

Índice

EDITORIAL	1
EFFECTO DE LA ELECTROCOAGULACIÓN EN LA BIODEGRADABILIDAD DE EFLUENTES INDUSTRIALES MEZCLADOS	3
RECONOCIMIENTO DE LA MIEL ADULTERADA CON GLUCOSA	17
DETERMINACIÓN DE DEXTRANA EN PRODUCTOS DE LA INDUSTRIA AZUCARERA	21
MODELO SISTÉMICO DE REDES DE NODOS COGNITIVOS PARA EL DISEÑO DE AULAS VIRTUALES	29
EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA PERFORACIÓN DE POZOS PETROLEROS, MEDIANTE CASING DRILLING VS PERFORACIÓN CONVENCIONAL	38
TIEMPOS DE RESPUESTA EN TRÁMITES DE LICENCIAS AMBIENTALES	47
COSTO DE VIDRIOS DEFECTUOSOS EN LA PRODUCCIÓN INDUSTRIAL	61
INNOVACIÓN TECNOLÓGICA EN SUPERVISIÓN DE OBRAS	71
¿ACTIVIDAD SISMICA EN SANTA CRUZ?	84

DIRECTORIO COMITÉ EDITORIAL

Msc. Gonzalo Rojas Morón
Msc. Orlando Pedraza Mérida
Ing. Mario Jiménez Veizaga
Lic. Miguel Bustos Quiroga

EDITOR

Ing. Mario Jiménez Veizaga

DIRECTOR IIT

COMITÉ REVISOR

Ing. Corrado Vallet Ph. D.
Msc. Roberto Quevedo
Msc. Rodrigo Echeverría (UMSS)
Lic. Marioly Chávez Arteaga
Ing. Hugo Salas Montaña
Ing. Janneth Guzman Ph. D.

DIRECCIONES

Universidad Autónoma
Gabriel René Moreno
Facultad de Ciencias Exactas y
Tecnología
Av. Busch s/n Edificio Facultad de
Tecnología
Telefax: 355-0498
**Instituto de Investigaciones
Tecnológicas**
Módulo 224 - Planta baja
Telefax: 358-4776
Email: mar_ji_ve@yahoo.es

STAFF

Eduardo López Vega
**Edición, Diagramación y Diseño de
Portada**

Richard Soliz Quiroz
Diseñador Gráfico

Diseño e Impresión
Editorial e Imprenta Universitaria

INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Efecto de la electrocoagulación en la biodegradabilidad de efluentes industriales mezclados

Effect of electrocoagulation in the biodegradability of mixed industrial effluents

Miguel Ángel Quiroga Zeballos

Ingeniero Ambiental, Facultad de Ciencias
Exactas y Tecnología, UAGRM
q.z.miguel@gmail.com

M. Sc. Ing. Abraham M. Montaña Suarez

Docente de la Facultad de Ciencias Exactas y
Tecnología, UAGRM

RESUMEN

La presente investigación evaluó el efecto de la electrocoagulación a escala laboratorio en la biodegradabilidad de efluentes industriales mezclados. Por medio de un diseño experimental factorial 2k en bloques con tres factores y puntos centrales adicionales, se comprobó que el pH, densidad de corriente y tiempo de retención son factores que influyen en el incremento de la biodegradabilidad. El tratamiento de electrocoagulación incrementó el índice de biodegradabilidad de 0.71 a 0.84, desde 0.43 a 0.93 y de 0.25 hasta 0.77 cuando las condiciones de operación son pH 9, densidad de corriente 44.29 A/m² y tiempo de retención de 3 min. Además, se lograron remociones en DBO₅ de 51.2% y en DQO de 73.44% con un pH de 5, densidad de corriente de 44.29 A/m² y tiempo de retención 9 min. También se obtuvieron consumos de energía

desde 0.075 kWh/m³ hasta 0.675 kWh/m³ y eficiencias de corriente de 97.13% y 220%.

Palabras claves: Electrocoagulación, biodegradabilidad, índice de biodegradabilidad, DBO₅, DQO, consumo de energía, eficiencia de corriente, efluentes industriales mezclados, diseño factorial en bloques, superficie de respuesta.

ABSTRACT

This investigation evaluated the effects of electrocoagulation in laboratory scale on the biodegradability of mixed industrial effluents. Through a factorial experimental design 2k in blocks with three factors and additional central points, it was shown that the pH, current density, and retention time are factors that influence the increase of biodegradability. The treatment of electrocoagulation increased the index of

biodegradability from 0.71 to 0.84, from 0.43 to 0.93 and from 0.25 to 0.77 in operation conditions of pH 9, current density of 44.29 A/m² and retention time of 3 minutes. Also, achieved were removals in DBO₅ of 51.2% and in DQO of 73.44% with a pH of 5, current density of 44.29 A/m² and retention time of 9 min. Also achieved were energy consumptions from 0.075 kWh/m³ to 0.675 kWh/m³ and current efficiencies from 97.13% and 220%.

Keywords: Electrocoagulation, biodegradability, index of biodegradability, DBO₅, DQO, energy consumption, current efficiency, mixed industrial effluents, factorial experimental design in blocks, response surface.

1. INTRODUCCIÓN

Los tratamientos biológicos de aguas residuales constituyen los tipos de procesos más utilizados en la depuración de efluentes industriales, pero su aplicabilidad depende de ciertas características del efluente. La biodegradabilidad es una característica del efluente que influye en la eficiencia de un tratamiento biológico y en consecuencia esta debe ser determinada previamente a optar por estos tratamientos. Para esto, el criterio normalmente utilizado es el índice de biodegradabilidad (IB), mismo que define si un efluente puede considerarse como fácilmente biodegradable.

La electrocoagulación es un proceso electroquímico para el tratamiento de aguas que consiste en la desestabilización de los coloides por coagulantes generados in situ por medio de la disolución de iones eléctricamente a partir de electrodos de aluminio o hierro. Cuando los electrodos son conectados a una fuente de energía externa, el ánodo de hierro o aluminio, también llamado "ánodo de sacrificio",

es corroído electroquímicamente debido a la oxidación, generando así los iones metálicos Fe²⁺ o Al³⁺ respectivamente; mientras que en el cátodo se realizan procesos de reducción generando gas hidrogeno. Los iones formados son hidratados formando tanto hidróxidos insolubles, los cuales atrapan los contaminantes, como hidroxocomplejos cargados positiva o negativamente neutralizando las cargas y provocando la coagulación y separación de la fase acuosa. El campo eléctrico formado por los electrodos facilita el movimiento de los coloides por la carga que estos tienen; además la evolución de gases en los electrodos, oxígeno en el ánodo e hidrogeno en el cátodo, provocan la mezcla suave y favorecen el choque entre los coloides dándose así el proceso de electrofloculación. Del mismo modo, los gases generados pueden adherirse a la superficie de los flóculos disminuyendo su densidad y causando la electroflotación de los mismos (Chen G. , 2004) (Cañizares et al, 2004) (Mollah, Schennach, Parga, & Cocke, 2001).

