# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
# SEDE CUENCA

## FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

## CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

***Tesis previa a la obtención del Título de Ingeniero Ambiental***

## TÍTULO:
## "ESTUDIO PARA LA REDUCCIÓN DE COLORANTES DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL A TRAVÉS DE PROCESOS ELECTROQUÍMICOS"

**AUTORES:**
**ANDREA NATHALY MALDONADO ROGEL**
**RENATO MIGUEL MOLINA AYALA**

**DIRECTOR:**
**ING. PABLO ARÉVALO**

**CUENCA – ECUADOR**

**2011**

# DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Los conceptos desarrollados, análisis realizados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Cuenca, Marzo de 2011.

Nathaly Maldonado R. Renato Molina A.

# CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Nathaly Maldonado Rogel y Renato Molina Ayala, bajo mi supervisión.

ING. JOSÉ ULLOA.

DIRECTOR DE TESIS ENCARGADO

BAJO RESOLUCIÓN

N° 124-009-2011-04-13

## AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento va dirigido a todas las personas que, de forma desinteresada, han aportado con sus conocimientos, opiniones y consejos a la realización de este documento.

A nuestro querido director de Tesis Ing. Pablo Arévalo, quien apropiadamente nos indicó el camino más factible a tomar durante la elaboración de este proyecto de tesis. Por su colaboración desde el inicio de esta investigación y por su aporte, hasta las últimas horas de este trabajo.

A la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, que nos abrió sus puertas y nos acogió en sus aulas inculcándonos una formación como profesionales y personas honradas, que en el futuro aportaremos con nuestros conocimientos, saberes y experiencia, en el campo de la Ingeniería Ambiental.

Además, a nuestros profesores por transmitirnos sus conocimientos a lo largo de la carrera universitaria.

A nuestros compañeros de estudio, que siempre nos apoyaron en la realización de trabajos y proyectos durante el proceso de formación en las aulas.

A todas las industrias textiles que nos abrieron sus puertas de la manera más comedida, brindado las facilidades en sus infraestructuras para poder cumplir con la presente investigación.

## DEDICATORIA

La presente tesis se la dedico a Dios y a mi familia. A Dios por haberme dado salud para lograr mis objetivos, por ser quien ha estado a mi lado en todo momento dándome las fuerzas necesarias para continuar luchando día tras día y seguir adelante rompiendo todas las barreras que se me presenten.

A mi familia por haberme brindado su apoyo, comprensión, amor y fortaleza en momentos de fatiga y cansancio.

*Nathaly Maldonado R.*

## DEDICATORIA

A mi familia con mucho cariño; en especial a mi padre Patricio Molina L. por su esfuerzo, ejemplo de trabajo y firmeza. A mi madre Paulina Ayala L. por su amor, por ser pilar fundamental en mi vida y de mi carrera universitaria.

A Maité Sarmiento V. una persona muy especial, por haberme brindado su apoyo y comprensión en los

buenos y malos momentos.

A todos aquellos quienes me han colaborado de una forma desinteresada en mi formación personal y académica.

*Renato Molina A.*

## RESUMEN

La presente tesis consiste en un estudio de mitigación del impacto causado por las tintorerías que se encuentran en la ciudad de Cuenca.

El objetivo central es determinar los parámetros óptimos con los cuales debe trabajar un proceso electroquímico, a fin de dar un tratamiento a las aguas residuales de las industrias textiles.

Se realizó una recopilación de datos de las industrias textiles existentes en la ciudad y cuáles de estas se dedican específicamente a tinturar ropa. Una vez obtenida la información requerida se efectuaron visitas al azar donde se pudo constatar que las aguas, producto de los tinturados no reciben ningún tratamiento antes de ser arrojadas a las fuentes naturales; sumado a esto se realizó las pruebas pertinentes para demostrar

que sus aguas residuales exceden los límites máximos permisibles de la normativa ambiental.

Se procedió a realizar prácticas en laboratorio con la finalidad de obtener los parámetros que afectarían al tratamiento planteado en nuestra investigación, como es el tratamiento electroquímico.

Para poder realizar este proyecto se debe tener claro en qué consiste el tratamiento electroquímico, cuáles son sus ventajas, desventajas, cómo funciona, los tipos de tratamientos similares que existen. De ahí, se tomó como referente el tratamiento de electrocoagulación, implementado en nuestra investigación.

De todos los ensayos realizados se tomó como factores relevantes cuatro y como variables de respuesta relevantes tres. Con estos datos procedimos a realizar las prácticas en laboratorio de acuerdo a las combinaciones que nos dio como resultado el software statgraphics cuando ingresamos los datos en el mismo. Culminadas estas prácticas se procedió a tabular los resultados en el software que nos ayudó a la interpretación de datos y finalmente a presentar las conclusiones a las que llegamos, una vez finalizada la investigación; a esto se suman las recomendaciones pertinentes.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA I

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD II

CERTIFICACIÓN III

AGRADECIMIENTOS IV

DEDICATORIA V

DEDICATORIA VI

RESUMEN
VII

ÍNDICE DE CONTENIDOS
IX

INTRODUCCIÓN
XIII

OBJETIVOS
XIV

JUSTIFICACIÓN
XV

HIPÓTESIS
XVI

**CAPÍTULO I: EL AGUA**
1

1.1. DEFINICIÓN
2

1.1.1. Importancia del Agua
2

1.1.2. Propiedades del Agua
2

1.1.3. Características del Agua
4

1.1.4. Ciclo Hidrológico del Agua
4

1.1.5. Usos del Agua
5

1.2. CONTAMINACIÓN DEL AGUA
5

1.2.1. Definición
5

1.2.2. Principales Contaminantes Del Agua
6

1.2.3. Parámetros Generales, e Indicadores de Contaminación del Agua
7

1.2.3.1. Parámetros de Carácter Físico
7

1.2.3.2. Parámetros de Carácter Químico
7

1.2.3.3. Parámetros de Carácter Radiactivo
7

1.2.3.4. Parámetros de Carácter Microbiológico
7

1.2.4. Fuentes de Contaminación del Agua
8

1.2.5. Efectos de la Contaminación del Agua
10

1.2.6. Efectos de la Contaminación en Ríos y Lagos
10

1.2.7. Legislación Ambiental de Aguas
11

**CAPÍTULO II: LA INDUSTRIA** TEXTIL
13

2.1. INTRODUCCIÓN
14

2.1.1. Procesos de la Industria Textil
16

2.1.2. Características de las Aguas Residuales de la Industria Textil
23

2.2. ELECTROQUÍMICA 24

2.2.1. Definición 24

2.2.2. Principios 26

2.2.2.1. Reacciones de Reducción-Oxidación 26

2.2.2.2. Celdas Electrolíticas 26

2.2.2.3. Celdas Electroquímicas 27

2.2.2.4. Electrólisis 28

2.2.2.5. Electrodos 29

2.2.2.6. Electrolito 30

2.2.3. Corriente Eléctrica y Movimiento de Iones 31

2.2.4. Métodos Electroquímicos de Tratamiento de Aguas Residuales 31

2.2.4.1. Electroflotación 32

2.2.4.2. Electro decantación 33

2.2.4.3. Electrocoagulación 34

**CAPÍTULO III: SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN**
36

3.1. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN
37

3.1.1. Celda Electrolítica
37

3.1.2. Construcción de la Cuba
37

3.1.3. Fuente de Poder
38

3.1.3.1. Características de la Fuente de Poder
38

3.1.4. Electrodos
39

3.1.4.1. Dimensiones, Disposición y Descripción de los Electrodos
39

3.2. MATERIALES, SUTANCIAS Y EQUIPOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO
43

3.2.1. Materiales
43

3.2.2. Sustancias
45

3.2.3. Equipos
48

3.3. PROCESOS DE LABORATORIO
49

3.3.1. Obtención de Aguas Residuales del Sector Industrial
49

3.3.2. Marchas de Laboratorio
50

3.3.2.1. Marcha para la Preparación de la Solución de Características Similares de las Aguas Residuales de las Tintorerías 50

3.3.2.2. Marcha para Sólidos Suspendidos 53

3.3.2.3. Marcha para Sólidos Disueltos 54

3.3.2.4. Marcha para Determinar las Unidades de Color 55

3.4. ETAPAS EN EL DISEÑO DE EXPERIMENTOS 55

3.4.1. Planeación y Realización. 56

**CAPÍTULO IV: ANÁLISIS ESTADÍSTICO** 65

4.1. HIPÓTESIS. 66

4.2 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LAS VARIABLES DE RESPUESTA. 66

4.2.1. Análisis de las Unidades de Color 68

4.2.2. Análisis de Sólidos Suspendidos 79

4.2.3. Análisis de Sólidos Disueltos 89

**CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES** 100

5.1. ANTECEDENTES
101

5.2. CONCLUSIONES
101

5.3. RECOMENDACIONES
103

ANEXOS
104

BIBLIOGRAFÍA
107

## INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural indispensable que a lo largo del tiempo ha venido solventando las necesidades de la humanidad, utilizándola para sus diferentes actividades cotidianas.

Este recurso lo podemos conseguir de forma relativamente pura en diferentes fuentes naturales y luego de la intervención del hombre la devolvemos a los causes con cierto grado de contaminación. Debido al aumento de la población y el uso inadecuado del agua se ha convertido en una prioridad el desarrollo de mecanismos para mitigar este impacto. Luego de haber obtenido el agua en forma natural y una vez intervenida esta se considera un desecho o agua residual, siendo nociva para los seres vivos y el ambiente.

La ciudad de Cuenca, capital de la provincia del Azuay, es una ciudad interandina situada al sur del Ecuador sobre una planicie a 2.550 m.s.n.m., con una temperatura media anual de 15°C, ciudad de tradición colonial y republicana, es un centro cultural y artesanal de importancia en el país, la misma que fue declarada por la UNESCO como "Patrimonio Cultural de la Humanidad" en el año de 1999.

En esta ciudad existen alrededor de cuarenta y cuatro industrias textiles, según la Cámara de la Pequeña Industria, dedicadas a alguna de las diferentes etapas que componen la cadena textil, de los cuales ocho se declaran como tintorerías o lugares en donde se realizan los procesos de lavado y tinturado que utilizan diferentes colorantes para el teñido de su materia prima, descargando de esta manera el agua residual a las fuentes naturales sin ningún tipo de tratamiento, es por esta razón que con el pasar del tiempo la utilización de técnicas electroquímicas en los tratamientos de los efluentes industriales se ha incrementado. Tales procesos son limpios operan a bajas temperaturas y en la mayoría de casos no necesitan adición de reactivos. (Industria, 2010).

La presente investigación consiste en mitigar el impacto causado por estas industrias textiles mediante un tratamiento electroquímico.

## OBJETIVOS

### *Objetivo General:*

"Determinar los parámetros óptimos con los cuales debe trabajar un proceso electroquímico para dar un tratamiento a las aguas residuales de las industrias textiles"

### *Objetivos Específicos*:

**i.** Determinar cuáles son los factores que tienen influencia en el rendimiento del tratamiento electroquímico.

ii. Establecer los parámetros apropiados de cada uno de los factores involucrados en el tratamiento a realizarse.

iii. Comprobar el proceso óptimo de eliminación de los colorantes de las aguas residuales de la industria textil.

## JUSTIFICACIÒN

En la constitución del estado, sección séptima, denominada Biosfera, ecología urbana y energías alternativas, concretamente en los artículos 413, dice "El Estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables, diversificadas, de bajo impacto y que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas **ni el derecho al agua**". También en el Artículo 415, "El Estado central y los gobiernos autónomos descentralizados adoptarán políticas integrales y participativas de ordenamiento territorial urbano y de uso del suelo, que permitan regular el crecimiento urbano, el manejo de la fauna urbana e incentiven el establecimiento de zonas verdes.

Los gobiernos autónomos descentralizados **desarrollarán programas de uso racional del agua**, y de reducción reciclaje y tratamiento adecuado de desechos sólidos y líquidos. Se incentivará y facilitará el transporte terrestre no motorizado, en especial mediante el establecimiento de ciclo vías".

En este marco de exigencias expresadas en nuestra constitución es necesario que todos aportemos desde nuestros saberes y destrezas en el desarrollo y aplicación de tecnologías que nos permitan alcanzar lo expresado en la carta magna. En el cantón Cuenca se han implementado importantes proyectos orientados a reducir la contaminación del agua en los ríos, a través de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ucubamba, sin embargo existen algunas industrias textiles (tintorerías) emplazadas de manera dispersa en la ciudad y la periferia que están contaminando el recurso agua, esta forma de localización hace difícil establecer un mecanismo colectivo de tratamiento de las guas contaminadas de dicha actividad productiva, es así que es necesario identificar alternativas prácticas y económicas que contribuyan a descontaminar las aguas.

## HIPÓTESIS

- $H_o$ El tratamiento electroquímico no influye en el proceso de decoloración de las aguas residuales de la industria textil.

- $H_1$ El tratamiento electroquímico influye directamente en el proceso de decoloración de las aguas residuales de la industria textil.

# CAPÍTULO I

# EL AGUA

## 1.1. DEFINICIÓN

"La palabra agua viene del latín *aqua,* es una sustancia cuya molécula está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno; notada como $H_2O$". (Wikipedia, 2010).

### 1.1.1. Importancia del Agua

El agua es esencial para la supervivencia de todas las formas conocidas de vida.

Sin agua no hay vida. El hecho de que el agua constituya alrededor del 60% del peso corporal en los hombres y cerca del 50% en las mujeres prueba ampliamente su importancia para la vida humana. (Martínez, 2010).

Por la importancia del agua en la vida de todos los seres vivos, y debido al aumento de las necesidades de ella por el continuo desarrollo de la humanidad, el hombre está en la obligación de proteger estos recursos y evitar toda influencia nociva sobre las fuentes del preciado líquido.

"Los humanos consumen agua potable. Los recursos naturales se han vuelto escasos con la creciente población mundial y su disposición en varias regiones habitadas es la preocupación de muchas organizaciones gubernamentales." (Wikipedia, 2010)

### 1.1.2. Propiedades del Agua

El agua es una sustancia cuya fórmula química es $H_2O$. Sus propiedades físico-químicas más notables son:

- Con presión constante, el índice de tensión superficial del agua disminuye al aumentar su temperatura.

- El punto de ebullición del agua está directamente relacionado con la presión atmosférica.

- El agua es un disolvente muy potente, al que se ha catalogado como universal y afecta a muchos tipos de sustancias distintas.

- El agua es miscible con muchos líquidos, como el etanol, y en cualquier proporción, formando un líquido homogéneo.

- El agua pura tiene una conductividad eléctrica relativamente baja, pero ese valor se incrementa significativamente con la disolución de una pequeña cantidad de material iónico, como el cloruro de sodio.

- El agua tiene el segundo índice más alto de capacidad calorífica específica -sólo por detrás del amoníaco- así como una elevada entalpía de vaporización, ambos factores se deben al enlace de hidrógeno entre moléculas.

- La densidad del agua líquida es muy estable y varía poco con los cambios de temperatura y presión.

- El agua puede descomponerse en partículas de hidrógeno y oxígeno mediante electrólisis.

- Como un óxido de hidrógeno, el agua se forma cuando el hidrógeno -o un compuesto conteniendo hidrógeno- se quema o reacciona con oxígeno -o un compuesto de oxígeno.

- A presión atmosférica normal hierve a 100° C y se congela a 0° C.

- Alcanza su densidad máxima a los 4° C.

### 1.1.3. Características del Agua

- El agua cubre las tres cuartas partes de la superficie de la Tierra (mares, ríos, lagos, etc.), también constituye del 50% al 90% por peso, de todas las plantas y animales.

- Su gravedad específica es de 1, su calor específico es 1.

- El agua es insípida e inodora en condiciones normales de presión y temperatura.
- El agua bloquea ligeramente la radiación solar UV fuerte.
- El oxígeno tiene una electronegatividad superior a la del hidrógeno, el agua es una molécula polar.

### 1.1.4. Ciclo Hidrológico del Agua

El ciclo hidrológico o ciclo del agua es el proceso de circulación del agua entre los distintos compartimentos de la hidrósfera.

La mayor parte de la masa del agua se encuentra en forma líquida, sobre todo en los océanos y mares y en menor medida en forma de agua subterránea o de agua superficial.

Los principales procesos implicados en el ciclo del agua son:

- Evaporación.
- Condensación.
- Precipitación.
- Infiltración.
- Escorrentía.
- Circulación subterránea.
- Fusión.
- Solidificación.

El proceso se repite y así el líquido vital no se pierde nunca.

### 1.1.5. Usos del Agua

Es tan importante el agua en la naturaleza que el hombre ha destinado algunos usos para ella, como son:

- Consumo doméstico.
- Consumo público.
- Uso en agricultura y ganadería.
- El agua en la industria.
- El agua, fuente de energía.
- El agua, vía de comunicación.

- Deporte, y ocio.

## 1.2. CONTAMINACIÓN DEL AGUA

### 1.2.1. Definición

La contaminación del agua es la alteración o daño del estado original de pureza del agua mediante la incorporación de materias extrañas de modo directo o indirecto, que perjudican su estado y la hacen inútil para los diversos usos como son el consumo humano, la industria, agricultura, para los animales, y la vida natural.

Toda el agua pura procedente de las lluvias, ya antes de llegar al suelo recibe su primera carga contaminante, cuando disuelve sustancias como anhídrido carbónico, óxido de azufre y de nitrógeno que la convierten en lluvia ácida. Ya en el suelo el agua puede arrastrar un sin número de contaminantes hacia donde la escorrentía le lleve a desembocar. (EDUCASITIOS).

Otro factor y el más importante que influye en la contaminación del agua son las actividades humanas, pues con el crecimiento poblacional, y el surgimiento de la actividad industrial, la polución de los ríos, lagos y aguas subterráneas aumenta constantemente.

### 1.2.2. Principales Contaminantes del Agua

Hay un gran número de contaminantes que se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Agentes patógenos e infecciosos, como virus, bacterias, parásitos provenientes de desechos orgánicos.

- Residuos que demandan oxígeno, que en su mayor parte son materia orgánica, y que necesita ser descompuesta por bacterias que usan oxígeno para biodegradarla. Y si es que hay grandes cantidades de bacterias pueden acabar con el oxígeno del agua, matando así las formas acuáticas.

- Nutrientes vegetales, que pueden estimular el crecimiento de las plantas acuáticas. Estas a su vez interfieren con los usos a los que se destina el agua y, al descomponerse producen la eutrofización.

- Productos químicos, incluyendo los pesticidas, diversos productos industriales, sustancias tensoactivas contenidas en detergentes, y los productos de la descomposición de otros compuestos orgánicos.

- Sustancias radioactivas, que pueden causar defectos congénitos y cáncer.

- Sedimentos o materia suspendida, como partículas insolubles del suelo que enturbian el agua, y que son la mayor fuente de contaminación.

- Calor, el ingreso de agua caliente disminuye el contenido de oxígeno y hace a los organismos acuáticos muy vulnerables.

- Petróleo y sus derivados, como el alquitrán, aceites, combustibles.

### 1.2.3. Parámetros Generales, e Indicadores de Contaminación del Agua

El libro “Contaminación Ambiental una visión desde la Química”, menciona que se puede realizar un estudio de la calidad de las aguas clasificándolas según su naturaleza de la propiedad o especie que se determina.

Así se los puede dividir en:

#### 1.2.3.1. Parámetros de Carácter Físico

a. Características organolépticas
b. Turbidez y materias en suspensión
c. Temperatura
d. Conductividad

#### 1.2.3.2. Parámetros de Carácter Químico

a. Salinidad y dureza
b. pH: Acidez y Alcalinidad
c. Oxígeno disuelto
d. Medidores de materia orgánica DBO, DQO
e. Medidores de materia inorgánica: Cationes, Aniones, Metales

#### 1.2.3.3. Parámetros de Carácter Radiactivo

a. Radiación y totales
b. Elementos individuales

#### 1.2.3.4. Parámetros de Carácter Microbiológico

a. Bacterias
b. Virus
c. Hongos
d. Algas

### 1.2.4. Fuentes de Contaminación del Agua

Se consideran las fuentes naturales y antropogénicas:

**a. Naturales**

Ciertas fuentes de contaminación del agua son naturales, como son algunos metales y otros productos que se encuentran naturalmente en la corteza de la tierra y en los océanos.

Beneficiosamente las fuentes de contaminación natural son muy dispersas y no provocan concentraciones altas de contaminación, ocurriendo lo contrario con las fuentes antropogénicas.

**b. Antropogénicas**

La contaminación antropogénica es producida por la actividad humana. Hay cuatro focos principales de contaminación antropogénica: (Starmedia).
Industria, contaminación doméstica y urbana, navegación, contaminación agrícola y agropecuaria.

- **Industria**

El agua que utilizan las industrias para sus procesos es vertida a los ríos, sin un tratamiento previo. En su mayoría no poseen sistemas de depuración de las aguas, esta contaminación es muy elevada dada la gran cantidad de agua que necesita la industria en proceso de producción.
Además, con sus emisiones a la atmósfera mediante chimeneas de expulsión de humos contribuyen a la formación de la lluvia ácida.

- **Navegación**

Produce diferentes tipos de contaminación, especialmente con hidrocarburos que son un tipo de contaminantes que afectan a la calidad del agua de manera importante. Los derrames de petróleo cada día son más frecuentes en los océanos, dejan estelas de contaminación de efectos a muy largo plazo. La formación de una película impermeable

sobre el agua en las zonas de derrame afecta rápida y directamente a las aves y a los mamíferos acuáticos ya que obstruye el intercambio gaseoso y desvía los rayos luminosos que aprovecha el fitoplancton para llevar a cabo el proceso de fotosíntesis. (www.sagan-gea.org).

- **Contaminación Agrícola y Ganadera**

En la actualidad es casi imprescindible el uso de pesticidas y abonos químicos en la agricultura, los mismos se incorporan al agua por filtración del terreno hacia las aguas subterráneas.

La actividad ganadera es otro aporte importante en la contaminación del agua, fundamentalmente por la producción de grandes cantidades de residuos orgánicos en forma de purinas que producen la contaminación de los acuíferos.

- **Contaminación Doméstica y Urbana**

La contaminación doméstica se debe al uso de detergentes, para el aseo personal y del hogar. Se trata de productos variados y de muy diferentes características.

La contaminación urbana comprende el uso de vehículos que causan las emisiones de humos que depositados por la lluvia son los responsables, junto con la industria de la lluvia ácida. A esto se suman los vertidos de aceites de motor y otros líquidos derivados del petróleo, los que también son altamente nocivos.

### 1.2.5. Efectos de la Contaminación del Agua

La contaminación del agua tiene varias consecuencias en la vida animal, vegetal y desde luego en la salud humana. La presencia de nitratos en el agua potable puede producir enfermedades que pueden ser mortales en los niños. Los fertilizantes derivados de

metales pueden ser absorbidos por las cosechas y de ser ingerida, en cantidad suficiente, pueden ocasionar lesiones en algunos órganos humanos. (Starmedia).

Cuando el agua se enriquece de modo artificial con nutrientes se produce un crecimiento anormal de las plantas. La contaminación agropecuaria, forestal, atmosférica, urbana, pueden ser las causas. Esto se conoce como eutrofización que produce desde problemas estéticos como mal sabor y olor, así como el agotamiento de oxígeno en las aguas y la acumulación de sedimentos en el fondo de los lagos, así como otros cambios químicos. (WIKIPEDIA, 2010).

En general el agua contaminada se convierte en un vehículo de agentes infecciosos como virus, bacterias, helmintos, protozoarios, hongos, sustancias tóxicas perjudiciales para la salud.

### 1.2.6. Efectos de la Contaminación en Ríos y Lagos

"Los ríos se definen como la corriente natural de agua que fluye por un lecho, desde un lugar elevado a otro más bajo. La gran mayoría de los ríos desaguan en el mar o en un lago, aunque algunos desaparecen debido a que sus aguas se filtran en la tierra o se evaporan en la atmósfera". (laanunciataikerketa.com).

Los ríos representan la principal fuente de abastecimiento de agua de las poblaciones humanas. La agricultura, el transporte y la industria al utilizar sus aguas las devuelven sin previo tratamiento en la mayoría de veces, es por esta circunstancia que los ríos se ven afectados constantemente y se pueden generar problemas como la alteración de la cadena trófica, que se rompe por la presencia de materiales extraños introducidos. De esta manera algunas especies se reproducen en demasía y otras desaparecen, lo que no sucede con aguas no contaminadas en donde existe un equilibrio entre los animales y los vegetales.

