

50009

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE  
INGENIERIA  
SECCION DE INGENIERIA AMBIENTAL

"FILTRABILIDAD DE LODOS DIGERIDOS AEROBICAMENTE"

TRABAJO PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA OBTENER  
EL GRADO DE MAESTRO  
EN INGENIERIA AMBIENTAL  
P O R :  
PEDRO A. LOPEZ GARRIDO



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



DEPA

T. UNAM  
1981  
LOP

## C O N T E N I D O

	Pág
INTRODUCCION	
1. OBJETIVOS Y ALCANCES	4
2. ASPECTOS GENERALES DE LA DIGESTIÓN AEROBIA	6
3. ASPECTOS GENERALES DE LA FILTRACION AL VACIO	30
4. DISEÑO EXPERIMENTAL	43
5. RESULTADOS	48
6. ANALISIS DE RESULTADOS	56
7. APLICACION DE RESULTADOS	73
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
BIBLIOGRAFIA	81
REFERENCIAS	83

## INTRODUCCION

En todos los tipos de tratamiento y para fines prácticos, los contaminantes en las aguas residuales se remueven en forma de gases y precipitados químicos y biológicos. Los sólidos suspendidos son separados por un proceso físico mientras que los contaminantes coloidales y solubles primero deben ser convertidos a sólidos para luego ser removidos de igual forma.

El proceso completo y disposición final de estos lodos representa del 25 al 50% del costo de una planta de tratamiento; - por ello, debe hacerse énfasis en que el tratamiento líquido- y el manejo de sólidos deben ser conjuntos.

Antiguamente, los lodos eran dispuestos en grandes cuerpos de agua o en el suelo, ocasionando peores problemas que los que ocasionaría la descarga del efluente sin tratar.

Actualmente hay varios métodos de colección y procesamiento que garantizan la higiene y aceptabilidad sensorial de los lodos y la reducción del volumen y peso del material que se va a manejar, transportar o evacuar: digestión aerobia o anaerobia, oxidación con cloro, composteo, tratamiento con cal (para estabilizar la materia orgánica) y una deshidratación tal como lechos de secado, centrifugación o filtros de presión o vacío (para reducir el volumen final a disponer así como requerimientos de transporte y manejo).

Tradicionalmente, la digestión se ha realizado en forma anaeróbica; este proceso produce un lodo estable, pero como gran parte del material orgánico es solubilizado, el sobrenadante resulta alto en nutrientes y materia orgánica; además, el proceso es muy sensible y frecuentemente se tienen problemas de operación. Debido a esto, ultimamente se ha dado gran importancia a la digestión aerobia.

Respecto a la deshidratación, los filtros de vacío tienen la ventaja de requerir poco espacio y lograr una buena reducción del volumen de lodos en plantas de tratamiento de áreas metropolitanas.

En años recientes, un gran número de plantas pequeñas han encontrado ventajas en este tipo de filtración; su uso, en cualquier tamaño de planta produce sólidos con bajo contenido de

humedad que son fáciles de transportar.

Con base en lo anterior, es necesario realizar estudios de --  
tratabilidad de los lodos subproductos del tratamiento de las  
aguas residuales ya que actualmente en México, la disposición  
de ellos es un problema cada día mayor.

## 1. OBJETIVOS Y ALCANCES

Dado el actual auge de la digestión aerobia y la necesidad de que los lodos representen un volumen de material inócuo fácil de manejar, transportar y disponer, el presente estudio tiene por objeto determinar que tan aplicables son los filtros de vacío a los lodos digeridos aeróbicamente. Para ello, se hace uso de varias ecuaciones por medio de las cuales se determinan los parámetros con los que se evalúa el rendimiento de un filtro al vacío.

Cabe mencionar que no es la intención, hacer historia sobre los procesos empleados ni análisis matemáticos para establecer el origen de las fórmulas empleadas; pero si, dar un panorama general de la teoría y evaluar el rendimiento de un filtro de vacío aplicado a un lodo específico.



Una vez determinados los parámetros mencionados, se presenta un ejemplo de aplicación que muestra la importancia de este tipo de estudios en el momento de elegir la técnica de deshidratación a seguir.

## 2. ASPECTOS GENERALES DE LA DIGESTION AEROBIA

Como se mencionó anteriormente, la estabilización de los lodos, se ha realizado tradicionalmente por digestión anaeróbica, es decir, digestión en ausencia de oxígeno molecular. Este proceso produce un lodo estable, pero gran parte del material orgánico es solubilizado y por tanto el sobrenadante resulta alto en nutrientes y materia orgánica; además, el proceso es muy sensible y se tienen problemas frecuentemente. Debido a esto, se han introducido otros métodos como la digestión aerobia que no es más que la continuación del proceso de lodos activados.

Cuando un cultivo de heterótrofos aeróbicos es colocado en un ambiente que contiene una fuente de material orgánico, los microorganismos remueven y utilizan la mayoría de este material. Una fracción de él, es utilizado para síntesis, por tanto hay

un incremento en la biomasa. El material remanente es utilizado para energía de metabolismo y oxidado a bióxido de carbono, agua y material soluble inerte y proveen energía para síntesis y otras funciones. Una vez que la fuente externa de material orgánico se ha agotado, los microorganismos entran en la fase de respiración endógena donde el material celular es oxidado para satisfacer la demanda de energía.

Si estas condiciones se mantienen por un período prolongado de tiempo, la cantidad total de biomasa será reducida considerablemente y la fracción remanente tendrá tan bajo grado de energía que puede ser considerada biológicamente estable y adecuada para ser dispuesta.

Cuando una mezcla de lodos primarios y secundarios se digieren biológicamente, se debe considerar otro factor:

Los lodos primarios, además de ser por naturaleza orgánicos y particulados, contienen una pequeña biomasa. La mayoría del material orgánico representa una fuente externa de alimento para la biomasa activa contenida en los lodos biológicos, y por tanto, antes de que se alcancen las condiciones endógenas, se presentan el metabolismo y crecimiento; por lo que se requieren mayores tiempos de retención para alcanzar la misma estabilización que cuando se digieren solamente lodos activos.

Se han establecido varias ventajas para la digestión aerobia sobre otras técnicas de estabilización, particularmente la digestión anaerobia. Estas ventajas se garantizan siempre y -- cuando el proceso esté bien diseñado y operado:

1. Tienen costos de capital generalmente menores que para - los sistemas aerobios para plantas abajo de 220 l/s.
2. Son relativamente fáciles de operar comparados con los - sistemas anaerobios.
3. No generan olores nocivos.
4. Producen un sobrenadante bajo en  $DBO_5$ , sólidos suspendi- dos y nitrógeno.
5. Reducen la cantidad de grasa o hexáno solubles en la ma- sa de lodos.
6. Reducen el número de patógenos a bajos niveles en condi- ciones normales de diseño.

Bajo diseño de autocalentamiento, muchos sistemas pro---veen el 100% de destrucción de patógenos.

7. Los lodos digeridos aeróbicamente, generalmente tienen - buenas características de deshidratación.

Así también, se establecen las siguientes desventajas:

- a) Tienen altos costos de energía para abastecerlos de oxígeno, aún para plantas muy pequeñas.
- b) Son significativamente influenciadas en su comportamiento por la temperatura, localización y tipo de material del tanque.
- c) Algunos lodos aparentemente no se deshidratan bien.

Además, la digestión aerobia no debe ser considerada solamente desde el punto de vista de estabilización, sino también como un medio para acondicionar los lodos antes de la deshidratación. Randall et al, <sup>(3)</sup> a través de sus investigaciones hacen las siguientes observaciones:

1. La digestión aerobia tiene un efecto considerable en las características de filtración de los lodos activados de desecho, produciendo cambios tanto en la resistencia específica como en el factor de compresibilidad.

2. Durante la digestión aerobia, inicialmente se tiene una mejoría en las características de deshidratación del lodo, llegándose a valores máximos después de 1 a 5 días de aereación. Para períodos mayores de aereación, empiezan a empeorar dichas características pudiendo llegar a ser más pobres que las características iniciales.
3. La mejoría en las propiedades de deshidratación depende:
  - a) Origen y naturaleza del lodo crudo
  - b) Tiempo de retención operacional de sólidos biológicos
  - c) Tasa de aereación durante la digestión
  - d) Temperatura de digestión
  - e) Grado de mezcla
4. La adición de polímeros artificiales reduce drásticamente la resistencia específica.
5. Los polímeros son muy específicos en su acción de acondicionamiento; los aniónicos son perjudiciales a la filtrabilidad durante todas las fases de la digestión aerobia mientras que los catiónicos mejoran su filtrabilidad.

6. La digestión aerobia puede producir una disminución considerable en la dosis de polímero para acondicionamiento del lodo. Se obtuvo un 80% de disminución después de 7 días de digestión.

#### Consideraciones de Diseño

Temperatura.- Ya que la mayoría de los digestores aerobios -- son tanques abiertos, la temperatura del líquido del digestor depende de las condiciones climatológicas y puede fluctuar extensamente. Como en todos los sistemas biológicos, las temperaturas más bajas retardan el proceso mientras que temperaturas más altas lo aceleran:

Cuando los efectos de temperatura se consideran en el diseño, se deben minimizar las pérdidas de calor usando tanques de -- concreto en lugar de acero, colocándolos subterráneamente -- usando aereación subsuperficial en lugar de superficial. El diseño debe permitir el grado necesario de estabilización a -- las temperaturas de operación más bajas esperadas en el líquido así como el máximo requerimiento de oxígeno a la máxima -- temperatura de operación esperada.

Reducción de sólidos.- Generalmente, los digestores aeróbicos son operados con flujo continuo, en unidades aereadas y completamente mezcladas y, tomando como base la reducción de sólidos

lidos suspendidos volátiles. El modelo empleado por Adams<sup>(1)</sup>, es probablemente el modelo más aceptado para el diseño. En él, se asume que la pérdida de sólidos suspendidos volátiles-degradables (asume que no hay pérdida de sólidos suspendidos-no volátiles) durante el metabolismo endógeno sigue una reacción de primer orden.

$$\left(\frac{d(Xd)}{dt}\right)_R = K_b (Xd) \quad (2.1)$$

donde:

$\left(\frac{d(Xd)}{dt}\right)_R$  velocidad a la que se pierden los sólidos degradables como resultado de la respiración endógena. -- (masa/volumen - tiempo).

