

ESTUDIO DE TRATABILIDAD DE LAS AGUAS RESIDUALES DE UNA PLANTA PULVERIZADORA DE LECHE

I.S, M.Sc. Jorge Humberto Sierra C.

I.S, M.Sc. Beatriz Amparo Wills B.

I.S. Julio César Saldarriaga M.*

RESUMEN

Las aguas residuales del proceso de pulverización de leche y suero presentan fuertes variaciones de pH, elevadas temperaturas y altas concentraciones de sólidos, carga orgánica y grasas, que justifican la búsqueda de alternativas de tratabilidad para cumplir con la legislación y disminuir las potenciales erogaciones por concepto de tasas retributivas.

En este trabajo se presentan los resultados de los estudios de caracterización y tratabilidad de las aguas residuales de una industria dedicada a la pulverización de leche y suero con el fin de evaluar la susceptibilidad de las mismas a un tratamiento fisicoquímico.

Se describe la manera como se realizaron el aforo, el muestreo y los ensayos a los que se sometieron las diferentes muestras del agua residual, tanto cruda como tratada.

Los ensayos de jarras de las aguas residuales del proceso se llevaron a cabo con sulfato de aluminio, cal, sulfato férrico, cloruro férrico y un polímero, mientras que para las aguas de lavado de equipos e instalaciones se utilizó ácido sulfúrico con sulfato de aluminio o sulfato férrico con y sin polímero o cloruro férrico.

En el caso de las aguas residuales del proceso todos los tratamientos fueron muy efectivos en la remoción de sólidos suspendidos y grasas; la remoción de carga orgánica fue mejor con adición de sulfato férrico más flotación y con el uso de soda y cloruro férrico.

En el caso de las aguas residuales de lavado fue más efectiva la adición consecutiva de ácido sulfúrico y cloruro férrico

* Profesores Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia

ABSTRACT

The results of a study on the characterization and treatability test of the waste water of a dairy plant which is mainly devoted to the production of powdered milk and whey, are presented in this work.

It includes a description of the procedures to carry out the field and the laboratory test.

Several coagulation tests were run using alum, lime, ferric sulphate, ferric chloride, sulphuric acid and a polyelectrolyte.

In the case of waste waters from processes all treatments were very effective in removal of both suspended and fatty solids; the removal of the organics improved with the addition of ferric sulphate plus floatation, and with the use of soda and ferric chloride.

The treatment of waste water from washing operations was more effective with a serial addition of sulphuric acid and ferric chloride.

Palabras claves:

Aguas residuales de industria láctea, Tratamientos fisicoquímicos de aguas residuales, Coagulación, Flotación.

INTRODUCCIÓN

La planta pulverizadora de leche y suero en la que el Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia realizó el estudio, se encontraba en producción de prueba, es decir, aún se le estaban haciendo ajustes al montaje, a la programación de la producción y al consumo de agua y demás insumos.

Los productos e insumos empleados en ese momento eran: leche fluida con un 12.5% de sólidos como materia prima y soda cáustica (6000Kg/mes), ácido fosfórico (2589Kg/mes), hipoclorito de sodio (233Kg/mes) utilizados para limpieza de equipos e instalaciones.

En el período en el que se realizó el trabajo campo, días 6 al 16 de abril de 1997, se estaban produciendo 420 toneladas/mes de leche en polvo, que podrán incrementarse hasta unas 1000 toneladas/mes, cuando se introduzcan los ajustes necesarios y el proceso de pulverización y el lavado de equipos sea continuo durante las 24 horas del día.

Las aguas residuales del proceso de pulverizado tienen alto contenido de grasas emulsificadas y su separación del agua no es posible por gravedad; se demanda el rompimiento de la emulsión por métodos químicos, eléctricos o físicos. En esta experiencia se decidió agregar y mezclar rápidamente coagulantes químicos antes de la sedimentación y de la flotación.

El trabajo de campo incluyó las actividades de muestreos, aforos a intervalos de 20 minutos, mediciones de pH y temperatura a cada fracción de muestra y realización de ensayos de coagulación (pruebas de jarras) seguidos de sedimentación y de flotación con coagulantes y sin ellos y con recirculación y sin ella.

Las aguas residuales del proceso con descarga de la clarificadora, separador sólido-líquido, respondieron bien al ensayo de jarras con soda y cloruro férrico que produjo remociones de sólidos suspendidos (99.7%), grasa (96%), DBO₅ (74.1%) y DQO (69.4%). Cuando no hay descarga de la clarificadora respondieron bien al ensayo de flotación con sulfato férrico que produjo remociones de sólidos

suspendidos (97.2%), grasa (99.8%), DBO₅ (52.8%) y DQO (88.6%)

Las aguas residuales del lavado de equipos e instalaciones respondieron bien al ensayo de jarras con ácido sulfúrico y cloruro férrico que produjo remociones de sólidos suspendidos (91.8%), grasa (99.6%), DBO₅ (84.4%) y DQO (69.8%)

CONSIDERACIONES TEÓRICAS

Los procesos y operaciones unitarias de coagulación (mezcla rápida y floculación), sedimentación y filtración han sido por más de un siglo los más importantes soportes de la potabilización de aguas y su uso se extendió rápidamente al tratamiento de aguas residuales (A.R.).

La *coagulación* ocurre cuando se adiciona un producto químico al agua con el fin de desestabilizar las partículas coloidales que no sedimentan o no flotan, o que lo hacen muy lentamente, para posibilitar su choque y producir un flóculo que sedimente o que flote con mayor facilidad o rapidez debido a su peso y consistencia.

En la depuración de aguas residuales domésticas (A.R.D.), la coagulación se utiliza para aglomerar los sólidos de los efluentes primarios o secundarios y en el tratamiento de aguas residuales industriales (A.R.I.), para aglutinar los sólidos que están presentes en cantidades apreciables en forma suspendida o emulsificada. Los principales coagulantes utilizados en el tratamiento de A.R. son las sales de aluminio y de hierro, cal y polielectrolitos (Reynolds, 1982)

Las alternativas para los procesos de desemulsificación química son “adición de sales coagulantes, adición de ácidos, adición de sales y calentamiento de la emulsión, adición de sales y tratamiento con electricidad y adición de ácidos más agentes separadores” (Mentens, 1967). Se insiste en que “las sales de hierro y aluminio son muy efectivas en la desemulsificación de desechos aceitosos” (Barker, Foltz y Thompson, 1970), no obstante su tendencia a formar lodos hidróxidos que son muy

difíciles de deshidratar. Los ácidos rompen más efectivamente las emulsiones que las sales coagulantes, pero además de resultar más costosos, se suele requerir ajuste de pH después de la separación

La desemulsificación puede ocurrir a pH tan bajo como 2 a 3 (Vaughn y McCurdy, 1973), aunque con valores de 5.0 a 5.5 también ha ocurrido (Stoner, 1971), lo cual es un indicio de la influencia del tipo de desecho; de todas maneras los ácidos y las sales coagulantes tienen buena aceptación, aunque no se puede descartar la necesidad de ayudantes de coagulación.