Se han realizado investigaciones en efluentes de refinación de petróleo (Martínez Delgadillo, Morales Mora, & Barceló Quintal, 2010) (Abdelwahab, Amin, & El-Ashtoukhy, 2009), de industria farmacéutica (Kermet-Said & Moulai-Mostefa, 2015), industria textil (Koby, Can, & Bayramoglu, 2003) (Chenik, Elhafdi, Dassaa, Essadki, & Azzi, 2013) (Tyagi, Mathur, & Kumar, 2014), efluentes de azucareras (Shivayogimath & Jahagirdar, 2013), destilerías de alcohol (Khandegar & Saroh, 2014) (Wagh & Nemade, 2015), industria láctea (Arango Ruíz & Garcés Giraldo, 2012) (Bazrafshan, Moein, Kord Mostafapour, & Nakhaie, 2012), lavanderías (Razavi, Saeedi, & Jabbari, 2012), mataderos (Koby, Senturk, & Bayramoglu, 2006) (Eryuruk, Tezcanun, & Bakir Ogutveren, 2014) (Budiyono, Widiyasa, & Johari, 2010), fabricación

de pinturas (Akyol, 2012), efluentes del lavado de autos (Rubí Juárez, Barrera Díaz, Linares Hernández, Fall, & Bilyeu, 2015), cur-tiembres (Apaydin, Kurt, & Gönüllü, 2009) (Feng, y otros, 2007) (Shivayogimath & Kurdekar, 2015) (Varank, Erkan, Yazıcı, Demir, & Engin, 2014) y efluentes industriales mezclados (Linares-hernández, Barrera-Díaz, Roa-Morales, Bilyeu, & Ureña-Núñez, 2007).entre otros.

La electrocoagulación aún no ha sido considerada en el medio local, el cual presenta una diversidad de industrias, como ser aceiteras, de productos alimenticios, mataderos, curtiembres, papeleras y talleres mecánicos, entre otras, que generan líquidos residuales con características organolépticas, físicas, químicas y biológicas distintas y propias de cada industria. Se desconoce la capacidad de la electrocoagulación para tratar estos efluentes y menos una mezcla de dichos efluentes industriales.

Para que la electrocoagulación sea eficiente respecto a la remoción de los contaminantes que se evalúan y en el consumo de energía eléctrica, es necesario la definición de sus condiciones de operación; definir estas condiciones es un trabajo extenso y costoso debido a la cantidad de factores que afectan el proceso, esto implica realizar bastantes pruebas experimentales, que pueden reducirse si se cuenta con bases bibliográficas de referencia que sirvan para la determinación de las condiciones de operación del proceso y que estén relacionadas a los tipos de industrias del lugar donde fueron definidas. Esta investigación evalúa el efecto de la electrocoagulación en la biodegradabilidad de efluentes industriales mezclados en distintas condiciones de operación y al mismo tiempo determina la eficiencia en la remoción de DBO₅ y DQO.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Muestras de efluente

Se tomó una muestra compuesta de 170 L de efluentes industriales mezclados, obtenida al final del parque industrial Ramón Darío Gutiérrez ubicado en el sector Nor-Este, fuera del cuarto anillo de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, antes de la descarga al sistema tratamiento. La muestra fue almacenada en bidones de 10 L y luego transportada al laboratorio de la carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Autónoma Gabriel René Moreno (UAGRM).

2.2. Reactor de electrocoagulación

Se construyó un reactor electroquímico a escala laboratorio para operar en batch, presentado en la **Figura 1**.

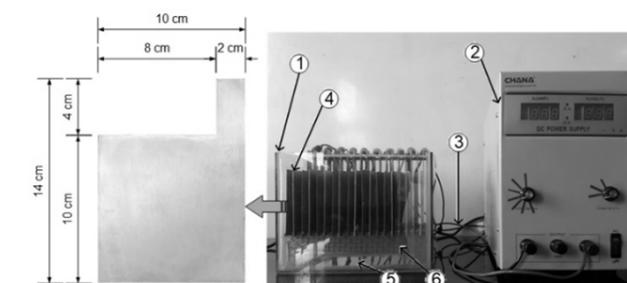


Figura 1: Reactor a escala laboratorio-Electrocoagulación de efluentes industriales mezclados

El reactor consistía de una cuba de vidrio con forma de paralelepípedo (1) con una capacidad de aproximadamente 5 L, volumen definido tomando como referencias publicaciones realizadas por Linares Hernández et al. (2007) y Cano Rodríguez et al. (2010), y 10 pares de electrodos de aluminio de 1 mm de espesor cada uno (4). Los electrodos estaban suspendidos del fondo 4,5 cm con soportes de acrílico (6) para dejar una zona inferior de sedimentación (5) y sumergidos 0.8 cm, siendo el área no

sumergida del electrodo de 2 cm x 3.2 cm diseñada para las conexiones eléctricas. La superficie anódica o área efectiva es de 0.2032 m², correspondiente a la superficie sumergida. La separación entre electrodos fue de 1 cm. La corriente eléctrica era suministrada mediante cables para una conexión en paralelo (3) con una fuente de corriente continua de laboratorio con capacidad de 0 – 15 A y 0 – 30 V provista de un amperímetro y un voltímetro digital (2).

2.3. Experimentos en batch

La muestra de 170 L se mezclaba y agitaba para homogeneizarla, de la cual se recolectaba una submuestra de 0.5 L para la determinación de la DBO₅ y DQO iniciales en cada bloque. Para cada tratamiento se tomaban 4 L de la muestra la cual siempre se agitaba previamente. Al finalizar cada prueba se tomaban 0.5 L del efluente tratado para la determinación de la DBO₅ y DQO finales. De acuerdo con la prueba a realizar, se ajusta el pH de la muestra a 5, 7 o 9 con ácido sulfúrico o hidróxido de sodio 2N según el grado de alcalinidad o acidez de la muestra. Para medir el pH se utilizó un pHmetro marca Mettler Toledo modelo SG2 ELK. Todos los electrodos fueron pulidos con papel lija, posteriormente los ánodos se pesan en una balanza de precisión marca Mettler Toledo modelo New Clasic ME1002. Los electrodos se lavaban con agua luego de ser pulidos y al finalizar cada tratamiento.