$K_b$  constante de velocidad de reacción para la destrucción de los SSV degradables; determinada en un reactor batch (tiempo<sup>-1</sup>).

$(Xd)$  SSV degradables remanentes a un tiempo  $t$  (masa/volumen).

Considerando flujo continuo en un digestor completamente mezclado y haciendo un balance de masas para los sólidos que entran y salen del sistema:



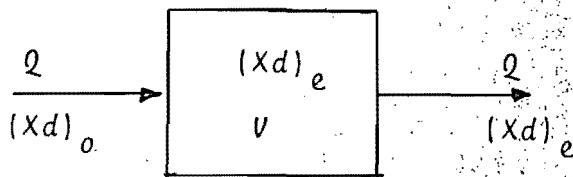


Fig 2.1 Diagrama de flujo de un digestor aerobio completamente mezclado.

$\frac{m}{s} = Q$   
 $\frac{m}{V \cdot t} = \frac{kg}{m^3 \cdot s}$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{tasa neta de cambio} \\ \text{de SSV degradables} \\ \text{en el digestor} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{tasa a la cual} \\ \text{los SSV degra-} \\ \text{dables entran} \\ \text{al digestor} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{l} \text{tasa a la cual-} \\ \text{los SSV degrada} \\ \text{bles se pierden} \\ \text{del digestor.} \end{array} \right]$$

$$\delta \quad \left( \frac{d(Xd)}{dt} \right) V = Q (Xd)_o - \left[ \left( \frac{d(Xd)}{dt} \right)_R V + Q (Xd)_e \right] \quad (2.2)$$

$\delta = d.V$

donde:

- $Q$  velocidad de flujo volumétrico, (volumen/tiempo)
- $(Xd)_o$  concentración de SSV degradables en el influente, -  
(masa/volumen)
- $(Xd)_e$  concentración de SSV degradables en el efluente --  
(masa/volumen)
- $V$  volumen del digestor

Asumiendo condiciones de equilibrio y substituyendo  $\left( \frac{d(Xd)}{dt} \right)_R$  de la ecuación 2.1, la ecuación 2.2 queda:

$$t_d = \frac{(Xd)_o - (Xd)_e}{K_b (Xd)_e} \quad (2.3)$$

donde:

$t_d = V/Q =$  tiempo de retención del digestor.

Sean:

$$(Xd)_e = (X_e - X_n) \quad (2.4)$$

y

$$(Xd)_o = (X_o - X_n) \quad (2.5)$$

donde:

$X_e$  concentración de SSV totales en el efluente, (masa/volumen).

$X_o$  concentración de SSV totales en el influente, (masa/volumen).

$X_n$  porción no degradable de SSV la cuál se asume que permanece constante a lo largo del período de digestión, (masa/volumen).

Substituyendo  $(Xd)_o$  y  $(Xd)_e$  de 2.4 y 2.5 en la ec. 2.3:

$$t_d = \frac{X_o - X_e}{K_b (X_e - X_n)} \quad (2.6)$$

Adams et al<sup>(1)</sup>, proponen que  $K_b$  y  $X_n$  pueden ser determinados para cualquier lodo particular a través de una prueba Batch - de laboratorio;  $K_b$ , graficando en papel semilogarítmico los -

SSV remanentes contra tiempo de digestión y  $X_n$  haciendo la --  
 misma gráfica en papel aritmético.

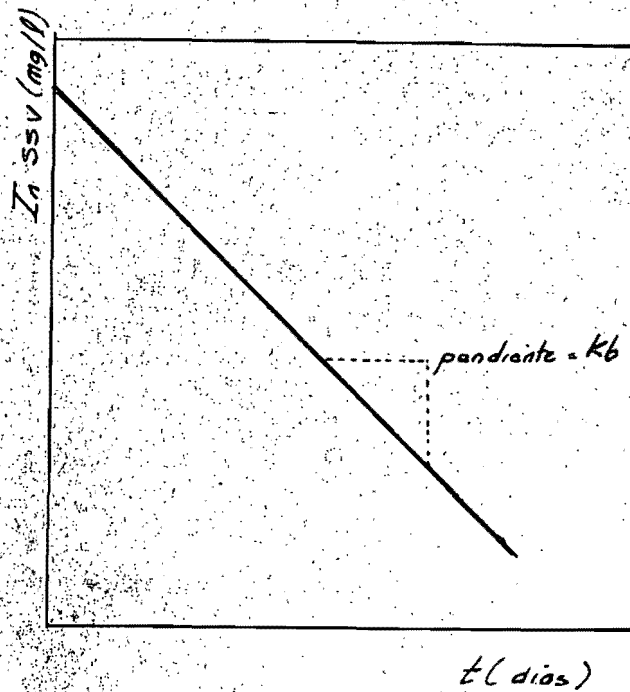


Fig. 2.2 Gráfica del logaritmo de la concentración de SSV contra tiempo de digestión.

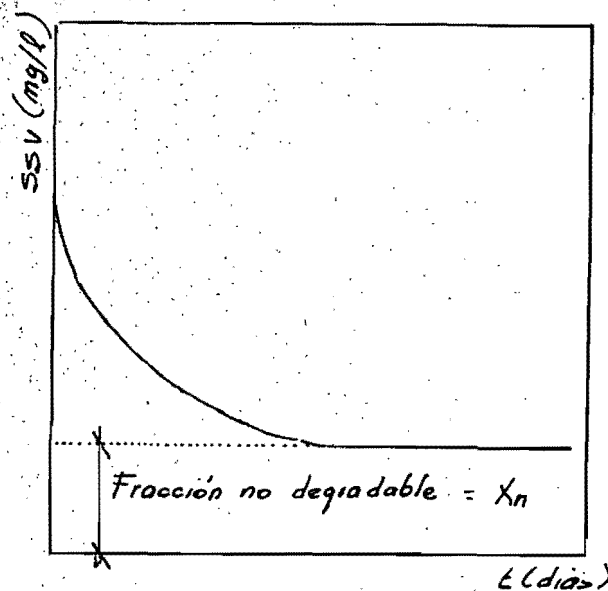


Fig. 2.3 Gráfica de la concentración de SSV contra tiempo de digestión.

En su modelo, Adams et al. (1), asumen que solamente el contenido de SSV disminuye durante la digestión y que no hay destrucción de sólidos fijos o no volátiles. Randall, et al, -- han encontrado que esto no es cierto y reportan una disminución de sólidos suspendidos fijos (SSF) durante la digestión de los lodos activados, implicando la necesidad de un modelo que describa en forma más realista el proceso de digestión -- aerobia.

Según Larry D. Benefield y Clifford W. Randall (2), la reducción se explica como un cambio en la forma de los sólidos fijos de suspendidos a solubles mediante lisis de las células microbianas contenidas en los sólidos. Por tanto, la biomasa activa y los sólidos suspendidos totales (SST) pueden ser usados para describir la digestión aerobia.

En realidad, parece lógico usar los SST en lugar de los SSV -- cuando se considera que una célula activa está compuesta de -- materia orgánica e inorgánica y que durante la respiración en dógena hay una solubilización de material inorgánico así como una oxidación de material orgánico. Por tanto, se asume que:

1. Los SST están compuestos de una fracción activa y una -- inactiva.

$$\begin{aligned} SST &= SSV + SDF \\ &= SSV + SSF + S_{DV} + SDF \end{aligned}$$

2. Que la fracción inactiva de los SST del influente es no-biodegradable, es decir, material que no puede ser oxidado o solubilizado a través de la actividad microbiana.
3. La fracción activa de los SST del influente está compuesta de fracciones degradables y no degradables, en donde, la degradable describe el material que puede ser oxidado o solubilizado a través de la actividad microbiana.
4. Únicamente la fracción activa degradable de los SST disminuye durante la digestión.

De donde se puede construir un diagrama de flujo que indique la forma en que se comportan los SST a lo largo del proceso de digestión.

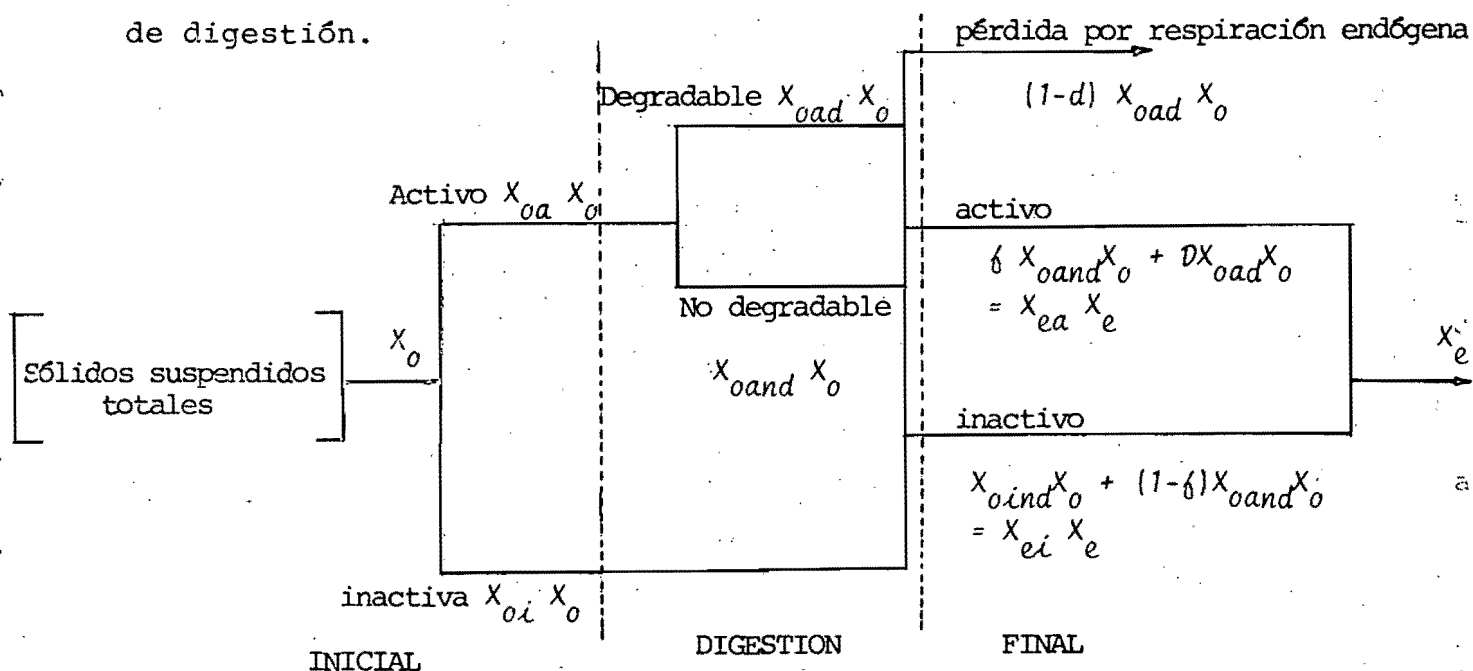


Fig 2.4 Cambio de los SST como resultado de la digestión aerobia.