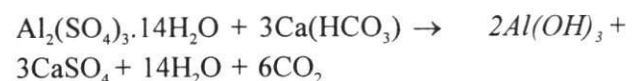
Una vez lograda la desestabilización de la emulsión, la separación aceite-agua se consigue mediante flotación con aire disuelto, cuya efectividad puede duplicarse con ayudantes de coagulación (Quigley y Hoffman, 1966). En agua caliente la flotación ocurre más rápido, pero la temperatura no tiene incidencia sobre otros factores (Shannon y Buisson, 1980)

En lugar de la flotación con aire disuelto puede utilizarse la sedimentación, que produce resultados aceptables en muchos casos (Wigren y Burton, 1972), (Boyd y Shell, 1972), (API, 1963) y (Garrison y Geppert, 1960)

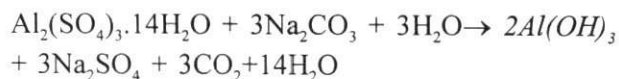
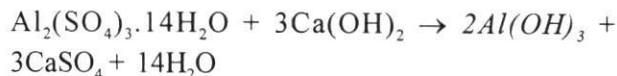
La selección de un coagulante requiere estudios de coagulación a escala de laboratorio o planta piloto, puesto que una A.R. dada puede mostrar buenos resultados de coagulación para un determinado coagulante, pero esto no es generalizable. La química de la coagulación se puede sintetizar como sigue, para los productos más usuales:

• **Reacción química simplificada del sulfato de aluminio (alumbre)**

Cuando el agua contiene suficiente alcalinidad para reaccionar con el alumbre se produce un flóculo de hidróxido de aluminio, mediante la siguiente reacción química simplificada:



Si no hay alcalinidad natural o si la que hay es insuficiente para reaccionar con el alumbre y amortiguar el pH, puede ser necesario adicionarla en forma de cal o soda (sosa), así:



De las reacciones anteriores se deduce que 1 mg/l de alumbre reacciona con:

0.5 mg/l de alcalinidad natural, expresada como $CaCO_3$

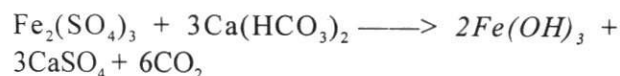
0.33 mg/l de cal viva como CaO al 85%

0.39 mg/l de cal hidratada como $Ca(OH)_2$ al 95%

0.53 mg/l de soda como Na_2CO_3

• **Reacción química simplificada del sulfato férrico**

La reacción simplificada del sulfato férrico con la alcalinidad natural al bicarbonato para formar hidróxido férrico, es:

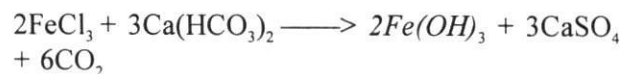


Esta reacción produce, usualmente, un flóculo denso y de sedimentación rápida; si la alcalinidad natural es insuficiente para la reacción, se puede emplear cal apagada, $Ca(OH)_2$ o cal viva, CaO, para suplir la deficiencia. El rango óptimo de pH para el cloruro férrico está entre 4 y 12, dentro del cual es relativamente insoluble.

Si la cantidad de cal requerida es más bien pequeña, puede ser preferible utilizar cal hidratada o apagada ($Ca(OH)_2$) debido a que los equipos de alimentación son menos costosos que los equipos de apagamiento.

• **Reacción química simplificada del cloruro férrico**

La reacción química simplificada del cloruro férrico con la alcalinidad natural al bicarbonato, para formar hidróxido férrico es:



En caso de que la alcalinidad sea insuficiente se puede agregar cal apagada para formar el hidróxido, de acuerdo con la siguiente reacción:

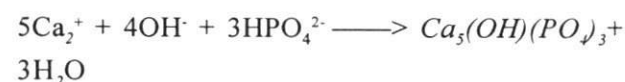
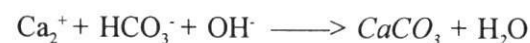


El cloruro férrico produce un flóculo denso y de rápida sedimentación.

• **Coagulación con cal**

Históricamente, la cal ha sido usada como ayudante en la sedimentación debido a su bajo costo unitario con respecto a otras sales minerales. Promueve la coagulación incrementando el pH del agua, reaccionando con la alcalinidad y el fosfato presente, formando precipitados de carbonato de calcio ($CaCO_3$), hidroxiapatita de calcio [$Ca_5(OH)(PO_4)_3$] e hidróxido de magnesio [$Mg(OH)_2$]. Este empieza a precipitar a valores de pH sobre 9.5, pero no se completa sino hasta valores de pH de 11.

Las reacciones con la alcalinidad y el fosfato, para formar los precipitados mencionados son:



Los lodos calizos resultantes pueden espesarse, deshidratarse y calcinarse para convertir el carbonato de calcio a cal reutilizable; sin embargo, la calcinación es económicamente viable sólo en plantas grandes, con caudales superiores a 38000 m³/d (WPCF. MOP 8, 1977).

• Ayudantes de coagulación

Ciertos materiales, referidos como *ayudantes de coagulación*, mejoran las propiedades del flóculo y del proceso de coagulación; los más utilizados son las arcillas, la sílice activada y polímeros (polielectrolitos).

Los polielectrolitos son cadenas orgánicas de alto peso molecular con grupos funcionales a intervalos a lo largo de la cadena. Pueden ser aniónicos, catiónicos y no iónicos; de origen natural (almidones y gomas polisacáridas) o sintético y se pueden conseguir en forma líquida o seca.

Antes de diseñar un sistema de alimentación de un polímero se deben establecer las especificaciones: denominación y tipo de polímero, concentración requerida y cantidad a alimentar, características fisicoquímicas del polímero, tiempo de disolución requerido y tipo de control de la alimentación.

Las arcillas bentoníticas, que se utilizan frecuentemente como ayudante de coagulación de aguas de baja turbiedad, pueden reducir la cantidad de coagulante y mejorar la naturaleza de los flóculos producidos. Aunque su uso es más común en potabilización, también tienen aplicaciones en el tratamiento de A.R. en dosis de 3 a 20 mg/l (WPCF. MOP 8, 1977), las cuales se determinan mediante un ensayo de jarras.

La Sílice activada es silicato de sodio [$\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_{3,22}$] que ha sido activado con ácido sulfúrico, sulfato de aluminio, bióxido de carbono, sulfato de amonio, bicarbonato de sodio o cloro.

La dosis de coagulante se debe determinar experimentalmente, generalmente con un ensayo de jarras, aunque la dosis determinada en el ensayo no es la misma que en la planta a escala real; una razón que explica la discrepancia es que el ensayo de jarras es una prueba batch, que es más eficiente que un sistema de flujo continuo completamente mezclado para cualquier reacción de orden mayor que cero; además el A.R. sometida a tratamiento tiene calidad variable, lo cual incide en el requerimiento de coagulante.

La selección de los coagulantes mediante un ensayo de jarras debe contemplar entre otras las siguientes variables o factores que influyen en la coagulación y

que deben ser cuidadosamente controladas: temperatura del agua, concentración y dosis del coagulante y del ayudantes de coagulación, pH, manera de hacer la adición del coagulante y del ayudante de coagulación, secuencia y tiempos de adición del coagulante, duración e intensidad de la mezcla rápida y de la floculación, manera de tomar las muestras, equipo utilizado para los ensayos y análisis de laboratorio requeridos.

