



Presentado por:
Ing. Ulises Osegueda R.
Ing. Luis Felipe Novo Rojas

1. Introducción

La electrocoagulación es un proceso utilizado para la remoción de impurezas y sólidos suspendidos en una línea de proceso. Es una técnica utilizada para el tratamiento de aguas residuales, los contaminantes de muy diversos efluentes son removidos aplicando el principio de coagulación, pero en este caso no se hace uso de un coagulante químico (cuya función es llevada a cabo por corriente eléctrica que es aplicada al medio líquido contaminado. Se puede definir el proceso de electrocoagulación como un proceso en el cual son desestabilizadas las cargas de las partículas de los contaminantes que se encuentran suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, induciendo corriente eléctrica a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, siendo el hierro y el aluminio los materiales más utilizados. (Mejía, Ruiz, & Giraldo, 2006).

La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca una serie de reacciones químicas, cuyo resultado final es la estabilidad de las moléculas contaminantes. Cuando esto ocurre, los contaminantes forman compuestos hidrofóbicos que precipitan o flotan, facilitando su remoción por algún método de separación secundario.

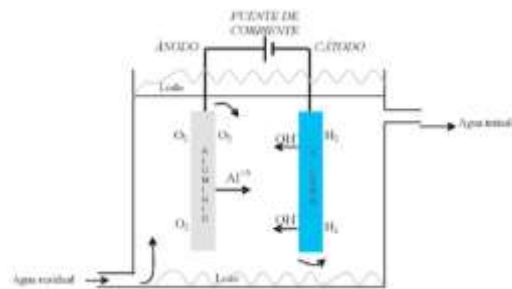


Figura 1. Sistema de electrocoagulación con ánodo de aluminio y cátodo de hierro (Mejía, Ruiz, & Giraldo, 2006)

1.1 Ventajas del proceso de Electrocoagulación

- Los costos de operación son menores comparativamente con los procesos convencionales usando polímeros
- Requiere de equipos simples y de fácil operación
- Elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos
- Genera lodos más compactos y en menor cantidad
- Produce floculos más grandes que aquellos formados con coagulación química y contienen menos agua ligada
- Purifica y permite reciclaje.

- Los contaminantes son arrastrados por las burbujas a la superficie del sistema tratado, donde pueden ser removidos con mayor facilidad

1.2 Desventajas del proceso de electrocoagulación

- Es necesario reponer los electrodos de sacrificio, debido a la pasivación
- El óxido formado en el ánodo puede, en muchos casos, formar una capa que impide el paso de corriente eléctrica, disminuyendo de esa forma la eficiencia del proceso.

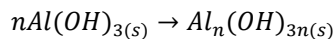
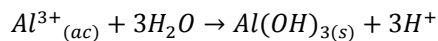
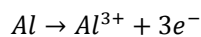
1.3 Mecanismo y Reacciones

Durante la electrólisis ocurren una serie de procesos físicos y químicos que permiten la remoción de contaminantes, las cuales proporcionan iones tanto positivos como negativos. El ánodo provee iones metálicos, el cual se le conoce como electrodo de sacrificio, ya que la placa que lo conforma se disuelve, mientras que la placa del cátodo permanece sin disolverse. A diferencia de la coagulación química, proceso en el cual el coagulante es adicionado al sistema como agente químico, en la electrocoagulación el coagulante es formado in situ mediante las reacciones dadas por la disolución de iones del metal que conforma el electrodo de sacrificio, y como se mencionó anteriormente la producción de iones metálicos se da en el ánodo y son los iones que, por oxidación electrolítica, dan origen a la sustancia química que hace actúa como coagulante. El proceso consta de tres etapas: inicialmente se forma el coagulante por oxidación electrolítica del metal del ánodo, luego se da la desestabilización de los contaminantes y emulsiones y, finalmente, se produce la formación de floculos por agregación de partículas del contaminante o adsorción de éstas en el coagulante. (Mejía, Ruiz, & Giraldo, 2006)

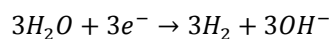
Reacciones involucradas en el proceso

Considerando placas de aluminio se tiene que:

- En el ánodo



- En el cátodo



2. Materiales y Métodos

Ensayos en Batch (Escala Laboratorio)

- Beaker de 1000 mL como reactor de electrocoagulación
- Arreglo de 6 placas metálicas 5 cm x 2.5 cm de hierro con una configuración en paralelo monopolar.
- Batería de 12 V/ 7A (DC), como fuente de poder,
- Meladura de Línea A sin clarificar
- pHmetro, balanzas granatarias, refractómetro, polarímetro, espectrofotómetro.

Ensayos en sistema continuo (Escala Laboratorio)

- Recipiente cilíndrico de 2000 mL
- Arreglo de 6 placas metálicas 8.4 cm x 3.5 cm de hierro con una configuración en paralelo monopolar.
- Batería de 24 V/ 20 A (DC), como fuente de poder,
- Bomba dosificadora cap. máx 600 mL/min
- Cloruro de Sodio, NaCl, grado reactivo
- Meladura Línea A, sin clarificar, acidificada con ácido fosfórico H₃PO₄
- pHmetro, balanzas granatarias, refractómetro, polarímetro, espectrofotómetro.