En la figura 2.4:

- $X_o$  concentración de SST en el influente al digestor
- $X_e$  concentración de SST en el efluente del digestor
- $X_{oa}$  fracción de la concentración de SST en el influente que es activa
- $X_{oi}$  fracción de la concentración de SST en el influente que es inactiva
- $X_{oad}$  fracción de la masa activa que es degradable, es decir, aquella fracción de la masa activa que puede ser oxidada o solubilizada por la actividad biológica
- $X_{oand}$  fracción de la masa activa que no es degradable
- $X_{oind}$  aquella fracción de masa inactiva que no es degradable
- $X_{ea}$  fracción de la concentración de SST en el efluente que es activa
- $X_{ei}$  fracción de la concentración de SST en el efluente que es inactiva
- $\delta$  fracción de la masa activa no degradable en el influente que pasa a través del proceso de digestión y aparece como biomasa activa no degradable en el efluente
- $D$  fracción de la biomasa activa degradable en el in-

fluente que aparece como biomasa activa degradable en el efluente

$K_d$  tasa de decaimiento de la fracción degradable de la biomasa activa aproximada por el decaimiento de SST

Examinando la figura 2.4, se obtienen las siguientes relaciones que son válidas:

$$X_{oi} X_o + X_{oand} X_o - \delta X_{oand} X_o = X_{ei} X_e \quad (2.7)$$

$$\delta X_{oand} X_o + D X_{oad} X_o = X_{ea} X_e \quad (2.8)$$

$$X_{oi} X_o = X_{oi} X_o \quad (2.9)$$

$$X_{oad} X_o + X_{oand} X_o = X_{oa} X_o \quad (2.10)$$

$$X_{oa} X_o + X_{oi} X_o = X_o \quad (2.11)$$

$$X_{ei} X_e + X_{ea} X_e = X_e \quad (2.12)$$

y finalmente, recordando que la concentración de biomasa activa degradable en el reactor es igual a la concentración en el efluente para un sistema de flujo continuo completamente mezclado operando en condiciones de equilibrio:

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Pérdida de biomasa} \\ \text{por actividad bio-} \\ \text{lógica} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{Biomasa activa} \\ \text{degradable en-} \\ \text{el influente} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{l} \text{Biomasa activa} \\ \text{degradable en-} \\ \text{el efluente} \end{array} \right]$$

(2.13)

Si  $K_d$  es definida como la biomasa activa degradable perdida - por unidad de biomasa activa degradable en el sistema, una ex presión matemática para la biomasa activa degradable perdida- por actividad microbial es:

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Biomasa Activa Degradable} \\ \text{perdida por actividad mi-} \\ \text{crobiana} \end{array} \right] = K_d t_d \left[ \mathcal{D}(X_{oad}) X_o \right] \quad (2.14)$$

donde:

$$\left[ \mathcal{D}(X_{oad}) X_o \right] = \text{concentración de biomasa activa degradable en --} \\ \text{equilibrio en el sistema}$$

Por tanto, es posible representar una expresión del balance - de masas en equilibrio para biomasa degradable activa:

$$K_d t_d \left[ \mathcal{D}(X_{oad}) X_o \right] = (X_{oad}) X_o - \mathcal{D}(X_{oad}) X_o \quad (2.15)$$

que se reduce a:

$$K_d t_d = \frac{1 - \mathcal{D}}{\mathcal{D}} \quad (2.16)$$



La ec. 2.7 puede ser arreglada en la forma:

$$X_{oand} X_o - \delta X_{oand} X_o = X_{ei} X_e - X_{oind} X_o \quad (2.17)$$

Substituyendo  $\delta X_{oand} X_o$  de la ec. 2.8 en la ec. 2.7:

$$X_{oand} X_o - (X_{ea} X_e - D X_{oad} X_o) = X_{ei} X_e - X_{oind} X_o \quad (2.18)$$

Substituyendo  $X_{oand} X_o$  de la ec. (2.10) y  $X_{oind} X_o$  de la ecuación (2.9):

$$X_{oa} X_o - X_{oad} X_o - X_{ea} X_e + D X_{oad} X_o = X_{ei} X_e - X_{oi} X_o$$

haciendo arreglos:

$$(X_{oa} + X_{oi})X_o + X_{oad} X_o (D-1) = (X_{ea} + X_{ei})X_e \quad (2.19)$$

De las ecs. 2.11 y 2.12, se observa que:

$$X_{oa} + X_{oi} = X_{ea} + X_{ei} = 1$$

Por tanto, la ec. 2.19 se puede expresar como:

$$X_o + X_{oad} X_o (D-1) = X_e$$

6

$$\frac{X_0 - X_e}{X_0 (X_{oad})} = 1 - D \quad (2.20)$$

Substituyendo  $1 - D$  de la ecuación 2.16 y resolviendo para  $t_d$  tenemos:

$$t_d = \frac{X_0 - X_e}{K_d D (X_{oad}) X_0} \quad (2.21)$$

La ecuación 2.21 refleja la importancia del estado fisiológico de la biomasa cuando se calculan los requerimientos del digestor. Upadhyaya y Eckenfelder<sup>(4)</sup> han observado que la fracción activa de los sólidos del lodo disminuyen cuando la relación alimento a microorganismos disminuye o cuando se incrementa la edad de lodos.

Además, Kountz y Forney<sup>(5)</sup> han encontrado que aproximadamente el 77% de la célula biológica es degradable. Por tanto la ec 21 puede ser modificada a:

$$t_d = \frac{X_0 - X_e}{K_{d0.77} D (X_{oa}) X_0} \quad (2.22)$$

que puede ser usada para calcular el tiempo de retención requerido en el digestor. Debe hacerse notar que el valor de 0.77 para la fracción degradable de la célula, se aplica solamente a la biomasa activa y no a los SST ó SSV.

Si se asume que la presencia de lodo primario en el digestor-aerobio no provoca síntesis de nueva biomasa pero si retrasa la velocidad de destrucción de material celular por suministrar una fuente externa de alimento, la ecuación 2.22 sigue siendo válida; sin embargo, ciertos términos deben ser modificados si la ecuación describe al proceso en forma más exacta. Para este caso, la ec. 2.17 es modificada a:

$$t_d = \frac{(X_o)_m - (X_e)_m}{(K_d)_m 0.77 D (X_{oa})_m (X_o)_m} \quad (2.23)$$

donde:

$(X_o)_m$  concentración de SST en la alimentación al digestor, (masa/vol).

$$(X_o)_m = \frac{Q_p (X_o)_p + Q_A X_o}{Q_p + Q_A}$$

$Q_p$  velocidad de flujo volumétrico de lodo primario, - (vol/tiempo)

$Q_A$  velocidad de flujo volumétrico de lodos activados, (vol/tiempo)

$(X_o)_p$  concentración de SST en el lodo primario

$(X_{oa})_m = \frac{X_o}{(X_o)_m} X_{oa}$  fracción de la concentración de SST en la alimentación del digestor que es masa activa.

$(X_e)_m$  concentración de SST en el efluente del digestor -  
(masa/volumen)

$(K_d)_m$  velocidad promedio de decaimiento de la fracción biodegradable de la biomasa activa. Este término toma en cuenta la presencia de una fuente de alimento externo en forma de lodo primario y asume -- que todo el alimento externo es utilizado, (tiempo<sup>-1</sup>)

Recordando que  $K_d$  es definida como la biomasa activa degradable perdida por unidad de tiempo y por unidad de biomasa activa degradable en el sistema y que para un digestor de flujo continuo completamente mezclado en condiciones de equilibrio, la biomasa activa degradable total está dada por

$D (X_{oad}) (X_o) V$  ,  $(K_d)_m$  puede ser expresado en la siguiente forma:

$$(K_d)_m = \left[ \frac{\text{Biomasa activa degradable perdida por actividad microbiana, por unidad de tiempo}}{\text{Biomasa activa degradable en el sistema}} \right]$$

$$- \left[ \frac{\text{Biomasa no destruida por unidad de tiempo debido a la presencia de una fuente externa de alimento}}{\text{Biomasa activa degradable en el sistema}} \right]$$

en forma matemática:

$$(K_d)_m = \left[ \frac{K_d D (X_{oad})_m (X_o)_m V}{D (X_{oad})_m (X_o)_m V} \right] - \left[ \frac{y Q S_a}{D (X_{oad})_m (X_o)_m V} \right]$$

6

$$(K_d)_m = K_d - \frac{y S_a}{\left[ 0.77 D (X_{oa})_m (X_o)_m t_d \right]} \quad (2.25)$$

donde:

$y$  coeficiente de rendimiento neto representativo del contenido orgánico de los lodos primarios

$$S_a = \left[ \frac{Q_p}{Q_A + Q_p} \right] S_o \quad \text{DBO última del lodo primario alimentado al digestor.}$$

$S_o$  DBO última del lodo primario

Substituyendo  $(K_d)_m$  de la ec. 2.25 en la ec. 2.23:

$$t_d \left[ K_d - \frac{y S_a}{\left[ 0.77 D (X_{oa})_m (X_o)_m t_d \right]} \right] = \frac{(X_o)_m - (X_e)_m}{0.77 D (X_{oa})_m (X_o)_m}$$

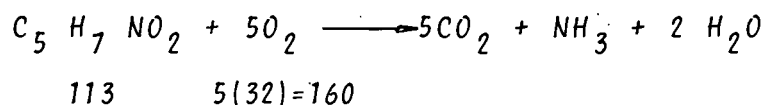
6

$$t_d = \frac{(X_o)_m + y S_a - (X_e)_m}{K_d \left[ 0.77 D (X_{oa})_m (X_o)_m \right]} \quad (2.26)$$

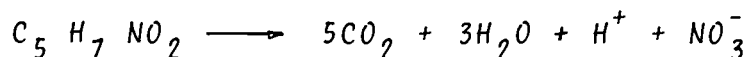
Las ecuaciones 2.22 y 2.26, serán utilizadas cuando se digieran lodos activados excesivos y mezcla de lodos primarios y -

activados respectivamente.