MATERIALES Y METODOS

Muestreo y aforo

El aforo se hizo en un vertedor triangular, ilustrado en la figura 1, debidamente calibrado; el muestreo fue compuesto proporcional al caudal, tomando alícuotas de muestra cada 20 minutos, de tal forma que el volumen colectado y debidamente preservado se pudiera utilizar para los ensayos piloto (coagulación, sedimentación y flotación, etc.) y para los análisis de laboratorio respectivos

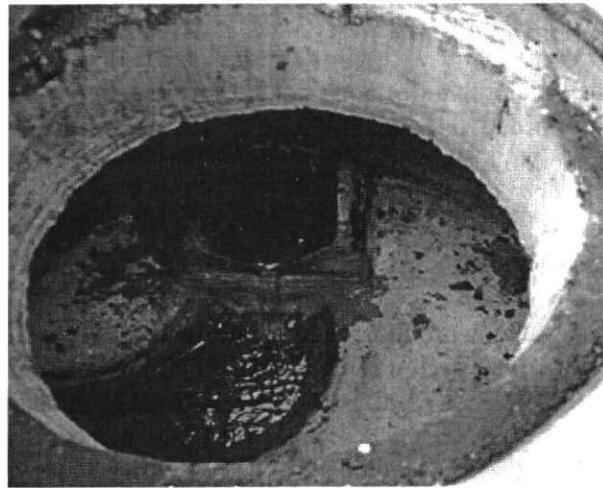


Figura 1. Dispositivo de aforo y sitio de muestreo

Productos químicos

Ácido Sulfúrico
Hidróxido de Sodio
Cal
Sulfato Férrico, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ al 10% - W
Sulfato de Aluminio, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ al 10% - W
Cloruro Férrico, FeCl_3 al 10% - W
Poliacrilamida
Nalco

Ensayos de jarras

Los ensayos de jarras se llevaron a cabo con la siguiente rutina:

- Se ajustó el pH, así: al A.R. del proceso se le agregó soda cáustica (NaOH) al 50% y al A.R. del lavado, ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 88%.
- La cantidad de coagulante adecuada se estima observando el efecto de cantidades variables de éste en fracciones de muestra puestas en tubos de ensayo que se agitan manualmente.
- Se hace el ensayo con seis jarras siguiendo el procedimiento convencional: un litro de muestra, recipientes de 1.5 litros, diferente dosis por muestra, mezcla rápida durante un minuto a 100 r.p.m. y mezcla lenta por 15 minutos a 40 r.p.m.
- Reposo durante 15 minutos, observación de las muestras y toma de datos, medición de los valores de pH finales para las muestras que presentan los mejores resultados.
- Selección de la dosis adecuada, con la cual se monta un ensayo de jarras para la mejor dosis (6 jarras con los mismo gradientes de velocidad y tiempos de mezcla)
- Toma de muestra para laboratorio (2 litros), a partir de los sobrenadantes de las jarras, una vez cumplido el tiempo de reposo

Flotación

Los ensayos de flotación se realizaron con y sin recirculación, de la manera convencional para sistemas batch (Eckenfelder y Ford, 1981). Las condiciones fueron las siguientes:

- * Volumen de agua flotado = 2.0 - 2.5 litros
- * Presión de flotación = 50 p.s.i.g.
- * Tiempo de retención en el saturador = 4 minutos
- * Tiempo de reposo = 10 minutos
- * Toma de muestra del clarificado para análisis de laboratorio

Aguas residuales

La industria pulverizadora de leche y suero genera aguas residuales en el proceso de pulverización propiamente dicho y en las actividades de lavado de equipos e instalaciones. El tren de producción tiene una duración de aproximadamente 20 horas, mientras que el lavado, que al realizar el estudio presentó muchas variaciones, dura unas 4 horas.

Las aguas residuales del proceso de pulverización de leche y suero presentan fuertes variaciones de pH, elevadas temperaturas y altas concentraciones de sólidos, carga orgánica y grasas, lo cual se evidencia en los resultados obtenidos en la caracterización, que se presentan en la tabla 1 (valores promedio, máximos y mínimos de caudal, temperatura y pH) y en la tabla 2 (análisis de laboratorio).

Tabla 1. Valores máximos y mínimos registrados durante las actividades de aforo y muestreo

Muestreo Actividad	Día 1		Día 2		Día 3	
	1	2	1	2	1	2
Caudal máximo (l/s)	3.832	2.684	1.922	3.477	3.832	3.832
Caudal mínimo (l/s)	0.316	0.091	0.434	0.019	0.526	0.625
Caudal promedio (l/s)	0.970	1.618	0.716	0.884	1.010	1.230
Temperatura máx. (°C)	57.3	72.3	46.0	58.0	45.3	66.6
Temperatura mín. (°C)	29.5	27.3	33.4	30.6	29.9	36.2
pH máximo (unidades)	12.53	11.96	10.86	12.60	11.59	12.46
pH mínimo (unidades)	2.34	2.13	3.12	2.13	3.25	1.97

1 = Producción de leche en Polvo

2 = Lavado de instalaciones y equipos

RESULTADOS

Características de las aguas residuales

Los resultados promedio de las caracterizaciones aparecen en las tablas 1 y 2.

Efectividad de los distintos tratamientos

Las tablas 3 y 4 tienen los resultados de los diferentes tratamientos para el agua residual del proceso con y sin descarga de la clarificadora, respectivamente, y la tabla 5, los resultados para el agua residual del lavado

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Aguas residuales crudas

Las aguas residuales generadas son de color lechoso como se puede observar en las figuras 2 y 3, además de presentar las características registradas en las tablas 1 y 2 y en las figuras 4 a 9, así:

- Temperaturas elevadas tanto en las A.R. del proceso como en las de lavado, como se puede ver en las figuras 4 a 6, siempre por encima de los 30°C y en su gran mayoría sobre los 40°C, que es la temperatura máxima permitida para todos los vertimientos (Decreto 1594, 1984).

Tabla 2. Características promedio del A.R. cruda

Parámetro	A.R. del proceso	A.R. del lavado
Caudal promedio (l/s)	0.90	1.24
Caudal máximo (l/s)	3.20	3.33
Caudal mínimo (l/s)	0.30	0.25
Temperatura máxima (°C)	57.3	72.3
Temperatura (°C)	29.5	27.3
PH máximo (unidades)	12.53	12.60
PH muestra compuesta	6.94 – 7.22	12.80
Sólidos totales (mg/l)	29369	17379
Sólidos suspendidos volátiles (mg/l)	8687	1410
Sólidos sedimentables (ml/h)	78	0.89
Sólidos suspendidos (mg/l)	18238	3223
Fósforo (mg/l PO ₄ ⁼)	385	201
Nitrógeno (mg/l NTK)	434	171
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) (mg/l)	12596	2271
Demanda Química de Oxígeno (DQO) (mg/l)	21966	5621
Detergentes (mg/l SAAM)	0.267	0.345
Grasas y aceites (mg/l)	413	640
Alcalinidad (mg/l CaCO ₃)	2153	4400

- El pH de las A.R. del proceso presenta variaciones que van desde algunos picos con valores entre 2.0 y 4.0, pasando por un buen número de datos entre 7.0 y 8.0, y otro entre 10.0 y 12.0. Es más predominante la tendencia alcalina que la ácida, como se ve en las figuras 7 y 8.

Las A.R. del lavado también presentan variaciones de pH desde 2.0 hasta 12.0, pero son mucho más alcalinas que las del proceso. La mezcla de estas dos corrientes puede producir autoajuste del pH, no obstante que su producción no es simultánea.

- El caudal de las A.R. del proceso, figuras 7 y 8, presenta algunas variaciones que se acentúan con las descargas de la Clarificadora; ocurren con alguna frecuencia picos del orden de los 3.0 a 4.0 l/s, pero el promedio es del orden de 0.9 l/s.

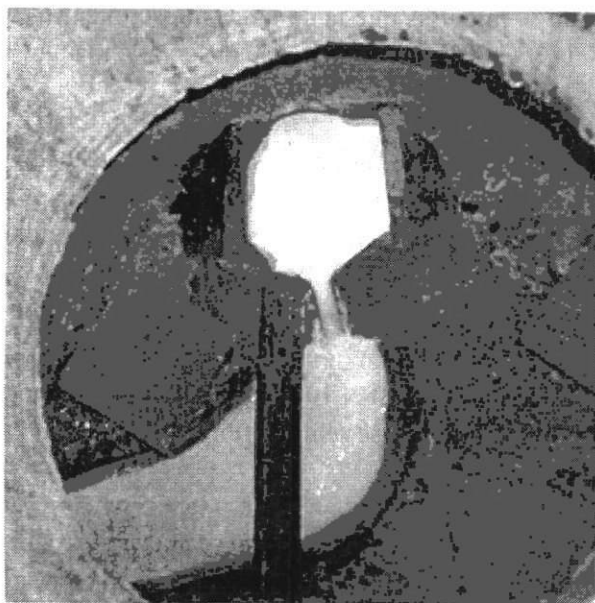


Figura 2. Aspecto del agua residual con descarga de la Clarificadora

Las A.R. del lavado, tabla 2, tienen 17309 mg/l de sólidos totales, de los cuales el 81% son disueltos, 640 mg/l de grasas y relación DBO /DQO de 0.41, con una DQO de 5621, lo cual da una idea de la poca biodegradabilidad.