2.4. Métodos de análisis para las muestras

La DQO se analizó por el método colorimétrico de reflujo cerrado según los métodos estándar de la APHA utilizando un espectrofotómetro ultravioleta Agilent CARY 100. La DBO₅ fue realizada por el método respirométrico con el sistema DBO Oxidirect. Todos los análisis se llevaron a cabo en el laboratorio de la carrera

de Ingeniería Ambiental de la UAGRM.

2.5. Diseño experimental

Para determinar el efecto de los parámetros operacionales pH, densidad de corriente y tiempo de retención sobre las variables de respuesta índice de biodegradabilidad (IB), porcentaje de remoción de DBO₅ y porcentaje de remoción de DQO, el presente estudio utilizó un diseño factorial 2k, es decir, k factores (variables independientes) con 2 niveles cada uno; adicionalmente se incluyeron 2 puntos centrales para analizar la posibilidad de existencia de un comportamiento no lineal en alguno de los factores.

La **Tabla 1** muestra los distintos factores con sus respectivos niveles. El diseño fue replicado 3 veces en bloques ya que las réplicas se realizaron en diferentes espacios de tiempo, haciendo un total de 30 tratamientos, 10 por cada bloque. Todos los tratamientos fueron en orden aleatorio. Se realizaron pruebas preliminares para la selección de los niveles. Todos los tratamientos se realizaron sin adición de cloruro de sodio.

Variables independientes	Niveles		
	Bajo	Punto central	Alto
pH	5	7	9
Densidad de corriente (A/m ²)	14.71	29.42	44.12
Tiempo de retención (min)	3	6	9

Tabla 1: Variables independientes y niveles elegidos para los tratamientos - Electrocoagulación de efluentes industriales mezclados.

2.6. Superficie de respuesta

Con el fin de explorar en forma más detallada la región experimental que comprende el diseño experimental 2k, se ajusta un modelo matemático de primer orden para las variables dependientes IB, porcentaje de remoción

de DBO₅ y porcentaje de remoción de DQO utilizando los resultados obtenidos.

El modelo de regresión de primer orden para tres factores con sus interacciones está dado por:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (1)$$

Donde Y es el IB, porcentaje de remoción de DBO₅ o porcentaje de remoción de DQO para cada respectivo caso; x_1 , x_2 y x_3 son los factores o variables independientes pH, densidad de corriente y tiempo de retención respectivamente; β_0 es una constante que representa la ordenada al origen; β_1 , β_2 y β_3 son los coeficientes de regresión para los efectos lineales y β_{12} , β_{13} , β_{23} y β_{123} son los coeficientes para los efectos de interacción.

Los criterios utilizados para determinar la calidad del modelo de regresión son los coeficientes de determinación R² y R² ajustado, estos cuantifican el porcentaje de variabilidad de la respuesta que es explicado por el modelo; mientras más cercanos a 100, mejor es el ajuste. Posteriormente se determinan los niveles de los factores para obtener una respuesta óptima dentro de la región experimental.

2.7. Evaluación de los resultados

El análisis de varianza (ANOVA por sus siglas en inglés Analysis of Variance) del diseño experimental, el ajuste de las superficies de respuesta y la determinación de las condiciones para una respuesta óptima, se hizo uso de las herramientas de análisis estadístico del software Statgraphics Centurion XVI.

3. RESULTADOS

3.1. Características de los efluentes industriales mezclados

En la Tabla 2 se presentan los valores mensuales para IB, DBO₅, DQO, conductividad y pH de los efluentes industriales mezclados para el año 2015. Estos datos fueron obtenidos a partir de información secundaria provista por la institución encargada del tratamiento de los efluentes mezclados en el parque industrial.

3.2. Resultados de las pruebas experimentales

Para el primer bloque la DBO₅ presenta una concentración inicial de 2242 mg/L y la DQO 3136 mg/L, dando como índice de biodegradabilidad inicial 0.71 por tanto es considerada como biodegradable al ser superior a 0.5 (Crites & Tchobanoglous, 2000), este valor inicial del IB es mayor a los que se muestran en la Tabla 2 obtenido en base a los registros de las características mensuales de los efluentes industriales mezclados. Por otra parte, el pH de la muestra homogeneizada antes de realizar el ajuste para los tratamientos fue de 7.17 y la conductividad 6.36 mS/cm. Los resultados para cada corrida experimental se muestran en la Tabla 3.

Para el bloque 2 la concentración inicial de la DBO₅ fue 1071 mg/L y para la DQO 2479.8 mg/L dando un IB inicial de 0.43. El segundo bloque o replica fue ejecutado 14 días después del primer bloque. La Tabla 4 presenta los resultados para las corridas del bloque 2.

Mes	DQO (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	IB	Conductividad (µS/cm)		pH	
				Max.	Min.	Max.	Min.
Enero	3950	1675	0.42	5970	2000	8.84	6.77
Febrero	5574	3280	0.59	6880	2170	7.27	6.09
Marzo	4219	1900	0.45	5050	2690	7.49	6.65
Abril	3390	1482	0.44	4340	2250	7.45	6.26
Mayo	3515	1590	0.45	4030	2560	9.38	6.58
Junio	7210	2995	0.42	5940	2690	6.92	6.13
Julio	4530	2367	0.52	4910	2080	7.05	6.67
Agosto	3900	1950	0.50	4030	2150	7.64	6.37
Septiembre	4333	2120	0.49	5330	2100	9.65	6.78
Octubre	3621	1929	0.53	4390	2440	8.88	6.26
Noviembre	3252	1510	0.46	5410	1921	7.05	6.34
Diciembre	4000	1948	0.49	5600	2670	7.23	6.18

Tabla 2: DBO₅, DQO, IB, Conductividad y pH de los efluentes industriales mezclados para el año 2015 - Electrocoagulación de efluentes industriales mezclados.