Requerimientos de Oxígeno.— La biomasa de los lodos activados suele representarse por la siguiente fórmula:  $C_5 H_7 NO_2$  (composición promedio del material celular). Bajo prolongados períodos de aereación, típicos de la digestión aerobia (no se espera nitrificación):



Hipotéticamente, la ec. indica que se requieren 1.416 Kg de  $O_2$  para oxidar 1.0 Kg de masa celular (aproximadamente 1.42  $mgO_2/mg$  masa celular oxidada). Para tiempos de retención más prolongados:



y entonces se requerirían  $\approx 2 \text{ Kg}O_2/\text{Kg}$  masa celular oxidada.

Si solamente se van a digerir lodos activados de exceso, los requerimientos recomendados de aire son de 15 a 20  $m^3/\text{min}$ -1000  $m^3$  de capacidad del tanque. Cuando se va a digerir una mezcla de lodos primarios y biológicos, el requerimiento, generalmente se incrementa a 25 a 30  $m^3/\text{min}$ -1000  $m^3$  de capacidad de tanque.

Una forma más racional de determinar los requerimientos de -- oxígeno, es asumir que la DBO última de los lodos primarios -- es satisfecha durante la digestión, y además, que 1.42 Kg de Oxígeno son requeridos por Kg de sólidos biológicos destrui-- dos; por tanto:

$$O_2 = 1.42 \left[ \begin{array}{l} \text{Kg de sólidos bioló-} \\ \text{gicos destruidos du-} \\ \text{rante la digestion -} \\ \text{por día} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{l} \text{Kg de DBO última de los} \\ \text{lodos primarios agrega-} \\ \text{dos al digestor por día} \end{array} \right]$$

que matemáticamente se expresa:

$$O_2 = 1.42 \left[ Q_o R (0.77) X_{oa} X_o \right] + Q_p S_o$$

donde:

$O_2$  Kg de Oxígeno requerido por día

$Q_p$  gasto de lodos primarios

$R$  fracción reducida de biomasa degradable durante la digestión

$X_{oa}$  fracción de los SST de la alimentación que es bio-  
masa activa

$X_o$  concentración de SST en la alimentación del diges-  
tor

$Q_o$  gasto alimentado al digestor

$S_o$  DBO última de los lodos primarios

En caso de digerir solamente lodos activados, el último término de la ecuación es "cero".

También se debe notar, que la ecuación no considera la nitrificación, que en muchos casos puede ser significativo.

Requerimientos de Mezclado.- En la digestión aerobia, se debe proporcionar mezclado con dos fines: mantener los sólidos en suspensión y mantener en forma óptima la eficiencia de transferencia de oxígeno. Comúnmente, los requerimientos de energía se expresan como niveles de energía. Un nivel de energía se define como la energía por unidad de volumen bajo aereación; sus unidades generalmente son HP/miles de galones.

Cuando el nivel de sólidos en el digestor es menor de 20 000 mg/l, se consideran adecuados niveles de energía entre 70 y 100 HP/millón de galones; si el nivel de sólidos es más grande, se requieren niveles de energía entre 100 y 200 HP/millón de galones.

Reynolds<sup>(6)</sup> desarrolló una expresión para calcular el nivel mínimo de energía requerido para proporcionar un buen mezclado:

$$\frac{P}{V} = 0.00475 (\mu)^{0.3} (X)^{0.298}$$



donde:

$\frac{P}{V}$  HP/1000 gal.

$\mu$  viscosidad del agua

$X$  concentración de SST en el digestor en condiciones de equilibrio

asimismo, el flujo de aire comprimido será:

$$\frac{G_{\Delta}}{V} = 50.5 \frac{P/V}{\log \left( \frac{h + 34}{34} \right)}$$

donde:

$\frac{G_{\Delta}}{V}$  cfm/1000 ft<sup>3</sup> a temperatura de operación del aire

$h$  sumergencia de los difusores en pies

### 3. ASPECTOS GENERALES DE LA FILTRACION AL VACIO

La filtración al vacío es el procedimiento más ampliamente -- usado en la deshidratación de lodos; consiste en remover el - agua aplicando vacío a un medio poroso el cual retiene los só lidos, dejando pasar el agua.

Generalmente, la filtración al vacío se lleva a cabo en fil-- tros de tambor cilíndrico. Este tambor tiene un medio fil--- trante que puede ser tela, alguna fibra sintética, resortes - helicoidales o mallas de alambre inoxidable. El tambor está- suspendido y se introduce en una tina de lodo; a medida que - el tambor rota lentamente, parte de su circunferencia se suje- ta a un vacío interno que atrae el lodo hacia el medio filtran- te haciendo que se forme una pasta a través de cuyos poros se elimina el agua. Un conjunto de tuberías dentro del tambor - permite mantener la succión hasta que éste completa un ciclo;

en ese momento, se aplica aire a presión para desprender la -  
torta de lodo con ayuda de unas cuñas. El medio se lava con-  
un sistema de aspersión antes de que la succión comience y se  
inicie un nuevo ciclo mientras que el lodo desprendido es ---  
transportado para su disposición final.

Una nueva práctica en el diseño de filtros de vacío, es la-  
alimentación superior, con lo que se utiliza la gravedad para  
ayudar a la deposición de sólidos sobre la superficie del tam-  
bor.

El número y tamaño de los filtros de vacío está basado en el-  
tipo de lodo a ser filtrado y el número de horas de operación.  
En plantas pequeñas, se pueden asumir 30 hrs/semana; en plan-  
tas grandes, pueden ser necesarias 20 hrs/día, además de ho--  
ras adicionales por acondicionamiento, limpieza y fallas.

Las variables que afectan el proceso de filtración al vacío,-  
cáen dentro de dos grupos: a) las relacionadas a las caracte-  
rísticas de los lodos y b) las que pertenecen a la operación  
del filtro:

a)

1. Concentración de sólidos en el lodo. Está determinada -  
por la naturaleza del lodo (primario o secundario, domés

tico o industrial) y por el proceso de espesamiento previo a la filtración.

2. Viscosidad del lodo y del filtrado. En el último, la viscosidad es aproximadamente la misma que para el agua a una temperatura similar.
3. Compresibilidad del lodo, la cual está relacionada con la naturaleza de las partículas de lodo.
4. Naturaleza física y química, incluyendo tamaño y forma de partículas contenidas en el agua.

b)

1. Vacío operativo. Usualmente varía de 10 a 20 pulg de Hg (4.9 a 9.8 lb/plg<sup>2</sup>). En pastas incompresibles, un vacío mayor es más efectivo, mientras que para pastas muy compresibles, un vacío alto puede provocar la obstrucción del medio filtrante.
2. Sumergencia del tambor. Varía del 10 al 60%, sin embargo los lodos con mayor porosidad permiten mayores sumergencias; de otra manera la pasta resulta compacta y espesa y no permite un flujo adecuado del filtrado.

3. Tipo y porosidad del medio filtrante. A mayor porosidad, se obtienen mayores tasas de filtración.
4. Acondicionamiento de lodos, adicionando reactivos. Muchos lodos requieren coagulantes para coagular partículas más pequeñas que podrían, de otra forma, obstruir el medio filtrante y reducir la tasa de filtración.

Respecto a esta última variable, de los productos químicos -- que pueden aprovecharse (cloruro férrico, nitrato férrico, -- sulfato férrico, cloruro de aluminio, nitrato de aluminio y -- sulfato de aluminio), el más indicado, por ser barato y efi-- cáz, es el cloruro férrico.

Con base en la reacción cloruro férrico - alcalinidad del lí-- quido a tratar, la demanda química de  $Fe Cl_3$  es 1.08 veces la alcalinidad de los lodos y la demanda química de  $Fe Cl_3$  en -- porcentaje  $p_1$  en peso de la fracción de sólidos secos para -- tratar los lodos de  $p$  porcentaje de líquido será

$$p_1 = \frac{1.08 A_{lc}}{10\ 000} \times \frac{P}{100-P} \quad \text{para la porción lí--}$$

quido de los lodos.

Según Genter<sup>(\*)</sup>, la demanda química de los sólidos de los lo-- dos puede tomarse como:

\* G.E. Barnes "Tratamiento de Aguas Negras y Desechos Indus-- triales", UTEHA, Méx.

$$p_s = 1.6 (pv/pf)$$

donde

$pv$             % sólidos volátiles

$pf$             % sólidos fijos

Por tanto, la demanda química total de los lodos será:

$$p_c = \frac{1.08 \Delta_{lc}}{10\ 000} \times \frac{P}{100-P} + 1.6 (pv/pf)$$

porcenta-  
je de  $Fe$   
 $Cl_3$  del -  
peso de -  
sólidos -  
secos.

Recientemente, se han introducido polielectrólitos sintéticos como coagulantes, pudiendo ser aniónicos, catiónicos o no iónicos. En muchas plantas, su uso ha mejorado la operación, con mayores rendimientos y menores costos de operación.

Toda la teoría de la filtración, parte del trabajo original de Darcy, quién encontró que la tasa de flujo  $Q$  de un filtrado con viscosidad  $\mu$ , a través de una cama de espesor  $l$  y área superficial  $A$  estaba relacionada a la fuerza actuante  $\Delta P$ :

$$Q = \frac{K A \Delta P}{\mu L} \quad (3.1)$$

Donde  $K$  representa la permeabilidad de la cama.