La misma tendencia se presenta con las A.R. de lavado, aunque el promedio es un poco más alto, del orden de 1.25 l/s.

Ambas aguas residuales presentan un alto contenido de sólidos, fósforo, nitrógeno, grasas, demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), como se puede observar en la tabla 2.

Las A.R. del proceso, tabla 2, presentaron una concentración de 29369 mg/l de sólidos totales, de los cuales un 62% están en la forma suspendida; la relación DBO₅ /DQO fue 0.58, con una DQO de 21966 mg/l, lo cual es un indicio de su resistencia a la acción biológica. Se destaca el hecho de que la descarga de la clarificadora, más o menos cada 30 minutos, aporta gran cantidad de sólidos, grasa y carga orgánica, razón por la cual se especifica si se incluye o no la descarga de la clarificadora.

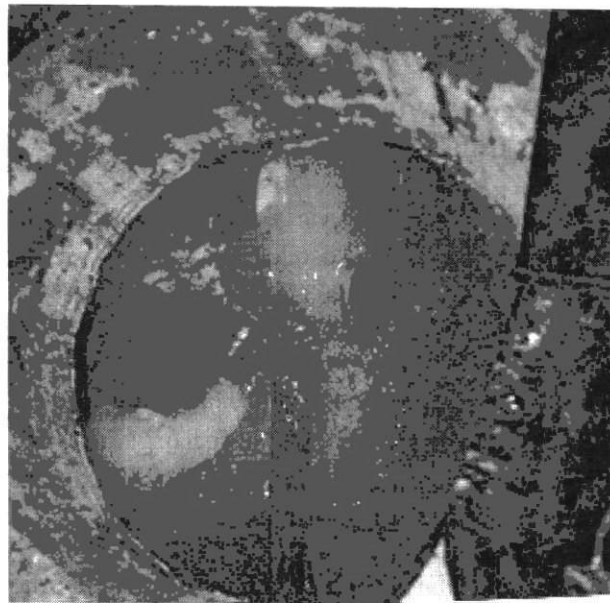


Figura 3. Aspecto del agua residual sin descarga de la Clarificadora

Las características descritas son las que explican por qué se optó por estudiar las alternativas de coagulación y sedimentación y flotación con y sin rompimiento previo de la emulsión con coagulantes y con recirculación y sin ella como opciones de tratamiento

primario, porque se sabe que tanto los sólidos como las grasas limitan la efectividad de los tratamientos anaerobios, opción en la que se piensa como alternativa de tratamiento secundario.

Ensayos de tratabilidad de las A.R. del proceso de pulverización con descarga de la clarificadora.

- La remoción de sólidos suspendidos, sólidos suspendidos volátiles y sólidos sedimentables fue del orden del 99% en todos los casos como se ve en la tabla 3.

Se presentó un incremento de los sólidos disueltos, lo que constituye una de las principales limitaciones de los casos en los cuales se deben agregar grandes cantidades de sales inorgánicas.

- La remoción de grasas (véase la tabla 3) fue del orden del 99% en todos los casos, hallazgo que prueba la efectividad del proceso de desmulsificación con cal y coagulantes
- La remoción de DBO_5 varió entre un 70 y un 75%, mientras que la DQO osciló entre el 63 y el 69%, como se ve en la tabla 3.

La ilustración de la figura 10 indica que la selección de los productos químicos se debe hacer con base en la efectividad para remover carga orgánica. En consecuencia, el sulfato férrico, $Fe_2(SO_4)_3$, o el Cloruro Férrico, $FeCl_3$, son adecuados.

Debido a que la descarga de la Clarificadora aporta muchos sólidos y carga orgánica, como se puede inferir de la comparación de los datos de las tablas 3 y 4, se optó por muestrear en momentos en que no estuviera descargando, con los resultados que se comentan a continuación.

Ensayos de tratabilidad del A.R. del proceso de pulverización sin descarga de la clarificadora

- La remoción de sólidos suspendidos varió entre el 88 y el 97%, como se puede observar en la tabla 4.

Los sólidos totales se removieron entre un 40 y un 60% y se presentó una disminución de los sólidos disueltos, lo cual pone en ventaja la aplicación de la flotación con respecto a la sedimentación, no obstante que deben tenerse en cuenta las diferencias de calidad del A.R. con y sin descarga de la clarificadora.

- La remoción de grasas, como se puede ver en la tabla 4, fue del orden del 95% en un caso, mientras que en los demás fue cercana al 100%
- La remoción de DBO_5 varió entre un 25 y un 80%, mientras que la de la DQO osciló entre el 11 y el 89%, como se puede observar en la tabla 4.

La ilustración de la figura 11 indica que la selección de los productos químicos se debe hacer con base en la efectividad para remover carga orgánica. En consecuencia, el sulfato férrico, $Fe_2(SO_4)_3$ parece ser el más adecuado. Se remueve el 53% de la DBO_5 , el 89% de la DQO, el 97% de los sólidos sedimentables y casi el 100% de las grasas. Lo más importante fue que se removieron sólidos disueltos casi en un 50%.

De conformidad con lo expuesto se puede decir que la flotación con 40% de recirculación y adición de hidróxido de sodio y sulfato férrico (tratamiento 4 de la tabla 4) produjo los mejores resultados, aunque la flotación sin productos químicos (tratamiento 3 de la tabla 4) también da buenos resultados, lo que se traduce en disminución de costos.

Ensayos de tratabilidad del A.R. resultante del lavado de instalaciones y equipos.

- Al igual que para las A.R. del proceso, la remoción de sólidos suspendidos fue alta; varió entre el 90 y el 99%, como se puede observar en la tabla 5; sin embargo, prácticamente todos los sólidos están en la forma disuelta.

Los sólidos totales se removieron en un 8% sólo con el tratamiento 3, indicado en las notas de la tabla 5, que también fue el único caso en el que se presentó una disminución de los sólidos disueltos, lo cual pone en ventaja a dicho tratamiento frente a los demás.

- Como se puede ver en la tabla 5, la remoción de grasas fue del 70% sólo en el tratamiento 4, con sulfato férrico, pues en los demás siempre se mantuvo sobre el 99%.
- La remoción de DBO₅ varió entre un 62 y un 84%, mientras que la de la DQO osciló entre el 62 y el 73%, como se puede observar en la tabla 5.

La ilustración de la figura 12 indica que el cloruro férrico, FeCl₃, parece ser el más adecuado porque se remueve el 84% de la DBO₅, el 70% de la DQO y el 92% de los sólidos suspendidos. Lo más importante fue que, aunque en un porcentaje muy pequeño, se removieron sólidos disueltos cosa que no ocurrió en los demás tratamientos.

Tabla 3. Resultados de los ensayos de tratabilidad de las aguas residuales del proceso de pulverización de leche y suero en la planta de Colanta en Planeta Rica con descarga de la clarificadora.