Prueba con prototipo de Reactor de electrocoagulación (Proceso de producción en fábrica)

- Prototipo reactor de electrocoagulación (ver **Figura 11** Figura 12)
- Cristalería Laboratorio
- Fuente de corriente continua 5V/80 A
- pHmetro, balanzas granatarias, refractómetro, polarímetro, espectrofotómetro.
- Placas metálicas de aluminio y hierro

Métodos de análisis empleados

- Método GS1/3-7 (2002). Determinación del color en solución de azúcares crudos, azúcares morenos y jarabes coloreados a pH 7,0. ICUMSA.
- Análisis de Turbidez en Jugos y Meladuras. Análisis de producto en proceso. Azucarera El Viejo
- Determinación de la pureza en meladuras.

3. Resultados

3.1 Ensayos en Batch (Escala Laboratorio)

La investigación en el proceso de electrocoagulación de meladura o bien para siropes de azúcares es prácticamente nula, por lo que las variables de proceso son desconocidas, si bien existe mucha investigación en la aplicación de esta tecnología al tratamiento de aguas residuales, bajo el principio científico del método, es aplicable para otras matrices como meladura. Los primeros ensayos se realizaron para determinar si existía alguna transformación de la materia al exponer la meladura a corriente eléctrica continua bajo un arreglo de seis placas de aluminio en paralelo. El fenómeno observado fue el que se muestra en la **Figura 1**, donde se evidencia que efectivamente se da el proceso de electrólisis donde se forma el Al^{3+} (in situ) y la liberación hidrógeno (H_2) para arrastrar las partículas o impurezas por flotación. Se realizaron corridas experimentales bajo esta configuración y los resultados se presentan en el **Cuadro 1**.

Cuadro 1. Resultados de pruebas de electrocoagulación de meladura en batch (escala laboratorio)

Pruebas batch (Escala Laboratorio)										
Fecha	Condiciones de proceso	Meladura sin clarificar LA			Meladura Clarificada LA			% Remoción color	% Remoción turbidez	% incremento en la pureza
		Color	Turbidez (NTU)	Pureza (%)	Color	Turbidez (NTU)	Pureza (%)			
2/27/2017	Tiempo residencia 1 h	11120	103	78.03	17643	90.8	77.87	-58.7	11.8	-0.2
2/28/2017	Tiempo residencia 1 h, con H3PO4	17115	95.7	80.08	21893	68.27	81.17	-27.9	28.7	1.4
3/1/2017	Tiempo residencia 1 h, con H3PO4	18304	78.1	79.45	22002	56.8	81.57	-20.2	27.3	2.7
3/2/2017	Tiempo residencia 1 h, con H3PO4. Se le agrega 6 g de NaCl a la meladura	17090	97.4	81.98	21831	70.2	82.65	-27.7	27.9	0.8
3/3/2017	Tiempo residencia 1 h, con H3PO4. Se le agrega 6 g de NaCl a la meladura	13224	100	75.45	15179	96.7	79.3	-14.8	3.3	5.1
Promedio								-29.9	19.8	1.9

De acuerdo con el cuadro anterior se infiere que se obtuvieron resultados satisfactorios para la remoción de la turbidez, y a la vez un incremento en el porcentaje de la pureza en la meladura en la mayoría de los ensayos, lo cual sería muy beneficioso para las etapas posteriores en la producción de azúcar. En la disminución del color no se obtuvieron los resultados esperados, debido a que la meladura después del proceso presenta una elevación en el color. Existen muchas premisas en cuanto a ese fenómeno, entre ellas: formación de sustancias-complejos que absorban energía a la longitud de onda a la que se realiza el análisis, remoción de contaminantes que no presentan color, acumulación de lodos en el recipiente de pruebas debido que no existe un efluente ni un flujo continuo que permita una toma adecuada de la meladura tratada. Los resultados de éstas pruebas dieron la necesidad de adaptar el sistema a algo más realista de lo que sería una tecnología en la planta de producción. Asimismo, la revisión bibliográfica continuó y se encontró con un artículo científico de la Guangxi University of Technology, China titulado "Study on purification of syrup by electrocoagulation", de donde se tuvo un mejor panorama de las condiciones de proceso en las que se

puede favorecer la electrocoagulación de la meladura, entre ellas: pH 4~9, temperatura de 50°C, tiempo de residencia de 16 min, distancia entre placas de 1 cm y una densidad de corriente eléctrica de 700 A/m².