Si  $r =$  resistencia del medio  $= L/K$

$$Q = \frac{A \Delta P}{\mu R} \quad (3.2)$$

Esta ecuación se puede escribir como

$$\frac{dv}{dt} = \frac{P A^2}{\mu (rc V + R_m A)} \quad (3.3)$$

donde:

- $V$  volumen de filtrado
- $t$  tiempo
- $P$  vacío aplicado
- $A$  área del filtro
- $c$  masa de sólidos depositados por unidad de volumen-filtrado
- $r$  resistencia específica de la pasta al flujo
- $R_m$  resistencia inicial del medio filtrante (generalmente se desprecia)
- $\mu$  viscosidad del filtrado

Una expresión para  $C$  se deriva de la siguiente manera: sea  $C_i$  la concentración de sólidos en la lechada entrante expresada como gramos de sólidos por ml de lechada. La lechada es filtrada en un filtro Buchner de laboratorio; si se asume que la concentración de sólidos se reduce a un valor  $C_f$ , presumiblemente

$$C_f \ll C_i$$

Ya que la lechada está relativamente diluida, se asume que la densidad es aproximadamente la del agua (1 g/ml); por tanto 1 g de alimentación al filtro contiene  $C_i$  gramos de sólidos y  $(1-C_i)$  g de agua. Los mililitros de agua por gramo de sólidos entrante son  $(1-C_i)/C_i$  (ml agua/g sólido). Similarmente para el filtrado se tiene  $(1-C_f)/C_f$  (ml agua/g sólidos).

La diferencia entre estos valores es:

$$(1-C_f)/C_f - (1-C_i)/C_i \quad (\text{ml agua/g sólido})$$

El inverso de esta cantidad corresponde al parámetro  $c$ , masa de sólidos depositados por unidad de volumen filtrado.

$$c = \frac{1}{(1-C_f)/C_f - (1-C_i)/C_i} \quad (3.4)$$



El producto  $cV$  es la masa de pasta correspondiente al volumen  $V$  del filtrado.

El significado físico del parámetro  $\kappa$  puede ser apreciado si en la ec.3-3 la resistencia del medio es despreciada. Resolviendo para  $\kappa$ :

$$\kappa = \frac{PA^2}{\mu cV (dv/dt)} \quad (3.5)$$

De aquí,  $\kappa$  es igual a la diferencia de presión requerida para producir una tasa de filtración unitaria a través de una masa unitaria de pasta y un área unitaria de filtro, si la viscosidad es unitaria, o bien:

$$\begin{aligned} \kappa &= P & \text{si} & \quad dv/dt = 1 \\ & & & \quad cV = 1 \\ & & & \quad \mu = 1 \\ & & & \quad A = 1 \end{aligned}$$

Por tanto, la resistencia específica  $\kappa$ , mide la habilidad del lodo para ser filtrado y se utiliza principalmente para comparar las características de filtración de diferentes lodos y - la determinación del requerimiento óptimo de coagulante para producir una pasta que presente una resistencia mínima.

La integración de la ecuación 3.3, usualmente se desarrolla -  
 asumiendo que la resistencia específica es constante a lo lar-  
 go del tiempo de formación. Integrando entre 0 y  $t$  y 0 y  $V$ :

$$(\mu/A^2 P) \int_0^V (\kappa c V + R_m A) dV = \int_0^t dt$$

asumiendo que  $\kappa$  es constante:

$$(\mu/A^2 P) (\kappa c \int_0^V V dV + R_m A \int_0^V dV) = \int_0^t dt$$

6

$$(\mu/A^2 P) [\kappa c (V^2/2) + R_m AV] = t$$

dividiendo entre  $V$  y despejando  $t/V$

$$t/V = (\mu \kappa c / 2PA^2) V + \mu R_m / AP \quad (3.6)$$

De aquí, se observa que graficando los valores de  $t/V$  contra-  
 $V$  se obtiene una línea recta, de donde  $\kappa$  y  $R_m$  son evaluados -  
 de la pendiente y la ordenada al origen respectivamente:

$$\kappa = (2PA^2/\mu c) S \quad (3.7)$$

$$R_m = \mu A P / \mu \quad (3.8)$$

donde:

$S$  pendiente de la recta  $t/V$   $\delta$   $V$

$i$  ordenada al origen  $t/V$   $\delta$   $V$

La mayoría de los lodos de aguas residuales industriales forman pastas compresibles para las cuales la tasa de filtración y la resistencia específica son funciones de la diferencia de presión a través de la pasta; este efecto está representado por la relación:

$$r = r_0 p^\delta \quad (3.9)$$

donde

$S$  coeficiente de compresibilidad. A mayor valor de  $\delta$ , el lodo es más compresible

Cuando el factor de compresibilidad es igual a cero, la resistencia específica es independiente de la presión y el lodo es incompresible:

$$r = r_0 = \text{constante}$$

Existen algunas generalizaciones sobre las características de filtración de lodos, a saber:

1. La facilidad de filtrabilidad decrece con el grado de -- tratamiento; es decir, los lodos crudos son más fáciles de filtrar (tienen menor resistencia específica) que los primarios, y éstos, a su vez, más filtrables que los secundarios.
2. La filtrabilidad, está influenciada por el tamaño, densidad, forma y carga eléctrica de las partículas. A mayor tamaño de partícula, la tasa de filtración es más alta - (menor resistencia específica), y entonces la humedad final de la pasta es más baja. La adición de coagulantes - promueve la aglomeración de partículas y por tanto incrementa la tasa de filtración.

Para propósitos de diseño de filtros, es conveniente modificar la ecuación 3.6; despreciando la resistencia del medio ( $R_m \approx 0$ ) y denominando a  $t$ , tiempo de formado  $t_f$ :

$$t_f/V = (\mu r c / 2 P A^2) V \quad (3.10)$$

Así también, es conveniente escribir la ecuación en términos de la carga del filtro ( $L_f$ ), lb/ft<sup>2</sup>/hr. Ya que el producto  $cV$  representa el peso de la pasta, la carga del filtro ( $L_f$ ) - basada en el tiempo de formación (carga de formación) es:

$$L_f = cV/A t_f = \frac{\text{lb pasta depositada}}{ft^2 \text{ hr}} \quad (3.11)$$

Sustituyendo  $r$  en la ec. 3.10 por el valor dado en la ec. 3.9 y despejando a  $V^2/A^2$ :

$$V^2/A^2 = (2P^{1-5} t_f) / (\mu r_0 c) \quad (3.12)$$

sustituyendo  $t_f = t_f^2/t_f$  y  $c = c^2/c$ :

$$(cV/At_f)^2 = (2P^{1-5} c) / (\mu r_0 t_f) \quad (3.13)$$

De aquí, se puede observar que el miembro izquierdo corresponde al cuadrado de la carga de formación (ec. 3.11), por tanto:

$$L_f = \left[ (2P^{1-5} c) / (\mu r_0 t_f) \right]^{1/2} \quad (3.14)$$

Que es la ecuación de formación de carga o rendimiento del -- filtro. Para propósito de diseño, es conveniente expresar esta ecuación en lb/ft<sup>2</sup>/hr y los otros parámetros en unidades -- prácticas:

$$P = \text{psi}$$

$$c = \text{g/cm}^3$$

$$\mu = \text{cP}$$

$$r_0 = \text{s}^2/\text{g} \times 10^{-7}$$

$$t_f \text{ (min)}$$

Por lo que:

$$L_f = 35.7 \left[ (c P^{1-s}) / (\mu r_0 t_f) \right]^{1/2} \quad (3.15)$$

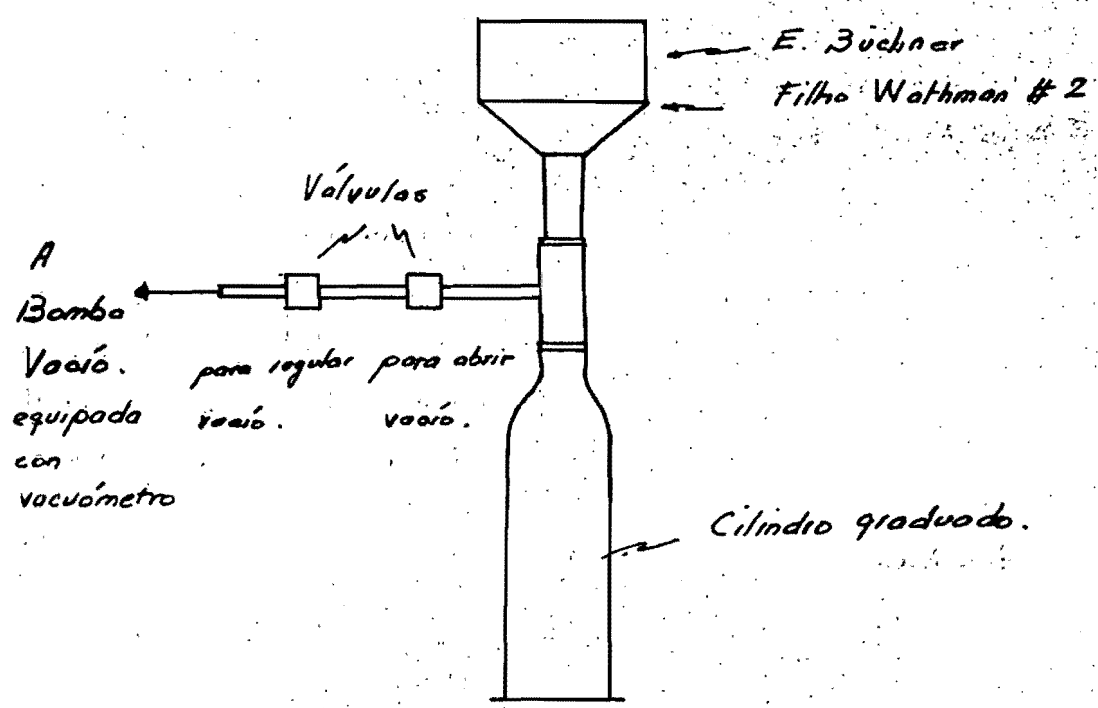
Puesto que la mayoría de los lodos tienen características específicas, la ec. 3.15 se modifica para predecir el desarrollo de la filtración:

$$L_f = 35.7 (P^{1-s} / \mu r_0)^{1/2} (c^m / t_f^n) \quad (3.16)$$

#### 4. DISEÑO EXPERIMENTAL

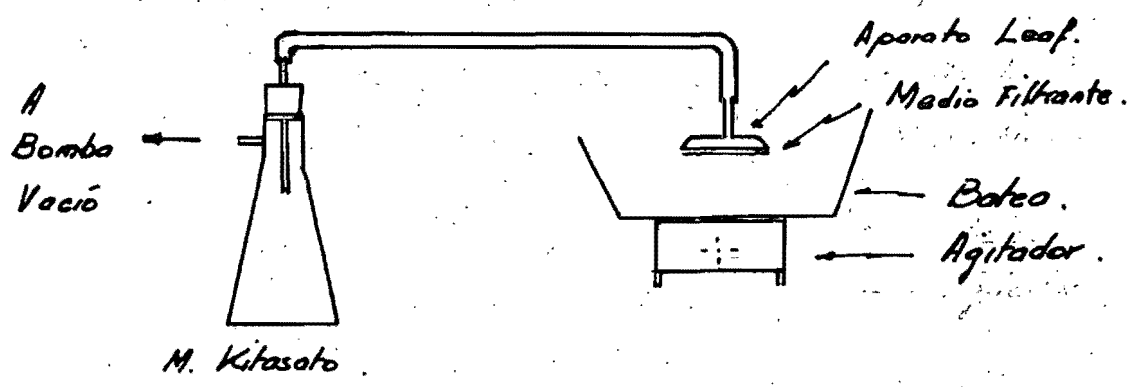
Para poder determinar las constantes que intervienen en la ecuación de diseño del rendimiento de un filtro de vacío ( $n$ ,  $m$ ,  $s$  y  $r_0$ ), primero fué necesario encontrar una dosis de coagulante que produjera una torta con la menor resistencia específica y después, hacer una serie de corridas de filtración utilizando la dosis de coagulante encontrada para determinar las constantes mencionadas y poder hacer una predicción del desarrollo de la filtración.