Parámetro (mg/l)	Valor	Remoción (%)			
		Tratamiento 1	Tratamiento 2	Tratamiento 3	Tratamiento 4
Sólidos totales	45038	40.39	42.44	38.52	44.01
Sólidos disueltos	14673	*	*	*	*
Sólidos suspendidos	30365	99.41	99.57	99.83	99.7
Sólidos sedimentables	78	99.49	98.21	100.00	99.36
Sól. Suspend. Volátiles	8687	98.65	98.88	99.52	99.12
Nitrógeno total	434	89.03	89.03	60.60	65.90
Fósforo total	385	69.61	35.84	35.06	44.16
Grasas y aceites	359	98.77	99.33	99.11	95.99
Demanda Química de Oxígeno	30627	63.61	64.87	64.14	69.37
Demanda Bioquímica de Oxígeno	21000	70.00	75.52	73.62	74.10

pH de la muestra cruda: 6.94

Tratamiento 1:

Se ajustó el pH de 6.94 a 7.50 con una dosis de 1730 p.p.m de Cal

Coagulante: Al₂(SO₄)₃ con una dosis de 2700 p.p.m.
pH final después del tratamiento: 5.70 unid.

Tratamiento 2:

Coagulante: Al₂(SO₄)₃ con una dosis de 2700 p.p.m.
pH final después del tratamiento: 5.02 unid.

Tratamiento 3:

Coagulante: Fe₂(SO₄)₃ con una dosis de 900 p.p.m.
pH final después del tratamiento: 4.90 unid.

Tratamiento 4:

Coagulante: FeCl₃ con una dosis de 2500 p.p.m.
pH final después del tratamiento: 3.94 unid.

Para los tratamientos 2, 3 y 4, se ajusto el pH con NaOH al 50%, con una dosis promedio de 200 a 400 mg/l.

Tabla 4. Resultados de los ensayos de tratabilidad de las aguas residuales del proceso de pulverización de leche y suero en la planta de Colanta en Planeta Rica sin descarga de la clarificadora.

Parámetro (mg/l)	Valor	Remoción (%)				
		Tratam. 1	Tratam. 2	Tratam. 3	Tratam. 4	Tratam. 5
Sólidos totales	8206	3.51	27.39	49.13	59.44	35.15
Sólidos disueltos	6396	*	14.43	35.82	48.76	19.03
Sólidos suspendidos	1810	97.13	88.12	96.16	97.18	92.10
Grasas y aceites	491	99.64	99.50	95.05	99.82	100.00
Demanda Química de Oxígeno	10232	77.27	81.82	78.03	88.63	80.30
Demanda Bioquímica de Oxígeno	1210	25.54	25.54	*	52.81	10.66

pH de la muestra cruda: varía entre 7.22 y 4.51, valores medidos en los dos días de duración de los ensayos.

Tratamiento 1:

Se ajustó el pH de 7.22 a 8.00 con NaOH al 50% y con una dosis de 30 mg/l.

Coagulante: $Al_2(SO_4)_3$ con una dosis de 2300 p.p.m.

Ayudantes de coagulación: Poliacrilamida y Nalco, con dosis de 1 y 50 p.p.m. respectivamente

pH final después del tratamiento: 3.35 unid.

Tratamiento 2:

Se ajustó el pH de 7.22 a 8.00 con NaOH al 50% y con una dosis de 30 mg/l.

Coagulante: $Fe_2(SO_4)_3$ con una dosis de 650 p.p.m.

Ayudantes de coagulación: Poliacrilamida y Nalco, con dosis de 1 y 50 p.p.m. respectivamente

pH final después del tratamiento: 3.15 unid.

Tratamiento 3:

El pH de la muestra cruda (4.51 unid.), no fue modificado

Coagulante: No se agregó

Flotación: Dos litros de muestra sometida a presión de 50 p.s.i.g, tiempo de presurización de 4 min y 10 minutos de tiempo de reposo

pH final después del tratamiento: 4.61 unid.

Tratamiento 4:

El pH de la muestra cruda (4.51 unid.), no fue modificado

Coagulante: $Fe_2(SO_4)_3$ con una dosis de 650 p.p.m.

Flotación: 2 litros de muestra sometida a presión de 50 p.s.i.g, tiempo de presurización de 4 min y 10 minutos de tiempo de reposo, con recirculación del 40%

pH final después del tratamiento: 3.69 unid.

Tratamiento 5:

Se ajustó el pH de 4.51 a 8.00 con NaOH al 50%

Coagulante: $Fe_2(SO_4)_3$ con una dosis de 650 p.p.m.

Flotación: 2.5 litros de muestra sometida a presión de 50 p.s.i.g, tiempo de presurización de 4 min y 10 minutos de tiempo de reposo, con recirculación del 50% con agua cruda del proceso sin tratamiento alguno

pH final después del tratamiento: 4.28 unid.

Tabla 5. Resultados de los ensayos de tratabilidad de las aguas residuales del lavado de instalaciones y equipos en la planta de pulverización de leche y suero de Colanta en Planeta Rica

Parámetro (mg/l)	Valor	Remoción (%)			
		Tratamiento 1	Tratamiento 2	Tratamiento 3	Tratamiento 4
Sólidos totales	13678	*	*	7.95	*
Sólidos disueltos	13240	*	*	5.18	*
Sólidos suspendidos	438	93.61	89.95	91.78	99.22
Sólidos sedimentables	1.1	100.00	100.00	100.00	*
Sól. Suspend. Volátiles	323	95.05	95.20	96.13	*
Nitrógeno total	140	40.00	54.00	52.00	*
Fósforo total	250	70.00	67.00	55.60	*
Grasas y aceites	475	98.13	99.39	99.58	70.56
Demanda Química de Oxígeno	3855	61.79	72.66	69.83	69.57
Demanda Bioquímica de Oxígeno	1540	74.61	78.51	84.35	61.77

pH de la muestra cruda: 12.80 unidades.

Tratamiento 1:

Se ajustó el pH de 12.80 a 8.00 con H_2SO_4 al 88.2% y con una dosis de 5 g/l.

Coagulante: $Al_2(SO_4)_3$ con una dosis de 1900 p.p.m.
pH final después del tratamiento: 3.84 unid.

Tratamiento 2:

Se ajustó el pH de 12.80 a 8.00 con H_2SO_4 al 88.2% y con una dosis de 5 g/l.

Coagulante: $Fe_2(SO_4)_3$ con una dosis de 600 p.p.m.
pH final después del tratamiento: 4.52 unid.

Tratamiento 3:

Se ajustó el pH de 12.80 a 8.00 con H_2SO_4 al 88.2% y con una dosis de 5 g/l.

Coagulante: $FeCl_3$ con una dosis de 1500 p.p.m.
pH final después del tratamiento: 4.89 unid.

Tratamiento 4:

Se ajustó el pH de 12.80 a 8.00 con H_2SO_4 al 88.2% y con una dosis de 5 g/l.

Coagulante: $Fe_2(SO_4)_3$ con una dosis de 600 p.p.m.