Figura 2. Ensayo en batch electrocoagulación de meladura

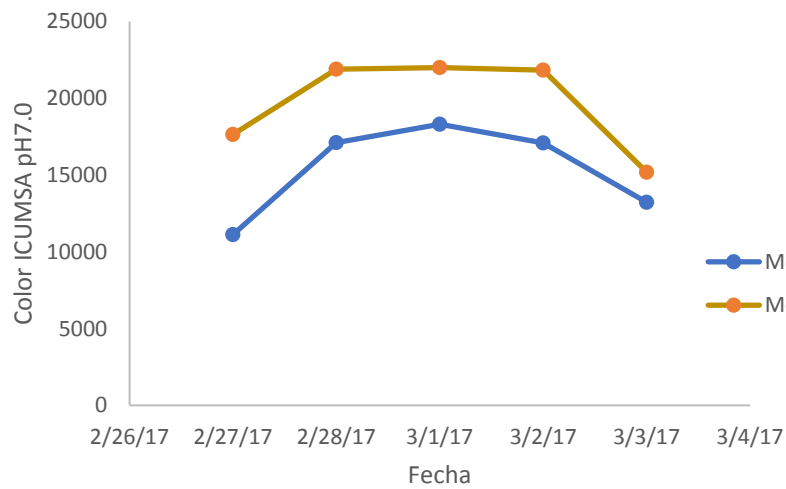


Figura 3. Color de la meladura línea A sin clarificar y clarificada. Proceso batch (escala laboratorio)

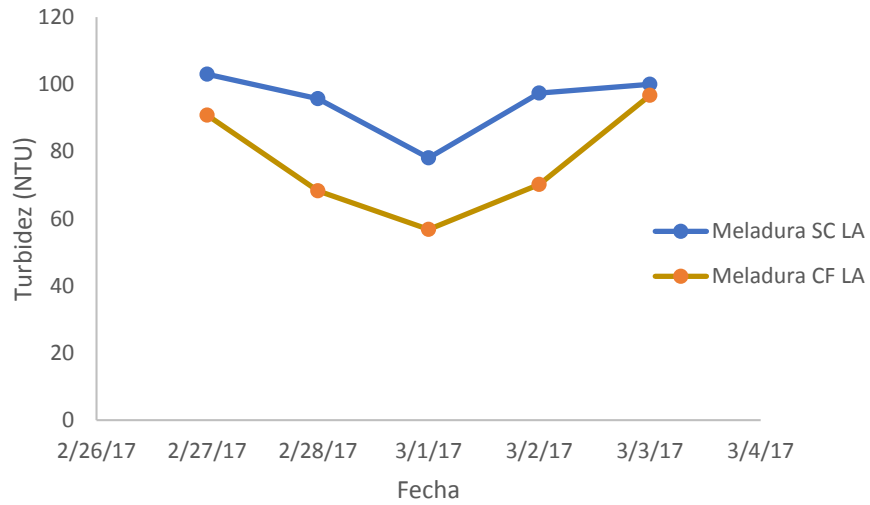


Figura 4. Turbidez de la meladura línea A sin clarificar y clarificada. Proceso batch (escala laboratorio)

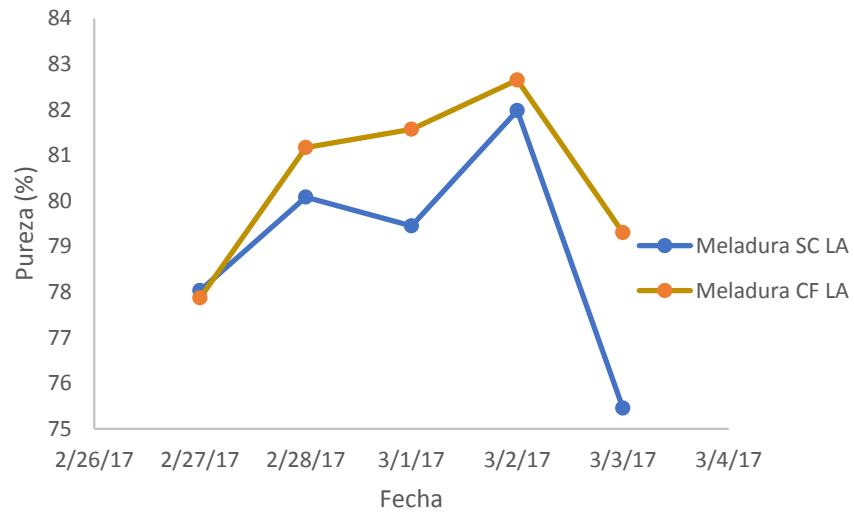


Figura 5. Pureza de la meladura línea A sin clarificar y clarificada. Proceso batch (escala laboratorio)

3.2 Ensayos en Flujo continuo (Pruebas de Laboratorio)

Para ajustar mejores las condiciones de proceso se acopló el sistema de electrocoagulación con una bomba peristáltica para tener un flujo continuo de meladura en el recipiente de reacción, tal como se muestra en la **Figura 6**. Además, a todas las muestras se les agregó 15 g de NaCl por 5L de Meladura Cruda, para aumentar la conductividad de la misma y el proceso de electrocoagulación fuese más favorable. Una de las limitaciones en esta etapa fue encontrar una fuente que proporcionara la corriente adecuada al proceso. Las pruebas se realizaron con una UPS de 24 V/10 A en corriente directa. Además, se acopló un amperímetro para monitorear la corriente de entrada a las placas metálicas.

Los resultados de las pruebas se muestran en el **Cuadro 2**. Tanto en la remoción de turbidez como en el incremento en la pureza, se obtuvieron resultados favorables, incluso mejores con los obtenidos en los ensayos en “batch” para el caso del incremento en la pureza. Con respecto al color el comportamiento es similar a los ensayos anteriores, en vez de esperar una caída del mismo se da un incremento, sin embargo, se evidenció que el aumento del color es menor en el sistema de electrocoagulación de flujo continuo con respecto a la configuración “batch”. Con esto resultados dan pie en pensar en estrategia para la eliminación de lodos en el fondo del recipiente o bien pensar en una etapa posterior de clarificación.