### 1.2.7. Legislación Ambiental de Aguas

Para el avance del presente proyecto es necesario conocer la Normativa Ecuatoriana del Agua que se aplica en el país, por lo que hemos tomado como referencia el TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACIÓN AMBIENTAL SECUNDARIA y las NORMAS TÉCNICAS AMBIENTALES PARA EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO.

El Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria (TULAS), LIBRO VI ANEXO 1 establece:

**a.** Los límites permisibles, disposiciones y prohibiciones para las descargas en cuerpos de aguas o sistemas de alcantarillado.
**b.** Los criterios de calidad de las aguas para sus distintos usos.
**c.** Métodos y procedimientos para determinar la presencia de contaminantes en el agua.

Nosotros tomaremos como referencia la Tabla 11. Límites de descarga al sistema de alcantarillado público y la Tabla 12. Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce, del Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria, las cuales contienen 44 y 50 parámetros respectivamente.

Para obviar la mención de todos los parámetros de dichas tablas y centrarnos en los parámetros que tendrán real importancia en nuestro proyecto nos basaremos en las Normas Técnicas Ambientales para el Distrito Metropolitano de Quito, en la cual explica que toda descarga líquida proveniente de actividades industriales, comerciales, deberá ser vertida en la red pública de alcantarillado o cauce de agua cuando se haya verificado el cumplimiento de los valores máximos permisibles de los parámetros aplicables a cada tipo de actividad enlistados en el Anexo D de dicha norma técnica.
Según la tabla 1: Guía de parámetros a evaluar por actividad industrial, comercial, y servicios.

- **Lavanderías y Tintorerías**

Caudal, carga contaminante, potencial hidrógeno, temperatura, aceites y grasas, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos totales, otros como son color, tensoactivos, TPH.

De acuerdo a estos parámetros nos basaremos en el TULAS para describir los valores máximos permisibles de cada uno de ellos.

**Tabla. 1. Límites máximos permisibles**

| Parámetros | Expresado como | Unidad | Límite máximo permisible | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Descarga al sistema de alcantarillado público | Descarga a un cuerpo de agua dulce |
| Aceites y grasas | Sustancias solubles en hexano | mg/l | 100 | 0,3 |
| Caudal máximo | | l/s | 1.5 veces el caudal promedio horario del sistema de alcantarillado | |
| Color real | Color real | Unidades de color | | *Inapreciable en dilución 1/20 |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días) | $D.B.O_5$ | mg/l | 250 | 100 |
| Demanda Química de Oxígeno | DQO | mg/l | 500 | 250 |
| Potencial de hidrógeno | pH | | 5-9 | 5-9 |
| Sólidos suspendidos totales | | mg/l | 220 | 100 |
| Temperatura | °C | | <40 | <35 |
| Tensoactivos | Sustancias activas al azul de metileno | mg/l | 2,0 | 0,5 |

**Fuente**: **Texto Unificado de Legislación Ambiental – Ecuador, Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua, 2009**

# CAPÍTULO II

# INDUSTRIA TEXTIL

## 2.1. INTRODUCCIÓN

Los textiles son productos de consumo masivo que se venden en grandes cantidades. La industria textil genera gran cantidad de empleos directos e indirectos y tiene un peso importante en la economía mundial.

La industria textil se divide en los siguientes subsectores:

- **Producción de fibras:** Las fibras son las materias primas básicas de toda producción textil. Dependiendo de su origen, las fibras son generadas por la agricultura, la ganadería, la química o la petroquímica.

- **Hilandería:** Es el proceso de convertir las fibras en hilos.

- **Tejeduría:** Es el proceso de convertir hilos en telas.

- **Tintorería y acabados:** Son los procesos de teñir y mejorar las características de hilos y telas mediante procesos físicos y químicos.

- **Confección:** Es la fabricación de ropa y otros productos textiles a partir de telas, hilos y accesorios.

- **No tejidos:** Producción de telas directamente desde fibras sin pasar por procesos de hilatura y tejeduría.

Esta investigación está dirigida al subsector de ***tintorería y acabados***, ya que es una sección que necesita de la atención de todos los habitantes de la ciudad y con mayor razón de la nuestra.

Esta actividad industrial necesita de un tratamiento de las aguas antes de incorporarlas al sistema de alcantarillado. En muestras de agua tomadas en una tintorería y de acuerdo a los análisis realizados en ETAPA, se pudo determinar que éstas no cumplen la normativa del Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria. Los mismos resultados pueden verse en el **Anexo 1**.

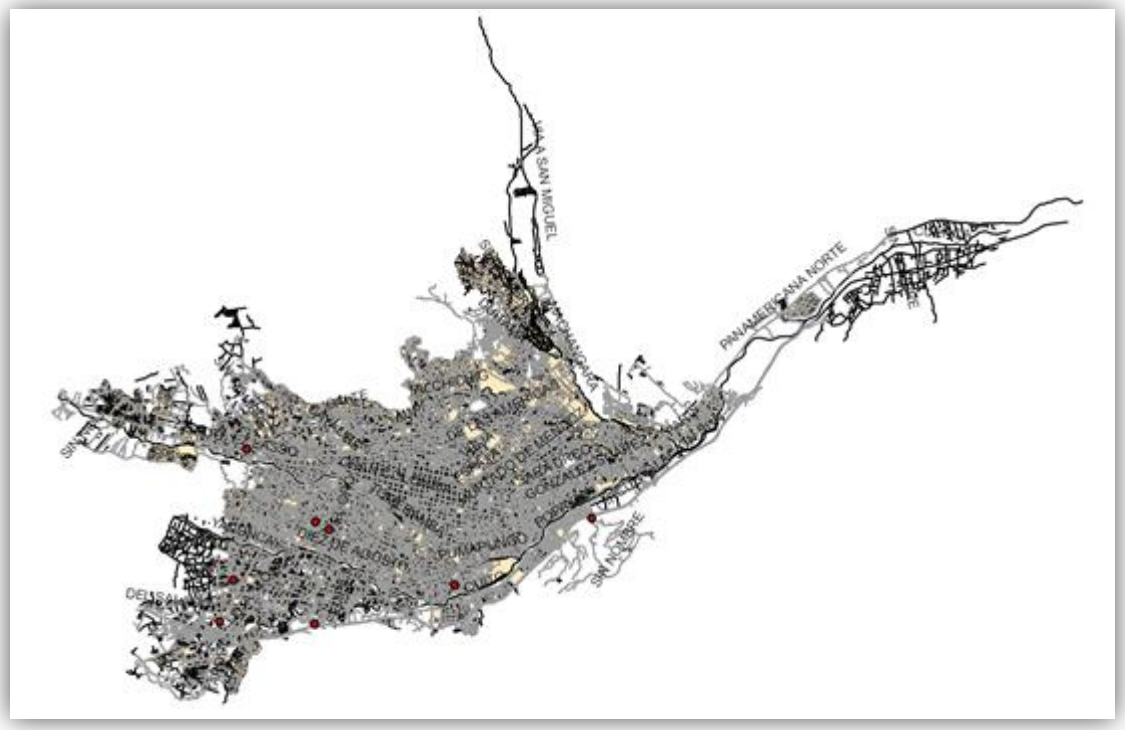
A demás del elevado consumo de agua, energía y productos químicos auxiliares, se genera una gran cantidad de agua residual; estos efluentes poseen elevadas concentraciones de colorantes, contaminantes inorgánicos, compuestos químicos sintéticos, materia en suspensión, orgánicos refractarios, tensoactivos y componentes clorados. Por lo tanto, se constituye en uno de los efluentes de más difícil tratamiento.

Los requerimientos normativos, así como la necesidad de ahorrar y reutilizar agua en la industria, hace necesario que se investigue nuevos procesos que permitan mejorar la remoción de componentes difícilmente biodegradables, partículas coloidales, virus, bacterias y que a su vez permitan la posibilidad de la incorporación del efluente en el proceso productivo. (Lorena Salazar).

La fuerte coloración de las aguas residuales de las tintorerías que se imparten a los cuerpos de descarga puede llegar a suprimir los procesos fotosintéticos en corrientes de agua, por lo que su presencia debe ser controlada. En general, las moléculas de los colorantes utilizados en la actualidad son estructuras muy variadas y complejas. La mayoría son de origen sintético, muy solubles en agua, altamente resistentes a la acción de agentes químicos y poco biodegradables.

La ciudad de Cuenca tiene cuarenta y cuatro pequeñas industrias textiles afiliadas a la Cámara de la Pequeña Industria dedicadas a alguna de las diferentes etapas que componen la cadena textil, de los cuales ocho se declaran como tintorerías o lugares en donde se realizan los procesos de lavado y tinturado de las prendas de las demás empresas textiles, y a su vez estas tintorerías cuentan con su taller propio de confección, es decir, tiñen el producto que ellos fabrican. El promedio de empleados que tiene cada tintorería es de once trabajadores.

**Figura 1. Ubicación de las tintorerías en la ciudad de Cuenca**




**Fuente: Los Autores**

Las tintorerías en la ciudad de Cuenca no están ubicadas en la zona industrial, sino dispersas por toda la ciudad de manera especial en la parte suroeste de la ciudad.

### 2.1.1. Procesos de la Industria Textil

La industria textil procesa diferentes fibras y debido a la gran diversidad de procesos, productos químicos y maquinaria empleada. Estas fábricas van desde instalaciones artesanales hasta pequeñas fábricas.

Los procesos de las empresas textiles comprenden las operaciones de: *Pre-tratamiento, teñido, y acabado.* (Figura 2.)

**a. Pre-tratamiento**

Esta fase contempla los siguientes pasos:

- ***Confección.-*** La tela adquirida viene en rollos de 1.5 metros de ancho por 500 metros de largo, la que es tendida sobre una mesa para proceder a cortarla de acuerdo a la medida requerida para cada tipo de plantilla.

  Una vez obtenidas las piezas de la prenda se realiza la costura uniendo las partes correspondientes a través de las máquinas de coser.

**Foto 1. Confección**

**Fuente: Los Autores**

Finalmente se colocan los acabados como son: cierres, pasadores, botones, se realiza la costura de las bastas y queda lista la prenda para el proceso de tinturado.

- ***Desengomado.-*** En esta operación, se remueve el agente encolante presente en los tejidos planos. Se realiza con enzimas vegetales o animales para descomponer la goma en una forma soluble, y así poder cambiar de una tela áspera a una más suave para los siguientes procesos. En esta fase se utilizan 300 litros de agua.

- ***Encimado.-*** En este proceso se usa el ácido acético, la piedra pómez y enzimas. Estos tres compuestos se usan para darle una apariencia de desgaste a la prenda. En esta operación se usan 150 litros de agua.

- ***Focalizado.-*** En este paso, que es opcional, la prenda es colocada en un mecanismo que permite extender la tela, lo que facilita la aplicación del permanganato de potasio, que es el agente que realiza la decoloración en determinadas zonas.

**Foto 2. Focalizado**

**Fuente: Los Autores**

- ***Reducción.-*** En este proceso se puede realizar dos fases; la de dirti o stong, dependiendo de lo que se requiera. En ambos se utiliza el silicato de sodio, con la diferencia que el primero tiene como finalidad cambiar el color, dar un aspecto de sucio en la parte en donde se haya hecho el focalizado anteriormente de la prenda. En este paso se adiciona glucosa de maíz; mientras que el stong es para que la prenda que no haya recibido focalizado, tome un aspecto más claro. En este último se utiliza sosa cáustica.

**b. Teñido**

Esta parte del proceso consta de:

- ***Tinturado o teñido***.- Es la etapa más compleja dentro de las operaciones de procesamiento húmedo; involucra una gran variedad de colorantes y agentes auxiliares de teñido como el carbosol y el humectal, éstos proveen el medio químico para su difusión y fijación sobre la fibra.
  En la actualidad se usan los colorantes directos y los sulfurosos en la pequeña industria.
  En el proceso de teñido la tela debe estar libre de grasas, gomas, minerales e impurezas y tener afinidad con los colorantes.

- ***Fijación.-*** Este proceso utiliza el peróxido de hidrógeno y el ácido fórmico que permite incrementar la afinidad de los colorantes sobre la fibra.

**c. Acabado**

Esta parte del proceso contempla:

- ***Suavizado.-*** El suavizante proporciona esponjosidad. Hace que las prendas sean más fáciles de planchar y ayudan a reducir la aparición de arrugas.
  Los ingredientes más importantes de los suavizantes son los tensoactivos catiónicos, habitualmente del tipo amonio cuaternario. Estos tensoactivos se adhieren a las fibras del tejido, proporcionando suavidad. Para realizar este proceso se utilizan 200 litros de agua.

- ***Enjuague.-*** Es el último tratamiento que recibe la tela en las lavadoras industriales para luego pasar a la centrífuga y/o exprimidoras.

**Foto 3. Lavadora industrial**

**Foto 4. Exprimidora**

**Fuente: Los Autores**

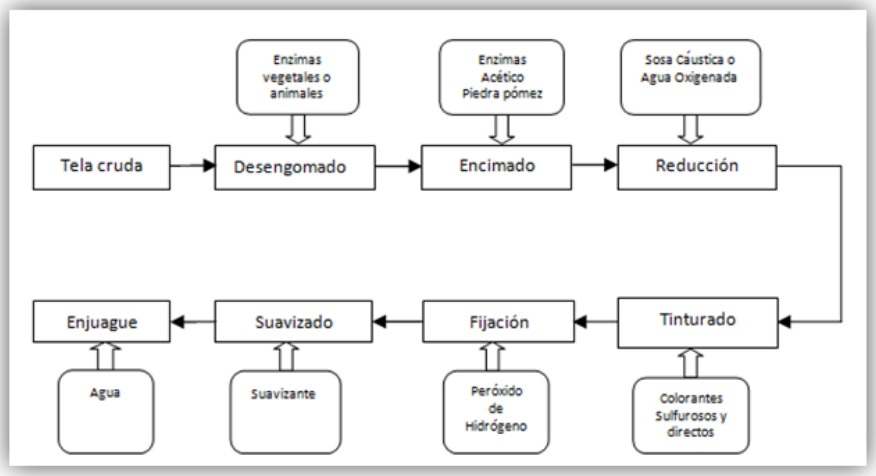
Por último la prenda debe pasar por las secadoras industriales para brindarle propiedades finales de apariencia, suavidad, sin rastros de arrugas y repelencia.

**Foto 5. Secadora industrial**

**Fuente: Los Autores**

En la figura 2. Se muestra un resumen de los distintos procesos que realizan las tintorerías.

**Figura 2. Esquema de un proceso típico en la industria textil**




**Fuente: Los Autores**

En cada proceso se emite una descarga de agua que contribuye en la carga total contaminante y por ende en la composición del agua residual.

**Foto 6. Carga residual**

**Fuente: Los Autores**

La carga contaminante del desengomado está dada por sólidos suspendidos y disueltos, grasas y aceites. Esta etapa contribuye aproximadamente en un 50% del total de sólidos suspendidos producidos por la planta, en la que el desengomado contribuye muy poco o nada a la alcalinidad/acidez de las corrientes residuales

En el encimado se produce cantidad de sólidos totales por la piedra pómez usada. El ácido acético que se utiliza puede causar irritación de nariz, garganta, y el contacto con la piel puede producir quemaduras severas. También puede ocasionar irritación en los ojos.

En la reducción se emplea el silicato de sodio, no combustible y poco tóxico, la sosa cáustica que se utiliza produce los mismos efectos sobre la carga contaminante que el desengomado, además de causar una elevada alcalinidad y color grisáceo en el agua residual. Por lo general no es posible recuperar este agente químico por los altos costos que esto conlleva.

El aporte a la carga contaminante de los procesos de teñido o tinturado es muy significativo y depende del tipo de colorante utilizado, por lo general se presentan altas cantidades de sólidos suspendidos y altas cantidades de DQO y $DBO_5$; y como ya se había mencionado anteriormente los colorantes afectan severamente el agua de ríos y lagos, pues las distintas tonalidades impiden el paso de la luz solar, la cual es importante para llevar a cabo el proceso fotosintético.

La fijación es realizada con peróxido de hidrógeno, este debe ser manejado con cuidado ya que puede causar efectos en el sistema nervioso central, irritación severa en los tractos respiratorio y digestivo e irritación en la piel con posibles quemaduras. Además que el ácido fórmico es de olor irritante y debe tenerse precaución de no tener contacto con la piel ya que causa ampollas dolorosas que se revientan y sangran.

Los suavizantes son productos contaminantes para el medio, ya que los tensoactivos facilitan que la suciedad se separe de las fibras pero también son responsables de las alergias y trastornos cutáneos, así como de la espuma cada vez más frecuente en los cursos de agua.

En el enjuague se puede encontrar uno o todos los contaminantes descritos anteriormente.

### 2.1.2. Características de las Aguas Residuales de la Industria Textil

"De los 200 mil millones de $m^3$ de agua dulce disponible para la industria a nivel mundial, 2.5 mil millones de $m^3$ es decir el 1.25% corresponde a industrias textiles, la cual estará altamente contaminada después de los procesos." (Adriana Aristizabal, Catalina Bermúdez, 2007).

Para la fabricación de una tonelada de producto textil se consume alrededor de 200 toneladas de agua y del total de productos químicos utilizados cerca del 90% es vertido como desecho después de cumplir su misión.

Las aguas residuales textiles son irregulares y variables en su composición ya que dependen de la unidad de proceso y la operación que se efectúe.

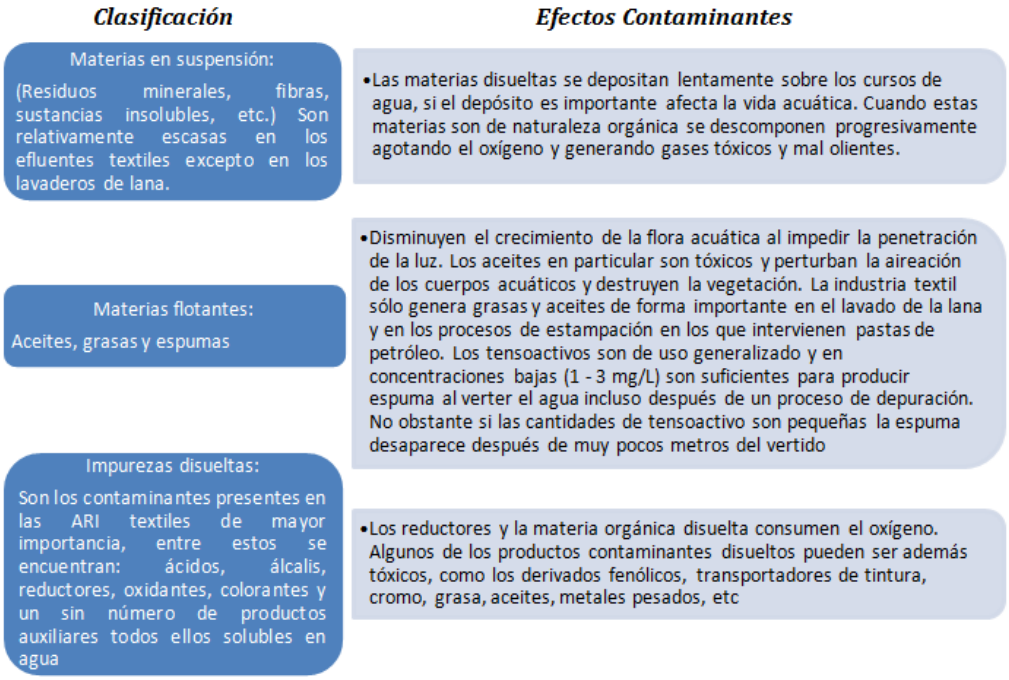
Las industrias textiles son contaminantes en términos de volumen y complejidad de sus efluentes ya que cada una de las actividades que realizan genera agua residual de características muy variables; para tener una idea del tipo de impacto ambiental que tendrán estas aguas residuales, se ha tomado la muestra más común y más contaminante dentro del proceso de tinturado cuya base principal es el colorante negro sulfuroso, para luego ser analizado en los laboratorios de ETAPA. La muestra en mención arrojó los resultados que pueden verse en el **Anexo 1**.

Como se puede observar las aguas residuales de esta tintorería exceden los límites máximos permisibles según el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria mencionados en la sección anterior.

Es por esta razón que en nuestra investigación se busca cumplir con los requerimientos ambientales de vertimiento del agua residual de la industria textil, así como contrarrestar la contaminación ambiental producida en el proceso industrial y mejorar la calidad de vida.

En la figura 3. Se clasifican los contaminantes de las aguas residuales textiles y sus efectos.

**Figura 3. Clasificación general de los contaminantes de las industrias textiles**




**Fuente: (Adriana Aristizabal, Catalina Bermúdez, 2007)**

## 2.2. ELECTROQUÍMICA

**2.2.1. Definición.-** Es una rama de la química que estudia la transformación entre la energía eléctrica y la energía química. En otras palabras, las reacciones químicas que se dan en la interfase de un conductor eléctrico (llamado electrodo, que puede ser un metal o un semiconductor) y un conductor iónico (el electrolito) pudiendo ser una disolución y en algunos casos especiales, un sólido.

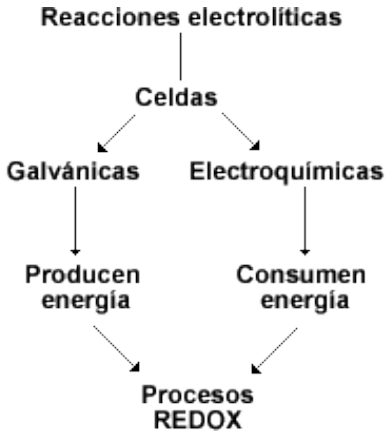
Si una reacción química es conducida mediante una diferencia de potencial aplicada externamente, se hace referencia a una electrólisis.

Las reacciones químicas donde se produce una transferencia de electrones entre moléculas se conocen como reacciones redox, y su importancia en la electroquímica es vital, pues mediante este tipo de reacciones se llevan a cabo los procesos que generan electricidad o en caso contrario, son producidos como consecuencia de ella.

En general, la electroquímica se encarga de estudiar las situaciones donde se dan reacciones de oxidación y reducción encontrándose separadas, físicamente o temporalmente, se encuentran en un entorno conectado a un circuito eléctrico. Esto último es motivo de estudio de la química analítica, en una sub-disciplina conocida como análisis potencio-métrico.

La electroquímica estudia los cambios químicos que producen una corriente eléctrica y la generación de electricidad mediante reacciones químicas. Es por ello, que el campo de la electroquímica ha sido dividido en dos grandes secciones. La primera de ellas es la electrólisis, la cual se refiere a las reacciones químicas que se producen por acción de una corriente eléctrica. La otra sección se refiere a aquellas reacciones químicas que generan una corriente eléctrica, éste proceso se lleva a cabo en una celda o pila galvánica.

**Figura 4. Reacciones electrolíticas**




**Fuente: Fundación Educativa Héctor García**

### 2.2.2. Principios

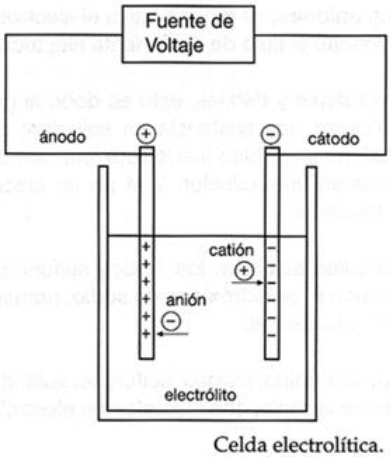
#### 2.2.2.1 Reacciones de Reducción-Oxidación

Las reacciones de **reducción-oxidación** son las reacciones de transferencia de electrones. Esta transferencia se produce entre un conjunto de elementos químicos, uno oxidante y uno reductor (una forma reducida y una forma oxidada respectivamente). En dichas reacciones la energía liberada de una reacción espontánea se convierte en electricidad o bien se puede aprovechar para inducir una reacción química no espontánea.

#### 2.2.2.2. Celdas Electrolíticas

Son aquellas en las cuales la energía eléctrica, que procede de una fuente externa provoca reacciones químicas no espontáneas generando un proceso denominado electrólisis. Las celdas electrolíticas constan de un recipiente para el material de reacción, dos electrodos sumergidos dentro de dicho material y conectados a una fuente de corriente directa.