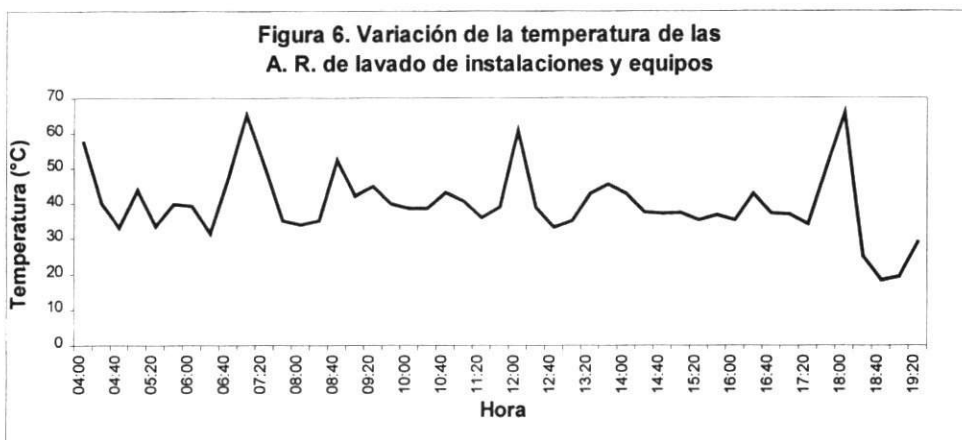
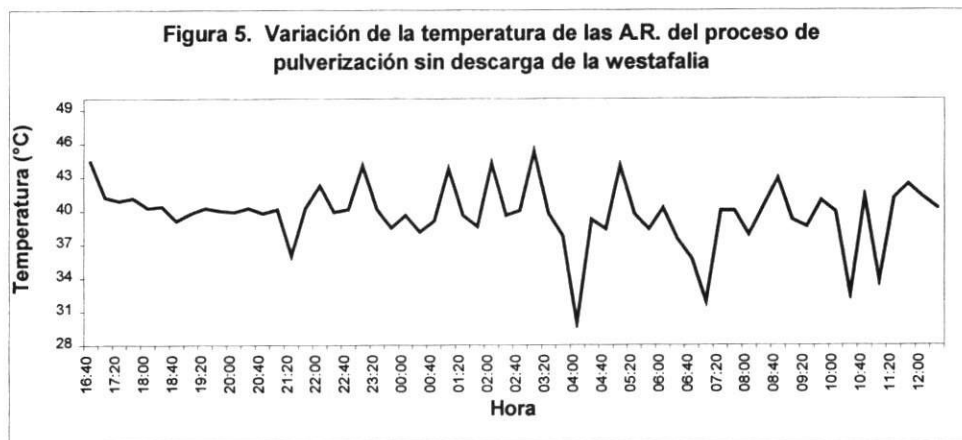
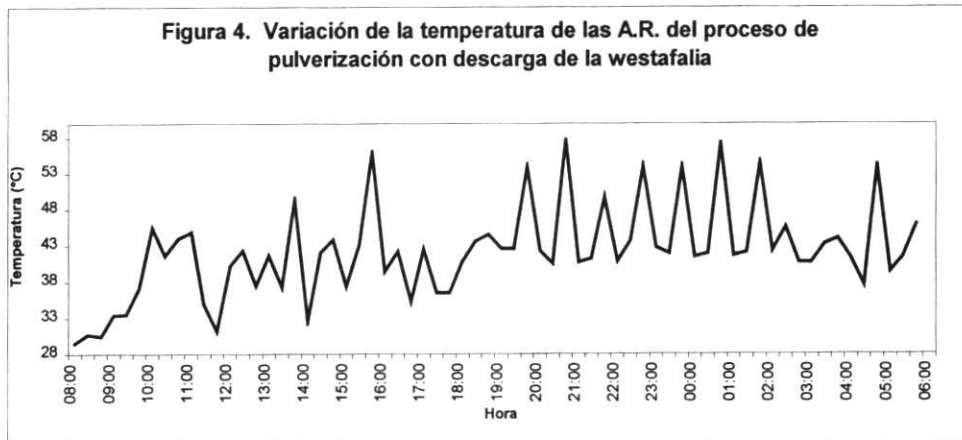
pH final después del tratamiento: 4.21 unid.

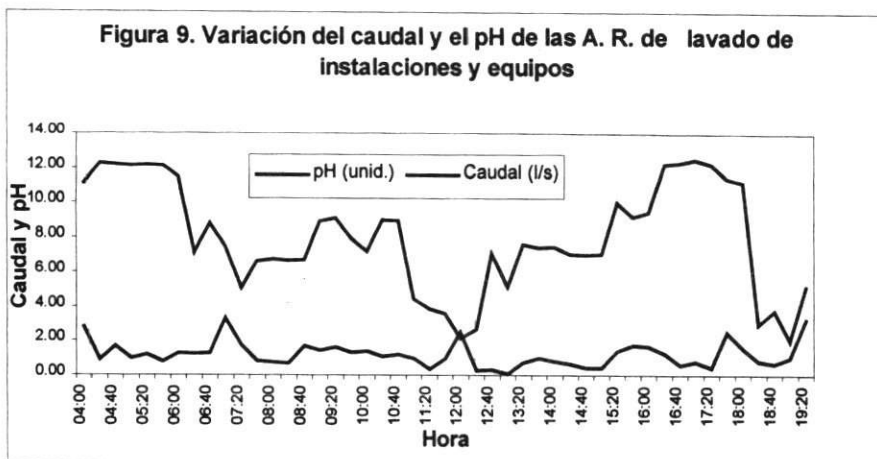
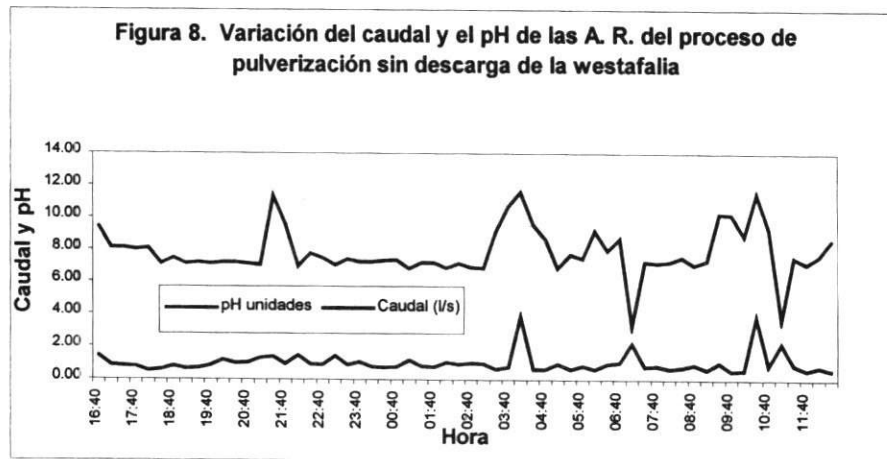
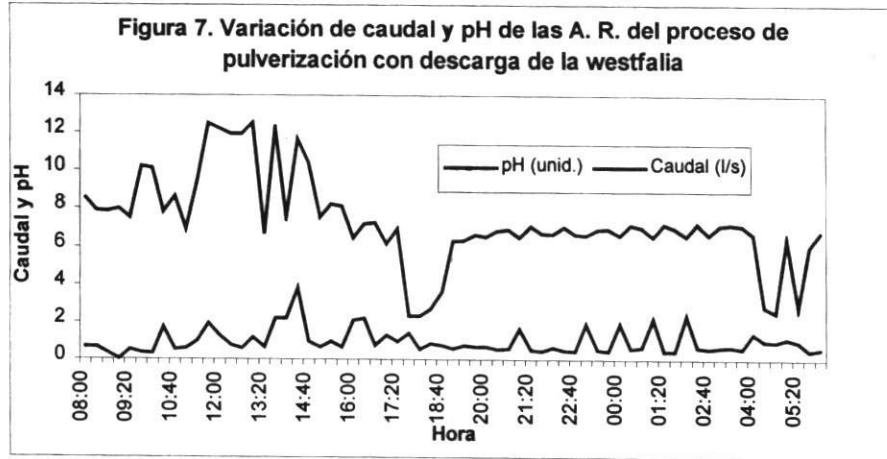
Ayudantes de coagulación: Poliacrilamida y Nalco, con dosis de 1 y 50 p.p.m. respectivamente