En el primer caso, se requirió un embudo Büchner, una "T", un cilindro graduado, una bomba de vacío, un manómetro, una serie de válvulas y papel filtro Wathman # 2, montado como indica la siguiente figura:



Esquema del Modelo Empleado en la Determinación de la Dosis de Coagulante Empleada.

En el segundo caso, se empleó un aparato de "leaf"\*, un matríz kitasato, un agitador, un batea, una bomba de vacío, un manómetro, un juego de válvulas y un medio filtrante (Nylon, distribuido por Shriver de México S.A. No. Cat. SH 3601)



Esquema del modelo empleado en la determinación de las constantes  $n$ ,  $m$ ,  $s$  y  $n_0$ .

\* "leaf" = placa filtrante



El lodo estudiado fué traído de una planta de lodos activados y la muestra, para garantizarla aerada, se tomo de la superficie del digestor, cerca de los aereadores.

Las características del lodo, determinadas en laboratorio son las siguientes:

$$T = 21^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Hum.} = 97.4 \%$$

$$\text{ST} = 22 - 25\ 000 \text{ mg/l}$$

$$\text{SVT} = 18\ 650 = 70\% \text{ ST}$$

$$\text{SFT} = 7\ 900 = 30\% \text{ ST}$$

$$\text{Alc.} = 1\ 400 \text{ mg/l de Ca CO}_3$$

$$\text{pH} = 7.6$$

Para poder trabajar, hubo necesidad de preservar la muestra a  $4^{\circ}\text{C}$  y por un tiempo máximo de 7 días<sup>(7)</sup>, teniendo que calentarla a un rango de trabajo de  $21$  a  $23^{\circ}\text{C}$  cada vez que se utilizo.

El procedimiento experimental seguido en cada caso fué:

- a) Determinación de la Dosis de Coagulante. La determinación está basada en encontrar la dosis de coagulante que forme una torta con la menor resistencia específica, lo cual se determina a partir de la ec. 3.7. El valor de -

s, se calcula de la gráfica de  $t/V$  &  $V$ .

En este caso se utilizaron como coagulantes cal y cloruro férrico, por considerarse los más baratos. Sin embargo, se hicieron algunas pruebas con polielectrólitos cuyos resultados se comentarán más adelante.

1. Se humedeció el papel filtro y se ajusto el vacío a 18 - pulg Hg ( $8.84 \text{ lb/plg}^2$ )
2. Se colocaron 100 ml de muestra a la cual se había adicionado una dosis de cal y otra de  $\text{Fe Cl}_3$  proporcionando una mezcla adecuada para su homogenización.
3. Se abrió la válvula de vacío y se midió el volumen de -- filtrado a diferentes intervalos de tiempo.
4. Se midió el contenido de sólidos en el lodo entrante y - en el filtrado.

Cabe mencionar que los coagulantes se agregaron en porcientodel peso de sólidos secos del lodo.

- b) Determinación de los parámetros de la ecuación de diseño. Consiste en simular la operación de un filtro, sumergiendo el aparato "leaf" en el lodo (tiempo de formación) y-

sacándolo (tiempo de secado).

1. Se hizo una selección de valores de  $t_f$  y  $t_d$
2. Se agregó la dosis de coagulante ya determinada en una muestra de 1.5 lt.
3. Se mezcló y se dejó flocular por aproximadamente 30 seg.
4. Se abrió el vacío
5. Se sumergió el "leaf" por el tiempo ya establecido manteniendo una mezcla suave para evitar la sedimentación.
6. Se saco el "leaf" y se mantuvo verticalmente durante el tiempo de secado determinado bajo vacío.
7. Se cerró el vacío, se transfirió la torta a una cápsula-tarada, se pesó, se secó a 103°C y se volvió a pesar.

## 5. RESULTADOS

En la tabla 5.1, se presentan los resultados de la prueba del embudo Buchner correspondientes a aquélla en la cual se obtuvo una resistencia específica mínima. Aquí, se presentan los tiempos requeridos para lograr los distintos volúmenes de filtrado bajo diferentes dosificaciones de  $Fe Cl_3$ , variando del 5 al 25%.

Cabe mencionar que estas pruebas se realizaron agregando primero el  $Fe Cl_3$  y después la Cal.

Se puede observar que en esta tabla hay algunos valores que faltan; esta irregularidad es debida a que el filtrado pasaba muy rápidamente y era difícil controlar el volumen, el tiempo y además hacer el registro al mismo tiempo.

Para esta prueba, los valores de  $C_i$ ,  $C_f$  y  $C$  fueron calculados a partir de los pesos que se presentan en la tabla 5.2. Para determinar las concentraciones de sólidos, se emplearon 30 ml de muestra tanto para el influente como para el filtrado.

Respecto a la prueba realizada con polielectrólito, ésta, se llevó a cabo agregando cloruro férrico, cal y polielectrólito a una muestra de mucho menor concentración. Esto, se debió a la carencia en la disponibilidad de lodo.

El polielectrolito empleado fué aniónico, Wisprofloc de Permutit.

Los resultados se presentan en la tabla 5.3.

Antes de dosificar el polielectrólito, se hicieron pruebas para determinar la dosis  $CaI - Fe Cl_3$  que proporcionara la mínima resistencia específica para esta concentración de sólidos.

Para este caso, los valores de  $C_i$ ,  $C_f$  y  $C$  se presentan en la tabla 5.4.

Respecto a los resultados obtenidos con el aparato "leaf", éstos se presentan en la tabla 5.5, la cual incluye las condiciones de operación (vacío, concentración de sólidos en la --

alimentación, tiempo de formado y tiempo de secado), utilizando la dosis de coagulante determinada con la prueba del Buchner y cuya obtención se presenta en el análisis de resultados.

V (ml)	Dosis Cal = 16%*				
	Dosis FeCl <sub>3</sub> :				
	5%	10%	15%	20%	25%
	t (seg)	t	t	t	t
30	42	12	7	9	7
35	64	-	-	10	-
40	71	18	10	11	8
45	94	26	11	13	9
50	137	31	14	15	10
55	170	-	16	16	12
60	215	46	20	18	15
65	280	-	23	20	19
70	350	79	27	23	26
75	-	-	34	26	32
80	510	118	45	32	52
85	666	190	73	47	60
90	987	480	178	59	-

TABLA 5.1 Resultados de la prueba con embudo Buchner para lodos aerobios concentrado (2.6%)

\* en peso de sólidos secos

Corrida No	Cápsula No	$w_1$	$w_2$	$C_i$ (mg/l)	$C_f$ (mg/l)	$c$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	1a	61.111	61.798	22 900	-	0.00354
	1b	69.314	69.406	-	33067	
2	2a	63.315	62.993	22 600	-	0.0035
	2b	62.250	62.337	-	2900	
3	3a	62.714	63.395	22 750	-	0.00316
	3b	71.262	71.344	-	2733	
4	4a	61.310	62.011	22 833	-	0.00357
	4b	60.332	60.125	-	3100	
5	5a	69.602	70.287	22 833	-	0.00347
	5b	59.403	59.484	-	2700	

TABLA 5.2 Pesos obtenidos para determinar  $C_i$ ,  $C_f$ ,  $c$

- $a$  = influente  
 $b$  = filtrado  
 $w_1$  = peso cápsula  
 $w_2$  = peso cap. t. sólidos secos.  
 $C_i$  = conc. sólidos secos en influente  
 $C_f$  = conc. sólidos secos en filtrado

$$c = \frac{1}{\frac{1 - C_f}{C_f} - \frac{1 - C_i}{C_i}} = \text{g/cm}^3$$



v (ml)	Cal = 10%*		Fe Cl <sub>3</sub> 26%*	
	Poli = 0.4%*		1.1%*	1.8%*
	t (seg)	t	t	t
30	14	15	15	15
35	17	18	19	19
40	21	20	23	23
45	25	24	25	25
50	32	30	30	30
55	41	35	36	36
60	48	40	41	41
65	58	47	49	49
70	67	56	58	58
75	90	65	65	65
80	104	76	79	79
85	-	85	94	94
90	124	118	126	126

TABLA 5.3 Tabla de resultados de la prueba con embudo Buchner usando polielectrólito.

\* en peso de sólidos secos

Corrida No	Cápsula No	$w_1$	$w_2$	$C_i$ (mg/l)	$C_f$ (mg/l)	$C$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	1a	66.313	66.509	6533	-	0.0247
	1b	67.927	68.082	-	5167	
2	2a	63.214	63.430	7200	-	0.0179
	2b	62.910	63.064	-	5133	
3	3a	61.326	61.583	8562	-	0.01240
	3b	66.491	66.643	-	5067	

TABLA 5.4 Tabla de valores para obtener  $C_i$ ,  $C_f$  y  $C$  usando polielectrólito. Cal y  $FeCl_3$  en lodos poco concentrados.