Cuadro 2. Resultados de pruebas de electrocoagulación de meladura en batch (escala laboratorio).

Pruebas continuo (Escala Laboratorio)										
Fecha	Condiciones de proceso	Meladura sin clarificar LA			Meladura Clarificada LA			% Remoción color	% Remoción turbidez	% incremento en la pureza
		Color	Turbidez (NTU)	Pureza (%)	Color	Turbidez (NTU)	Pureza (%)			
3/9/2017	Tiempo residencia 20 min, 15 g NaCl adicionada a la meladura acidificada. Fuente 24 V/10 A. Flujo 125mL/min	16000	128	76.93	21848	89.5	79.93	-36.6	30.1	3.9
3/10/2017	Tiempo residencia 20 min, 15 g NaCl adicionada a la meladura acidificada. Fuente 24 V/10 A. Flujo 125mL/min	18414	120	78.84	20363	105	79.34	-10.6	12.5	0.6
3/13/2017	Tiempo residencia 16 min, 15 g NaCl adicionada a la meladura acidificada. Fuente 24 V/10 A. Flujo 125mL/min	14936	103	82.6	18702	94.2	85.74	-25.2	8.5	3.8
3/16/2017	Tiempo residencia 16 min, 15 g NaCl adicionada a la meladura acidificada. Fuente 24 V/10 A. Flujo 125mL/min	18124	127	79.45	22347	116	81.14	-23.3	8.7	2.1
Promedio								-23.9	14.9	2.6



Figura 6. Sistema de flujo continuo de electrocoagulación de meladura

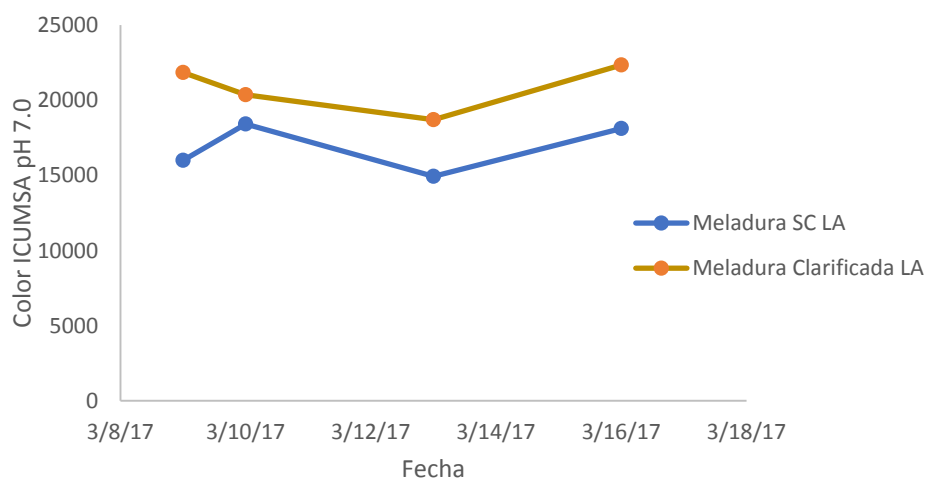


Figura 7. Color de la meladura línea A sin clarificar y clarificada. Proceso flujo continuo (escala laboratorio)

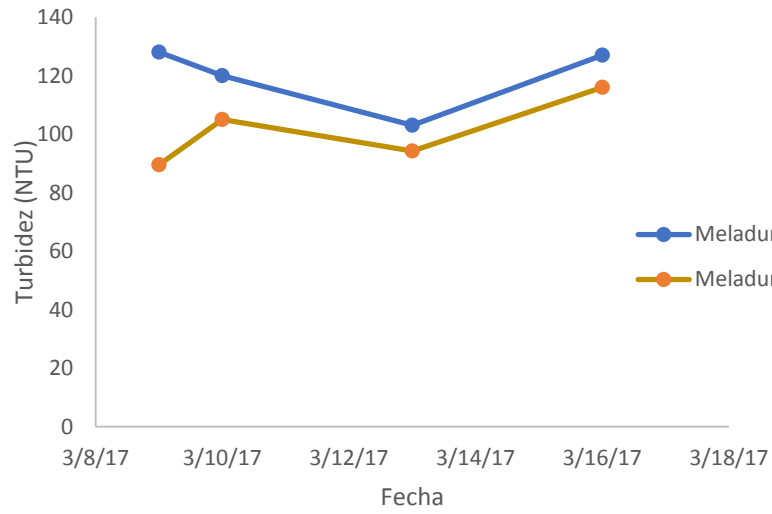


Figura 8. Turbidez de la meladura línea A sin clarificar y clarificada. Proceso flujo continuo (escala laboratorio)