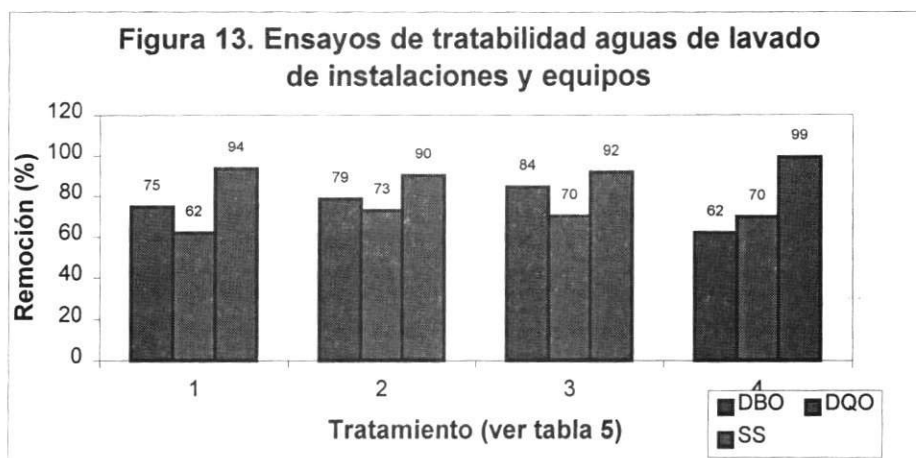
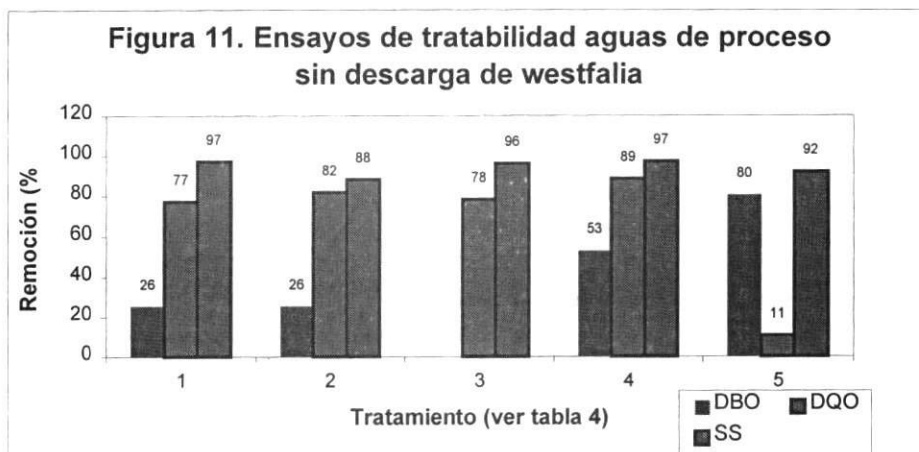
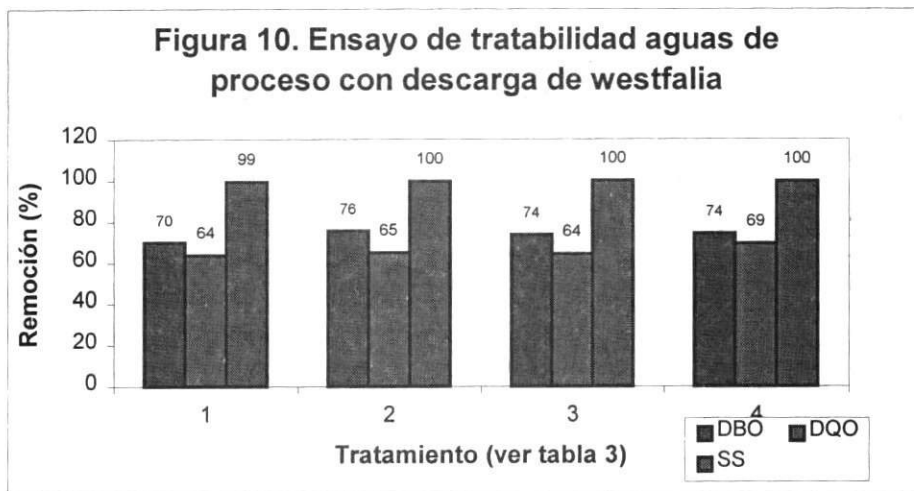
CONCLUSIONES

Las aguas residuales presentan fuertes variaciones de temperatura, con predominio de valores por encima de $40^\circ C$, tanto en las del proceso como en las de lavado, razón por la cual es necesario tomar decisiones simples para ajustarlas a la norma (Decreto 1594/84).

Al igual que la temperatura, el pH del agua residual cruda presenta fluctuaciones que en algunos casos lo ponen en valores por fuera del rango de 5.0 a 9.0, lo cual riñe no solamente con los requerimientos del sistema anaerobio, reactor UASB existente, que recibirá la mezcla de estas aguas con las procedentes del recibo de leche que actualmente se tratan en el sistema mencionado, sino también con la norma de vertimiento (Decreto 1594/84).







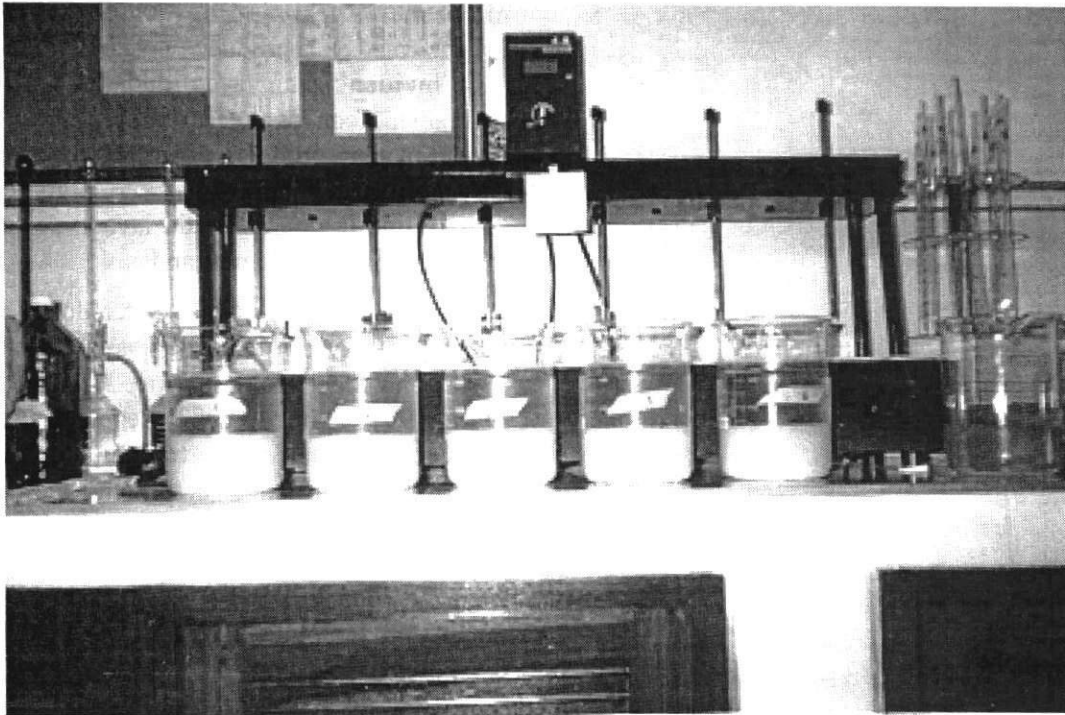


Figura 13. Aspecto del A.R. después del tratamiento de coagulación-sedimentación

Los caudales generados de aguas residuales son variables, pero bastante pequeños, entre 0.30 y 4.00 l/s, por lo cual las sobrecargas hidráulicas son posibles, pero de fácil mitigación.

La descarga intermitente de la clarificadora, separador de sólidos, aporta a la corriente de agua residual gran cantidad de sólidos, grasa y carga orgánica, no obstante que el caudal aportado es muy pequeño. Se piensa que esta descarga no debería hacerse al canal de aguas residuales, pues su efecto es drástico y, además, puede tener incidencia en la demanda de productos químicos.

Se presentan entonces variaciones de temperatura, pH y caudal que se pueden acentuar cuando se produzca la mezcla de estas aguas con las que

proviene de la planta de recibo de leche que actualmente se tratan en un reactor UASB. No se puede descartar la necesidad de someterlas a homogenización, con lo cual se amortiguarían tales variaciones y se podría minimizar la demanda de productos químicos para ajuste de pH y coagulación.