Orden de corrida	pH	Densidad de corriente (A/m ²)	Tiempo de retención (min)	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	IB	DBO ₅ Remoción (%)	DQO Remoción (%)	ΔIB (%)
1	7	29.53	6	1280	1313.5	0.97	42.91	58.12	36.62
2	7	29.53	6	1180	1319.7	0.89	47.37	57.92	25.35
3	9	14.76	9	1156	1398.95	0.83	48.44	55.39	16.9
4	9	14.76	3	1008	1405.4	0.72	55.04	55.18	1.41
5	5	44.29	9	1094	1304.4	0.84	51.2	58.41	18.31
6	9	44.29	3	1124	1334.7	0.84	49.87	57.44	18.31
7	5	14.76	3	1365	1383.65	0.99	39.12	55.88	39.44
8	9	44.29	9	1470	1421	1.03	34.43	54.69	45.07
9	5	14.76	9	1275	1309.5	0.97	43.13	58.24	36.62
10	5	44.29	3	1287	1281.45	1	42.6	59.14	40.85

Tabla 3: Resultados bloque 1 - Electrocoagulación de efluentes industriales mezclados.

Orden de corrida	pH	Densidad de corriente (A/m ²)	Tiempo de retención (min)	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	IB	DBO ₅ Remoción (%)	DQO Remoción (%)	ΔIB (%)
1	7	29.53	6	939	1094.3	0.86	12.32	55.87	100
2	7	29.53	6	938	1074.25	0.87	12.42	56.68	102.33
3	9	14.76	9	917	1120.75	0.82	14.38	54.8	90.7
4	9	14.76	3	918	1137.8	0.81	14.29	54.12	88.37
5	5	44.29	9	798	992.8	0.8	25.49	59.96	86.05
6	9	44.29	3	1018	1092.95	0.93	4.95	55.93	116.28
7	5	14.76	3	801	1137.35	0.7	25.21	54.14	62.79
8	9	44.29	9	711	1064.9	0.67	33.61	57.06	55.81
9	5	14.76	9	687	1017.2	0.68	35.85	58.98	58.14
10	5	44.29	3	729	1006.4	0.72	31.93	59.42	67.44

Tabla 4: Resultados bloque 2 - Electrocoagulación de efluentes industriales mezclados.

El bloque 3 mostrado en la Tabla 5, fue ejecutado 13 días luego del segundo bloque. Este presenta una concentración inicial de DBO₅ de 593 mg/L y un DQO de 2362.6 mg/L, lo que da un IB de 0.25, el cual ya es considerado como no biodegradable por ser muy inferior a 0.5. Es evidente como el incremento del IB como la remoción de DQO son mayores que en los primeros 2 bloques. Al realizar una simple

inspección de los resultados, el tratamiento 5 es el que muestra una mayor remoción de DQO en los 3 bloques. Los resultados obtenidos se asemejan con los publicados en otras investigaciones, en las cuales operando el proceso a pH 8 y densidad de corriente 45.45 A/m² obtuvieron remociones para la DQO de 50.8% (Linares-hernández et al, 2007) y 75% (Cano Rodríguez et al, 2012) donde la

importante diferencia se encuentra en el tiempo de retención empleado, los cuales fueron 60 min y 40 min respectivamente, contra 3 min y 9 min de la presente investigación.

Orden de corrida	pH	Densidad de corriente (A/m ²)	Tiempo de retención (min)	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	IB	DBO ₅ Remoción (%)	DQO Remoción (%)	ΔIB (%)
1	7	29.53	6	392	707.75	0.55	33.9	70.04	120
2	7	29.53	6	396	707.8	0.56	33.22	70.04	124
3	9	14.76	9	395	749.45	0.53	33.39	68.28	112
4	9	14.76	3	390	796.35	0.49	34.23	66.29	96
5	5	44.29	9	346	627.45	0.55	41.65	73.44	120
6	9	44.29	3	542	704.45	0.77	8.6	70.18	208
7	5	14.76	3	587	743.05	0.79	1.01	68.55	216
8	9	44.29	9	544	671.35	0.81	8.26	71.58	224
9	5	14.76	9	544	646.85	0.84	8.26	72.62	236
10	5	44.29	3	496	666.05	0.74	16.36	71.81	196

Tabla 5: Resultados bloque 3 - Electrocoagulación de efluentes industriales mezclados.

3.3. Análisis estadístico

La Tabla 6 corresponde a la tabla ANOVA para el IB, en ella se prueba la significancia estadística para los efectos principales del pH (A), densidad de corriente (B), tiempo de retención (C), como interacciones AB, AC, BC y ABC.

Como únicamente el efecto de la interacción pH x densidad de corriente (AB) tienen un valor-p menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza de 95% y una probabilidad de error de 5%, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna de que si existe un efecto significativo de esta sobre el IB. Dado que un diseño factorial 2k solo puede representar un modelo lineal de la respuesta IB, se agregaron puntos centrales al diseño formados por niveles intermedios de los factores para determinar si existe falta de ajuste. Como el valor-p para la falta de ajuste es menor que 0.05 se concluye que existe falta de ajuste con un 95% de confianza y un 5% de error y que por tanto es probable la presencia de curvatura en la respuesta IB.

Como los bloques presentan un valor-p menor que 0.05, se concluye que el efecto de bloque debido a los días es significativo con un 95% de significancia y un 5% de error.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A	0.00666667	1	0.00666667	6.06	0.0907
B	0.0104167	1	0.0104167	9.47	0.0543
C	0.00106667	1	0.00106667	0.97	0.3974
AB	0.05415	1	0.05415	49.23	0.0059
AC	0.0054	1	0.0054	4.91	0.1135
BC	0.0104167	1	0.0104167	9.47	0.0543
ABC	0.00015	1	0.00015	0.14	0.7364
bloques	0.292847	2	0.146423	133.11	0.0012
Falta de	0.232533	17	0.0136784	12.43	0.0302
Error puro	0.0033	3	0.0011		
Total (corr.)	0.630737	29			

Tabla 6: Análisis de varianza para el IB - Electrocoagulación de efluentes industriales mezclados.