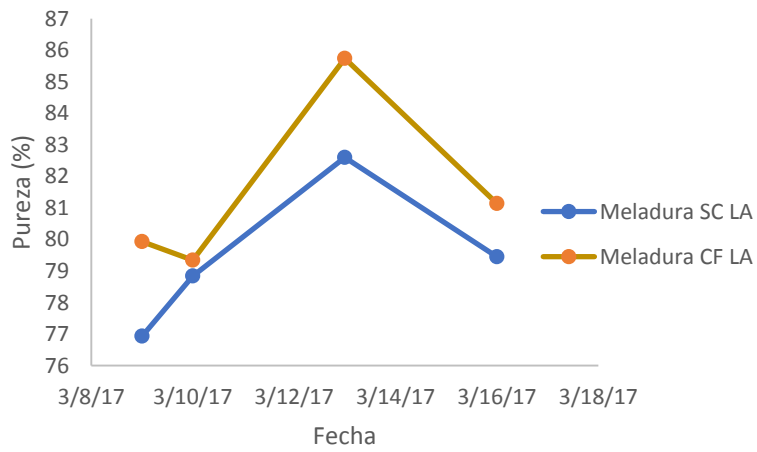


Figura 9. Pureza de la meladura línea A sin clarificar y clarificada. Proceso flujo continuo (escala laboratorio)

3.3 Prueba con prototipo de Reactor de electrocoagulación (Proceso de producción en fábrica)

Debido a los resultados obtenidos en las pruebas anteriores, evidenciando un aumento importante en la pureza en la meladura y en la disminución de la turbidez, se diseñó y se instaló un prototipo de un reactor de electrocoagulación en la línea de proceso, en el tanque de acidificación de la meladura de la Línea B, como se observa en la **Figura 11**. El prototipo fue conectado a una fuente de corriente directa proporcionada por una máquina para soldar, el voltaje y corriente suministrada fue de 10 V/80 A aproximadamente. De igual forma que en la pruebas en laboratorio, la placas fueron conectadas en un arreglo en paralelo manteniendo una distancia de 1 cm entre ellas.



Figura 10. Prototipo de reactor de electrocoagulación



Figura 11. Prototipo de reactor de electrocoagulación instalado en la línea de Meladura B previo a la clarificación.

En la siguiente figura se muestran las dimensiones del reactor de electrocoagulación instalado

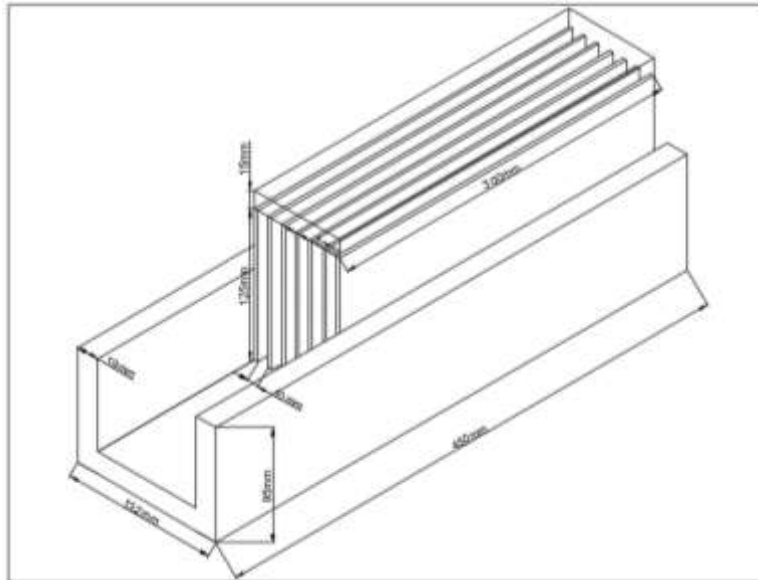


Figura 12. Dimensiones del prototipo del reactor de electrocoagulación

Las medidas de este prototipo quedan subdimensionadas debido al flujo de meladura de la Línea B (120 GPM), sin embargo, se realiza el diseño puesto que, si aumenta el área de placas, el requerimiento de corriente eléctrica aumentará excesivamente y eso fue una limitante a la hora de instalar el reactor.

Se realizaron tres días consecutivos de pruebas, no se continuó porque las placas de sacrificio sufrieron un deterioro tal (placas muy delgadas), que fue necesario el retiro del equipo de la línea de proceso. Los resultados de los análisis se muestran en el **Cuadro 3** y **Cuadro 4**, además se comparan con los análisis realizados los tres días posteriores del retiro del reactor de electrocoagulación para determinar si existe algún cambio en los resultados de las pruebas a la meladura antes y después de clarificar.

Cabe mencionar que la muestra de meladura sin clarificar fue tomada del último efecto de evaporación y la toma de muestra de meladura clarificada se tomó en la corriente de salida del clarificador de meladura de la Línea B.

De acuerdo con los datos obtenidos se puede inferir lo siguiente:

- Tanto el tratamiento de la meladura con el reactor de electrocoagulación (RE) y el clarificador de meladura (CM) se da un descenso del color de la misma, sin embargo, se da una mayor remoción solo teniendo en la línea el clarificador de meladura, para una caída promedio 749 UI con RE y 1237 UI con CM.
- Forma similar sucede con el parámetro de turbidez, donde se obtiene una diferencia promedio de 107.5 unidades NTU para RE mientras que con el CM se da una diferencia de 156.3 unidades NTU.
- En el caso del incremento en la pureza se obtienen resultados más satisfactorios con RE, con un aumento promedio de 0.6, mientras que en el CM solo se da un aumento promedio de 0,083.