**Figura 5. Celdas electrolíticas**




Celda electrolítica.

**Fuente: (Secretaría de Educación Pública)**

### 2.2.2.3. Celdas Electroquímicas

Celdas voltaicas o galvánicas son celdas electroquímicas en las cuales las reacciones espontáneas de óxido-reducción producen energía eléctrica. Las dos mitades de la reacción de óxido reducción, se encuentran separadas, por lo que la transferencia de electrones debe efectuarse a través de un circuito externo.

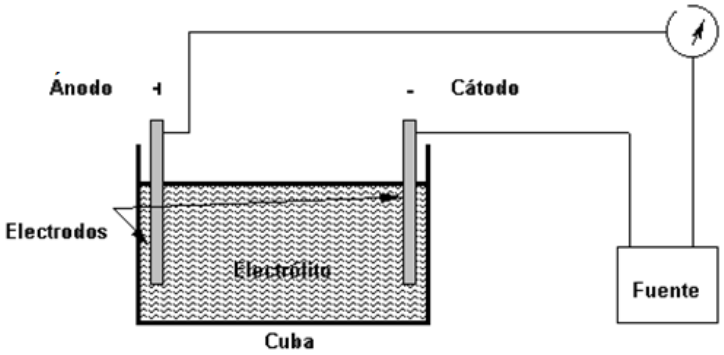
Es el dispositivo utilizado para la descomposición mediante corriente eléctrica de sustancias ionizadas denominadas electrolitos. También se conoce como celda galvánica o voltaica, en honor de los científicos Luigi Galvani y Alessandro Volta, quienes fabricaron las primeras de este tipo a fines del S. XVIII. (Wikipedia, 2010).

La celda electroquímica o voltaica se basa en la separación física de los agentes oxidantes y reductores. Un puente electrolítico une las secciones separadas de modo que los iones pueden fluir aun cuando la transferencia de electrones no pueda ocurrir directamente. El voltaje producido actúa como fuerza impulsora para el movimiento de los electrones por un conductor externo. Este flujo de electrones se puede aprovechar como en cualquier batería.

La tendencia de los iones y átomos a oxidarse o reducirse es una propiedad química peculiar a la estructura del átomo o ion. Cuando una substancia que pierde electrones con facilidad (oxidación) se acopla a una que atrae con fuerza electrones (reducción), se dispone de dos componentes de una buena pila voltaica.

### 2.2.2.4 Electrólisis

**Figura 6. Electrólisis**




**Fuente http://www.fisicanet.com.ar/fisica/tp05_muv_problema02.php**

La electrólisis es un proceso para separar un compuesto en los elementos que lo conforman, usando para ello la electricidad.

La electrólisis como proceso de Óxido – Reducción: Se tiene un recipiente o cuba electrolítica compuesta por dos electrodos inertes conectados a una fuente de corriente. Al colocar una solución electrolítica en el recipiente y hacer pasar una corriente eléctrica, los iones positivos de la solución se mueven hacia el cátodo (cationes) y los iones negativos hacia el ánodo (aniones). La reducción ocurre en el cátodo y la oxidación en el ánodo.

El electrodo conectado al polo negativo se conoce como cátodo, (aleación de hierro) y el conectado al positivo como ánodo, (aleación de aluminio).

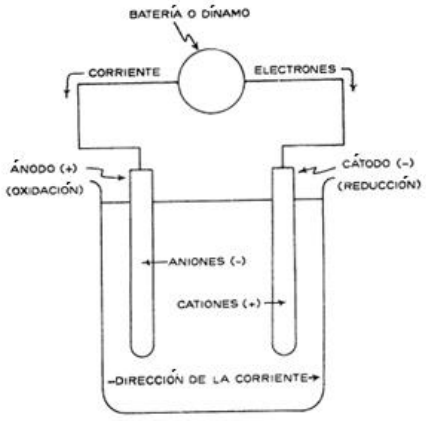
Cada electrodo atrae a los iones de carga opuesta. Así, los iones negativos, o aniones, son atraídos y se desplazan hacia el ánodo (electrodo positivo), mientras que los iones positivos, o cationes, son atraídos y se desplazan hacia el cátodo (electrodo negativo).

La descomposición del líquido conductor no se manifiesta en toda su masa, sino únicamente en los puntos de entrada y salida de la corriente.

El líquido conductor se llama electrolito; los conductores metálicos, generalmente en forma de placa, necesarios para hacer llegar la corriente al líquido, son llamados electrodos designándole con el nombre de ánodo (+) aquel por donde penetra la corriente y cátodo (-) aquel por donde sale. (Licencia Creative Commons Reconocimiento Compartir Igual 3.0, 2010)

### 2.2.2.5 Electrodos

**Figura 7. Electrodos**

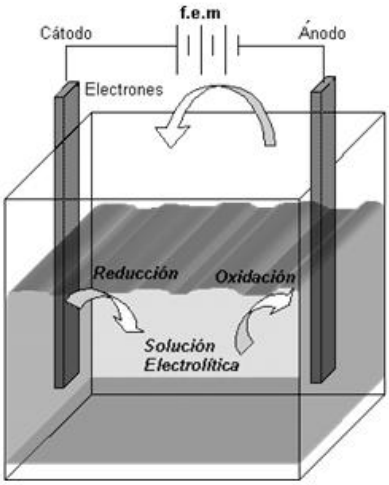



**Fuente: http://www.index.com/content&view_category&id_233&Itemid**

Un electrodo es una placa de membrana rugosa de metal, un conductor utilizado para hacer contacto con una parte *no metálica* de un circuito, por ejemplo un semiconductor, un electrolito, el vacío (en una válvula termoiónica), un gas (en una lámpara de neón), etc.

### 2.2.2.6 Electrolito

**Figura 8. Electrolito**




**Fuente http://www.fisicanet.com.ar/fisica/tp05_muv_problema02.php**

Un electrolito o electrólito es cualquier sustancia que contiene iones libres, los que se comportan como un medio conductor eléctrico. Debido a que generalmente se forman de iones en solución, los electrólitos también son conocidos como soluciones iónicas, pero también son posibles electrolitos fundidos y electrolitos sólidos. (Wikipedia, 2010).

Cuando se colocan electrodos en un electrólito y se aplica un voltaje, el electrólito conducirá electricidad. Los electrones solos, normalmente no pueden pasar a través del electrólito; en vez de ello, una reacción química sucede en el cátodo, consumiendo los electrones del cátodo, y otra reacción ocurre en el ánodo, produciendo electrones para ser capturados por el ánodo. Como resultado, una nube de carga negativa se desarrolla en el electrólito alrededor del cátodo, y una carga positiva se desarrolla alrededor del ánodo. Los iones en el electrólito se mueven para neutralizar estas cargas para que las reacciones puedan continuar y los electrones puedan seguir fluyendo.

### 2.2.3. Corriente Eléctrica y Movimiento de Iones

La mayoría de los compuestos inorgánicos y algunos de los orgánicos se ionizan al fundirse o cuando se disuelven en agua u otros líquidos; es decir, sus moléculas se disocian en especies químicas cargadas positiva y negativamente que tienen la propiedad de conducir la corriente eléctrica. Si se coloca un par de electrodos en una disolución de un electrólito (compuesto ionizable) y se conecta una fuente de corriente continua entre ellos, los iones positivos de la disolución se mueven hacia el electrodo negativo y los iones negativos hacia el positivo. Al llegar a los electrodos, los iones pueden ganar o perder electrones y transformarse en átomos neutros o moléculas; la naturaleza de las reacciones del electrodo depende de la diferencia de potencial o voltaje aplicado. (Laboratorio de Química).

### 2.2.4. Métodos Electroquímicos de Tratamiento de Aguas Residuales

La búsqueda de nuevos tratamientos para combatir la contaminación ambiental, ha llevado a los científicos a considerar la utilización de los métodos electroquímicos para transformar y remover los contaminantes de efluentes.

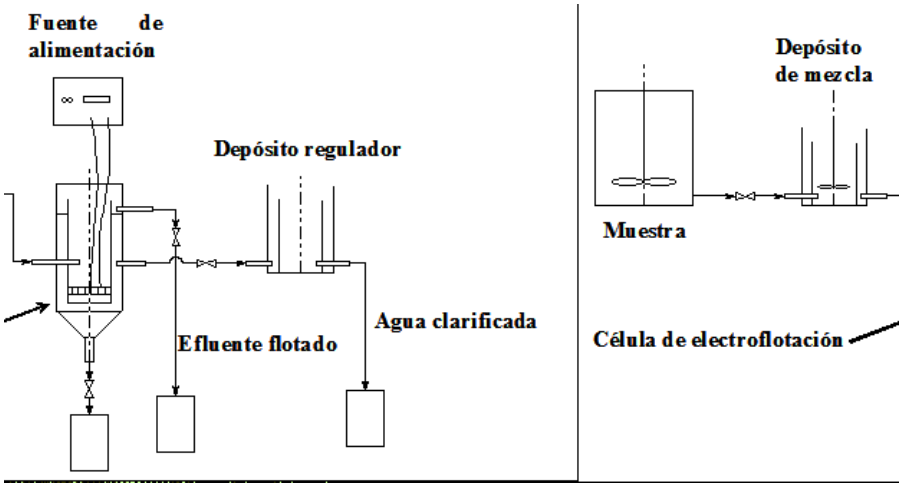
Los métodos electroquímicos de tratamiento de aguas residuales como la electroflotación, electro decantación y la electrocoagulación, involucran el uso de una celda electrolítica y un par de electrodos metálicos a través de los cuales se hace circular una corriente eléctrica. Sistemas electroquímicos pequeños son viables y en vez de usar reactivos químicos y microorganismos, el sistema emplea electrones para realizar el tratamiento. Estos métodos utilizan una instrumentación robusta y compacta, fácil de conseguir que ofrezcan la posibilidad de una fácil distribución y potencialmente pueden reemplazar procesos sofisticados, ya que requieren contenedores de poca capacidad. Entre las ventajas de los métodos electroquímicos se encuentran los beneficios ambientales, de compatibilidad, versatilidad, eficiencia de energía, seguridad, selectividad, facilidad de automatización del proceso y bajos costos. Los métodos

electroquímicos han sido estudiados pero pocos autores se han enfocado en las variables que son cruciales para el mejoramiento del desempeño de estas aplicaciones.

De todas las técnicas electroquímicas conocidas se tiene mayor interés en emplear la electrocoagulación como método de tratamiento de aguas residuales que contengan metales pesados, residuos de grasa, tintes textiles, partículas suspendidas, suspensiones acuosas de partículas ultra finas, nitratos, fenoles, arsénico y contaminantes orgánicos, y se emplea para potabilizar agua.

### 2.2.4.1. Electroflotación

**Figura 9. Electroflotación**



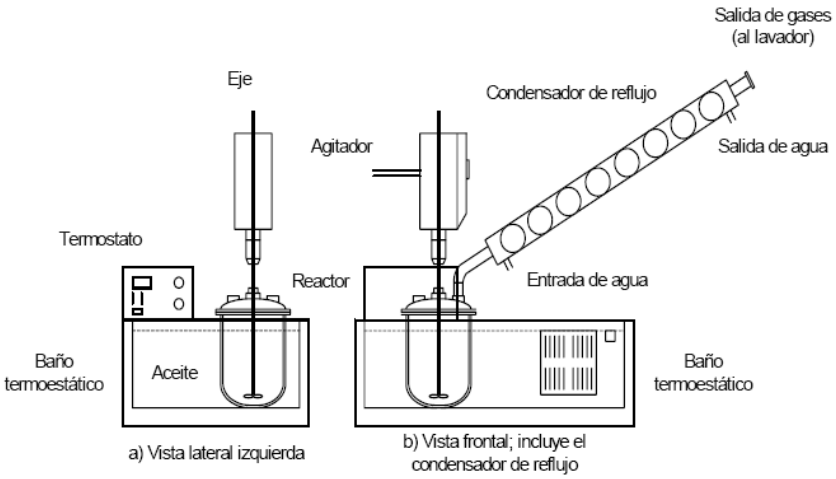

**Fuente:** http://www.ucm.es/info/iqpapel/equipos/electroflotacion.htm

El sistema de electroflotación se realiza en un tanque por el que pasa el efluente a tratar. En el fondo de éste, se localizan los electrodos de modo que el cátodo queda por encima del ánodo. A través de estos electrodos, circula una corriente eléctrica que provoca la electrólisis del agua con la consiguiente formación de pequeñas burbujas de oxígeno (en el ánodo) y de hidrógeno en el cátodo. Dichas burbujas arrastrarán en su trayectoria ascendente hacia la superficie, las pequeñas partículas que se encuentren en suspensión en el efluente a tratar. Para favorecer la eliminación de los contaminantes se utilizan floculantes antes de tratar el agua en el sistema de electroflotación.

Este método se utiliza generalmente en el destintado de pastas papelera, eliminación de materia disuelta y coloidal de aguas papeleras, determinación de la eficacia de los agentes de control de la materia disuelta y coloidal en el proceso de electroflotación.

### 2.2.4.2. Electro decantación

**Figura 10. Electro decantación**

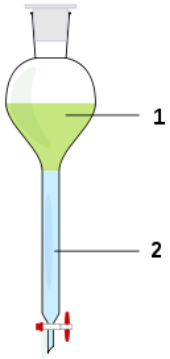



**Fuente: http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S07180&script=sci_arttext**

Electro decantación, separación por gravedad acelerado con campo eléctrico.
La electro decantación, está compuesta por un sedimentador de alta tasa, placas paralelas con barras de electrodos para campo magnético.

La decantación es un método físico de separación de mezclas heterogéneas, estas mezclas pueden ser formadas por un líquido y un sólido, o por dos líquidos. Es necesario dejar en reposo para que el sólido se sedimente, es decir, descienda y sea posible su extracción.

**Figura 11. Separación de un líquido y un sólido**




**Fuente: http://losmetalicosquimica122a.blogspot.com/2010_10_01_archive.html**

### 2.2.4.3. Electrocoagulación (ADRIANA ARISTIZÁBAL CASTRILLÓN, 2007)

La electrocoagulación es un método electroquímico de tratamiento de aguas contaminadas donde un electrodo de sacrificio se corroe para que se lleve a cabo la coagulación.

La electrocoagulación es un proceso complicado que envuelve varios mecanismos químicos y fenómenos físicos, que emplea electrodos consumibles para suplir iones en el agua residual.

Un proceso de electrocoagulación involucra tres etapas sucesivas:

- Formación de los coagulantes por oxidación electrolítica del electrodo de sacrificio.

- Desestabilización de los contaminantes, partículas suspendidas y rompimiento de la emulsión.

- Agregación de las fases desestabilizadas para formar flocs.

El mecanismo de desestabilización de los contaminantes, partículas suspendidas y del rompimiento de emulsión se describe a continuación:

- Compresión de la doble capa difusiva alrededor de las especies cargadas por la interacción de los iones generados por la oxidación del ánodo de sacrificio.

- Neutralización de las cargas de las especies iónicas presentes en el agua residual ocasionada por los iones coagulantes producidos por disolución electroquímica del ánodo de sacrificio. Estos iones coagulantes reducen la repulsión electrostática entre partículas lo que causa la coagulación y de este proceso resulta una carga neta igual a cero.

- Los flocs que se forman como resultado de la coagulación crean una capa de lodos que atrapa y conduce las partículas coloidales que permanecen en el medio acuoso.

Las siguientes reacciones fisicoquímicas tienen lugar en una celda de electrocoagulación:

- Reducción catódica de las impurezas presentes en el agua residual.

- Descarga y coagulación de las partículas coloidales.

- Migración electroforética de iones en solución.

- Electroflotación de las partículas coaguladas ocasionada por las burbujas de hidrógeno y oxígeno producidas por los electrodos.

- Reducción de los iones metálicos en el cátodo.

- Otros procesos químicos y electroquímicos.

Sobre este tema se tratará con mayor énfasis en el siguiente capítulo.

# CAPÍTULO III

# SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN

## 3.1. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN

### 3.1.1. Celda Electrolítica

Una celda electrolítica es básicamente un recipiente que consta de un líquido conductor llamado electrolito o solución electrolítica, además de dos electrodos que se encuentran sumergidos en el mismo. (Ver figura 6 del capítulo anterior.).

La celda como tal no sirve como fuente de energía eléctrica, pero puede conducir corriente continua desde una fuente externa, la misma que alimenta a los electrodos.
La energía eléctrica que brinda la fuente de poder se convierte en energía química por medio de las placas metálicas que reaccionan directamente con el electrolito.

**Foto 6. Montaje del sistema para electrocoagulación**

**Fuente: Los Autores**

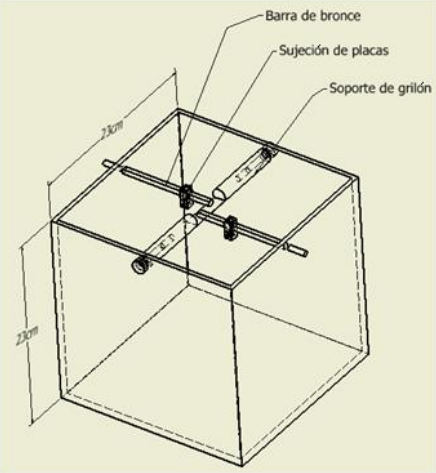
### 3.1.2. Construcción de la Cuba

En nuestra investigación, se construyó una cuba de vidrio de 23cm por cada lado, la misma que tiene una capacidad de 9 litros en donde se colocó un soporte de nylon 6,6 (grilón) que atraviesa la cuba de lado a lado, se escogió este tipo de material ya que no

presenta conductividad térmica ni eléctrica y sirve como sostén de las dos barras de bronce que posteriormente se verán como sujeción de los electrodos.

Para la fabricación de la cuba de vidrio se tomaron en cuenta dos factores la capacidad de la fuente y la cantidad de solución que se necesita para la práctica.

**Figura 12. Dimensiones de la celda para electrocoagulación**




**Fuente: Los Autores**

### 3.1.3. Fuente de Poder

Fuente de poder o de alimentación es un dispositivo que convierte la tensión alterna de la red de suministro, en una o varias tensiones, prácticamente continuas. Para esto consta de un rectificador, fusibles y otros componentes que le permiten recibir la electricidad, regular, filtrarla y adaptarla a las necesidades del aparato electrónico al que se conecta. (definición.de).

#### 3.1.3.1. Características de la Fuente Poder

Para armar el sistema de electrocoagulación propuesto obtuvimos una fuente que tiene las siguientes características:

- Fuente de poder con Display de led digital;

- Dimensiones de 291 x 158 x 136 mm,
- Peso 4 kilogramos,
- Tensión de entrada 110/220 V de corriente alterna,
- Tensión de salida 0 – 30 V de corriente continua.

### 3.1.4. Electrodos

Un electrodo en una celda electroquímica se refiere a cualquiera de los dos conceptos, sea ánodo o cátodo. El ánodo es el electrodo sobre el que se produce la oxidación. El agente reductor pierde electrones y por tanto se oxida, y el cátodo es el electrodo sobre el que se produce la reducción. El agente oxidante gana electrones y por tanto se reduce. (Ver figura 8 del capítulo anterior).

#### 3.1.4.1. Dimensiones, Disposición y Descripción de los Electrodos

***a. Material de los electrodos***

Para el trabajo de investigación se utilizaron electrodos de aleación de hierro y aleación de aluminio por las siguientes razones:

- Disponibilidad de metales.
- Son materiales relativamente baratos.

***b. Dimensiones y disposición de los electrodos***

Los electrodos se diseñaron como placas rectangulares dispuestas en paralelo. Comercialmente estos metales se encuentran disponibles como láminas de distinto espesor para nuestra práctica hemos usado un ***espesor de 0.4 mm y dimensiones de 19.4 x 14.8 cm***, las medidas de los electrodos deberán de tener la mayor área superficial posible en concordancia con la cuba de vidrio. Se estableció una distancia de 3 cm entre las placas.

### c. *Descripción de los electrodos*

#### i. **Aleación del hierro** (Wikipedia)

Se considera que acero es una aleación de hierro y carbono, donde el carbono no supera el 2,1% en peso de la composición de la aleación, alcanzando normalmente porcentajes entre el 0,2% y el 0,3%. Porcentajes mayores que el 2,0% de carbono dan lugar a las fundiciones, aleaciones que al ser quebradizas y no poderse forjar a diferencia de los aceros, se moldean.

La ingeniería metalúrgica trata al acero como una familia muy numerosa de aleaciones metálicas, teniendo como base la aleación hierro-carbono. El hierro es un metal relativamente duro y tenaz, con temperatura de fusión de 1.535 °C y punto de ebullición 2.740 °C. Mientras el carbono es un no metal, blando y frágil en la mayoría de sus formas alotrópicas (excepto en la forma de diamante en que su estructura cristalográfica lo hace el más duro de los materiales conocidos).

El acero es el más popular de las aleaciones, es la combinación entre un metal (el hierro) y un no metal (el carbono), que conserva las características metálicas del primero, pero con propiedades notablemente mejoradas gracias a la adición del segundo y de otros elementos metálicos y no metálicos. De tal forma, no se debe confundir el hierro con el acero, dado que el hierro es un metal en estado puro al que se le mejoran sus propiedades físico-químicas con la adición de carbono y demás elementos.

La definición anterior, sin embargo, se circunscribe a los aceros al carbono en los que este último es el único aleante o los demás presentes lo están en cantidades muy pequeñas. De hecho existen multitud de tipos de acero con composiciones muy diversas que reciben denominaciones específicas en virtud, ya sea de los elementos que

predominan en su composición, de su susceptibilidad a ciertos tratamientos, de alguna característica potenciada e incluso en función de su uso.
Por la variedad ya apuntada y por su disponibilidad sus dos elementos primordiales abundan en la naturaleza facilitando su producción en cantidades industriales.

Los aceros son las aleaciones más utilizadas en la construcción de maquinaria, herramientas, edificios y obras públicas, que han contribuido al alto nivel de desarrollo tecnológico de las sociedades industrializadas.

Las aleaciones, al igual que los metales puros, poseen brillo metálico y conducen bien el calor y la electricidad

Las aleaciones férreas presentan una gran variedad de propiedades mecánicas dependiendo de su composición o el tratamiento que se haya llevado a cabo.

La aleación de hierro utilizada en nuestra investigación es un acero bajo en carbono que tiene menos del 0,25% de C en peso. Es blando pero dúctil.

En nuestro trabajo de laboratorio utilizamos una aleación de hierro con las características que se presentan a continuación:

Calidad de Acero ASTM A 653 CS B (IPAC, 2011)

**Tabla 2: Composición de aleación del hierro**

| Colada | %C | %S | %Mn | %Si | %P | %Cu | %Al |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1045968 | 0.05 | 0.025 | 0.24 | 0.02 | 0.014 | | |

**Tabla 3: Propiedades mecánicas de aleación del hierro**

| Colada | Tipo | Fluencia (Fy) Mpa | Tracción T.S. Mpa. | Dureza (HRB) | Elongación % |
|---|---|---|---|---|---|
| 1045968 | ASTM A 653 CS | 310 | 395 | 39.5 | 44.5 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | B | | | | |

**ii. Aleación del aluminio** (Wikipedia)

Las aleaciones de aluminio son aleaciones obtenidas a partir de aluminio y otros elementos, generalmente cobre, zinc, manganeso, magnesio o silicio. Forman parte de las llamadas aleaciones ligeras, con una densidad mucho menor que los aceros. Las aleaciones de aluminio tienen como principal objetivo mejorar la dureza y resistencia del aluminio, que es en estado puro un metal muy blando.

Desde el punto de vista físico, el aluminio puro posee una resistencia muy baja a la tracción y una dureza escasa. En cambio, unido en aleación con otros elementos, el aluminio adquiere características mecánicas muy superiores. La primera aleación resistente de aluminio descubierta fue el duraluminio, y puede haber distintas composiciones de aluminio en el mercado. Es importante considerar las propiedades que éstas presentan, pues, en la industria de la manufactura, unas son más favorables que otras.

- **Aportaciones de los elementos aleantes:**

Los principales elementos aleantes del aluminio son los siguientes y se enumeran las ventajas que proporcionan.

**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.

**Escandio (Sc)** Mejora la soldadura.

La aleación de aluminio utilizada en las prácticas de laboratorio y la más común en el mercado es el duraluminio la misma que tiene los siguientes compuestos.