Corrida No	t formado (min)	t secado (min)	t ciclo (mm)	C dec	P psi	Peso Cápsula (g)	Peso Cap. t muestra (g)	Peso Cap. (m seca) (g)	Peso m. seca (g)	% Humed.	Carg. lb/ft <sup>2</sup> /hr
1	0.25	1.5	1.75	0.026	8.84	67.428	78.696	69.416	1.988	82.4	1.34
2	0.50	1.0	1.50	0.026	8.84	67.927	86.155	70.596	2.669	85.4	2.10
3	10	0.5	1.50	0.026	8.84	62.910	92.596	66.168	3.258	89.0	2.56
4	0.5	1.5	2.0	0.0187	8.84	70.123	76.453	71.409	1.286	79.7	0.759
5	0.5	1.5	2.0	0.014	8.84	70.021	75.202	71.122	1.101	78.7	0.650
6	1.5	1.0	2.5	0.026	5.9	62.611	89.906	66.063	3.452	87.4	1.629
7	1.5	1.0	2.5	0.026	7.37	65.207	101.959	69.257	4.050	89.0	1.912
8	1.5	0.5	2.0	0.026	8.84	68.930	99.920	72.233	3.303	89.3	1.949

$$L_b = \frac{\text{peso lodo seco en g} \times \text{ciclos/hr}}{454 \times \text{area hoja leaf en ft}^2}$$

$$\text{area hoja} = \frac{(11.5 \text{ cm})^2 \pi}{4} = 103.9 \text{ cm}^2 = 0.112 \text{ ft}^2$$

$$\text{ciclos/hr} = \frac{60 \text{ min}}{(t_f + t_d) \text{ min}}$$

TABLA 5.5 Resultados Prueba Leaf. - Usando Cal 16%  
Fe Cl<sub>3</sub>16%

## 6. ANALISIS DE RESULTADOS

Como se ha venido haciendo, también el análisis de los resultados se hará primeramente para los obtenidos con el embudo Buchner y posteriormente para los resultados de la prueba --- "leaf", haciendo énfasis en que el análisis de la primera --- prueba es básico para iniciar la del "leaf".

- a) Embudo Buchner. Con los datos de  $V$  y  $t$ , se calculó la relación  $t/V$  y se graficó contra  $V$ ; la pendiente de la recta resultante se calculó por mínimos cuadrados y se utilizó para calcular la resistencia específica a partir de la ecuación 3.7:

$$\kappa = (2 PA^2/\mu c) S \quad (3.7)$$

donde para el caso de los lodos concentrados:

$$P = 18 \text{ pulg Hg} = 617.22 \text{ g/cm}^2$$

$$A = 122.71 \text{ cm}^2 \text{ (papel filtro Wathaman \# 2, } \phi = 12.5 \text{ cm)}$$

$$\mu_{21^\circ\text{C}} = 0.98475 \times 10^{-2} \text{ P}$$

$$C = 0.0035 \text{ g/cm}^3 \text{ (este es un valor medio ya que en todas las corridas casi no varió).}$$

por lo que :

$$\kappa = \frac{2 (617.22) (122.71)^2 \text{ S}^2}{0.0098475 (0.0035)}$$

$$\kappa = 5.39 \times 10^{11} \text{ S}^2/\text{g}$$

De las figuras 6.1 a 6.5, se presentan las gráficas  $t/V$  vs  $V$ , la pendiente calculada por mínimos cuadrados y el valor de  $\kappa$  para la dosis de coagulante correspondiente.