Cuadro 3. Resultados de pruebas de electrocoagulación de meladura Línea B (planta industrial).

Fecha/Hora	Meladura Sin Clarificar			Meladura Clarificada			Δ Color	Δ Turbidez	Δ Pureza
	Color UI	Turbidez (NTU)	Pureza(%)	Color UI	Turbidez (NTU)	Pureza(%)			
4/18/17 14:00	21027	141	83.11	18665	73.2	84.64	2362	67.8	1.53
4/18/17 18:00	20981	130	81.95	19009	62.3	82.18	1972	67.7	0.23
4/18/17 22:00	19741	121	80.15	18934	65	80.47	807	56	0.32
4/19/17 2:00	20755	118	79.8	19319	59.3	81.29	1436	58.7	1.49
4/19/17 6:00	22565	203	78.07	21838	84.3	79.73	727	118.7	1.66
4/19/17 10:00	20883	144	79.95	22075	89.7	79.48	-1192	54.3	-0.47
4/19/17 14:00	21776	133	81.51	21010	81.6	77.98	766	51.4	-3.53
4/19/17 18:00	24412	151	80.52	23608	109	79.83	804	42	-0.69
4/20/17 2:00	23295	126	79.74	22845	84.9	80.22	450	41.1	0.48
4/20/17 6:00	27460	285	80.87	28869	131	84.94	-1409	154	4.07
4/20/17 10:00	26098	413	82.95	24999	102	82.9	1099	311	-0.05
4/20/17 14:00	26354	388	81.06	25187	121	83.63	1167	267	2.57
Promedio							749.1	107.5	0.6

Cuadro 4. Resultados de pruebas de clarificación de meladura Línea B (planta industrial).

Fecha/Hora	Meladura Sin Clarificar			Meladura Clarificada			Δ Color	Δ Turbidez	Δ Pureza
	Color UI	Turbidez (NTU)	Pureza (%)	Color UI	Turbidez (NTU)	Pureza (%)			
4/21/17 14:00	25108	183	79.51	24173	81.2	79.06	935	101.8	-0.45
4/21/17 18:00	23775	168	79.13	23713	78.5	79.74	62	89.5	0.61
4/21/17 22:00	24460	171	81.68	23910	82	81.1	550	89	-0.58
4/22/17 2:00	25224	180	78.61	24933	89	79.87	291	91	1.26
4/22/17 6:00	26774	366	79.76	25913	106	80.7	861	260	0.94
4/22/17 10:00	27758	205	80.38	24158	130	79.72	3600	75	-0.66
4/22/17 14:00	27206	385	79.77	24572	109	79.46	2634	276	-0.31
4/22/17 18:00	25914	199	81.29	24606	77.2	81.19	1308	121.8	-0.1
4/23/17 2:00	25711	180	79.96	24009	88	80.42	1702	92	0.46
4/23/17 6:00	26215	284	79.89	24365	81.2	81.37	1850	202.8	1.48
4/23/17 10:00	24794	314	80.92	24395	102	81.01	399	212	0.09
4/23/17 14:00	25080	360	81.78	24428	95.6	80.04	652	264.4	-1.74
Promedio							1237	156.3	0.083

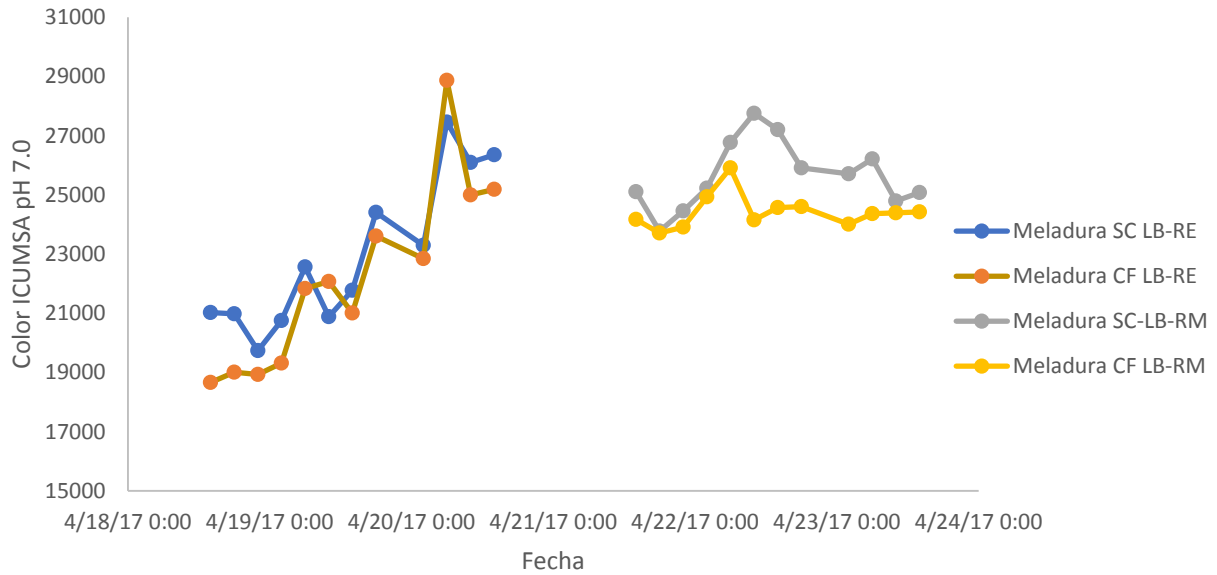


Figura 13. Comparación del color de la meladura con el Reactor de electrocoagulación en la línea y el Clarificador de Meladura