**Tabla 4: Composición de aleación del aluminio (duraluminio)**

| %Cu | %Mg | %Mn | %Zinc |
|---|---|---|---|
| 3-5 | 0.5-2 | 0.25-1 | 3.5-5 |

## 3.2. MATERIALES, SUSTANCIAS Y EQUIPOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO

### 3.2.1. Materiales

a. ***Luna de reloj.-*** Es un instrumento de química que se usa para pesar sustancias sólidas o desecar pequeñas cantidades en disolución.

   En la práctica se utilizó este instrumento para pesar el colorante y la sosa cáustica.

b. ***Balón de aforo.-*** Se emplea para medir con exactitud un volumen determinado de líquido. La marca de graduación rodea todo el cuello de vidrio, por lo cual es fácil determinar con precisión cuando el líquido llega hasta la marca.

   En la práctica se utilizó para aforar la solución de sosa cáustica que nos ayudaría a subir el pH.

c. ***Tiras de pH.-*** El pH es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución. Las tiras de test disponible se sumergen en la solución de estudio y se lee los resultados comparando con una escala de colores.

d. ***Pipeta.-*** Se encuentra formada por un tubo transparente de vidrio o plástico, que termina en una de sus puntas de forma coniforme o cónica. Su función principal es medir la cantidad de líquido.

- En nuestras prácticas usamos 2 pipetas de vidrio de 10 ml.

e. ***Trípode.-*** Uno de los objetivos del trípode es sujetar con mayor comodidad cualquier material que se use en el laboratorio.

En las marchas de sólidos suspendidos se usaron trípodes para sostener el embudo.

f. ***Cuba de vidrio.-*** Se construyó una cuba de vidrio de 23 cm por cada lado, la misma que será usada como celda electrolítica en el proceso de electrocoagulación.

g. ***Embudo.-*** Se utilizaron embudos de plástico para realizar las marchas de sólidos suspendidos.

h. ***Láminas de aleación de hierro y aleación de aluminio.-*** Las láminas fueron de las mismas dimensiones de 19.4 x 14.8 cm.

i. ***Filtro de tela.-*** Se usó un filtro de tela para la preparación de la solución a tratar.

j. ***Papel filtro.-*** Se usó papel filtro para la realización de las marchas sólidos suspendidos y sólidos disueltos.

**k.** ***Foco de luz infrarrojo.-*** Se usó un foco grande infrarrojo de alta temperatura ya que este emite calor, y nos ayudó en las marchas de sólidos suspendidos y disueltos, evaporando el agua excedente en la muestras.

**l.** ***Papel aluminio.-*** Se usaron recortes de papel aluminio, los mismos que de acuerdo a un molde servían de recipientes donde se colocaba el agua a evaporarse para realizar la marcha de sólidos disueltos.

**m.** ***Envases plásticos.-*** Se usaron varios envases plásticos para almacenar el agua producto para las marchas de sólidos suspendidos y disueltos.

**n.** ***Recipiente plástico.-*** Se usó un recipiente plástico con capacidad de 10 litros para realizar la mezcla del agua con colorante.

### 3.2.2. Sustancias

***a.*** ***Sosa cáustica.-*** El hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido sódico, también conocido como sosa cáustica o soda cáustica, es un hidróxido cáustico usado en la industria (principalmente como una base química), es un sólido blanco que absorbe humedad, se disuelve muy bien en el agua liberando calor. También se usa en el procesamiento de textiles de algodón, lavandería y blanqueado, revestimiento de óxidos, galvanoplastia y extracción electrolítica. (Wikipedia)**.**

El hidróxido de sodio que utilizamos nos sirvió básicamente para ajustar el pH en la solución del tratamiento pasando de pH bajo a un pH alto**.**

A continuación se describe las especificaciones del hidróxido de sodio (NAOH) utilizado en el laboratorio: M=40.00 g/mol

**Tabla 5: Especificación del hidróxido de sodio**

| Elementos | % |
|---|---|
| Assay (acidimetric, NaOH) | ≤ 99 |
| Carbonate (as $Na_2CO_3$) | ≤ 1 |
| Chloride (Cl) | ≤ 0.0005 |
| Phosphate ($PO_4$) | ≤ 0.0005 |
| Silicate ($SiO_2$) | ≤ 0.001 |
| Sulphate ($SO_4$) | ≤ 0.0005 |
| Total nitrogen (N) | ≤ 0.0003 |
| Heavy metals (as Pb) | ≤ 0.0005 |
| Al (Aluminium) | ≤ 0.0005 |
| As (Arsenic) | ≤ 0.0001 |
| Ca (Calcium) | ≤ 0.0005 |
| Cu (Copper) | ≤ 0.0002 |
| Fe (Iron) | ≤ 0.0005 |
| K (Potassium) | ≤ 0.05 |
| Mg (Magnesium) | ≤ 0.0005 |
| Ni (Nickel) | ≤ 0.00025 |
| Pb (Lead) | ≤ 0.0005 |
| Zn (Zinc) | ≤ 0.0001 |

Merck KGaA

www.merck-chemicals.com

**b.** ***Colorante Negro Sulfuroso***.- Los colorantes sulfurosos son una clase de compuestos coloreados, macromoleculares, insolubles en agua obtenidos por el tratamiento de aminas aromáticas, fenoles y aminofenoles con azufre y/o

polisulfuro sódico. Estos colorantes tienen la propiedad de solubilizarse de mejor manera cuando son tratados con soluciones alcalinas como de sulfuro de sodio, o cualquier otro agente reductor para formar un compuesto leuco.

Estos compuestos leuco son solubles en agua y tienen afinidad por los materiales celulósicos, como el algodón, el yute, etc.

Estos tintes son absorbidos por el material celulósico en forma leuco de la solución acuosa y son, subsecuentemente, insolubilizados por oxidación atmosférica.

Los colorantes sulfurosos fueron introducidos hace más de 100 años. Son, principalmente, mezclas de componentes coloreados y, a causa de su estructura macromolecular y su insolubilidad en casi todos los solventes, su estructura no ha sido determinada completamente.

**Propiedades generales de los tintes de azufre**

- Estos tintes tienen excelentes propiedades de resistencia a la luz.
- El teñido óptimo es con una temperatura de 80-95 C, pero a veces también se realiza el teñido en temperaturas frías.
- Estos tintes contienen una porción de ácido sulfúrico.
- Su velocidad de tintura es moderado.

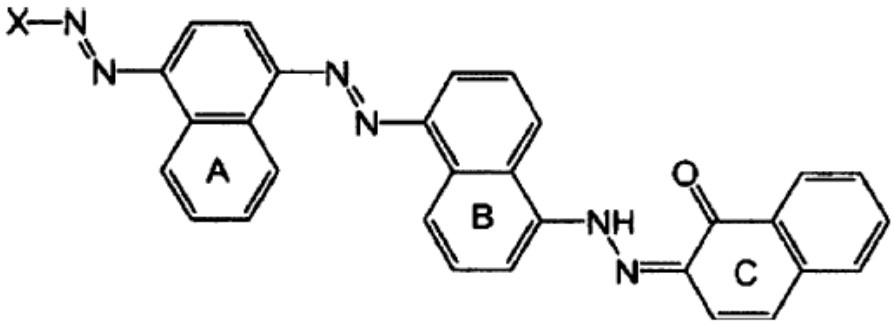
c. ***Colorante directo.-*** En el lugar en donde adquirimos este producto no nos ayudaron con la información de la composición del colorante pero sabemos que es un colorante directo por lo que optamos en levantar información sobre la composición del mismo en páginas web.

Los colorantes directos se absorben directamente por las fibras en soluciones acuosas, poseen afinidad directa por algodón, seda, lana y fibras regeneradas.

Estos colorantes presentan las siguientes características.

- Excelente solidez a la luz.
- Baja solidez en procesos húmedos.
- A mayor solidez, su estructura es más compleja y su manufactura más costosa.
- Son económicos y poseen la gama completa del espectro visible.

A continuación se muestra la estructura química del colorante directo triazoico semejante al utilizado en laboratorio. (patentados.com, 2007)




En la que al menos dos de los anillos A, B y C están sustituidos con un grupo sulfonato, el anillo C puede estar sustituido en la posición 5 con un grupo $NH_2$ o NHpH, X es un anillo fenilo o naftilo sustituido con hasta 2 grupos sulfonatos y puede estar sustituido en la posición 2 con un grupo OH y puede estar sustituido también con un grupo $NH_2$ o NHpH.

### 3.2.3. Equipos

***a.*** ***Balanza.-*** La balanza analítica es uno de los instrumentos de medida más usados en laboratorio y de la cual dependen básicamente todos los resultados analíticos.

***b.*** ***Colorímetro.-*** Un colorímetro es cualquier herramienta que identifica el color y el matiz para una medida más objetiva del color, la unidad de medida son las unidades de color.

El colorímetro usado en las prácticas de laboratorio es el SMART2, fue diseñado tanto para uso en campo como en laboratorio, en este se pueden realizar una serie de parámetros de calidad de agua. El colorímetro SMART 2 es un colorímetro de

lectura directa, portátil, controlado por microprocesador. Tiene una pantalla de cristal líquido de 4 líneas y 16 caracteres para mensajes numéricos y alfabéticos.

La operación es controlada con el teclado que tiene seis botones que se usan para realizar tareas específicas a través de un software que guía un menú en respuesta a selecciones que se muestran en la pantalla. (Manual de operación)

c. ***Agitador eléctrico.-*** En nuestra celda electrolítica fue necesario colocar un agitador eléctrico para el proceso de electrocoagulación, ya que las burbujas gaseosas de oxígeno e hidrógeno que se forman alrededor de los electrodos son de forma esférica y a medida que se acumulan en la superficie de los electrodos se incrementa la resistencia eléctrica de la celda y como resultado se requiere mayor cantidad de energía para lograr la eficiencia de remoción óptima; es por este motivo que para minimizar esta acumulación de las burbujas debíamos aumentar la turbulencia del electrolito. (Adriana Aristizabal).

## 3.3. PROCESOS DE LABORATORIO

### 3.3.1. Obtención de Aguas Residuales del Sector Industrial

Como ya se había mencionado en la sección anterior. En la ciudad de Cuenca hay cuarenta y cuatro industrias textiles de las cuales ocho son tintorerías que se encuentran afiliadas a la Cámara de la Pequeña Industria, dos de ellas nos abrieron sus puertas para conocer sobre sus procesos, y para hacernos conocer de que sus efluentes necesitan de un tratamiento previo a ser arrojado a los cuerpos de agua. Es por este motivo, que tomamos una muestra de agua, la misma que enviamos a analizar en los laboratorios de ETAPA.

Tomando en cuenta estos resultados nos basamos para realizar un agua similar en el laboratorio. Este proceso se describirá a continuación.

### 3.3.2. Marchas de Laboratorio

#### 3.3.2.1. Marcha para la Preparación de la Solución de Características Similares de las Aguas Residuales de las Tintorerías

Utilizando el instrumental en laboratorio iniciamos la preparación de la solución:

**a.** Pesamos 5gr de colorante en la balanza de precisión. En un recipiente plástico agregamos ocho litros de agua y añadimos el colorante previamente pesado, y lo diluimos durante 5 minutos con el agitador eléctrico.

**b.** Una vez que la muestra fue homogenizada procedimos a filtrar.

- La primera filtración se realizó para retirar las impurezas que se encuentra, generalmente en el colorante, para cada práctica se utilizó un filtro nuevo.

**Foto 7. Filtración de la muestra**

**Fuente: Los Autores**

- Mientras se filtraba la solución preparamos la cuba de vidrio la misma que fue preparada para estar limpia y con las placas instaladas a la fuente de poder, el agitador fue colocado en la cuba, listo para la práctica.

**Foto 8. Celda electrolítica**

**Fuente: Los Autores**

**c.** Inmediatamente luego de la filtración se colocó la solución en la cuba de vidrio previamente preparada y se realizó la primera toma de pH que generalmente nos da un resultado de 9.

- Debido que en nuestro proyecto el pH es un factor a estudiar éste se debe modificar, para lo cual se utiliza una solución de sosa cáustica.

- Se preparó una solución de sosa cáustica al 7%.

- Introducimos esta solución a la cuba de vidrio y mezclamos por 5 minutos.

**Foto 9. Solución de sosa cáustica**

**Fuente: Los Autores**

- Verificamos las unidades de color mediante el colorímetro, si ésta se encontraba fuera del rango que nos da el equipo procedemos a diluir 1ml en 100ml, aforamos esa muestra y procedemos a medir el color.

- Verificamos el pH, el cual debe estar en las condiciones requeridas para la práctica a realizar.

- Con estas características similares a la muestra tomada de las industrias textiles y las características necesarias para el buen rendimiento de nuestro trabajo procedemos a realizar la práctica.

Registramos el tiempo de inicio y calculamos el tiempo de finalización de la práctica, encendimos los equipos, en la fuente de poder regulamos el voltaje de acuerdo a las necesidades, y en ese momento tomamos la primera muestra llamada la muestra cero y arrancamos el proceso de electrocoagulación.

Para la muestra cero analizamos todas las variables de respuesta como sólidos disueltos, sólidos suspendidos, y las unidades de color.

**Foto 10: Preparación de solución**

**Fuente: Los Autores**

### 3.3.2.2. Marcha para Sólidos Suspendidos

**a.** Se toma una muestra de la solución problema.

**b.** Se procede a filtrar para lo cual se requiere un papel filtro con su peso respectivo.

**c.** Luego de la filtración el papel filtro utilizado para este trabajo se lleva a una fuente de calor, en este caso a un foco infrarrojo donde le mantenemos por 30 minutos a una temperatura aproximada de 70°C.

**d.** Dejamos que se hidrate por unos 10 a 15 minutos.

**e.** Volvemos a pesar el papel filtro en la balanza de precisión, y la diferencia de peso es la cantidad de sólidos suspendidos.

**f.** Este proceso repetimos, cada hora durante tres horas.

**Foto 11: Sólidos suspendidos**

**Fuente: Los Autores**

### 3.3.2.3. Marcha para Sólidos Disueltos.

**a.** Del líquido recolectado luego de la filtración de los sólidos suspendidos, utilizamos para esta práctica.

**b.** Esta solución lo depositamos en molde de papel aluminio previamente pesado.

**c.** Inmediatamente le llevamos a una fuente de calor de aproximadamente unos 60 a 70 °C.

**d.** Le mantenemos a esta temperatura durante el tiempo necesario hasta que se evapore totalmente la muestra.

**e.** Al evaporarse completamente la solución volvemos a pesar el papel aluminio siendo la diferencia de peso la cantidad de sólidos disueltos de la muestra.

**f.** Este proceso repetimos, para cada muestra.

**Foto 12: Sólidos disueltos**

**Fuente: Los Autores**

### 3.3.2.4. Marcha para Determinar las Unidades de Color.

**a.** De la solución que tenemos en la cuba de vidrio con una pipeta tomamos un mililitro.

**b.** Diluimos esta muestra en un balón de aforo de 100 mililitros, y aforamos.

**c.** Esta disolución se coloca cuidadosamente en las celdas de medición.

**d.** Listas las celdas calibramos el colorímetro y procedemos a tomar las medidas, las mismas que deberán ser registradas para un futuro análisis.

## 3.4. ETAPAS EN EL DISEÑO DE EXPERIMENTOS. (Humberto Gutiérrez)

Un aspecto fundamental del diseño de experimentos es decidir qué pruebas o tratamientos se van a realizar y cuantas repeticiones de cada uno se requieren, de manera que se obtenga la máxima información al mínimo costo posible. El arreglo

formado por diferentes tratamientos que serán corridos, incluyendo las peticiones, recibe el nombre de matriz de diseño o solo diseño.

Para que un estudio experimental sea exitoso es necesario realizar, por etapas, diferentes actividades. En este sentido, la etapa más importante y a la que se debe dedicar mayor tiempo es a la planeación. A continuación se describen de manera breve las etapas del diseño de experimentos con objeto de dar una visión global de lo que implica su correcta aplicación. Varios conceptos que se mencionan en estas etapas se definen con detalle en los siguientes capítulos.

### 3.4.1. Planeación y realización.

a. **Entender y delimitar el problema u objeto de estudio.** En la etapa de planeación se deben hacer investigaciones preliminares que conduzcan a entender y delimitar el problema u objeto de estudio, de tal forma que quede claro que se va a estudiar, porque es importante y, si es un problema, cual es la magnitud del mismo.

   Para el caso de nuestro estudio se realizó investigaciones en las empresas textiles que utilizan diferentes colorantes para el teñido de su materia prima, donde se tomaron muestras y, como indicamos anteriormente estas muestras fueron llevadas a los laboratorios de ETAPA para su análisis. Los resultados demostraron que las descargas que realizan estas empresas no cumplen los parámetros, es por tal razón que el objetivo de esta investigación fue "Determinar los parámetros óptimos con los cuales debe trabajar un proceso electroquímico para dar un tratamiento a las aguas residuales de las empresas textiles".

b. **Elegir la(s) variable(s) de respuesta que será medida en cada punto del diseño y verificar que se mide de manera confiable.** La elección de esta(s) variable(s) es vital, ya que en ella se refleja el resultado de las pruebas. Por ello,

se deben elegir aquellas que mejor reflejen el problema o que caractericen al objeto de estudio.

Las variables de respuesta son aquellas con las que podremos basarnos el funcionamiento del proceso, y son las unidades de color UC, sólidos suspendidos y sólidos disueltos las mismas que fueron elegidas mediante pruebas de laboratorio.[1]

c. **Determinar cuáles de los factores deben estudiarse o investigarse, de acuerdo a la supuesta influencia que tienen sobre la respuesta, los niveles que corresponden y el diseño experimental.** No se trata que el experimentador tenga que saber a priori qué factores influyen, puesto que precisamente para eso es el experimento, pero sí, que utilice toda la información disponible para incluir aquellos que se considera que tienen un mayor efecto.

En la etapa de planificación del proyecto nos tomamos un tiempo prudencial debido a que no teníamos identificados los factores y en la literatura no especifica claramente, en este caso mediante pruebas de laboratorio se determinó factores que podemos controlar los cuales se describirán más adelante.

- **Los factores**: son las que el investigador escoge para establecer agrupaciones en el estudio, clasificando intrínsecamente a los casos del mismo. Un tipo especial son las variables de control, que modifican al resto de las variables independientes y que de no tenerse en cuenta adecuadamente pueden alterar los resultados por medio de un sesgo.

[1]**Sólidos en suspensión:** Este tipo de sólidos como tales son difíciles de eliminar siendo necesaria la adición al agua de agentes coagulantes y floculantes que modifican la carga eléctrica de estas partículas consiguiendo que se agrupen en flóculos de mayor tamaño para así poder separarlos mediante filtración.

**Sólidos disueltos:** Están relacionados con la conductividad del agua ya que un aumento de estos iones aumenta la capacidad conductiva.

**Unidades de color:** Para determinar las unidades de color utilizamos un colorímetro, esto lo hacemos al iniciar la práctica, en cada muestra tomada en el tiempo correspondiente y al finalizar el tratamiento, y mediante un cálculo expresamos esta en porcentaje.

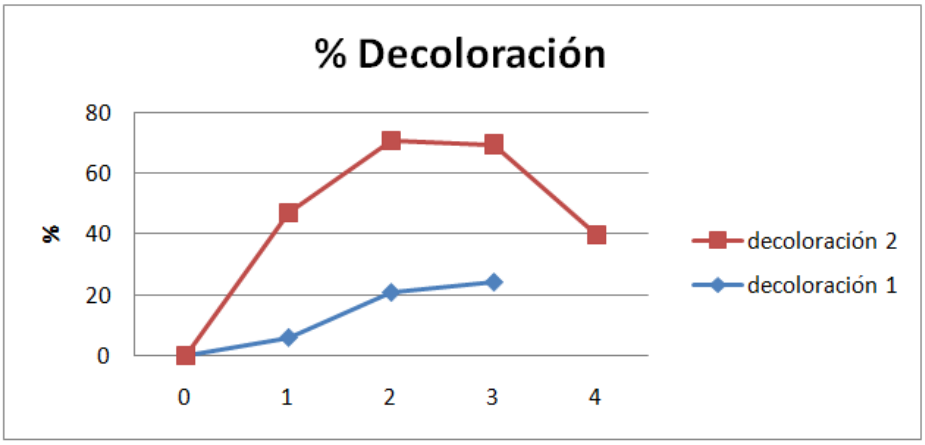
Es aquella característica o propiedad que se supone ser la causa del fenómeno estudiado. En investigación experimental se llama así a la variable que el investigador manipula, en nuestro caso tenemos:

- **Tiempo:** Es la magnitud física con la que medimos la duración o separación de acontecimientos sujetos a cambios, de los sistemas sujetos a observación, esto es, el período que transcurre entre el estado del sistema cuando éste aparenta un estado X y el instante en el que X registra una variación perceptible para un observador (o aparato de medida).

Para establecer al tiempo como un factor se realizaron pruebas de laboratorio determinando su influencia en dicho tratamiento.

En el trabajo consideramos al factor tiempo con tres niveles, quedando con un monitoreo de cada hora durante tres horas.

**Gráfico 1: Gráfico de decoloración en el tiempo - horas**



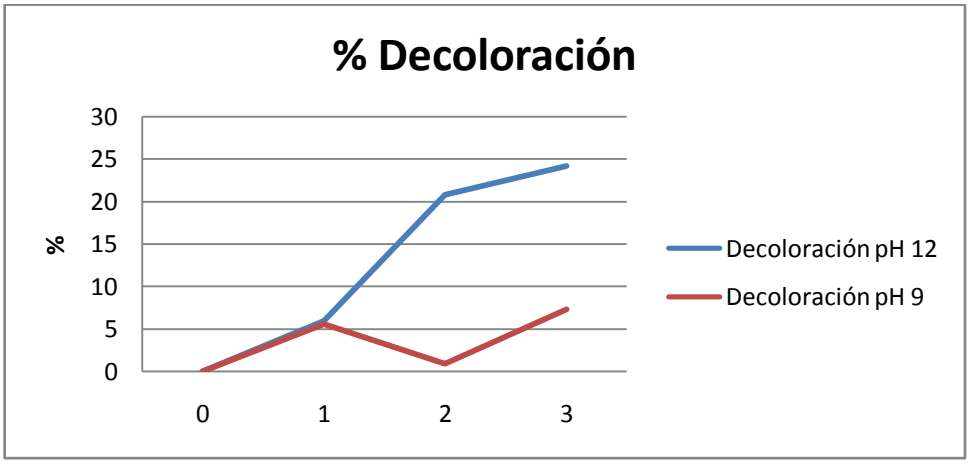

**Fuente: Los Autores**

En este gráfico podemos apreciar que el punto de mayor decoloración ocurre a la tercera hora, si el proceso continúa tiende a disminuir el porcentaje de decoloración debido a otros factores.

- **pH:** El pH es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución. El pH indica la concentración de iones hidronio [$H_3O^+$] presentes en determinadas sustancias. La sigla significa "potencial de hidrógeno". El valor del pH se puede medir de forma precisa mediante un potenciómetro, también conocido como pH-metro, (Wikipedia).

En este trabajo se realizaron pruebas de laboratorio con diferentes niveles de pH, con 3, con 7, y con 14, obteniendo resultados favorables con los dos últimos, debido a estos resultados se estableció al pH como un factor, por lo tanto en este trabajo se consideró el factor con dos niveles 9 y 12.

**Gráfico 2: Decoloración de la solución con respecto al pH**




**Fuente: Los Autores**

En este gráfico podemos observar que el mayor rendimiento es con un pH de 12, debido a que el sistema trabaja de mejor manera con pH alcalino.