El análisis de varianza para la remoción de DBO₅ se muestra en la Tabla 7. El efecto del tiempo de retención (C), las interacciones pH x densidad de corriente (AB) y pH x tiempo de retención (AC) presentan un valor-p menor a 0.05, por tanto si existe un efecto significativo de estos sobre la remoción de DBO₅. Además, el efecto más importante es el de la interacción AB seguido de C y la interacción AC. También se muestra que los bloques tienen un efecto debido a los días, además, existe una falta de ajuste para un modelo lineal ya que ambos presentan un valor-p menor que 0.05.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A	20.7576	1	20.7576	6.12	0.0898
B	0.481667	1	0.481667	0.14	0.7314
C	125.492	1	125.492	36.97	0.0089
AB	567.454	1	567.454	167.19	0.0010
AC	80.008	1	80.008	23.57	0.0167
BC	27.692	1	27.692	8.16	0.0648
ABC	8.97927	1	8.97927	2.65	0.2023
bloques	3825.81	2	1912.91	563.61	0.0001
Falta de ajuste	2492.2	17	146.6	43.19	0.0050
Error puro	10.182	3	3.394		
Total (corr.)	7159.06	29			

Tabla 7: Análisis de varianza para el porcentaje de remoción de DBO5 - Electrocoagulación de efluentes industriales mezclados.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A	36.6301	1	36.6301	315.73	0.0004
B	29.4595	1	29.4595	253.92	0.0005
C	9.8432	1	9.8432	84.84	0.0027
AB	0.0376042	1	0.0376042	0.32	0.6090
AC	4.20844	1	4.20844	36.27	0.0092
BC	6.96604	1	6.96604	60.04	0.0045
ABC	1.8872	1	1.8872	16.27	0.0274
bloques	1200.25	2	600.127	5172.76	0.0000
Falta de ajuste	17.484	17	1.02847	8.86	0.0486
Error puro	0.34805	3	0.116017		
Total (corr.)	1307.12	29			

Tabla 8: Análisis de varianza para el porcentaje de remoción de DQO - Electrocoagulación de efluentes industriales mezclados.

La Tabla 8 corresponde a la tabla ANOVA para el porcentaje de remoción de DQO. En ella se muestra que los efectos principales del pH (A), densidad de corriente (B) y tiempo de retención (C) y las interacciones pH x tiempo de retención (AC) y densidad de corriente x tiempo de retención (BC) tienen un efecto significativo sobre el porcentaje de remoción de DQO. Además, el efecto más importante es el de A seguido por B, C, BC, AC y ABC.

3.4. Efectos significativos

La Figura 2 muestra la interacción pH x densidad de corriente (AB). La línea con signo negativo (-) representa el efecto de interacción AB cuando la densidad de corriente permanece en su nivel bajo y el pH varía, y la línea con signo positivo (+) cuando está en su nivel alto. El eje horizontal indica los distintos niveles del pH.

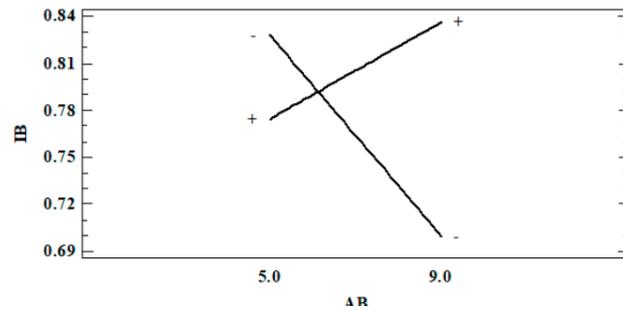


Figura 2: Efectos de interacción para el IB - Electrocoagulación de efluentes industriales mezclados.

La Figura 2 muestra como el efecto de la densidad de corriente (B) es muy distinto en su nivel bajo 14.76 A/m² (-) que cuando está en su nivel alto 44.29 A/m² (+) al cambiar el pH (A), ya que cuando está en su nivel alto, el IB se incrementa al subir el pH de 5 a 9; pero si está en su nivel bajo, el IB decrece pronunciadamente. Para el porcentaje de remoción de DBO5 el efecto del tiempo de retención indica que cuando este sea mayor el porcentaje de remoción de DBO5 tiende a ser mayor; pero esta interpretación no es del todo correcta ya que existe una interacción con el pH que modifica este comportamiento. La Figura 3 muestra los efectos principales para el porcentaje de remoción de DBO5.

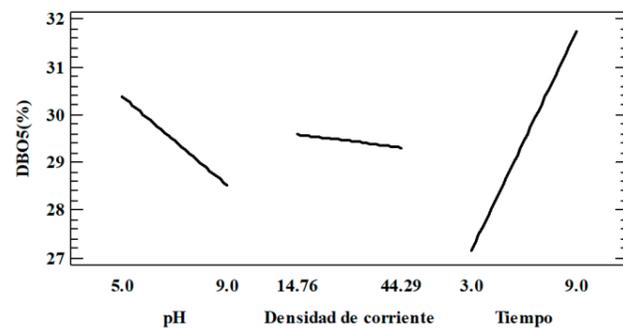


Figura 3: Efectos principales para el porcentaje de remoción de DBO5 - Electrocoagulación de efluentes industriales mezclados.

La Figura 4 muestra los efectos de interacción pH x densidad de corriente (AB) y pH x tiempo de retención (AC). En la interacción AB, cuando la densidad de corriente trabaja con su nivel

bajo 14.76 A/m² (-), la remoción de DBO5 se incrementa a medida que el pH pasa de 5 a 9; un comportamiento contrario ocurre cuando trabaja con su nivel alto 44.29 A/m² (+), ya que la remoción disminuye cuando el pH pasa de ácido a básico. Esto indica que la remoción de DBO5 a bajas densidades de corriente se ve favorecida en un pH básico como es 9, y en altas densidades de corriente con un pH ácido como es 5.

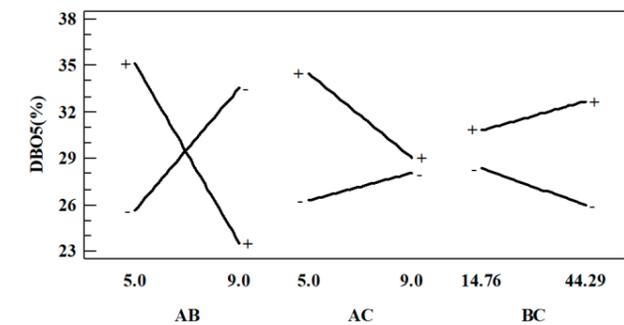


Figura 4: Efectos de interacción para la remoción de DBO5 - Electrocoagulación de efluentes industriales mezclados

Los tres efectos mostrados en la Figura 5 son significativos para la remoción de DQO. Como puede verse, el efecto del pH presenta una pendiente negativa, indicando que a medida que este se incrementa de un pH 5 a 9 la remoción decrece, contrario a lo que ocurre con los efectos de la densidad de corriente y el tiempo de retención, estos muestran una pendiente positiva representando un incremento en la remoción cuando estos aumentan de nivel.