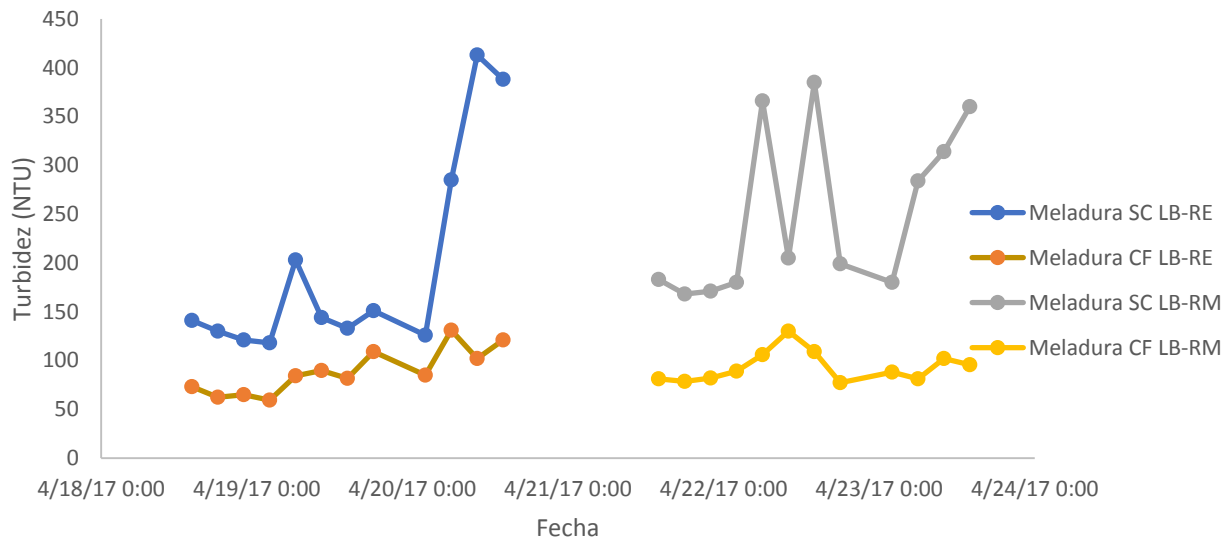


Figura 14. Comparación de la turbidez en meladura con el Reactor de electrocoagulación en la línea y el Clarificador de Meladura

Se realizó un análisis estadístico para determinar si existe diferencia significativa entre las respuestas de diferencia de color, turbidez y pureza cuando estuvo en la línea el reactor de electrocoagulación y el clarificador de meladura. Los resultados se muestran a continuación:

Two-Sample T-Test and CI: Δ Color RE, Δ Color CM

Two-sample T for Δ Color RE vs Δ Color CM

	N	Mean	StDev	SE Mean
Δ Color RE	12	749	1103	318
Δ Color CM	12	1237	1051	303

Difference = μ (Δ Color RE) - μ (Δ Color CM)
Estimate for difference: -488
95% upper bound for difference: 269
T-Test of difference = 0 (vs <): T-Value = -1.11 P-Value = 0.140 DF = 21

Figura 15. Comparación de dos tratamientos en la clarificación de Meladura Línea B-Color (Minitab)

Two-Sample T-Test and CI: Δ Turbidez RE, Δ Turbidez CM

Two-sample T for Δ Turbidez RE vs Δ Turbidez CM

	N	Mean	StDev	SE Mean
Δ Turbidez RE	12	107.5	91.5	26
Δ Turbidez CM	12	156.3	79.9	23

Difference = μ (Δ Turbidez RE) - μ (Δ Turbidez CM)
Estimate for difference: -48.8
95% upper bound for difference: 11.5
T-Test of difference = 0 (vs <): T-Value = -1.39 P-Value = 0.089 DF = 21

Figura 16. Comparación de dos tratamientos en la clarificación de Meladura Línea B-Turbidez (Minitab)

Two-Sample T-Test and CI: Δ Pureza RE, Δ Pureza CM

Two-sample T for Δ Pureza RE vs Δ Pureza CM

	N	Mean	StDev	SE Mean
Δ Pureza RE	12	0.63	1.89	0.54
Δ Pureza CM	12	0.083	0.918	0.27

Difference = μ (Δ Pureza RE) - μ (Δ Pureza CM)
Estimate for difference: 0.551
95% lower bound for difference: -0.512
T-Test of difference = 0 (vs >): T-Value = 0.91 P-Value = 0.189 DF = 15

Figura 17. Comparación de dos tratamientos en la clarificación de Meladura Línea B-Pureza (Minitab)