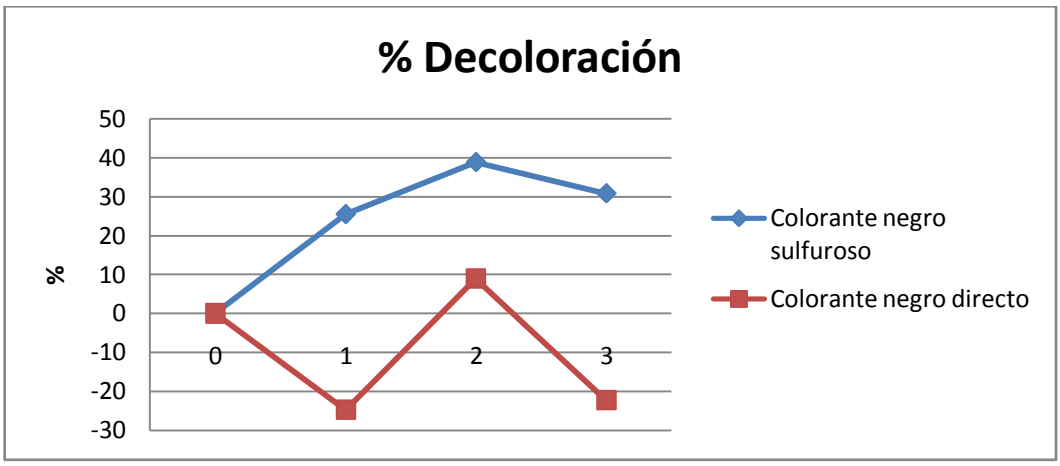
- **Colorante:** Es una sustancia que es capaz de teñir las fibras vegetales y animales. Los colorantes se han usado desde los tiempos más remotos, empleándose para ello diversas materias procedentes de vegetales (cúrcuma, índigo natural, etc.) y de animales (cochinilla, moluscos, etc.) así como distintos minerales. (Wikipedia).

Se realizaron pruebas en laboratorio de la solución de colorante negro sulfuroso tomado de las tintorerías, basándonos en estos resultados preparamos una solución con las características similares a las aguas industriales. **(Ver anexo 1).**

Con este antecedente buscamos otra alternativa de colorante y obtuvimos en un almacén de estos productos un colorante directo, para nuestro trabajo utilizamos los dos colorantes y se realizó el mismo proceso con cada uno y lo podremos comparar sus resultados en los capítulos siguientes.

Por lo tanto se estableció al colorante como un factor con dos niveles; el colorante negro sulfuroso y un colorante directo.

**Gráfico 3: Decoloración de la solución con respecto al Colorante**




**Fuente: Los Autores**

En este gráfico podemos observar que el colorante negro sulfuroso tiene un mayor porcentaje de decoloración.

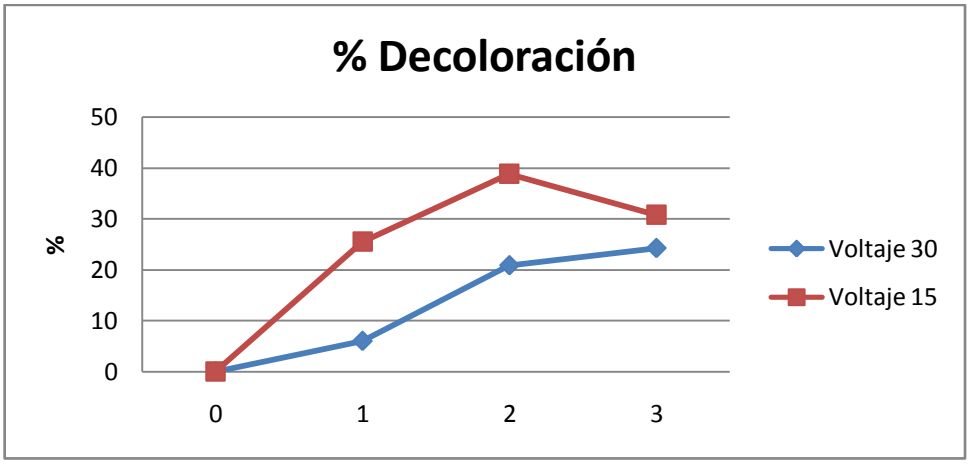
- **Voltaje:** La tensión, voltaje o diferencia de potencial es una magnitud física que impulsa a los electrones, a lo largo de un conductor en un circuito eléctrico cerrado, provocando el flujo de una corriente eléctrica. La diferencia de potencial también se define como el trabajo por unidad de carga ejercido por el campo eléctrico, sobre una partícula cargada, para moverla de un lugar a otro. Se puede medir con un voltímetro.

En el Sistema Internacional de Unidades, la diferencia de potencial se mide en voltios (V), al igual que el potencial. (Wikipedia).

Para determinar que el voltaje es un factor importante, se realizaron pruebas en laboratorio con diferente voltaje con 5 voltios, 15 y 30 voltios, dando mejores resultados con estos dos últimos.

Para este trabajo establecimos el factor voltaje con dos niveles 15V y 30V.

**Gráfico 4: Decoloración de la solución con respecto al voltaje**




**Fuente: Los Autores**

En este gráfico podemos observar que en el voltaje de 30 la decoloración incrementa porcentualmente en cada hora sin ninguna variación y de manera continua.

**d. Diseño experimental.** Es una técnica estadística que permite identificar y cuantificar las causas de un efecto dentro de un estudio experimental. En este se manipulan deliberadamente una o más variables, vinculadas a las causas, para medir el efecto que tienen en otra variable de interés. El diseño experimental prescribe una serie de pautas relativas qué variables hay que manipular, de qué manera, cuántas veces hay que repetir el experimento y en qué orden para poder establecer con un grado de confianza predefinido la necesidad de una presunta relación de causa-efecto. (Wikipedia).

Se determinó trabajar con un diseño factorial mixto, con cuatro factores; el primero con tres niveles y los tres restantes con dos niveles cada uno, los cuales son $3x2^3$:

**Factores y número de niveles del diseño experimental**

| Factores | Niveles |
|---|---|
| Tiempo | 3 |
| pH | 2 |
| Voltaje | 2 |
| Colorante | 2 |

El diseño factorial mixto es más frecuente que se utiliza cuando, por su naturaleza discreta o categórica, los factores tienen un número finito y distinto de niveles, y el interés es estudiar todos los niveles.

e. **Planear y organizar el trabajo experimental.** Con base en el diseño seleccionado, organizar y planear con detalle el trabajo experimental, por ejemplo, las personas que van a intervenir, la forma operativa en las que se harán las cosas, etc.

La ejecución de las prácticas en laboratorio con base en el diseño de experimentos seleccionado y teniendo en cuenta el número de prácticas a realizarse que nos dio como resultado el statgrapics. Se realizó la siguiente organización del trabajo.

***Organización:***

- Las prácticas empezaron a realizarse el mes de octubre de 2010
- El trabajo en laboratorio fue de dos a tres veces por semana aproximadamente.
- Antes de empezar las prácticas se hizo un inventario de los materiales y sustancias a utilizarse.

- Los resultados de cada práctica fueron archivados en una hoja de Excel, para luego ingresar en el software estadístico.

**Tabla 6. Libro de datos**

| Corridas | Tiempo | pH | Voltaje | Colorante | SS | SD | UC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 3 | 9 | 30 | directo | 1,036 | 0,103 | 248 |
| 2 | 1 | 12 | 30 | sulfuroso | 0,024 | 0 | 120,33 |
| 3 | 2 | 9 | 15 | directo | 0,144 | 0,056 | 272 |
| 4 | 1 | 9 | 15 | directo | 0,155 | 0,189 | 284 |
| 5 | 1 | 12 | 15 | directo | 0,014 | 0,583 | 237 |
| 6 | 2 | 9 | 15 | sulfuroso | 0,048 | 0 | 174 |
| 7 | 1 | 12 | 15 | sulfuroso | 0,03 | 0,143 | 149 |
| 8 | 2 | 12 | 15 | directo | 0,046 | 0,535 | 173 |
| 9 | 2 | 9 | 30 | directo | 0,204 | 0,142 | 211 |
| 10 | 3 | 12 | 15 | directo | 0,09 | 0,296 | 232,33 |
| 11 | 2 | 9 | 30 | sulfuroso | 0,064 | 0 | 189,66 |
| 12 | 2 | 12 | 30 | sulfuroso | 0,445 | 0 | 101,33 |
| 13 | 1 | 12 | 30 | directo | 0,022 | 0,186 | 232,33 |
| 14 | 3 | 9 | 15 | directo | 0,247 | 0,795 | 253 |
| 15 | 3 | 12 | 30 | directo | 0,02 | 0,08 | 235,33 |
| 16 | 2 | 12 | 15 | sulfuroso | 0,036 | 0 | 122,33 |
| 17 | 1 | 9 | 30 | sulfuroso | 0,11 | 0 | 180,66 |
| 18 | 1 | 9 | 15 | sulfuroso | 0,015 | 0 | 176 |
| 19 | 3 | 12 | 30 | sulfuroso | 0,09 | 0 | 97 |
| 20 | 2 | 12 | 30 | directo | 0,018 | 0,26 | 169,66 |
| 21 | 3 | 12 | 15 | sulfuroso | 0,044 | 0 | 138,33 |
| 22 | 3 | 9 | 15 | sulfuroso | 0,122 | 0 | 154 |
| 23 | 3 | 9 | 30 | sulfuroso | 0,707 | 0 | 177,33 |
| 24 | 1 | 9 | 30 | directo | 0,14 | 0,36 | 220 |

**Fuente: Los Autores**

f. **Realizar el experimento.** Seguir al pie de la letra el plan previsto en la etapa anterior, y en caso de algún imprevisto, determinar a que persona se le reportaría y lo que se haría.

Este proyecto se basa de dos trabajos de laboratorio o métodos físico y químico, como se indicó en todo el capítulo es básicamente una simulación de una tintorería, de donde se recogen los residuos líquidos generados y se procede a dar un tratamiento de decoloración.

El tratamiento consta de los siguientes pasos:

**a.** Preparación o recolección de la solución a tratar y filtración
**b.** Tratamiento electroquímico durante un período de tiempo, con un voltaje y pH calibrado.
**c.** Seguido de eso un proceso de filtración con papel filtro.
**d.** Y para finalizar se monitorea las variables de respuesta como sólidos disueltos, sólidos suspendidos, y unidades de color.

Obtendremos una decoloración de 50% a 70% aproximadamente dependiendo de las condiciones del proceso, sobre los resultados generados en todo el proceso se tratará en el capítulo siguiente.

# CAPÍTULO IV

# ANÁLISIS ESTADÍSTICO

## 4.1. HIPÓTESIS

Una hipótesis es una proposición aceptable que ha sido formulada a través de la recolección de información y datos, aunque no está confirmada sirve para responder de forma tentativa a un problema con base científica. (Wikipedia).

El análisis de varianza en un diseño factorial mixto se utiliza para demostrar que efecto es significativo, se procede a probar las hipótesis dadas cada una contra la alternativa de que el efecto en cuestión es diferente de cero o igual a cero. Esto en relación al *valor-p*.

Estas hipótesis se probaran con el análisis de varianza.

- $H_o$ El tratamiento electroquímico no influye en el proceso de decoloración de las aguas residuales de la industria textil.
- $H_1$ El tratamiento electroquímico influye directamente en el proceso de decoloración de las aguas residuales de la industria textil.

**Inferencia estadística**

Según el software statgraphics centurio, y el análisis de varianza ANOVA con la colección de modelos estadísticos y sus procedimientos asociados; podemos concluir que se acepta la **$H_1$** según los valores estadísticos que encontramos en este capítulo, y se demuestra que el tratamiento es estadísticamente significativo.

## 4.2. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LAS VARIABLES DE RESPUESTA

Para esta etapa tenemos que tomar en cuenta que los resultados experimentales son observaciones muestrales, no poblacionales. La técnica estadística central en el análisis de los experimentos es el llamado análisis de varianza ANOVA.

Aquí con el análisis estadístico formal, se debe analizar con detalle lo que ha pasado con el experimento, desde contrastar las conjeturas iniciales con los resultados del experimento, hasta observar los nuevos aprendizajes que sobre el proceso se lograron, verificar supuestos y elegir el tratamiento ganador, siempre con apoyo de las pruebas estadísticas.

- **Diferencia mínima significativa:** Es el método de comparación múltiple posiblemente más utilizado, debido quizá a su fácil manera de aplicar. Es usualmente usado para comparar una pareja de medias de tratamientos, pero puede ser utilizado para comparaciones de más de dos medias de tratamientos. (Universidad Nacional de Colombia)

- **ANOVA:** En estadística, el análisis de la varianza (*ANOVA*, según terminología inglesa) es una colección de modelos estadísticos y sus procedimientos asociados, en el cual la varianza está particionada en ciertos componentes debido a diferentes variables explicativas. La tabla ANOVA descompone la variabilidad de un factor. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Dado que un valor-P es menor que 0,05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo con un 95,0% de nivel de confianza. (Humberto Gutiérrez)

- **Mínimos cuadrados:** Es una técnica de análisis numérico encuadrada dentro de la optimización matemática, en la que, dado un conjunto de pares (o ternas, etc.), se intenta encontrar la función que mejor se aproxime a los datos (un "mejor ajuste"), de acuerdo con el criterio de mínimo error cuadrático.

  En su forma más simple, intenta minimizar la suma de cuadrados de las diferencias ordenadas (llamadas *residuos*) entre los puntos generados por la función y los correspondientes en los datos. Específicamente, se llama *mínimos cuadrados promedio* (LMS) cuando el número de datos medidos es 1 y se usa el

método de descenso por gradiente para minimizar el residuo cuadrado. Se puede demostrar que LMS minimiza el residuo cuadrado esperado, con el mínimo de operaciones (por iteración), pero requiere un gran número de iteraciones para converger. (Wikipedia).

- **Prueba de rango múltiple Duncan:** La prueba de rango múltiple Duncan es una comparación de las medias de tratamientos todos contra todos, de manera que cualquier diferencia existente entre cualesquier tratamiento contra otro se verá reflejado en este análisis. Utiliza un nivel de significancia variable que depende del número de medias que entran en cada etapa de comparación. La idea es que a medida que el número de medias aumenta, la probabilidad de que se asemejen disminuye. Para obtener los comparadores Duncan, se toman de la tabla de Duncan los valores de acuerdo al número de tratamientos y con los grados de libertad del error. Cada uno de estos valores será multiplicado por el error estándar de la media y éstos serán los comparadores para determinar cuáles diferencias son significativas. (Webmaster) .

- **Dispersión:** Las medidas de dispersión, también llamadas medidas de variabilidad, muestran la variabilidad de una distribución, indicando por medio de un número, si las diferentes puntuaciones de una variable están muy alejadas de la media. Cuanto mayor sea ese valor, mayor será la variabilidad, cuanto menor sea, más homogénea será a la media. Así se sabe si todos los casos son parecidos o varían mucho entre ellos. (Wikipedia)

- **Residuos:** Un dato atípico es un registro mayor o menor de lo esperado que se detecta por tener un residuo que es un valor “inusual”, muy grande o muy pequeño en relación con la distribución asociada a los residuos. (Vilar)

### 4.2.1. Análisis de las Unidades de Color

Esta etapa le consideramos el primer punto de control, por lo tanto aquí los resultados los encontramos de manera dispersa. Sin embargo, la tendencia de reducción de

unidades de color en el tiempo va a ser notoria las unidades para esta variable de respuesta es (UC), los factores que se tomaron en cuenta son:

- Tiempo (hora).
- pH.
- Voltaje (volteos).
- Colorante

- **Varianza o ANOVA de las unidades de color**

Para este procedimiento se analiza la varianza de varios factores. Para las unidades de color se realizan varias pruebas y gráficas para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre las unidades de color. También evalúa la significancia de las interacciones entre los factores. En la siguiente tabla del ANOVA le permitirán identificar los factores significativos. Para cada factor significativo, las pruebas de rangos múltiples le dirán cuales medias son significativamente diferentes de otras. El gráfico de medias y la gráfica de interacciones le ayudarán a interpretar los efectos significativos. Los gráficos de residuos le ayudarán a juzgar si los datos han violado los supuestos subyacentes al análisis de varianza.

**Tabla 8: Análisis de Varianza para Unidades de Color**

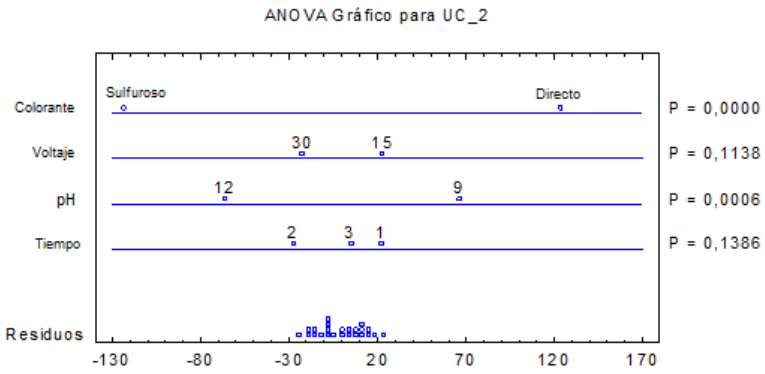
| *Fuente* | *Suma de Cuadrados* | *Gl* | *Cuadrado Medio* | *Razón-F* | *Valor-P* |
|---|---|---|---|---|---|
| EFECTOS PRINCIPALES | | | | | |
| A: tiempo | 2241,07 | 2 | 1120,53 | 2,48 | 0,1386 |
| B: pH | 11778,5 | 1 | 11778,5 | 26,08 | 0,0006 |
| C: voltaje | 1385,63 | 1 | 1385,63 | 3,07 | 0,1138 |
| D: colorante | 40646,3 | 1 | 40646,3 | 89,99 | 0,0000 |
| INTERACCIONES | | | | | |
| AB | 1996,93 | 2 | 998,467 | 2,21 | 0,1656 |
| AC | 344,979 | 2 | 172,489 | 0,38 | 0,6931 |
| AD | 1735,55 | 2 | 867,777 | 1,92 | 0,2019 |
| BC | 3,88815 | 1 | 3,88815 | 0,01 | 0,9281 |
| BD | 550,85 | 1 | 550,85 | 1,22 | 0,2981 |
| CD | 320,178 | 1 | 320,178 | 0,71 | 0,4216 |
| RESIDUOS | 4065,08 | 9 | 451,675 | | |
| TOTAL (CORREGIDO) | 65069,0 | 23 | | | |

**Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual**

**Fuente: Los Autores**

En esta tabla encontramos dos factores estadísticamente significativos como es el pH y el colorante identificado en la tabla con el literal “B” y “D” debido a que existe una diferencia entre los niveles que son los pH 9 y 12 y el colorante negro sulfuroso y el colorante negro directo.

- **Gráfico 5: ANOVA de las unidades de color**




**Fuente: Los Autores**

Al igual que en la tabla de ANOVA los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Dado que un valor-P de el colorante y el valor-P de el pH es menor que 0,05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo.

- **Mínimos cuadrados de las unidades de color**

Esta tabla muestra la media de las Unidades de Color para cada uno de los niveles de los factores. Las dos columnas de la extrema derecha muestran intervalos de confianza del 95,0% para cada una de las medias.

**Tabla 9: Medias por Mínimos Cuadrados para Unidades de Color**

| | | | *Error* | *Límite* | *Límite* |
|---|---|---|---|---|---|
| *Nivel* | *Casos* | *Media* | *Est.* | *Inferior* | *Superior* |
| MEDIA GLOBAL | 24 | 189,484 | | | |
| Tiempo | | | | | |
| 1 | 8 | 199,915 | 7,51395 | 182,917 | 216,913 |
| 2 | 8 | 176,623 | 7,51395 | 159,625 | 193,62 |
| 3 | 8 | 191,915 | 7,51395 | 174,917 | 208,913 |
| pH | | | | | |
| 9 | 12 | 211,638 | 6,13511 | 197,759 | 225,516 |
| 12 | 12 | 167,331 | 6,13511 | 153,452 | 181,209 |
| Voltaje | | | | | |
| 15 | 12 | 197,083 | 6,13511 | 183,204 | 210,961 |
| 30 | 12 | 181,886 | 6,13511 | 168,007 | 195,764 |
| Colorante | | | | | |
| Directo | 12 | 230,638 | 6,13511 | 216,759 | 244,516 |
| Sulfuroso | 12 | 148,331 | 6,13511 | 134,452 | 162,209 |
| Tiempo por pH | | | | | |
| 1,9 | 4 | 215,165 | 10,6263 | 191,127 | 239,203 |
| 1,12 | 4 | 184,665 | 10,6263 | 160,627 | 208,703 |
| 2,9 | 4 | 211,665 | 10,6263 | 187,627 | 235,703 |
| 2,12 | 4 | 141,58 | 10,6263 | 117,542 | 165,618 |
| 3,9 | 4 | 208,083 | 10,6263 | 184,044 | 232,121 |
| 3,12 | 4 | 175,748 | 10,6263 | 151,709 | 199,786 |
| Tiempo por voltaje | | | | | |
| 1,15 | 4 | 211,5 | 10,6263 | 187,462 | 235,538 |
| 1,30 | 4 | 188,33 | 10,6263 | 164,292 | 212,368 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 2,15 | 4 | 185,333 | 10,6263 | 161,294 | 209,371 |
| 2,30 | 4 | 167,912 | 10,6263 | 143,874 | 191,951 |
| 3,15 | 4 | 194,415 | 10,6263 | 170,377 | 218,453 |
| 3,30 | 4 | 189,415 | 10,6263 | 165,377 | 213,453 |
| Tiempo por colorante | | | | | |
| 1, directo | 4 | 243,333 | 10,6263 | 219,294 | 267,371 |
| 1, sulfuroso | 4 | 156,498 | 10,6263 | 132,459 | 180,536 |
| 2, directo | 4 | 206,415 | 10,6263 | 182,377 | 230,453 |
| 2, sulfuroso | 4 | 146,83 | 10,6263 | 122,792 | 170,868 |
| 3, directo | 4 | 242,165 | 10,6263 | 218,127 | 266,203 |
| 3, sulfuroso | 4 | 141,665 | 10,6263 | 117,627 | 165,703 |
| pH por voltaje | | | | | |
| 9,15 | 6 | 218,833 | 8,67636 | 199,206 | 238,461 |
| 9,30 | 6 | 204,442 | 8,67636 | 184,814 | 224,069 |
| 12,15 | 6 | 175,332 | 8,67636 | 155,704 | 194,959 |
| 12,30 | 6 | 159,33 | 8,67636 | 139,703 | 178,957 |
| pH por colorante | | | | | |
| 9, directo | 6 | 248,0 | 8,67636 | 228,373 | 267,627 |
| 9, sulfuroso | 6 | 175,275 | 8,67636 | 155,648 | 194,902 |
| 12, directo | 6 | 213,275 | 8,67636 | 193,648 | 232,902 |
| 12, sulfuroso | 6 | 121,387 | 8,67636 | 101,759 | 141,014 |
| Voltaje por colorante | | | | | |
| 15, directo | 6 | 241,888 | 8,67636 | 222,261 | 261,516 |
| 15, sulfuroso | 6 | 152,277 | 8,67636 | 132,649 | 171,904 |
| 30, directo | 6 | 219,387 | 8,67636 | 199,759 | 239,014 |
| 30, Sulfuroso | 6 | 144,385 | 8,67636 | 124,758 | 164,012 |

**Fuente: Los Autores**

Es una manera de estimar en donde se encuentran los valores máximos y mínimos de cada ensayo, todos los datos se encuentran dentro del rango normal para cada práctica.

- **Pruebas de múltiple rangos de las unidades de color**

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias.

No hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un nivel del 95,0% de confianza. En la parte superior de la tabla, se ha identificado un grupo homogéneo, según la alineación de las X's en columna. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher.