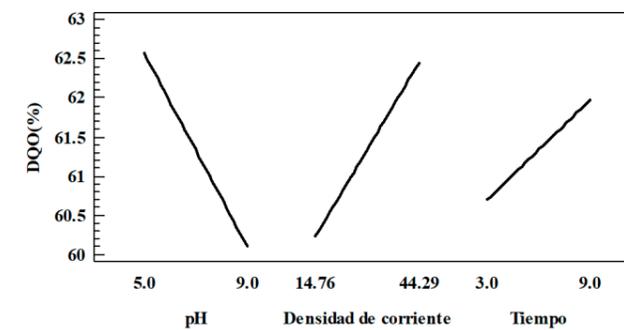


Figura 5: Efectos principales para el porcentaje de remoción de DQO - Electrocoagulación de efluentes industriales mezclados.

La interacción pH x tiempo de retención (AC) indica que cuando el tiempo de retención es de 9 min (+) su efecto se ve disminuido en gran medida cuando el pH pasa de 5 a 9, algo similar ocurre cuando el tiempo es de 3 min (-). Es claro como el efecto del pH predomina en la remoción de DQO. Como se ve en los efectos principales, la remoción incrementa con el tiempo, pero se ve perjudicada o beneficiada dependiendo del pH, tal como muestra la interacción en la Figura 6.

En la interacción densidad de corriente x tiempo de retención (BC) de la Figura 6, el efecto en la remoción de DQO debido al tiempo de retención incrementa con la densidad de corriente. Cuando el tiempo de retención es 9 min (+) la remoción aumenta al subir la densidad de corriente y cuando el tiempo es de 3 min (-) la remoción sufre un aumento en mayor magnitud al cambiar la densidad de corriente de 14.76 A/m² a 44.29 A/m².

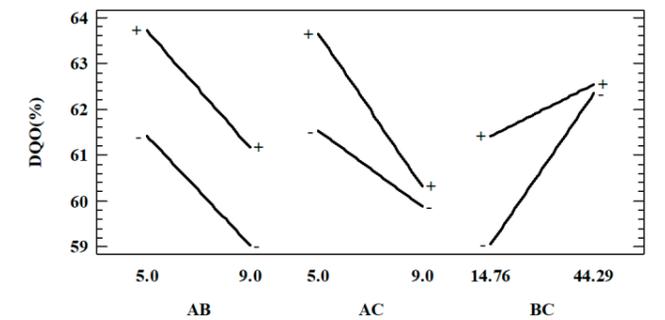


Figura 6: Efectos de interacción para el porcentaje de remoción de DQO - Electrocoagulación de efluentes industriales mezclados.

3.5. Ajuste de superficie de respuesta

Los modelos de primer orden ajustados para el IB, DBO5 y DQO, representados por las ecuaciones 2, 3 y 4 respectivamente, son los siguientes:

$$Y = 1.1338 - 0.0658261x_1 - 0.00584152x_2 - 0.00000333935x_3 + 0.00143921x_1x_2 + 0.00166681x_1x_3 - 0.000667871x_2x_3 + 0.0000282199 x_1x_2x_3 \quad (2)$$

$$Y = -22.6656 + 7.44564x_1 + 1.28753x_2 + 3.60335x_3 - 0.20609x_1x_2 - 0.50816x_1x_3 - 0.024081x_2x_3 + 0.00690447x_1x_2x_3 \quad (3)$$

$$Y = 52.8796 + 0.401357x_1 + 0.29034x_2 + 1.71531x_3 - 0.0203324x_1x_2 - 0.163248x_1x_3 - 0.0343201x_2x_3 + 0.00316533x_1x_2x_3 \quad (4)$$

La Tabla 9 presenta los coeficientes de determinación para el IB, DBO₅ y DQO, de los cuales los coeficientes de determinación para la DQO tienen un mejor ajuste. El coeficiente de determinación R² indica que el modelo, así ajustado, explica el 98.64% de la variabilidad en el porcentaje de remoción de DQO. El coeficiente de determinación R² ajustado, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 98.02%.

Variables de respuesta	R ² (%)	R ² Ajustado (%)
IB	61.77	44.57
DBO ₅	65.05	49.32
DQO	98.64	98.02

Tabla 9: Coeficientes de determinación para el IB, DBO₅ y DQO - Electrocoagulación de efluentes industriales mezclados.

Las Figura 7 y Figura 8 muestran las gráficas de contorno para el porcentaje de remoción de DQO cuando el pH permanece constante en 5 y 9 respectivamente. En ella puede verse nuevamente los efectos principales e interacciones descritas en la Figura 5 y Figura 6.

Las Figura 7 y Figura 8 muestran como la remoción de DQO incrementa en toda la superficie de respuesta cuando el pH es 5; pero decrece a un pH de 9.

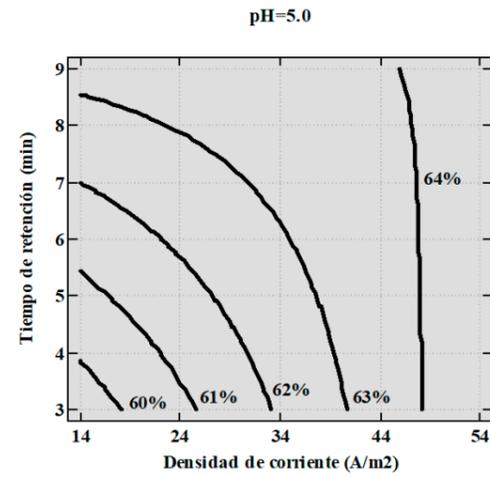


Figura 7: Gráfica de contorno para el porcentaje de remoción de DQO a pH 5 - Electrocoagulación de efluentes industriales mezclados.

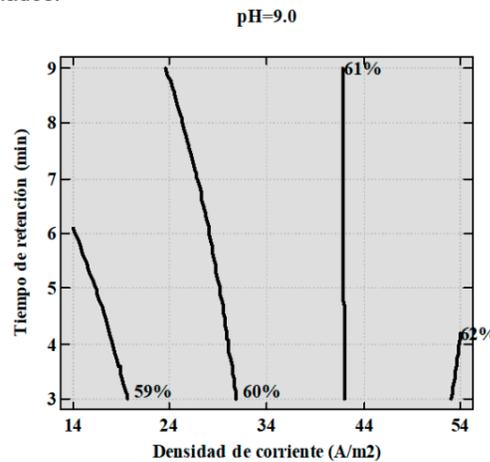


Figura 8: Gráfica de contorno para el porcentaje de remoción de DQO a pH 9 - Electrocoagulación de efluentes industriales mezclados.