Las Hipótesis fueron las siguientes:

$$H_0: \mu_{RE}(\text{variable } x)_{RE} = \mu_{CM}(\text{Variable } x)_{CM}$$

$$H_1: \mu_{RE}(\text{variable } x)_{RE} < \mu_{CM}(\text{Variable } x)_{CM} \text{ (Para color y turbidez)}$$

$$H_1: \mu_{RE}(\text{variable } x)_{RE} > \mu_{CM}(\text{Variable } x)_{CM} \text{ (Para pureza)}$$

De las **Figura 15**, **Figura 16** y **Figura 17** se puede inferir que no existe diferencia significativa entre las variables de color, turbidez, y pureza, debido que los “p-Values” son en todos los casos mayores a la significancia (0.05), con lo cual no se rechaza la hipótesis nula que es la igualdad de las medias. A la vez, se observa que en las figuras anteriores, los valores de “p- value” son muy cercanos a la significancia, con esto se recomienda recopilar más datos experimentales para tomar una mejor decisión.

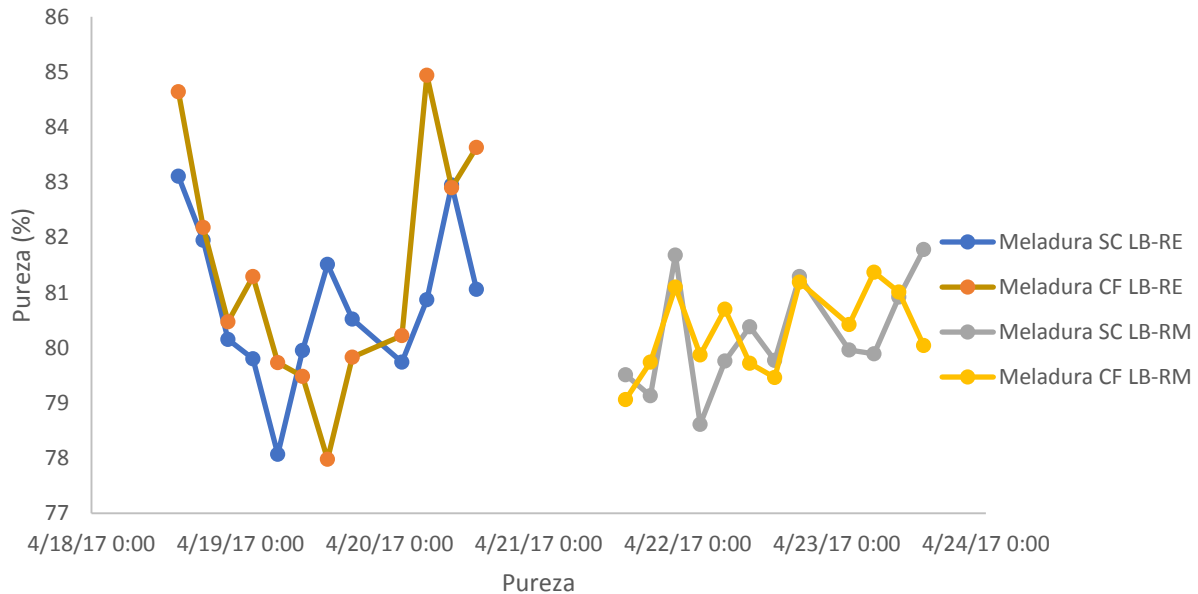


Figura 18. Comparación del porcentaje de pureza en meladura con el Reactor de electrocoagulación en la línea y el Clarificador de Meladura

4. Conclusiones y Recomendaciones

- La variabilidad de la materia prima en el procesamiento de la caña de azúcar dificulta muchas veces el análisis de resultados estadísticos.
- Se evidenció que no existe diferencia significativa entre los dos tratamientos de la meladura, sin embargo, los estadísticos están tienen valores cercanos para que se tome otra decisión, se recomienda recopilar más datos experimentales para una mejor conclusión.
- Se recomienda hacer un prototipo de dimensiones más grandes para darle un tiempo de residencia adecuado a la meladura en el reactor de electrocoagulación, con ello que la electrólisis se da satisfactoriamente. Asimismo aumentar el grosor de las placas para que el fenómeno de pasivación no deteriore tan rápido las mismas.
- Seleccionar y estudiar mejor la fuente que suministre la corriente directa al proceso, se sabe que se requiere al menos de 700 A/m² para que la electrocoagulación se lleve a cabo.

- De todas las pruebas tanto en laboratorio como en planta, se determinó que hay un aumento en la pureza de la meladura, con lo cual da pie a que se siga investigando y haciendo experimentación. Un aumento en la pureza de la meladura se vería reflejado en mejores rendimientos en la etapa de cristalización de la sacarosa en tachos.

5. Bibliografía

Mejía, A. P., Ruiz, Á. A., & Giraldo, L. F. (2006). La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *Línea de investigación: Tratamiento de aguas*.

Ruiz, A. A., & Giraldo, L. F. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea. *Rala*.

Yong—chun, H., Rui—chen, G., & Feng, Y. (2011). Study on purification of syrup by electrocoagulation. *He Ren*, 32(12).