**Tabla 10: Pruebas de múltiples rangos para unidades de color por tiempo**

**Método: 95,0 porcentaje LSD**

| *Tiempo* | *Casos* | *Media LS* | *Sigma LS* | *Grupos Homogéneos* |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 8 | 176,623 | 7,51395 | X |
| 3 | 8 | 191,915 | 7,51395 | X |
| 1 | 8 | 199,915 | 7,51395 | X |

| *Contraste* | *Sig.* | *Diferencia* | *+/- Límites* |
|---|---|---|---|
| 1 – 2 | | 23,2925 | 24,0385 |
| 1 – 3 | | 8,0 | 24,0385 |
| 2 – 3 | | -15,2925 | 24,0385 |

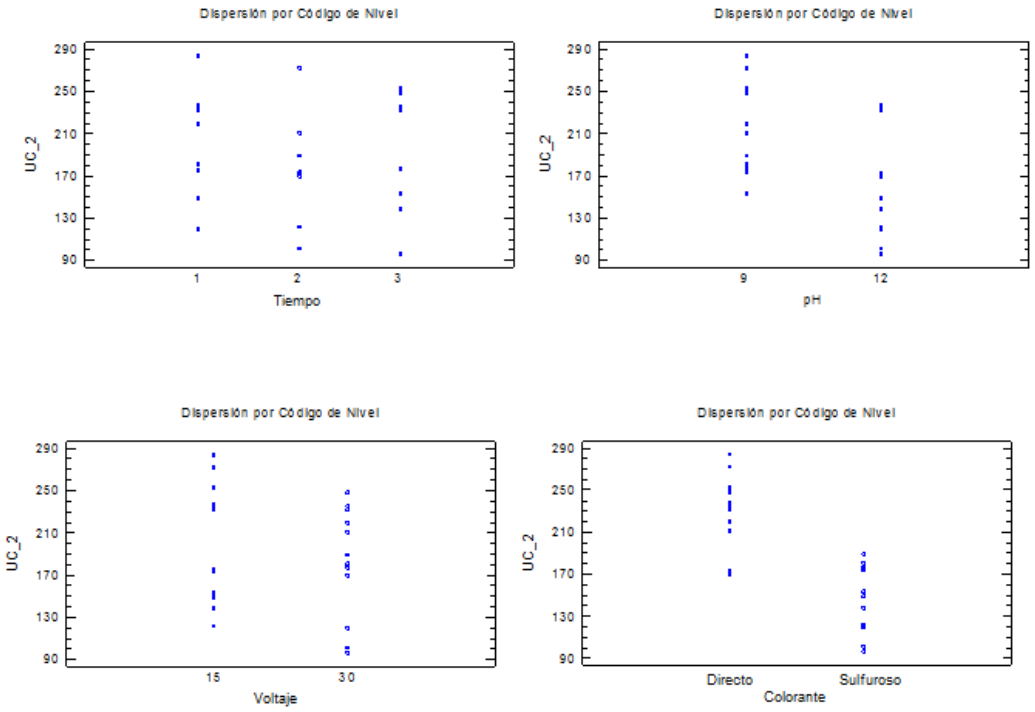
*** Indica una diferencia significativa**

**Fuente: Los Autores**

En esta tabla podemos observar que en los contrastes no existe una diferencia significativa debido que no hay una variación entre las horas que dura el proceso.

- **Gráfico 6: Dispersiones de las unidades de olor**

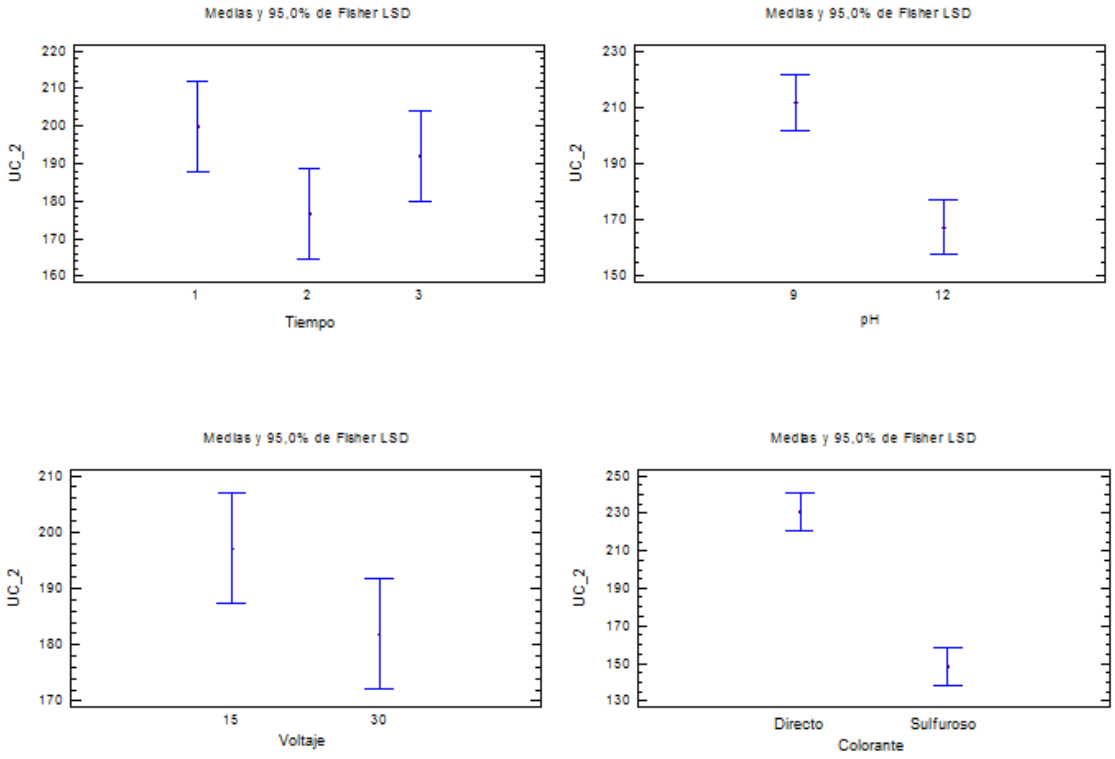
En el siguiente gráfico podemos observar los valores de dispersión que están distribuidos los datos estudiados, basándonos en las tablas anteriores no existe mucha diferencia, prácticamente la dispersión es homogénea.




**Fuente: Los Autores**

- **Gráfico 7: Medias de las Unidades de Color**

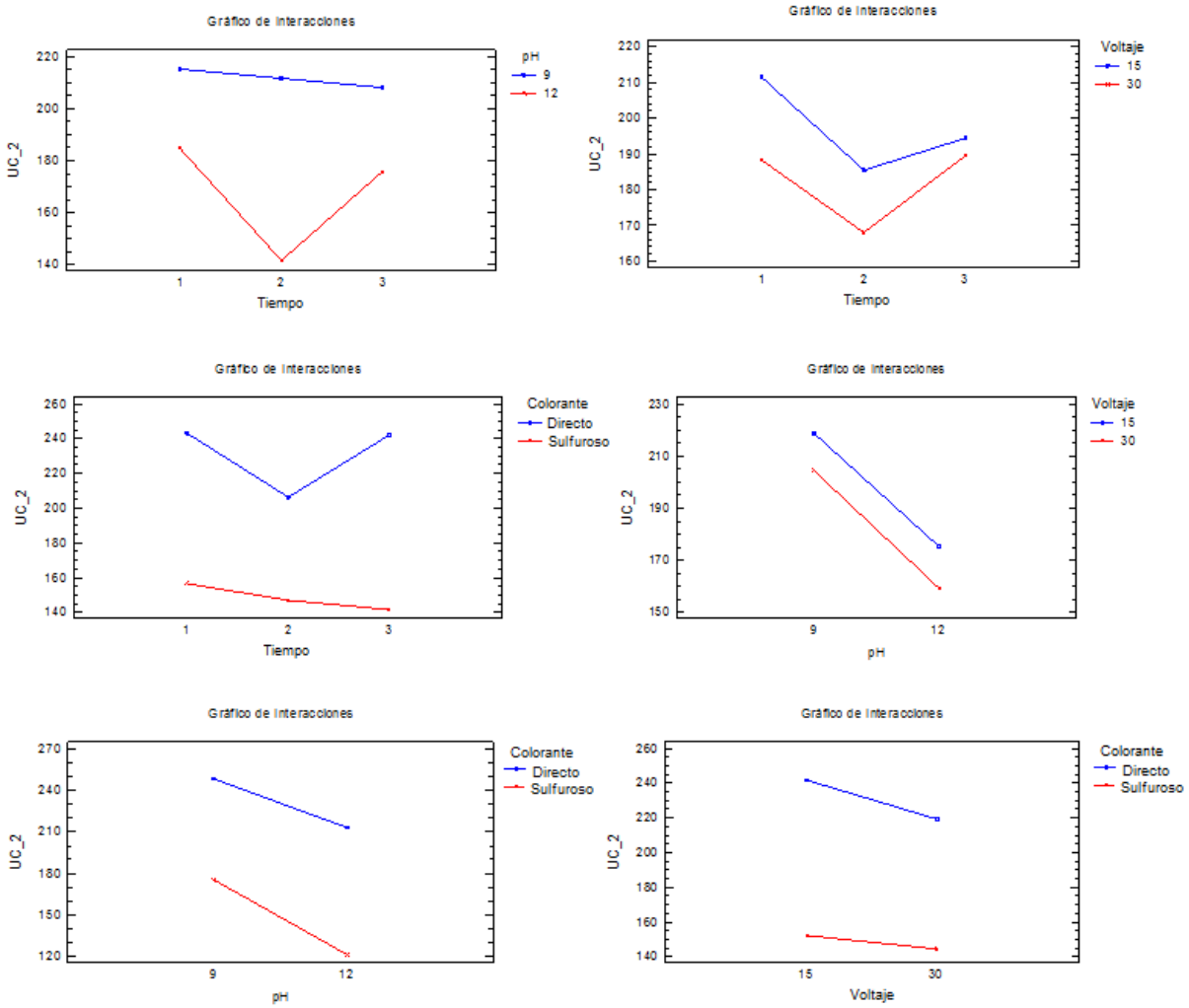
En el siguiente gráfico podemos observar las medias en gráficos de bigotes de cada uno de los factores estudiados, basándonos en las tablas anteriores confirmamos que los factores con una variación estadísticamente significativa son el pH, y el colorante.




**Fuente: Los Autores**

- **Gráfico 8: Interacciones de las unidades de color**

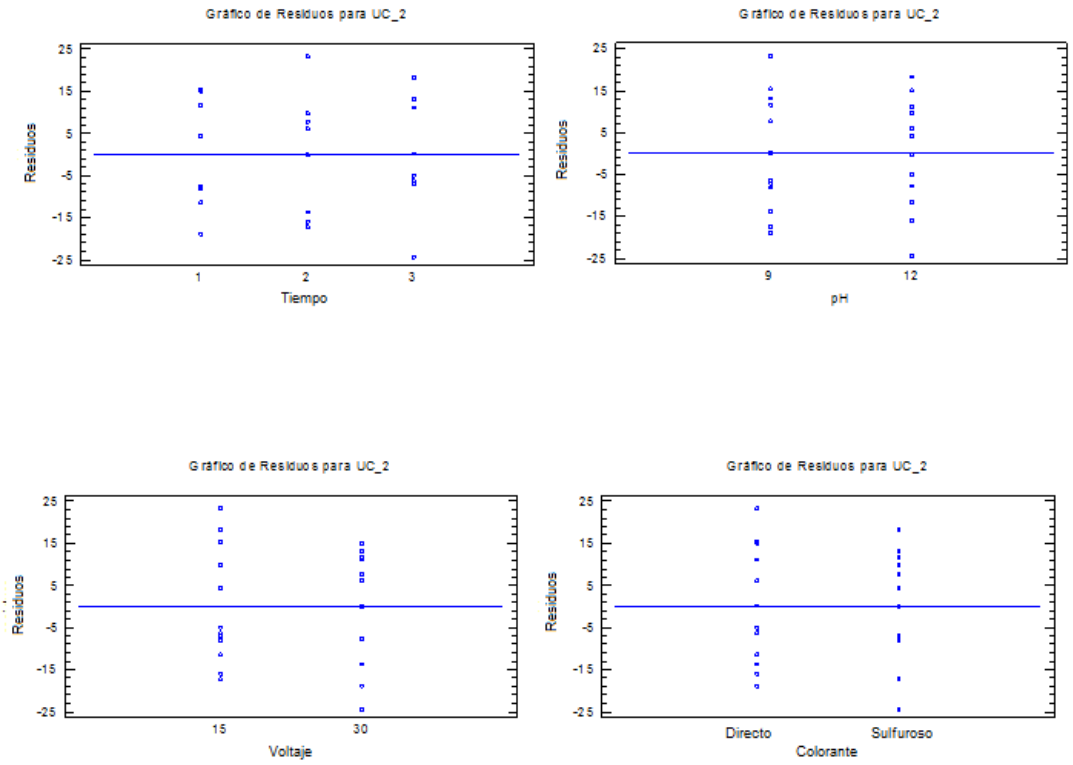
En estos gráficos podemos apreciar la disminución de las unidades de color en cada uno de los factores, esta disminución es significativa en casi todas las interacciones excepto en la interacción entre el colorante - tiempo con el colorante directo que disminuye y vuelve a su estado original debido a factores externos.



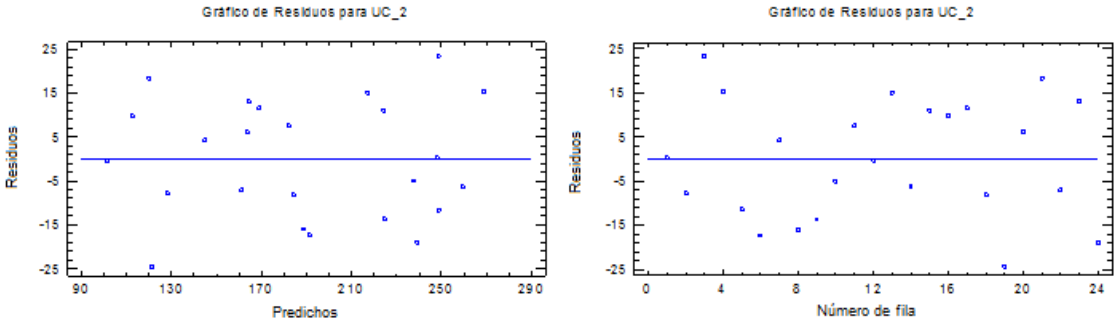

**Fuente: Los Autores**

- **Gráfico 9: Residuos de las unidades de color**

Los residuos están ubicados en linealidad debido a que la mayoría de resultados se encuentran dentro del rango normal.




Los residuos de predichos y número de fila están dispersos de una manera homogénea.




**Fuente: Los Autores**

### 4.2.2. Análisis de Sólidos Suspendidos

Este es el segundo punto de control, por lo tanto aquí deberá reaccionar el tratamiento de electro coagulación, los sólidos suspendidos se presentarán de una manera notoria, indicando un buen rendimiento en el proceso, las unidades para esta variable de respuesta es (mg/l), los factores que se tomaron en cuenta son:

- Tiempo (hora)
- pH
- Voltaje (volteos)
- Colorante

- **Varianza o ANOVA de sólidos suspendidos**

Para este procedimiento se analiza la varianza de varios factores, para los sólidos suspendidos, se realiza varias pruebas y gráficas para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre los sólidos suspendidos. También se evalúa la significancia de las interacciones entre los factores. En la siguiente tabla del ANOVA le permitirán identificar los factores significativos. Para cada factor significativo, las pruebas de rangos múltiples le dirán cuales medias son significativamente diferentes de otras. El gráfico de medias y la gráfica de interacciones le ayudarán a interpretar los efectos significativos. Los gráficos de residuos le ayudarán a juzgar si los datos han violado los supuestos subyacentes al análisis de varianza.

**Tabla 11: Análisis de varianza para sólidos suspendidos**

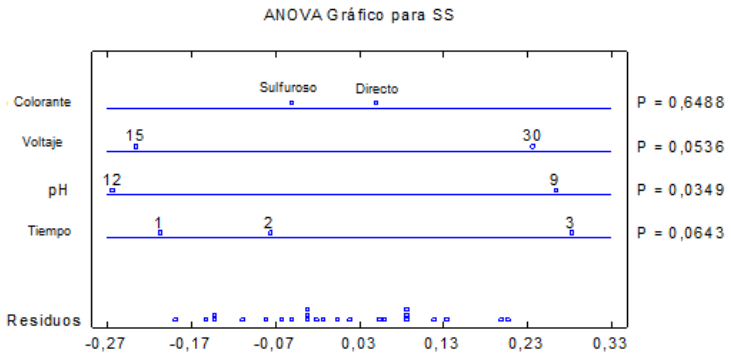
| *Fuente* | *Suma de Cuadrados* | *Gl* | *Cuadrado Medio* | *Razón-F* | *Valor-P* |
|---|---|---|---|---|---|
| EFECTOS PRINCIPALES | | | | | |
| A: tiempo | 0,228248 | 2 | 0,114124 | 3,78 | 0,0643 |
| B: pH | 0,186032 | 1 | 0,186032 | 6,16 | 0,0349 |
| C: voltaje | 0,14868 | 1 | 0,14868 | 4,92 | 0,0536 |
| D: colorante | 0,00670004 | 1 | 0,00670004 | 0,22 | 0,6488 |
| INTERACCIONES | | | | | |
| AB | 0,264662 | 2 | 0,132331 | 4,38 | 0,0469 |
| AC | 0,106079 | 2 | 0,0530395 | 1,76 | 0,2269 |
| AD | 0,0233956 | 2 | 0,0116978 | 0,39 | 0,6896 |
| BC | 0,057135 | 1 | 0,057135 | 1,89 | 0,2022 |
| BD | 0,07249 | 1 | 0,07249 | 2,40 | 0,1557 |
| CD | 0,00670004 | 1 | 0,00670004 | 0,22 | 0,6488 |
| RESIDUOS | 0,271712 | 9 | 0,0301902 | | |
| TOTAL (CORREGIDO) | 1,37183 | 23 | | | |

**Fuente: Los Autores**

**Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual**

En esta tabla encontramos dos factores estadísticamente significativos como es el pH y la interacción del tiempo-pH identificado en la tabla con el literal “A” y las interacciones AB debido a que existe una diferencia entre los niveles que son los pH 9 y 12.

- **Gráfico 10: ANOVA de sólidos suspendidos**




**Fuente: Los Autores**

Al igual que en la tabla de ANOVA los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Dado que el valor-P de el pH, es menor que 0,05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo.

- **Mínimos Cuadrados de Sólidos Suspendidos**

Esta tabla muestra la media de sólidos disueltos para cada uno de los niveles de los factores. Las dos columnas de la extrema derecha muestran intervalos de confianza del 95,0% para cada una de las medias.

- **Tabla 12: Medias por mínimos cuadrados para sólidos suspendidos**

| | | | *Error* | *Límite* | *Límite* |
|---|---|---|---|---|---|
| *Nivel* | *Casos* | *Media* | *Est.* | *Inferior* | *Superior* |
| MEDIA GLOBAL | 24 | 0,161292 | | | |
| Tiempo | | | | | |
| 1 | 8 | 0,06375 | 0,0614311 | -0,0752171 | 0,202717 |
| 2 | 8 | 0,125625 | 0,0614311 | -0,0133421 | 0,264592 |
| 3 | 8 | 0,2945 | 0,0614311 | 0,155533 | 0,433467 |
| pH | | | | | |
| 9 | 12 | 0,249333 | 0,0501583 | 0,135867 | 0,362799 |
| 12 | 12 | 0,07325 | 0,0501583 | -0,0402161 | 0,186716 |
| Voltaje | | | | | |
| 15 | 12 | 0,0825833 | 0,0501583 | -0,0308828 | 0,196049 |
| 30 | 12 | 0,24 | 0,0501583 | 0,126534 | 0,353466 |
| Colorante | | | | | |
| Directo | 12 | 0,178 | 0,0501583 | 0,0645339 | 0,291466 |
| Sulfuroso | 12 | 0,144583 | 0,0501583 | 0,0311172 | 0,258049 |
| Tiempo por pH | | | | | |
| 1,9 | 4 | 0,105 | 0,0868766 | -0,0915291 | 0,301529 |
| 1,12 | 4 | 0,0225 | 0,0868766 | -0,174029 | 0,219029 |
| 2,9 | 4 | 0,115 | 0,0868766 | -0,0815291 | 0,311529 |
| 2,12 | 4 | 0,13625 | 0,0868766 | -0,0602791 | 0,332779 |
| 3,9 | 4 | 0,528 | 0,0868766 | 0,331471 | 0,724529 |
| 3,12 | 4 | 0,061 | 0,0868766 | -0,135529 | 0,257529 |
| Tiempo por voltaje | | | | | |
| 1,15 | 4 | 0,0535 | 0,0868766 | -0,143029 | 0,250029 |
| 1,30 | 4 | 0,074 | 0,0868766 | -0,122529 | 0,270529 |
| 2,15 | 4 | 0,0685 | 0,0868766 | -0,128029 | 0,265029 |
| 2,30 | 4 | 0,18275 | 0,0868766 | -0,0137791 | 0,379279 |
| 3,15 | 4 | 0,12575 | 0,0868766 | -0,0707791 | 0,322279 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 3,30 | 4 | 0,46325 | 0,0868766 | 0,266721 | 0,659779 |
| Tiempo por colorante | | | | | |
| 1, directo | 4 | 0,08275 | 0,0868766 | -0,113779 | 0,279279 |
| 1, sulfuroso | 4 | 0,04475 | 0,0868766 | -0,151779 | 0,241279 |
| 2, directo | 4 | 0,103 | 0,0868766 | -0,0935291 | 0,299529 |
| 2, sulfuroso | 4 | 0,14825 | 0,0868766 | -0,0482791 | 0,344779 |
| 3, directo | 4 | 0,34825 | 0,0868766 | 0,151721 | 0,544779 |
| 3, sulfuroso | 4 | 0,24075 | 0,0868766 | 0,0442209 | 0,437279 |
| pH por voltaje | | | | | |
| 9,15 | 6 | 0,121833 | 0,0709345 | -0,038632 | 0,282299 |
| 9,30 | 6 | 0,376833 | 0,0709345 | 0,216368 | 0,537299 |
| 12,15 | 6 | 0,0433333 | 0,0709345 | -0,117132 | 0,203799 |
| 12,30 | 6 | 0,103167 | 0,0709345 | -0,0572987 | 0,263632 |
| pH por colorante | | | | | |
| 9, directo | 6 | 0,321 | 0,0709345 | 0,160535 | 0,481465 |
| 9, sulfuroso | 6 | 0,177667 | 0,0709345 | 0,0172013 | 0,338132 |
| 12, directo | 6 | 0,035 | 0,0709345 | -0,125465 | 0,195465 |
| 12, sulfuroso | 6 | 0,1115 | 0,0709345 | -0,0489653 | 0,271965 |
| Voltaje por colorante | | | | | |
| 15, directo | 6 | 0,116 | 0,0709345 | -0,0444653 | 0,276465 |
| 15, sulfuroso | 6 | 0,0491667 | 0,0709345 | -0,111299 | 0,209632 |
| 30, directo | 6 | 0,24 | 0,0709345 | 0,0795347 | 0,400465 |
| 30, sulfuroso | 6 | 0,24 | 0,0709345 | 0,0795347 | 0,400465 |

**Fuente: Los Autores**

Es una manera de estimar en donde se encuentran los valores máximos y mínimos de cada ensayo, todos los datos se encuentran dentro del rango normal para cada práctica.

- **Pruebas de Múltiples Rangos de Sólidos Suspendidos**

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. Se ha colocado un asterisco junto a 1 par, indicando que este par muestra diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza.

