132,035	86,2125
738	0,04008	0,26242	40,08	131,21	85,645
739	0,03987	0,26082	39,87	130,41	85,14
740	0,03976	0,25943	39,76	129,715	84,7375
741	0,03951	0,2579	39,51	128,95	84,23
742	0,03923	0,25641	39,23	128,205	83,7175
743	0,03902	0,25507	39,02	127,535	83,2775
744	0,03879	0,25365	38,79	126,825	82,8075
745	0,03865	0,25224	38,65	126,12	82,385
746	0,03844	0,25087	38,44	125,435	81,9375
747	0,03821	0,24948	38,21	124,74	81,475

748	0,03796	0,24814	37,96	124,07	81,015
749	0,03778	0,24689	37,78	123,445	80,6125
750	0,03758	0,24567	37,58	122,835	80,2075
751	0,03738	0,24445	37,38	122,225	79,8025
752	0,0372	0,24324	37,2	121,62	79,41
753	0,037	0,24202	37	121,01	79,005
754	0,03677	0,24077	36,77	120,385	78,5775
755	0,03654	0,23959	36,54	119,795	78,1675
756	0,03641	0,23845	36,41	119,225	77,8175
757	0,03625	0,23734	36,25	118,67	77,46
758	0,03613	0,2363	36,13	118,15	77,14
759	0,03601	0,23524	36,01	117,62	76,815
760	0,03598	0,23434	35,98	117,17	76,575
761	0,03561	0,23315	35,61	116,575	76,0925
762	0,03539	0,23204	35,39	116,02	75,705
763	0,0352	0,23099	35,2	115,495	75,3475
764	0,03511	0,2301	35,11	115,05	75,08
765	0,035	0,22922	35	114,61	74,805
766	0,03482	0,22818	34,82	114,09	74,455
767	0,03464	0,22719	34,64	113,595	74,1175
768	0,03447	0,22621	34,47	113,105	73,7875
769	0,03429	0,22527	34,29	112,635	73,4625
770	0,03413	0,22438	34,13	112,19	73,16
771	0,03401	0,22348	34,01	111,74	72,875
772	0,03389	0,22275	33,89	111,375	72,6325
773	0,03374	0,2218	33,74	110,9	72,32
774	0,03358	0,22092	33,58	110,46	72,02
775	0,03349	0,22012	33,49	110,06	71,775
776	0,03333	0,21927	33,33	109,635	71,4825
777	0,0332	0,21843	33,2	109,215	71,2075
778	0,03302	0,21758	33,02	108,79	70,905
779	0,03293	0,21678	32,93	108,39	70,66
780	0,03282	0,21602	32,82	108,01	70,415