Las aguas residuales se sometieron a unos ensayos piloto cuyos resultados son indicativos de que el tratamiento físicoquímico de coagulación y sedimentación o flotación con coagulantes y con recirculación del agua residual y sin ella es adecuado, particularmente en la remoción de sólidos suspendidos y sedimentables y grasas, no obstante que la remoción de carga orgánica también fue satisfactoria, a pesar de que ésta no era la pretensión del estudio de tratabilidad.

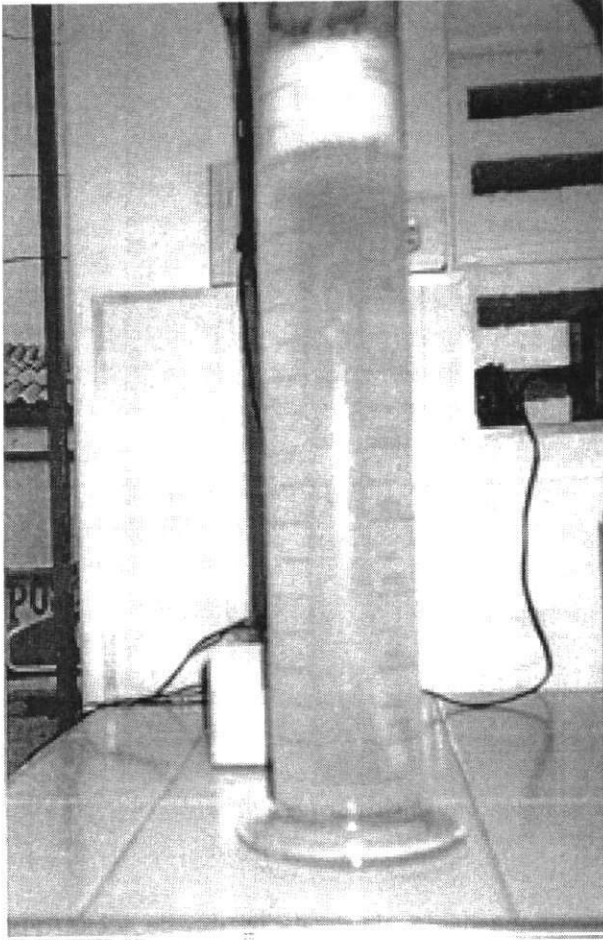


Figura 14. Aspecto del A.R. después de un ensayo de flotación.

La efectividad de los distintos tratamientos se infiere de los datos que aparecen en las tablas 3, 4 y 5, y en las figuras 10, 11 y 12, lo cual se complementa con las figuras 13 y 14 en las que se puede observar el aspecto del agua clarificada y de los materiales flotante y sedimentado.

Es importante destacar que en el momento en que se hicieron los trabajos de campo había mucha irregularidad en la producción y en el lavado, lo que tuvo incidencia en la calidad del vertimiento; seguramente con los ajustes que se hagan en la planta industrial van a producirse cambios en la calidad del desecho y en sus variaciones a lo largo del día. Se sugiere que la operación de lavado se realice de manera continua y no por tandas.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el trabajo de campo y con base en lo que aparece en la literatura (Balabran y Machado, 1974; Rico *et al*, 1989; Pereda *et al*, 1991; Hamza, 1982) se puede pensar en diferentes alternativas de tratamiento, una de las cuales podría consistir en el siguiente tren: cribado y desarenado, homogenización, ajuste de pH, flotación y tratamiento biológico aerobio o anaerobio. En este caso, se optaría por un reactor UASB para el tratamiento biológico debido a que ya existe uno en la empresa.

AGRADECIMIENTOS

A la Cooperativa Lechera, COLANTA LTDA; en particular a la Coordinación de Recursos Hídricos por toda la colaboración durante la realización de los estudios y por autorizar la presente publicación.

RECONOCIMIENTO

A los ingenieros Carlos A. Echeverri L., Gabriel Jaime Maya V. y al practicante de Ingeniería Sanitaria Mauricio Correa O. Por su participación en la realización del trabajo de campo.

BIBLIOGRAFÍA

- ADAMS, C. E. *et al*. Development of design and operational criteria for wastewater treatment. Nashville and Boston, Enviro Press, Inc., 1981. 493 p. ilus. 1981
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Manual on Disposal of Refinery Wastes, 7th edition, New York. 1963

- BALABRAN, V y MACHADO E. Y. Tratamiento do efluente industrial de um laticínio. Saneamento, Rio de Janeiro. No.48, año 28: 32-53. 1974.
- BARKER, J. *et al* Treatment of wastes oil- wastewater mixtures. Annual Conf; AIChE. Chicago, november, 1970
- BOYD, J. L. Y SHELL, G. L. Dissolved air fotation application to industrial wastewater treatment. 45th Anual Conference Water Pollution Control Federation. 1972
- DECRETO 1594/84, que reglamenta parcialmente la Ley 09/79 y el Decreto 2811/74 en cuanto a Usos del Agua y Residuos Líquidos.
- ECKENFELDER, W. W., Jr.: Principles of water quality management. Boston, CBI Publishing Company, Inc., 1980. X, 717 p. ilus.1981
- GARRISON, V. M. Y GEPPERT R. J. Packinghouse waste prcessing applied improvement of conventional methods. Proc. 15th Purdue Ind. Waste Conf. 15, 207-217. 1960
- HAMZA, A. Treatabilyte of dairy wastewater Proc. 37th Purdue Ind. Waste Conf. 37, 311-319. 1982.
- HUMENICK, M. J., Jr.: Water and Wastewater Treatment; Calculation for chemical and physical Processes. New York, Marcel Dekker Inc., 1977. VIII, 236 p. ilus.
- MENTENS, A. Treatment of wastes originating from metal industries. Proc. 22th Purdue Ind. Waste Conf. 22, 908-925. 1967
- PEREDA, M. J. *t al*. Depuración aerobia de vertidos lácteos de alta alcalinidad. Alimentación, equipos y tecnología, pp. 133-137 enero-febrero, 1991.
- QUIGLEY, R. E. Y HOFFMAN, E. L. Flotation of oily wastes. Proc. 21th Purdue Ind. Waste Conf. 21, 527-533. 1966
- RAMALHO, R. S.: Introduction to wastewater treatment processes. 2 ed. New York and London, Academic Press, 1983. IX, 580 p. ilus.
- REYNOLDS, T. D.: Unit operations and processes in environmental engineering. Monterrey, Brooks/Cole Engineering Division, 1982. XV, 576 p. ilus.
- RICO J. L. *et al*. Valorización y tratamiento del lactosuero. Depuración anaerobia. Alimentación, equipos y tecnología, pp. 110-103, septiembre octubre, 1989.
- SHANNON. W. T. Y BUISSON, D. H. Dissolved air flotation hot water. Water Research (USA). 14(7): 759-765. 1980
- STONER, L. B. Waste treatment facilities for Jones and Laughlin Steel Corporation Hennepin Works. Proc. 26th Purdue Ind. Waste Conf. 15, 207-217. 1960
- VAUGHN, S. H. Y McCURDY, R. S. Wastewater treatmentat Ford's Winds or Complex. Ind. Waste; 19 (3), 34-43, 1973
- WATER POLLUTION CONTROL. FEDERATION. Wastewater treatment plant design (MOP 8). Washington, WPCF, 1977. XIV, 560 p. ilus. Manuals of practice for water pollution control.
- WIGREN, A. A. Y BURTON, F. L. Refinery wastewater control. J. Water Pollution Control Federation. 44, 117-128. (1972).
- WIGREN, A. A. Y BURTON, F. L. Refinery wastewater control. J. Water Pollution Control Federation. 44, 117-128. (1972).