En la parte superior de la tabla, se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

- **Tabla 13: Pruebas de múltiples rangos para sólidos suspendidos por tiempo**

**Método: 95,0 porcentaje LSD**

| *Tiempo* | *Casos* | *Media LS* | *Sigma LS* | *Grupos Homogéneos* |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 8 | 0,06375 | 0,0614311 | X |
| 2 | 8 | 0,125625 | 0,0614311 | XX |
| 3 | 8 | 0,2945 | 0,0614311 | X |

| *Contraste* | *Sig.* | *Diferencia* | *+/- Límites* |
|---|---|---|---|
| 1 - 2 | | -0,061875 | 0,196529 |
| 1 - 3 | * | -0,23075 | 0,196529 |
| 2 - 3 | | -0,168875 | 0,196529 |

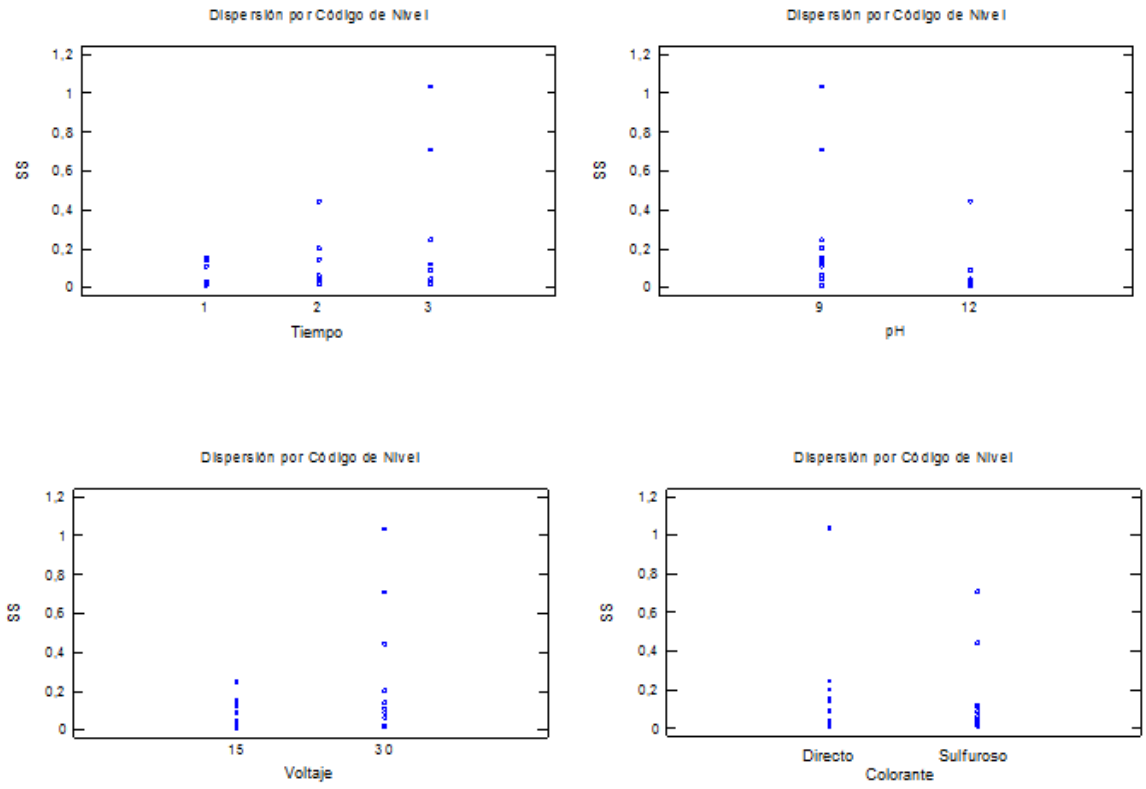
*** Indica una diferencia significativa**

**Fuente: Los Autores**

En esta tabla podemos observar que el contraste entre el 1 – 3 existe una diferencia significativa debido que existe una variación entre la primera hora de tratamiento y la tercera hora de tratamiento.

- **Gráfico 11: Dispersiones de sólidos suspendidos**

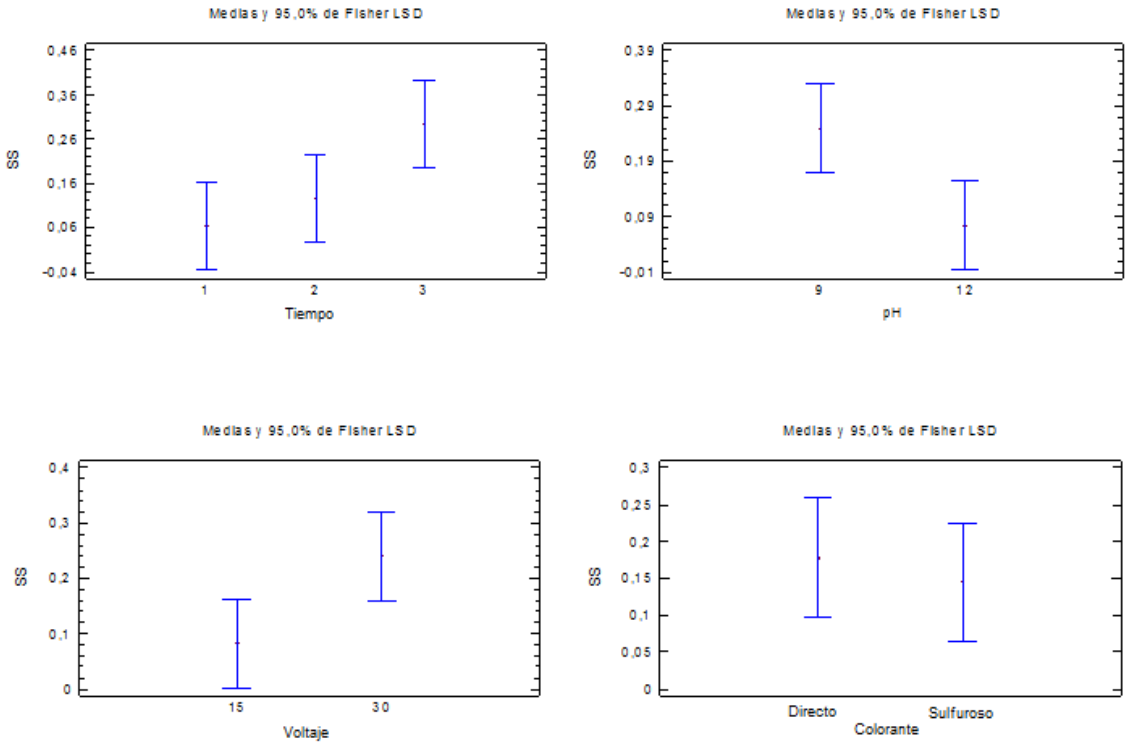
En el siguiente gráfico podemos observar los valores de dispersión que están distribuidos los datos estudiados, basándonos en las tablas anteriores existe diferencia significativa en todos los factores, siendo esta dispersión no muy homogénea.




**Fuente: Los Autores**

- **Gráfico 12: Medias de Sólidos Suspendidos**

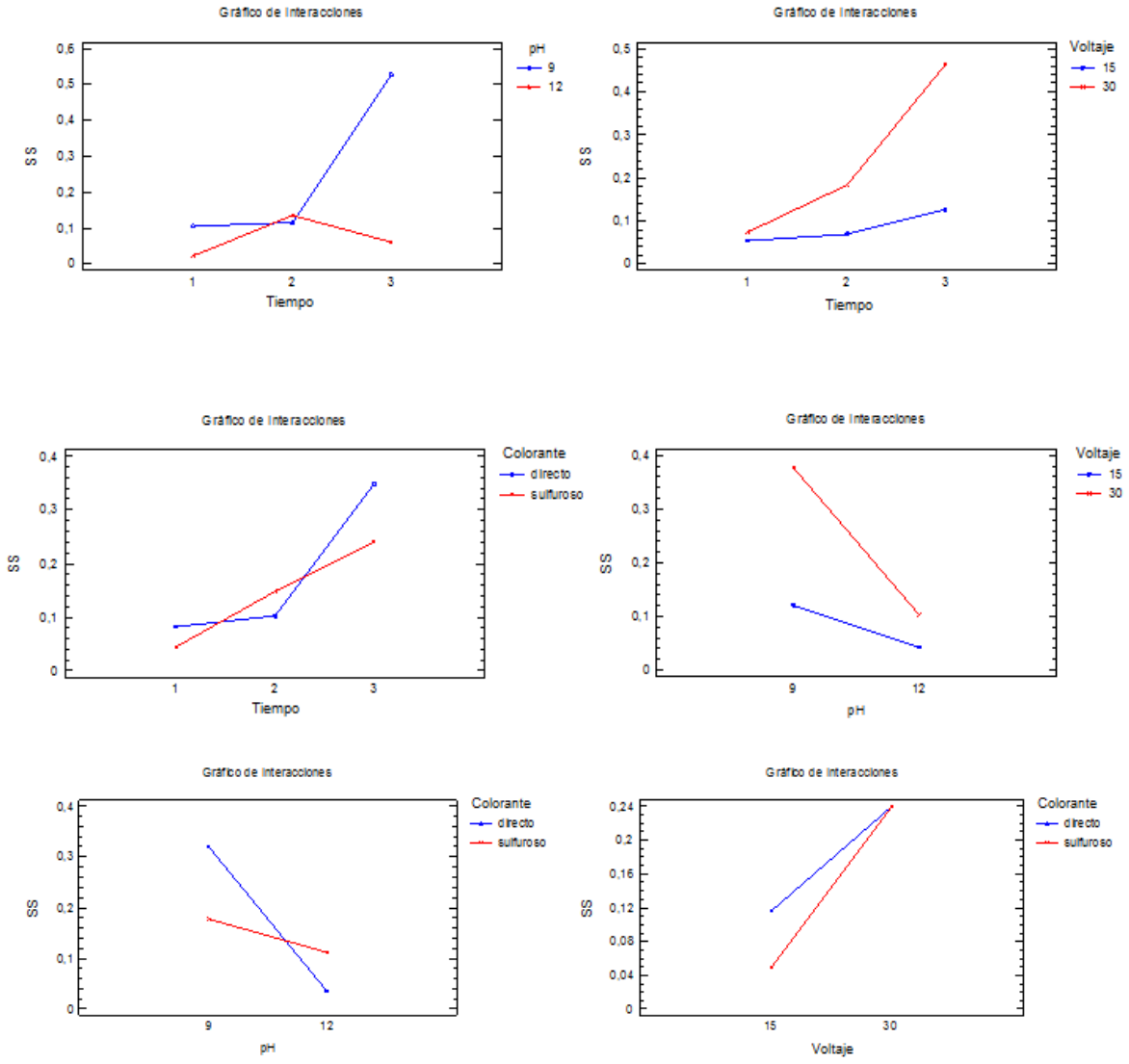
En el siguiente gráfico podemos observar las medias en gráficos de bigotes de cada uno de los factores estudiados, basándonos en las tablas anteriores confirmamos que los factores con una variación estadísticamente significativa son el pH, y el voltaje.




**Fuente: Los Autores**

- **Gráfico 13: Interacciones de Sólidos Suspendidos**

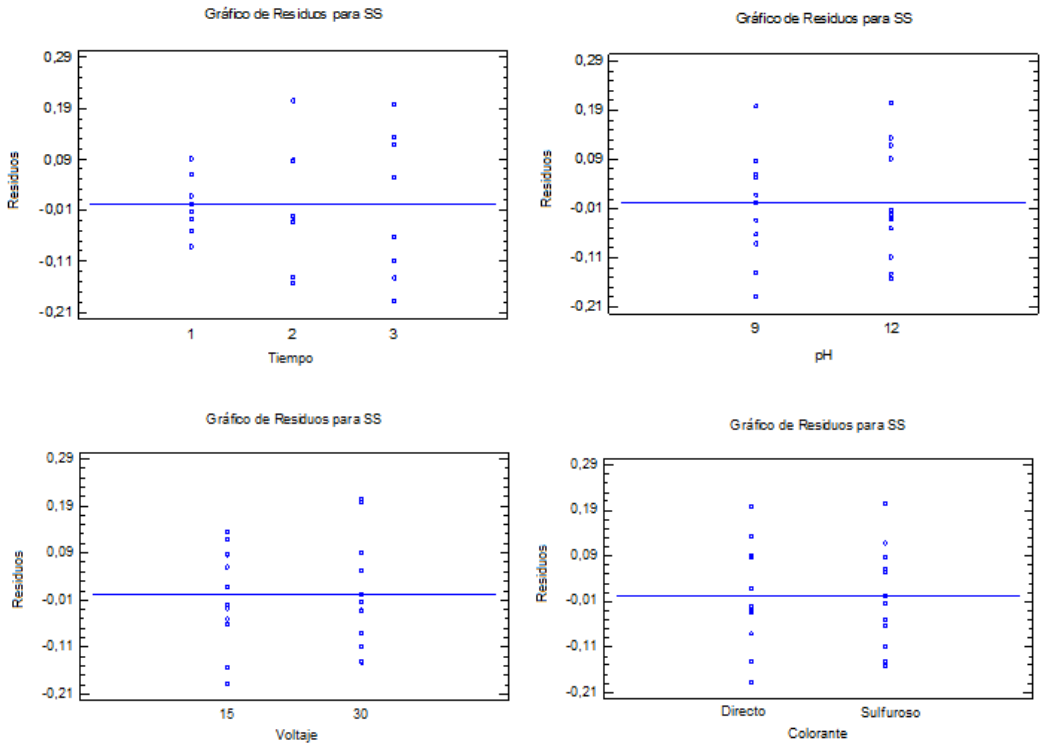
En este gráfico podemos apreciar las interacciones del tratamiento, como indicamos anteriormente en este punto los sólidos suspendidos tienden a incrementar, con excepción del voltaje - pH, colorante - pH siendo que en estas interacciones son significativas.



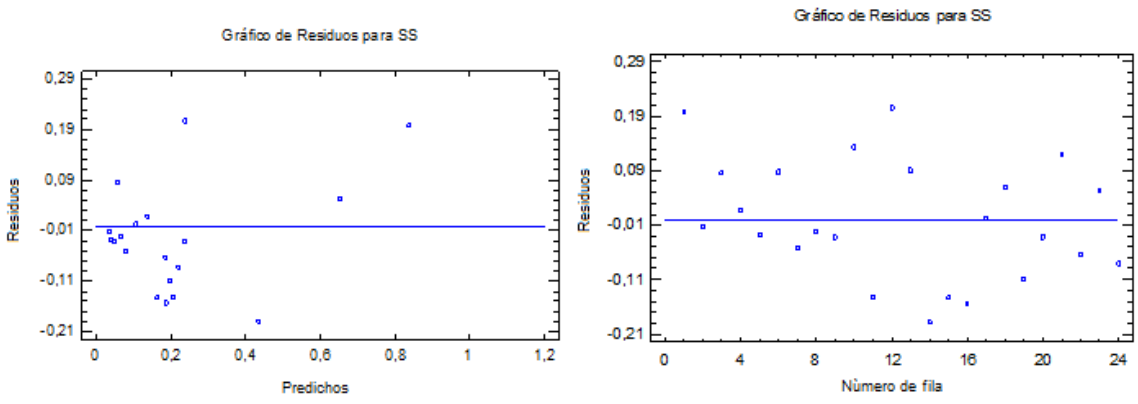

**Fuente: Los Autores**

- **Gráfico 14: Residuos de Sólidos Suspendidos**

Los residuos están ubicados en linealidad debido a que la mayoría de resultados se encuentran dentro del rango normal.




Los residuos de predichos y número de fila están dispersos de una manera homogénea.




**Fuente: Los Autores**

### 4.2.3. Análisis de Sólidos Disueltos

Para este análisis tenemos que considerar que es la parte final del proceso y si tenemos menos sólidos suspendidos el tratamiento tiene una mayor eficiencia, las unidades para esta variable de respuesta es (mg/l), los factores que se tomaron en cuenta son:

Tiempo (hora)
pH
Voltaje (volteos)
Colorante

- **Varianza o ANOVA de sólidos disueltos**

Para este procedimiento se analiza la varianza de varios factores, para los Sólidos Disueltos, se realiza varias pruebas y gráficas para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre los sólidos disueltos. También se evalúa la significancia de las interacciones entre los factores. En la siguiente tabla del ANOVA le permitirán identificar los factores significativos. Para cada factor significativo, las pruebas de rangos múltiples le dirán cuales medias son significativamente diferentes de otras. El gráfico de medias y la gráfica de interacciones le ayudarán a interpretar los efectos significativos. Los gráficos de residuos le ayudarán a juzgar si los datos han violado los supuestos subyacentes al análisis de varianza.

**Tabla 14: Análisis de Varianza para Sólidos Disueltos - Suma de Cuadrados Tipo III**

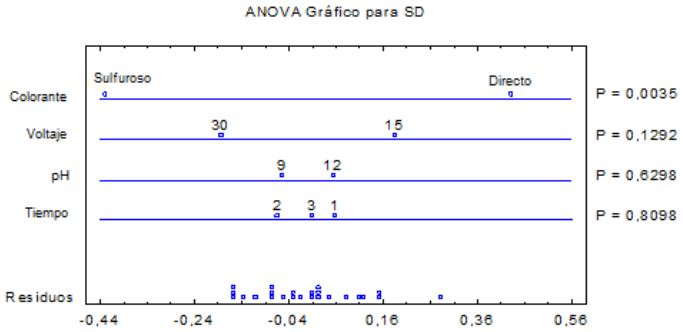
| *Fuente* | *Suma de Cuadrados* | *Gl* | *Cuadrado Medio* | *Razón-F* | *Valor-P* |
|---|---|---|---|---|---|
| EFECTOS PRINCIPALES | | | | | |
| A: tiempo | 0,0138731 | 2 | 0,00693654 | 0,22 | 0,8098 |
| B: pH | 0,0079935 | 1 | 0,0079935 | 0,25 | 0,6298 |
| C: voltaje | 0,0895482 | 1 | 0,0895482 | 2,79 | 0,1292 |
| D: colorante | 0,49364 | 1 | 0,49364 | 15,38 | 0,0035 |
| INTERACCIONES | | | | | |
| AB | 0,0870893 | 2 | 0,0435446 | 1,36 | 0,3056 |
| AC | 0,0349951 | 2 | 0,0174975 | 0,55 | 0,5978 |
| AD | 0,00507858 | 2 | 0,00253929 | 0,08 | 0,9246 |
| BC | 0,0148007 | 1 | 0,0148007 | 0,46 | 0,5142 |
| BD | 0,000962667 | 1 | 0,000962667 | 0,03 | 0,8664 |
| CD | 0,0580167 | 1 | 0,0580167 | 1,81 | 0,2118 |
| RESIDUOS | 0,28895 | 9 | 0,0321055 | | |
| TOTAL (CORREGIDO) | 1,09495 | 23 | | | |

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

**Fuente: Los Autores**

El único factor estadísticamente significativo es el Colorante identificado en la tabla con el literal “D” debido a que existe una diferencia entre los niveles que son los colorantes negro sulfuroso y el colorante de tipo directo.

- **Gráfico 15: ANOVA de Sólidos Disueltos**




**Fuente: Los Autores**

Al igual que en la tabla de ANOVA los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Dado que un valor-P de el colorante es menor que 0,05, este factor tiene un efecto estadísticamente significativo, este resultado se debe a que existe gran diferencia entre los colorantes sulfuroso y el directo.

- **Medias por Mínimos Cuadrados de Sólidos Disueltos**

Esta tabla muestra la media de Sólidos Disueltos para cada uno de los niveles de los factores. Las dos columnas de la extrema derecha muestran intervalos de confianza del 95,0% para cada una de las medias.

**Tabla 14: Medias por Mínimos Cuadrados para Sólidos Disueltos**

| | | | *Error* | *Límite* | *Límite* |
|---|---|---|---|---|---|
| *Nivel* | *Casos* | *Media* | *Est.* | *Inferior* | *Superior* |
| MEDIA GLOBAL | 24 | 0,155333 | | | |
| Tiempo | | | | | |
| 1 | 8 | 0,182625 | 0,0633497 | 0,0393176 | 0,325932 |
| 2 | 8 | 0,124125 | 0,0633497 | -0,0191824 | 0,267432 |
| 3 | 8 | 0,15925 | 0,0633497 | 0,0159426 | 0,302557 |
| pH | | | | | |
| 9 | 12 | 0,137083 | 0,0517248 | 0,0200734 | 0,254093 |
| 12 | 12 | 0,173583 | 0,0517248 | 0,0565734 | 0,290593 |
| Voltaje | | | | | |
| 15 | 12 | 0,216417 | 0,0517248 | 0,0994067 | 0,333427 |
| 30 | 12 | 0,09425 | 0,0517248 | -0,02276 | 0,21126 |
| Colorante | | | | | |
| Directo | 12 | 0,29875 | 0,0517248 | 0,18174 | 0,41576 |
| Sulfuroso | 12 | 0,0119167 | 0,0517248 | -0,105093 | 0,128927 |
| Tiempo por pH | | | | | |
| 1,9 | 4 | 0,13725 | 0,08959 | -0,0654172 | 0,339917 |
| 1,12 | 4 | 0,228 | 0,08959 | 0,0253328 | 0,430667 |
| 2,9 | 4 | 0,0495 | 0,08959 | -0,153167 | 0,252167 |
| 2,12 | 4 | 0,19875 | 0,08959 | -0,00391723 | 0,401417 |
| 3,9 | 4 | 0,2245 | 0,08959 | 0,0218328 | 0,427167 |
| 3,12 | 4 | 0,094 | 0,08959 | -0,108667 | 0,296667 |
| Tiempo por voltaje | | | | | |
| 1,15 | 4 | 0,22875 | 0,08959 | 0,0260828 | 0,431417 |
| 1,30 | 4 | 0,1365 | 0,08959 | -0,0661672 | 0,339167 |
| 2,15 | 4 | 0,14775 | 0,08959 | -0,0549172 | 0,350417 |
| 2,30 | 4 | 0,1005 | 0,08959 | -0,102167 | 0,303167 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 3,15 | 4 | 0,27275 | 0,08959 | 0,0700828 | 0,475417 |
| 3,30 | 4 | 0,04575 | 0,08959 | -0,156917 | 0,248417 |
| Tiempo por colorante | | | | | |
| 1, directo | 4 | 0,3295 | 0,08959 | 0,126833 | 0,532167 |
| 1, sulfuroso | 4 | 0,03575 | 0,08959 | -0,166917 | 0,238417 |
| 2, directo | 4 | 0,24825 | 0,08959 | 0,0455828 | 0,450917 |
| 2, sulfuroso | 4 | 0,0 | 0,08959 | -0,202667 | 0,202667 |
| 3, directo | 4 | 0,3185 | 0,08959 | 0,115833 | 0,521167 |
| 3, sulfuroso | 4 | 0,0 | 0,08959 | -0,202667 | 0,202667 |
| pH por voltaje | | | | | |
| 9,15 | 6 | 0,173333 | 0,07315 | 0,00785624 | 0,33881 |
| 9,30 | 6 | 0,100833 | 0,07315 | -0,0646438 | 0,26631 |
| 12,15 | 6 | 0,2595 | 0,07315 | 0,0940229 | 0,424977 |
| 12,30 | 6 | 0,0876667 | 0,07315 | -0,0778104 | 0,253144 |
| pH por colorante | | | | | |
| 9, directo | 6 | 0,274167 | 0,07315 | 0,10869 | 0,439644 |
| 9, sulfuroso | 6 | 0,0 | 0,07315 | -0,165477 | 0,165477 |
| 12, directo | 6 | 0,323333 | 0,07315 | 0,157856 | 0,48881 |
| 12,sulfuroso | 6 | 0,0238333 | 0,07315 | -0,141644 | 0,18931 |
| Voltaje por colorante | | | | | |
| 15, directo | 6 | 0,409 | 0,07315 | 0,243523 | 0,574477 |
| 15, sulfuroso | 6 | 0,0238333 | 0,07315 | -0,141644 | 0,18931 |
| 30, directo | 6 | 0,1885 | 0,07315 | 0,0230229 | 0,353977 |
| 30, sulfuroso | 6 | 0,0 | 0,07315 | -0,165477 | 0,165477 |

**Fuente: Los Autores**

Es una manera de estimar en donde se encuentran los valores máximos y mínimos de cada ensayo, todos los datos se encuentran dentro del rango normal para cada práctica.

- **Pruebas de Múltiple Rangos de Sólidos Disueltos**

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. Se ha identificado un grupo homogéneo, según la alineación de las X's por lo que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los niveles. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher.