3.6. Respuestas óptimas

La Tabla 10 muestra los niveles de los factores para cada variable de respuesta optimizada. Las respuestas predichas para el índice de biodegradabilidad, porcentaje de remoción de DBO₅ y porcentaje de remoción de DQO pueden encontrarse utilizando las ecuaciones 2, 3 y 4 respectivamente.

La Figura 9 corresponde a la superficie de respuesta obtenida para el porcentaje de remoción de DQO.

Variable de respuesta	Combinación óptima			Respuesta predicha
	pH	Densidad de corriente (A/m ²)	Tiempo de retención (min)	
IB	9	44.29	3	0.85
DBO ₅ (%)	5	44.29	9	39.67
DQO (%)	5	44.29	9	63.96

Tabla 10: Combinación de niveles de factores para respuesta óptima - Electrocoagulación de efluentes industriales mezclados.

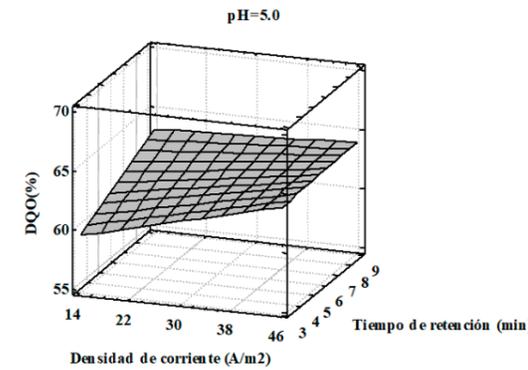


Figura 9: Superficie de respuesta para el porcentaje de remoción de DQO.

Consumo de energía eléctrica y disolución anódica

El cálculo de la disolución del material anódico, eficiencia de corriente y consumo de energía eléctrica puede realizarse con las siguientes expresiones:

$$m_{metal} = ItM/zF \quad (5)$$

$$E_f C = (m_{metal\ exp.} / m_{metal}) 100 \quad (6)$$

$$CEE = UIt/60V \quad (7)$$

Variable de respuesta	Condiciones de operación óptimas				CEE (Kwh/m ³)	M. metal teo. (gr)	M. metal exp. (gr)	E _f C (%)
	pH	Intensidad de corriente (A)	Tiempo de retención (min)	Voltaje (U)				
IB	9	9	3	2	0.225	0.151	0.257	170.20
DBO ₅	5	9	9	2	0.675	0.453	0.440	97.13
DQO	5	9	9	2	0.675	0.453	0.440	97.13

Tabla 11: Consumo de energía eléctrica y disolución anódica en condiciones óptimas - Electrocoagulación de efluentes industriales mezclados.

Donde m_{metal} es la masa disuelta del metal (gr), I es la intensidad de corriente en amperes (A), t es el tiempo de tratamiento (s), M la masa molar del metal anódico ($Al = 26.982$ gr/mol), z es la valencia del metal y F es la constante de Faraday (96485 C/mol) (Kuokkanen et al, 2013).

$E_f C$ es la eficiencia de corriente expresada en porcentaje, $m_{metal\ exp.}$ es la masa de metal disuelta obtenida experimentalmente (gr) (Matías, Cruz, & Rodríguez, 2010).

CEE es el consumo de energía eléctrica por volumen de efluente tratado (Kwh/m³), U es el voltaje aplicado, t el tiempo de tratamiento (min) y V es el volumen tratado (L) (Kuokkanen et al, 2013).

La Tabla 11 muestra el consumo de energía eléctrica y la disolución anódica para las condiciones óptimas de operación obtenidas presentadas en la Tabla 10

Las eficiencias de corriente superiores al 100% indicarían que existen procesos diferentes a la corrosión electroquímica ocasionadas probablemente por las condiciones de pH en la que se encuentra, lo que provoca un mayor aporte de metal disuelto.

Ya que todos los tratamientos presentan un incremento en el IB, se calculó el consumo de energía eléctrica y la masa de ánodo disuelta cuando se opera el proceso en distintos niveles de tiempo de retención y densidad de corriente. Los resultados se muestran en la Tabla 12.

pH	Condiciones de operación			CEE (Kwh/m ³)	M. metal teo (gr)	M. metal exp (gr)	E _r C (%)
	Intensidad de corriente (A)	Tiempo de retención (min)	Voltaje (U)				
5	3	3	2	0.075	0.050	0.070	140.00
7	6	6	2	0.300	0.201	0.220	109.45
9	3	3	2	0.075	0.050	0.110	220.00

Tabla 12: Consumo de energía eléctrica y disolución anódica a pH 5, 7 y 9 - Electrocoagulación de efluentes industriales mezclados.

4. CONCLUSIÓN

La electrocoagulación demostró ser una tecnología que es capaz de incrementar el índice de biodegradabilidad y de reducir las concentraciones de DBO₅ y DQO en efluentes industriales mezclados con características similares a las de la presente investigación, mejorando de esta manera sus condiciones y acondicionándolos para un post tratamiento biológico. Además, a través de la modificación de las condiciones de pH, densidad de corriente y tiempo de retención estos efectos pueden maximizarse o verse reducidos.

5. REFERENCIAS

Abdelwahab, O., Amin, N. K., & El-Ashtouky, E. Z. (2009). *Electrochemical removal of phenol from oil refinery wastewater. Journal of Hazardous Materials*, 163(2), 711-716.

Akyol, A. (2012). *Treatment of paint manufacturing wastewater by electrocoagulation. Desalination*, 285, 91-99.

Apaydin, Ö., Kurt, U., & Gönüllü, M. T. (2009). *An investigation on the treatment of tannery wastewater by electrocoagulation. Global NEST Journal*, 11(4), 546-555.

Arango Ruíz, A., & Garcés Giraldo, L. F. (2012). *Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. Revista Producción + Limpia*, 2(2), 23-30.

Bazrafshan, E., Moein, H., Kord Mostafapour, F., & Nakhaie, S. (2012). *Application of electrocoagulation process for dairy wastewater treatment. Journal of Chemistry*, 2013, 1-8.

Budiyono, Widiasa, I. N., & Johari, S. (2010). *Study on treatment of slaughterhouse wastewater by electro-coagulation technique. International Journal of Science and Engineering*, 1(1), 25-28.

Cano Rodríguez, C. T., Chávez-Amaya, A., Roa-Morales, G., Barrera-Díaz, C. E., & Ureña-Núñez, F. (2010). *An integrated electrocoagulation-phytoremediation precess for the treatment of mixed industrial wastewater. International Journal of Phytoremediation*, 12(8), 772-784.

Chen, G. (2004). *Electrochemical technologies in wastewater Treatment. Separation and Purification Technology*, 38(1), 11-41.