**Tabla 15: Pruebas de Múltiple Rangos para Sólidos Disueltos por tiempo**

**Método: 95,0 porcentaje LSD**

| *Tiempo* | *Casos* | *Media LS* | *Sigma LS* | *Grupos Homogéneos* |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 8 | 0,124125 | 0,0633497 | X |
| 3 | 8 | 0,15925 | 0,0633497 | X |
| 1 | 8 | 0,182625 | 0,0633497 | X |

| *Contraste* | *Sig.* | *Diferencia* | *+/- Límites* |
|---|---|---|---|
| 1 - 2 | | 0,0585 | 0,202667 |
| 1 - 3 | | 0,023375 | 0,202667 |
| 2 - 3 | | -0,035125 | 0,202667 |

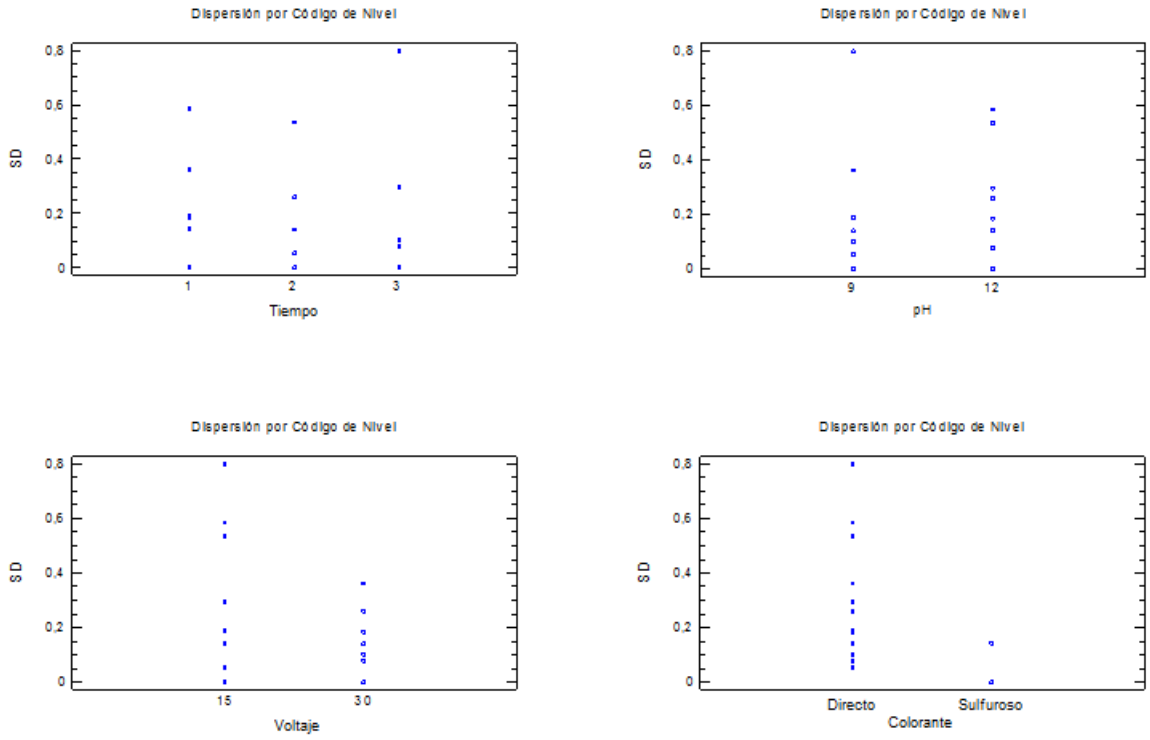
*** Indica una diferencia significativa**

**Fuente: Los Autores**

En esta tabla podemos observar que todos los resultados son homogéneos con respecto al tiempo.

- **Gráfico 16: Dispersiones de Sólidos Disueltos**

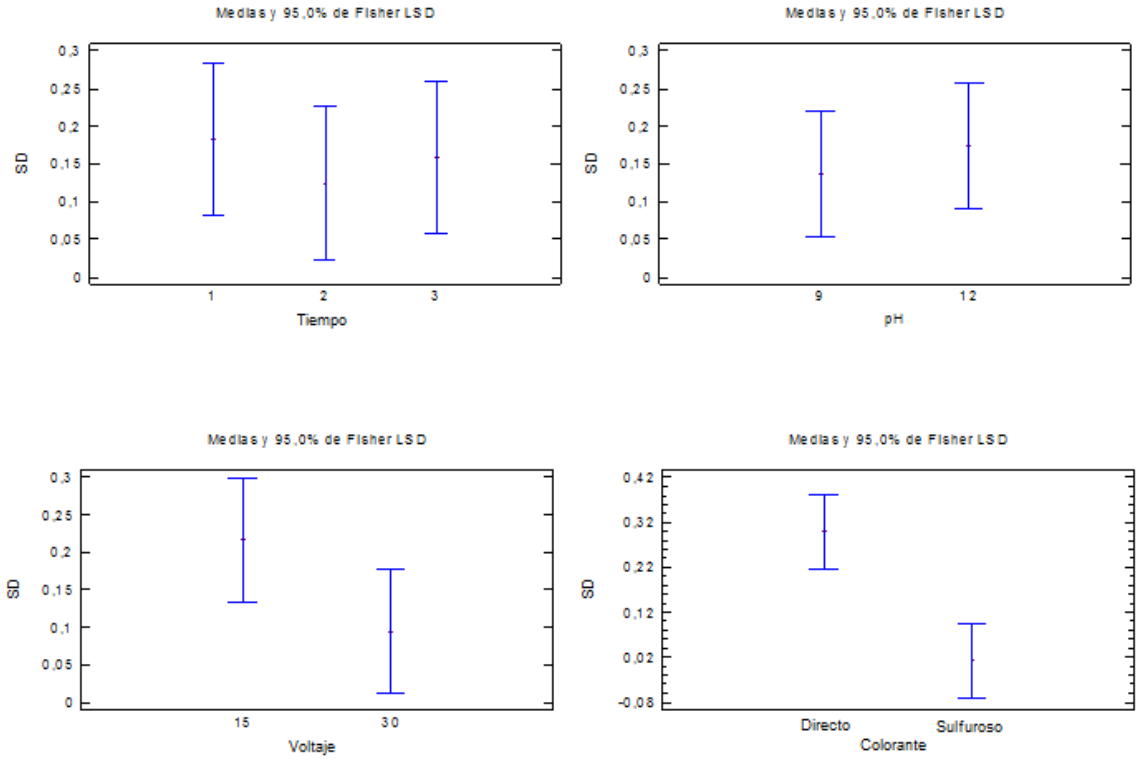
En el siguiente gráfico podemos observar los valores de dispersión de cada uno de los factores estudiados, basándonos en las tablas anteriores confirmamos que el único factor con una dispersión significativa es el colorante.




**Fuente: Los Autores**

- **Gráfico 17: Medias de Sólidos Disueltos**

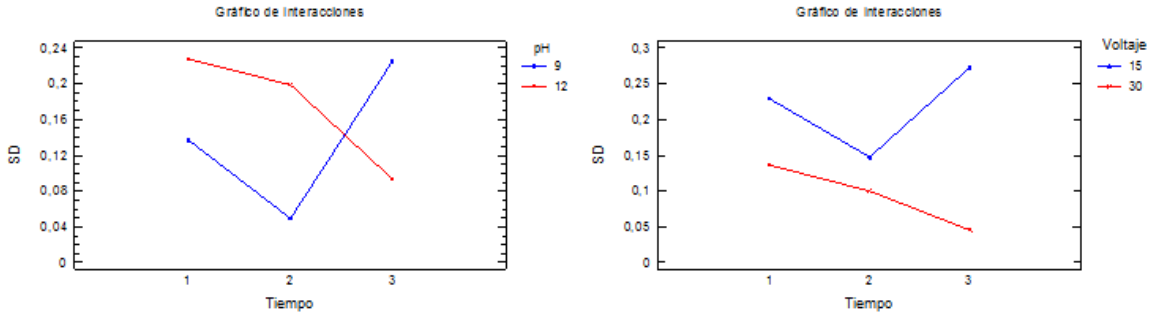
En el siguiente gráfico podemos observar las medias en gráficos de bigotes de cada uno de los factores estudiados, basándonos en las tablas anteriores confirmamos que el único factor con una variación estadísticamente significativa es el colorante.



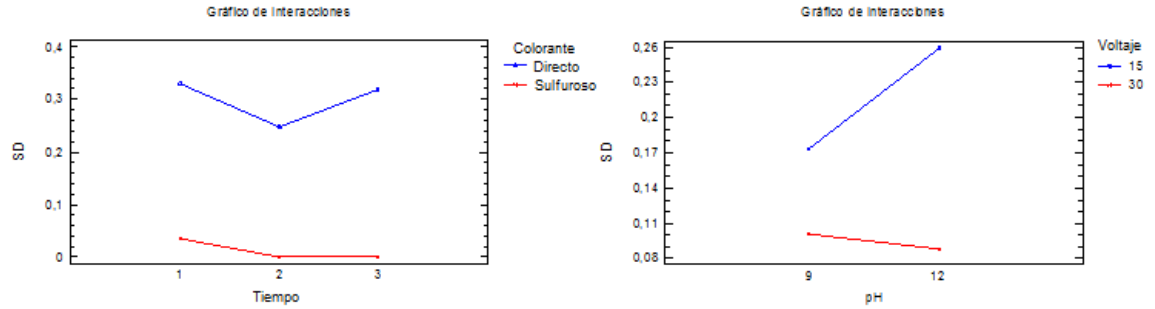

**Fuente: Los Autores**

- **Gráfico 18: Interacciones de Sólidos Disueltos**

Este gráfico corrobora lo que se ha discutido en los capítulos anteriores que el tratamiento tiene una mayor eficiencia con un pH de 12 y con un voltaje de 30, puesto que en este punto encontramos una cantidad menor de Sólidos Disueltos.



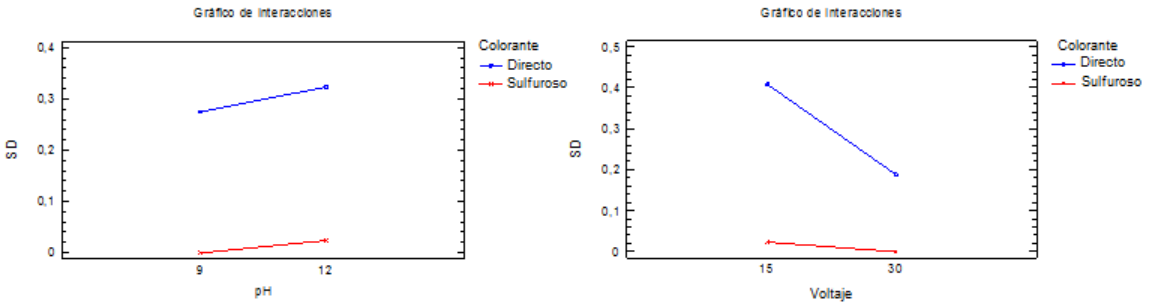

El colorante que mejor reacciona en estas condiciones es el negro sulfuroso devido a que en un periodo de tres horas los Sólido Disueltos llegan a disminuir en su totalidad.




**Fuente: Los Autores**

Es obvio que el colorante tenga una mayor cantidad de sólidos disueltos con un pH mayor debido a la utilización de sosa cáustica para alterar el pH.

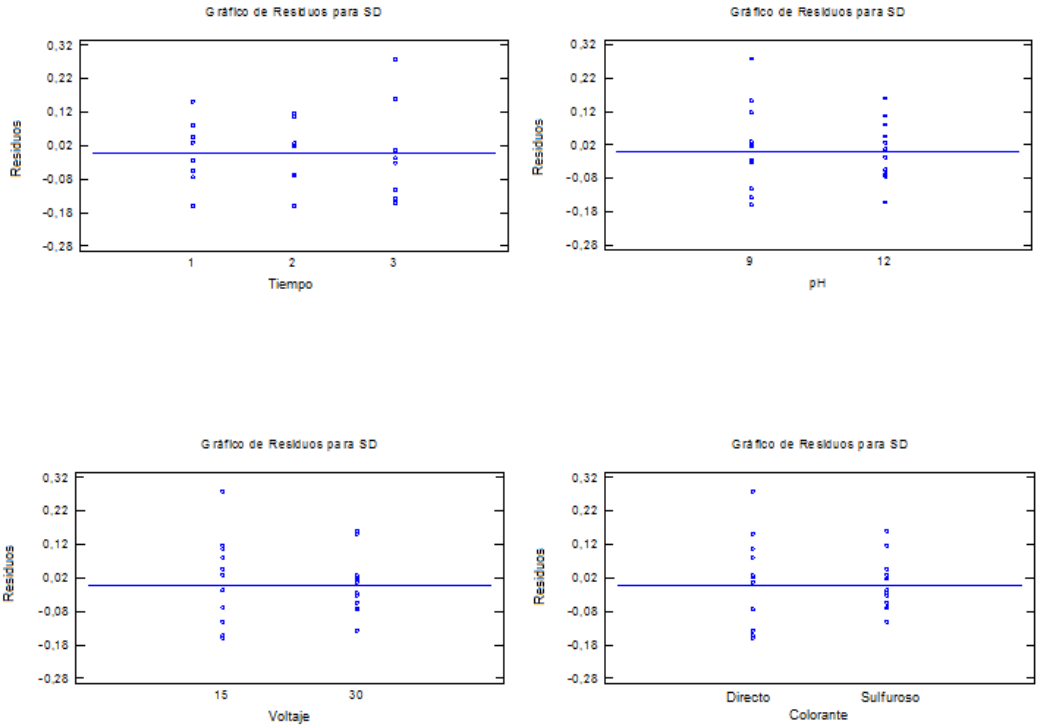
El tratamiento reacciona de mejor manera con un mayor voltaje, en este caso los dos colorantes tratados demuestran esta teoría.



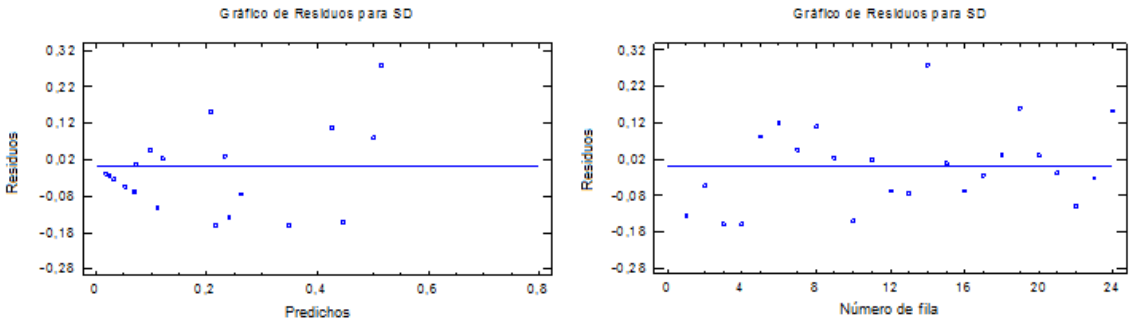

**Fuente: Los Autores**

- **Gráfico 19: Residuos de Sólidos Disueltos**

Los residuos están ubicados en linealidad debido a que la mayoría de resultados se encuentran dentro del rango normal.




Los residuos de predichos y número de fila están dispersos de una manera homogénea.




**Fuente: Los Autores**

# CAPÍTULO V

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 5.1. ANTECEDENTES

Para nuestro trabajo de investigación realizamos prácticas en laboratorio tanto físicas como químicas, para la misma se planteó: monitorear tres variables de respuesta como son las unidades de color, los sólidos en suspensión, y sólidos disueltos, los factores utilizados fueron, colorante, pH, tiempo, voltaje como ya lo detallamos en los capítulos anteriores.

## 5.2. CONCLUSIONES

- Se concluye que se acepta la $H_1$ según los valores estadísticos que encontramos en el Capítulo IV y se demuestra que el tratamiento es estadísticamente significativo, al registrar decoloración de 70%, aproximadamente dependiendo la combinación de los factores.

- Luego del análisis estadístico de las unidades de color, se determina que el factor pH y que el factor colorante es estadísticamente significativo, ya que conjuntamente con el gráfico de interacción se puede observar que existe menor cantidad de unidades de color con colorante sulfuroso y pH 12, debido a que el pH influye en este proceso.

- Según los resultados observados de sólidos suspendidos estos tienden a incrementar en el tiempo con algunas excepciones como vemos en el gráfico de interacción, esta variable tiende a incrementar debido a que el tratamiento funciona de esta manera.

- De acuerdo al gráfico de medias de sólidos suspendidos observamos que el pH y el voltaje son los factores estadísticamente significativos por lo tanto siendo este un punto importante en el tratamiento se debería considerar estos factores.

- En el análisis de los sólidos disueltos podemos observar según la tabla del ANOVA que el factor que más influye es el colorante, por lo que se debería considerar este factor al iniciar el tratamiento para una mayor eficiencia.

- De acuerdo al gráfico de medias de sólidos disueltos observamos que el colorante es el factor estadísticamente significativo por lo tanto siendo este un punto importante en el tratamiento se debería considerar estos factores.

- Los sólidos disueltos es la etapa final del tratamiento donde disminuye en su totalidad las unidades de color pudiendo llegar aproximadamente de 70% a 90% de decoloración dependiendo de los factores que se involucren en el tratamiento.

- El objetivo del tratamiento de electrocoagulación es coagular las partículas que se encuentran dentro de la solución, para precipitarlas por su peso y que estas sean retenidas por los filtros.

- Los factores con mayor influencia en el tratamiento son el pH 12 voltaje 30 colorante sulfuroso en un tiempo de tres horas teniendo presente que esta combinación es la que da un mayor rendimiento al proceso.

## 5.3. RECOMENDACIONES

- Se debería considerar los costos de implementación del sistema y si estos justifican el tratamiento electroquímico.

- Es necesario tomar en cuenta el espacio físico adecuado para el tratamiento electroquímico.

- Los electrodos deben ser renovados en cada tratamiento.

- Se debe tener especial cuidado cuando está en funcionamiento el tratamiento, los electrodos no deben tener contacto debido a que se produciría un corto circuito en la fuente poder

- Para la implantación de un sistema de tratamiento electroquímico de aguas de las tintorerías, se debe tener precaución en el material que contenga la celda electrolítica, para así evitar posibles cortos circuitos.

- Los frascos para la medición de las unidades de color deben estar sin contaminación externa.

- En el tratamiento electroquímico necesariamente se debe realizar las prácticas químicas y físicas, ya que solamente realizando la primero no se obtiene el rendimiento de decoloración esperado.

# ANEXOS

## Anexo 1: Análisis de las aguas tomadas de las Tintorerías.

ETAPA

**LSGA**

LABORATORIO DE LA SUBGERENCIA DE GESTION AMBIENTAL
Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca
**Telf : 2890418 - 2890463**

**ENSAYOS**
**Nº OAE LE 2C 06-004**

**INFORME DE RESULTADOS**

Página 1 de 1

FECHA: 2010/04/29

INFORME Nº: 225/10

**CLIENTE**
NOMBRE: Srta. Nataly Maldonado
DIRECCIÓN: Pasaje Madrid y Madrid - Cuenca

**MUESTRA**
CODIGO: 225/01/10
DESCRIPCIÓN: Efluente lavadora de pantalones
PROCEDENCIA: Lavadora de pantalones
FECHA DE RECEPCIÓN: 2010/04/21
ENTREGADAS POR: Srta. Nataly Maldonado

RESULTADOS

| PARAMETRO | METODO | FECHA REALIZACION | UNIDADES | EFLUENTE LAVADORA DE PANTALONES 225/01/10 |
|---|---|---|---|---|
| COLOR APARENTE | SM2120 C | 21/04/2010 | UC | 22050 |
| COLOR REAL | SM2120 C | 21/04/2010 | UC | 10800 |
| DBO5 | PEE/LSGA/FQ/01 | 2010/04/21 2010/04/26 | mg/l | 8000 |
| DQO | PEE/LSGA/FQ/02 | 2010/04/21 | mg/l | 18290 |
| pH | SM 4500 H B | 2010/04/21 | | 12.66 |
| SÒLIDOS SUSPENDIDOS | PEE/LSGA/FQ/04 | 2010/04/22 | mg/l | 3570 |
| SUST. SOLUBLES AL HEXANO | SM 5520 D | 2010/04/26 | mg/l | 208 |

SM: STANDARD METHODS, Edición 21

| PARÁMETRO | DBO5 | DQO | SOLID. SUSPENDIDOS |
|---|---|---|---|
| INCERTIDUMBRE | 15.4 % | 9.9% | 15.8% |

Atentamente,

Ing. Yolanda Torres Moscoso
RESPONSABLE DEL LABORATORIO

- *Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.*
- *Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.*
- *Los ensayos marcados no están incluidos en el alcance de acreditación.*

MC0406-06

**Fuente: ETAPA**

## Anexo 2: Análisis de las aguas realizadas en laboratorio.

| ETAPA LSGA | INFORME DE RESULTADOS | Página 1 de 1 |
|---|---|---|

LABORATORIO DE LA SUBGERENCIA DE GESTION AMBIENTAL
Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca
**Telf : 2890418 - 2890463**

FECHA: 2010/06/04 INFORME Nº: 302/10

**CLIENTE**
NOMBRE: SR. RENATO MOLINA
DIRECCIÓN: Dávila Chica y Antonio Delgado - Gualaceo

**MUESTRA**
CODIGO: 302/01-02/10
DESCRIPCIÓN: Muestra preparada en laboratorio
PROCEDENCIA: Universidad Politécnica
FECHA DE RECEPCIÓN: 2010/06/02
ENTREGADAS POR: Sr. Renato Molina

RESULTADOS

| PARAMETRO | METODO | FECHA REALIZACION | UNIDADES | Muestra 1 302/01/10 |
|---|---|---|---|---|
| COLOR APARENTE | SM2120 C | 2010/06/02 | UC | 30900 |

| PARAMETRO | METODO | FECHA REALIZACION | UNIDADES | Muestra 2 302/02/10 |
|---|---|---|---|---|
| COLOR APARENTE | SM2120 C | 2010/06/02 | UC | 31200 |

SM: STANDARD METHODS, Edición 21

Atentamente,

Ing. Yolanda Torres Moscoso
RESPONSABLE DEL LABORATORIO

- *Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.*
- *Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.*

**Fuente: ETAPA**

# BIBLIOGRAFÍA

- Martínez, Javier, La importancia del agua, 27 de Abril de 2011, http://www.cuentascuentos.com/la-importancia-del-agua/
- Wikipedia, Agua, 20 de Abril de 2010, http://es.wikipedia.org/wiki/Agua.
- Adriana Aristizabal, Catalina Bermudez, Estudio de la Factibilidad de un sistema de electrocoagulacion para tratamiento de aguas procedentes de lavanderias industriales con fines de reuso, 05 de Febrero de 2011, http://es.scribd.com/doc/500216/Estudio-de-la-electrocoaguacion-como-tratamiento-de-aguas-residuales-industriales.
- El cuidado del agua, 23 de Junio de 2010, http://educasitios.educ.ar/grupo068/?q=node
- GUTIERREZ, Humberto y VARA, Román, *Análisis y diseño de experimentos*, Segunda edición, McGraw-Hill Interamericana, México, 2008.
- OROZCO, Carmen, y otros, *Contaminación Ambiental una visión desde la química*, primera edición, Thomson Editores, España, 2003.
- Luis Echarri Prim, Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, 03 de Mayo de 2010, http://www.tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/indice.html
- Contaminación por petróleo, 03 de Mayo de 2010, http://www.sagan-gea.org/hojared_AGUA/paginas/14agua.html
- El agua, 20 de Mayo de 2011, http://html.rincondelvago.com/contaminacion-del-agua_4.html
- Wikipedia, Eutrofización, 20 de Mayo de 2010, http://es.wikipedia.org/wiki/Eutrofizaci%C3%B3n
- Ríos, 10 de Julio de 2010, http://www.laanunciataikerketa.com/jaizkibel_rios.pdf
- Corporación de Estudios y Publicaciones, *Control y Prevención de la Contaminación*, primera edición, Talleres de la Corporación de Estudios, y Publicaciones, Quito - Ecuador, TOMO V.
- Lorena Salazar Gómez, Tratamiento de aguas residuales textiles mediante un biorreactor de membrana, 26 de Julio de 2010, http://ciruelo. uninorte.edu.co/pdf/ingenieria_desarrollo/26/6_Tratamiento%20de%20aguas%20residuales.pdf.
- Wikipedia, Electrolito, 22 de Noviembre de 2010, http://es.wikipedia.org/wiki/Electrolito
- Wikipedia, Electrolisis, 20 de Noviembre de 2010, http://es.wikipedia.org/wiki/Electr%C3%B3lisis

- La corriente eléctrica y el movimiento de iones, 10 de Julio de 2010, http://labquimica.wordpress.com/2008/08/06/la-corriente-electrica-y-el-movimiento-de-iones/

- ucm.es, Sistema de Electroflotación, 05 de Noviembre de 2010 http://www.ucm.es/info/iqpapel/equipos/electroflotacion.htm#electroflotacion.

- Definición de fuente poder, 10 de Diciembre de 2010, http://definicion.de/fuente-de-poder/

- Wikipedia, Acero, 10 de Diciembre de 2010, http://es.wikipedia.org/wiki/Acero.

- Wikipedia, Aleaciones de Aluminio, 03 de Noviembre de 2010, http://es.wikipedia.org/wiki/Aleaciones_de_aluminio

- Composición de oscurecimiento, 03 de Noviembre de 2010, http://patentados.com/patente/composicion-de-oscurecimiento/

- Manual de operación, 10 de Enero de 2011, http://www.lamotte.com/pages/global/pdf/spanish/1919mnsp.pdf