Chenik, H., Elhafdi, M., Dassaa, A., Essadki, A. H., & Azzi, M. (2013). *Removal of real textile dyes by electrocoagulation/electroflotation in a pilot external-loop airlift reactor. Journal of Water Resource and Protection*, 5, 1000-1006.

Crites, R., & Tchobanoglous, G. (2000). *Sistema de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados (Vol. I). Santafé de Bogotá: McGraw Hill Interamericana*.

Eryuruk, K., Tezcanun, U., & Bakir Ogutveren,

U. (2014). *Electrocoagulation in a plugflow reactor: the treatment of cattle abattoir wastewater by iron rod anodes. International Journal of Environmental Research*, 8(2), 461-468.

Feng, J. W., Sun, Y. B., Zheng, Z., Zhang, J. B., Li, S., & Tan, Y. C. (2007). *Treatment of tannery wastewater by electrocoagulation. Journal of Environmental Sciences*, 19(12), 1409-1415.

Kermet-Said, H., & Moulai-Mostefa, N. (2015). *Optimization of Turbidity and COD Removal from Pharmaceutical Wastewater by Electrocoagulation. Isotherm modeling and cost analsis. Polish Journal of Environmental Studies*, 24(3), 1049-1061.

Khandegar, V., & Saroh, A. K. (2014). *Treatment of distillery spentwash by electrocoagulation. Journal of Clean Energy Technologies*, 2(3), 244-247.

Koby, M., Can, O. T., & Bayramoglu, M. (2003). *Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. Journal of Hazardous Materials*, 100(1), 163-178.

Koby, M., Senturk, E., & Bayramoglu, M. (2006). *Treatment of poultry slaughterhouse wastewaters by electrocoagulation. Journal of Hazardous Materials*, 133(1), 172-176.

Linares-hernández, I., Barrera-Díaz, C., Roa-Morales, G., Bilyeu, B., & Ureña-Núñez, F. (2007). *A combined electrocoagulation-sorption process applied to mixed industrial wastewater. Journal of Hazardous Materials*, 144(1), 240-248.

M. H., Cruz, V. R., & Rodríguez, M. V. (2010). *Evaluación de los parámetros: eficiencia de*

la corriente (fe), consumo de energía (Es) y rendimiento espacio-tiempo (sRT) asociados a la recuperación de Ag batch.

Martínez Delgadillo, S. A., Morales Mora, M. A., & Barceló Quintal, I. D. (2010). *Electrocoagulation treatment to remove pollutants from petroleum refinery wastewater. Journal of Environmental Engineering and Management*, 20(4), 227-231.

Mollah, M. A., Schennach, R., Parga, J. R., & Cocke, D. L. (2001). *Electrocoagulation (EC) - science and applications. Journal of Hazardous Materials*, 84(1), 29-41.

Razavi, M., Saeedi, M., & Jabbari, E. (2012). *The Effect of operating conditions on simultaneous removal of phosphate, nitrate and COD from laundry wastewater by electrocoagulation using aluminum electrodes. Journal of Environmental Studies*, 38(3), 19-21.

Rubí Juárez, H., Barrera Díaz, C., Linares Hernández, I., Fall, C., & Bilyeu, B. (2015). *A combined electrocoagulation-electrooxidation process for carwash wastewater reclamation. International Journal of Electrochemical Science*, 10(8), 6754-6767.

Shivayogimath, C. B., & Jahagirdar, R. (2013). *Treatment of sugar industry wastewater using electrocoagulation technique. International Journal of Research in Engineering and Technology*, 262-264.

Shivayogimath, C. B., & Kurdekar, P. (2015). *Treatment of tannery effluent using electrocoagulation. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4(7), 6554-6560.

Tyagi, N., Mathur, S., & Kumar, D. (2014). *Electrocoagulation precess for textile wastewater treatment in continous upflow*

reactor. *Journal of Scientific & Industrial Environmental Research*, 8(1), 165-180.
Research, 73, 195-198.

Varank, G., Erkan, H., Yazıcı, S., Demir, A., & Engin, G. (2014). *Electrocogulation of tannery wastewater using monopolar electrodes: Process optimization by response surface methodology. International Journal of*

Wagh, M. P., & Nemade, P. D. (2015). *Treatment of distillery spent wash by using chemical coagulation (CC) and electro-coagulation [EC]. American Journal of Environmental Protection*, 3(5), 159-163.

ENSAYO TÉCNICO

Reconocimiento de la miel adulterada con glucosa

Recognition of adulterated honey with glucose

Jorge Chau Wong

Ingeniería Química, Docente de Multigrupos,
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología,
UAGRM

RESUMEN

La miel se compone de diferentes azúcares principalmente glucosa y fructosa. Además contiene proteínas, aminoácidos, enzimas, ácidos orgánicos, vitaminas, sustancias minerales y otras. En nuestro estudio vamos a tomar en cuenta miel líquida por adulteración con glucosa, miel líquida por calentamiento y miel líquida por acción mecánica.

Principalmente como comprobar si la miel es adulterada con glucosa a través de un procedimiento simple y preciso que no requiere reactivos químicos específicos, ni instrumentos de medición de laboratorio, solamente con agua, alcohol etílico, materiales y elementos caseros.

Palabras claves: Miel, glucosa, adulteración, calentamiento, acción mecánica.

ABSTRACT

Honey is composed of different sugars mainly glucose and fructose. It also contains proteins, amino acids, enzymes, organic acids, vitamins, minerals and others. In our study we will take into account liquid honey adulterated with sugar, liquid honey liquid honey by heating and

mechanical action.

Primarily as check if honey is adulterated with glucose through a simple and accurate procedure without requiring special chemical reagents or laboratory measuring instruments, only with water, ethyl alcohol, materials and household items.

Keywords: Honey, glucose, adulteration, heating, mechanical action.

INTRODUCCIÓN

Las diferentes clases de miel de abeja varían mucho en densidad, sabor y color en el departamento de Santa Cruz como a nivel mundial. Esta diversidad es utilizada muchas veces para tomar opiniones rápidas y casi siempre equivocadas de sus otras particularidades y/o características.

Y al mismo tiempo al consumir miel de abejas pensando en todos los beneficios tantas veces expresados, nos equivocamos en razón de la mala calidad o adulteración de este producto con la glucosa que se vende en el comercio.

Ya que supuestamente, la miel es un producto de elevado valor nutritivo y de consumo delicioso que no siempre llega a la mesa familiar en estado natural como debe ser.