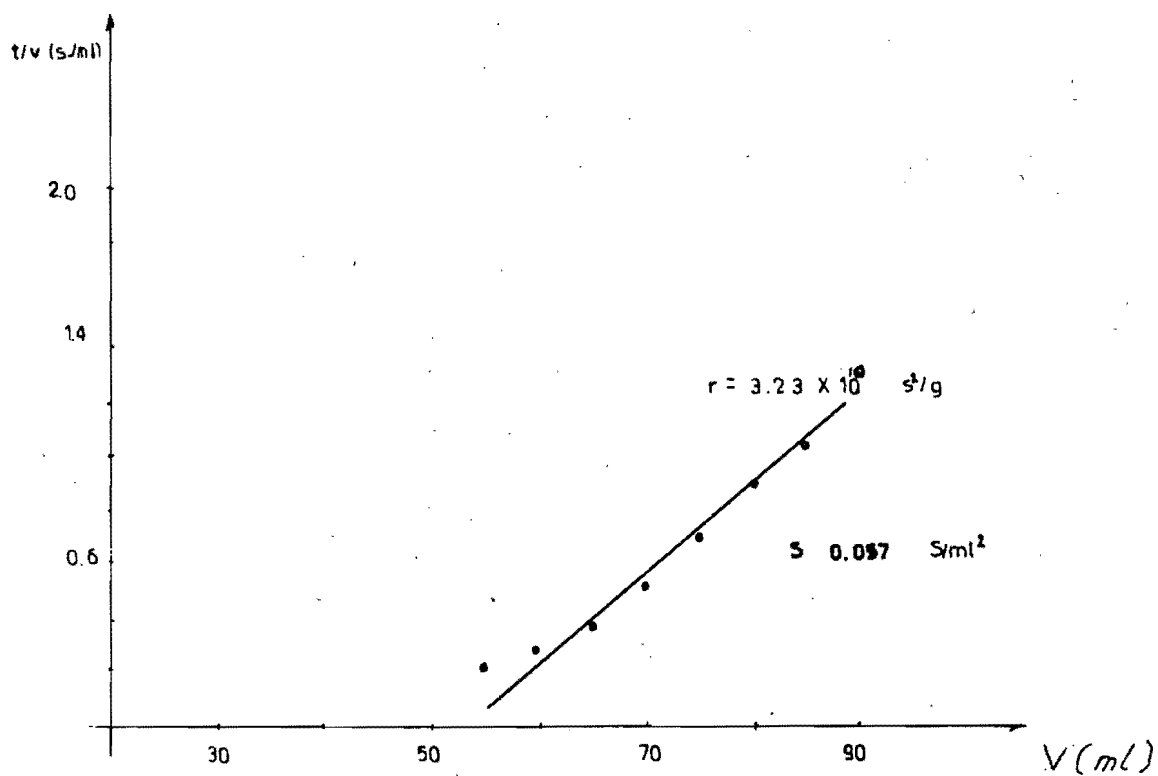


Fig 6.1 Recta  $t/V$  &  $V$  para Cal = 16%, Fe Cl<sub>3</sub> = 5%

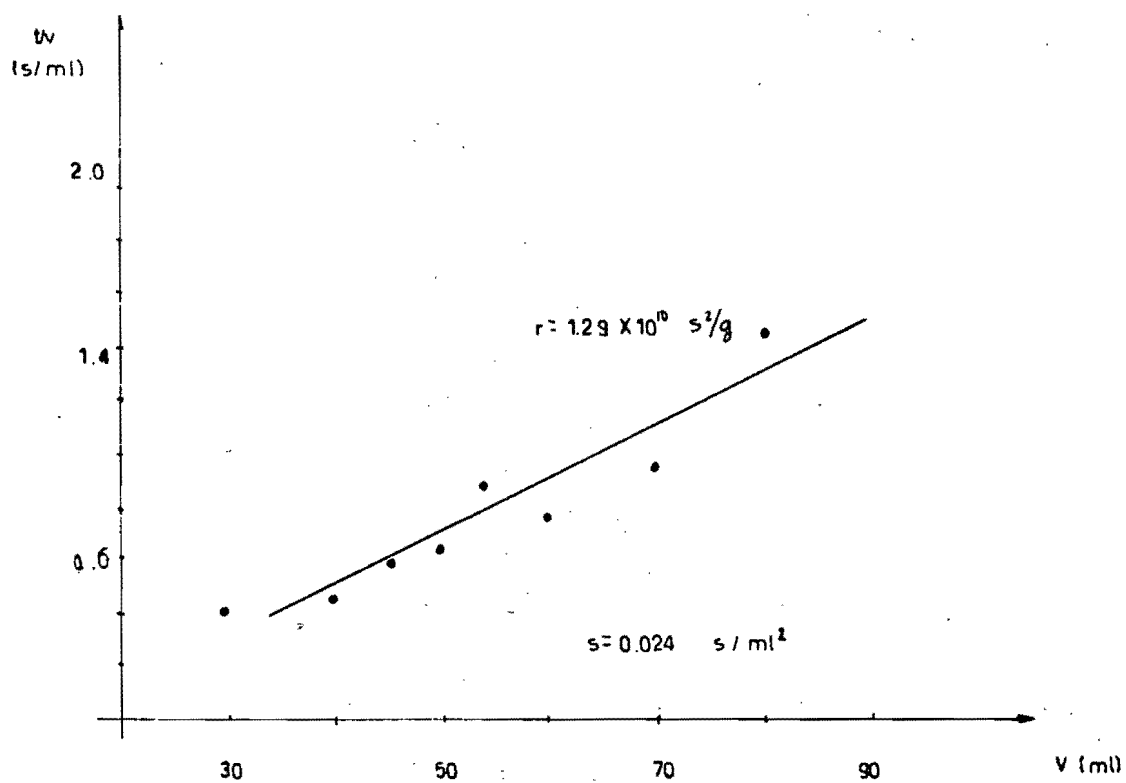


Fig 6.2 Recta  $t/V$  &  $V$  para Cal = 16%, Fe Cl<sub>3</sub> = 10%

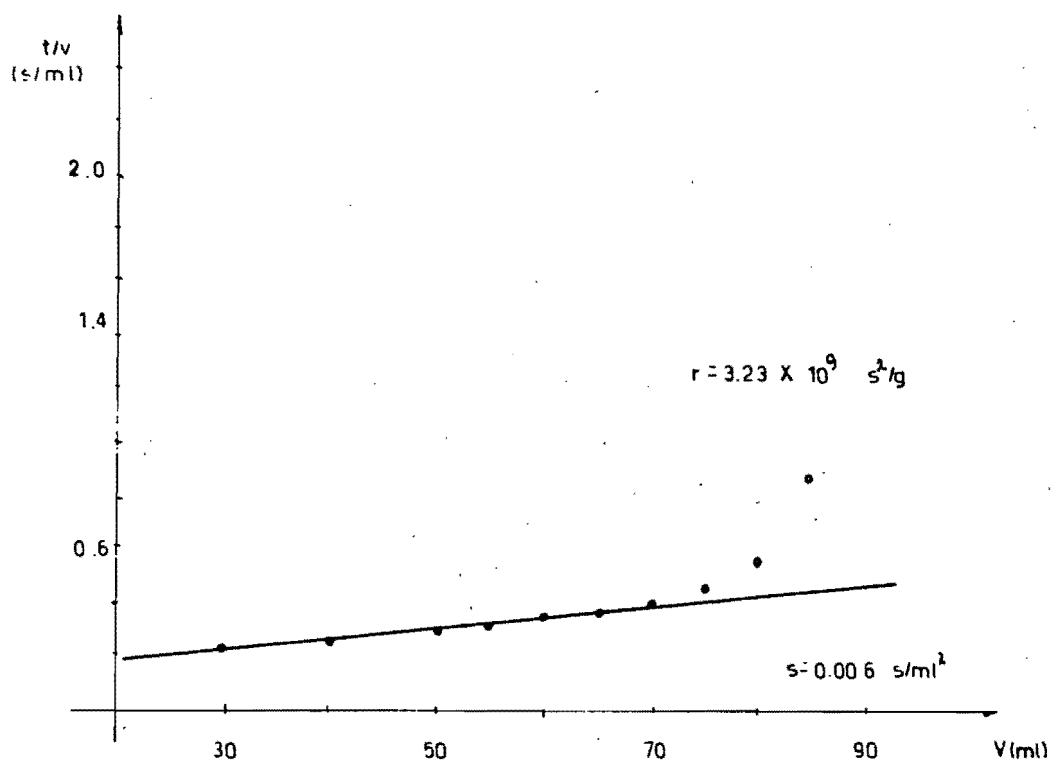


Fig 6.3 Recta  $t/V$  &  $V$  para Cal = 16%, Fe Cl<sub>3</sub> = 15%

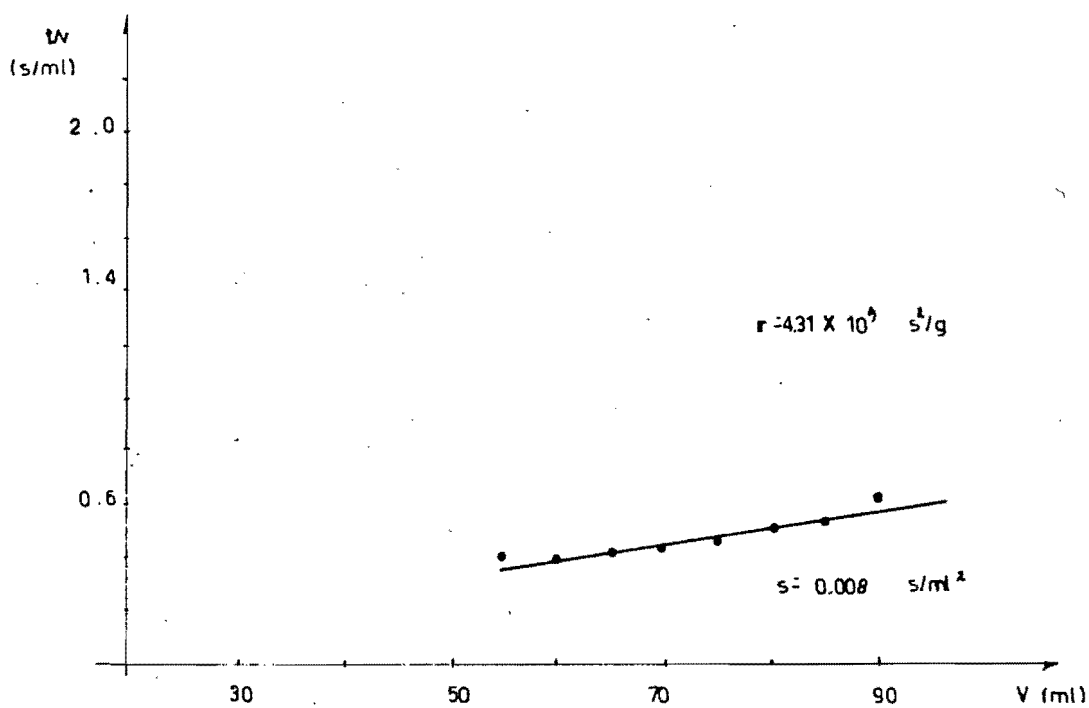


Fig 6.4 Recta  $t/V$  &  $V$  para Cal = 16%, Fe Cl<sub>3</sub> = 20%

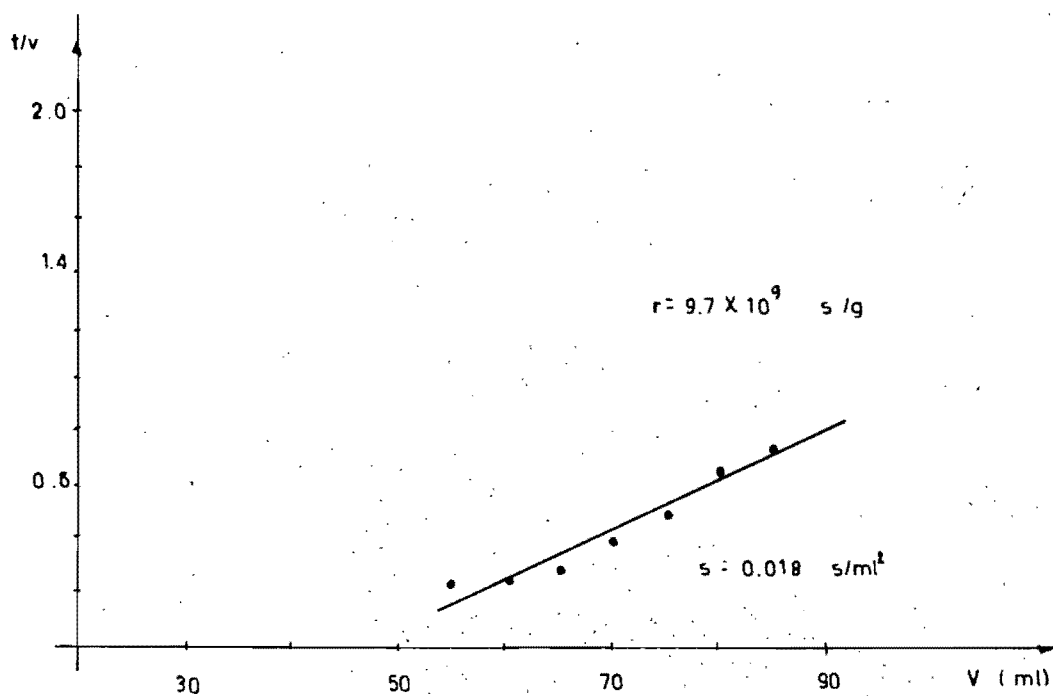


Fig 6.5 Recta  $t/V$  &  $V$  para Cal = 16%, Fe Cl<sub>3</sub> = 25%

Graficando la resistencia específica obtenida contra el % de Fe Cl<sub>3</sub>, ya que la cal es constante, se obtiene la curva de la figura 6.6

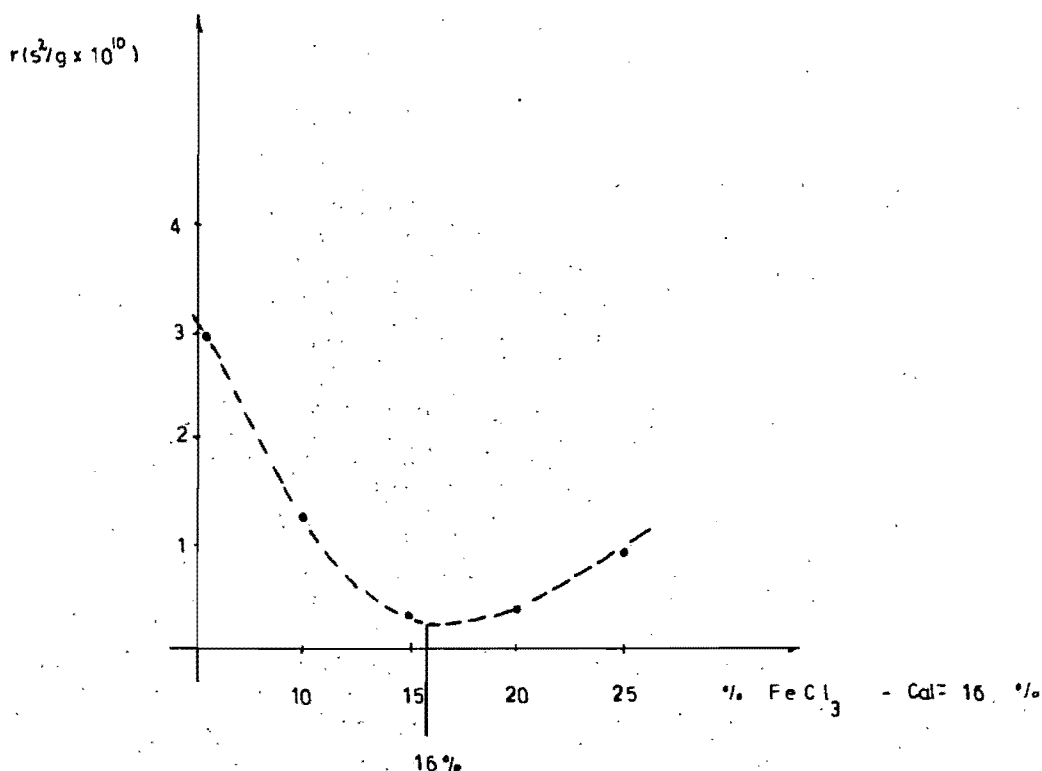


Fig 6.6 Curva  $r$  & % Fe Cl<sub>3</sub>; se puede observar que la menor resistencia específica se logra con una dosis de 16% Cal y 16% Fe Cl<sub>3</sub>



Para el caso en el que se utilizó Cal, Fe Cl<sub>3</sub> y Polielectrólito (lodo menos concentrado), las gráficas de  $t/V$  &  $V$  se presentan en las figuras 6.7 a 6.9, así como los valores de  $\kappa$ , - para lo cual:

$$P = 18 \text{ pulg Hg} - 617.22 \text{ g/cm}^2$$

$$A = 122.71 \text{ cm}^2$$

$$\mu_{21} = 0.98475 \times 10^{-2} P$$

$$C = 0.0175 \text{ g/cm}^3$$

$$\kappa = \frac{2 (617.22) (122.71)^2}{0.0098475 (0.0175)} = 1.08 \times 10^{11} \text{ s}^2/\text{g}$$

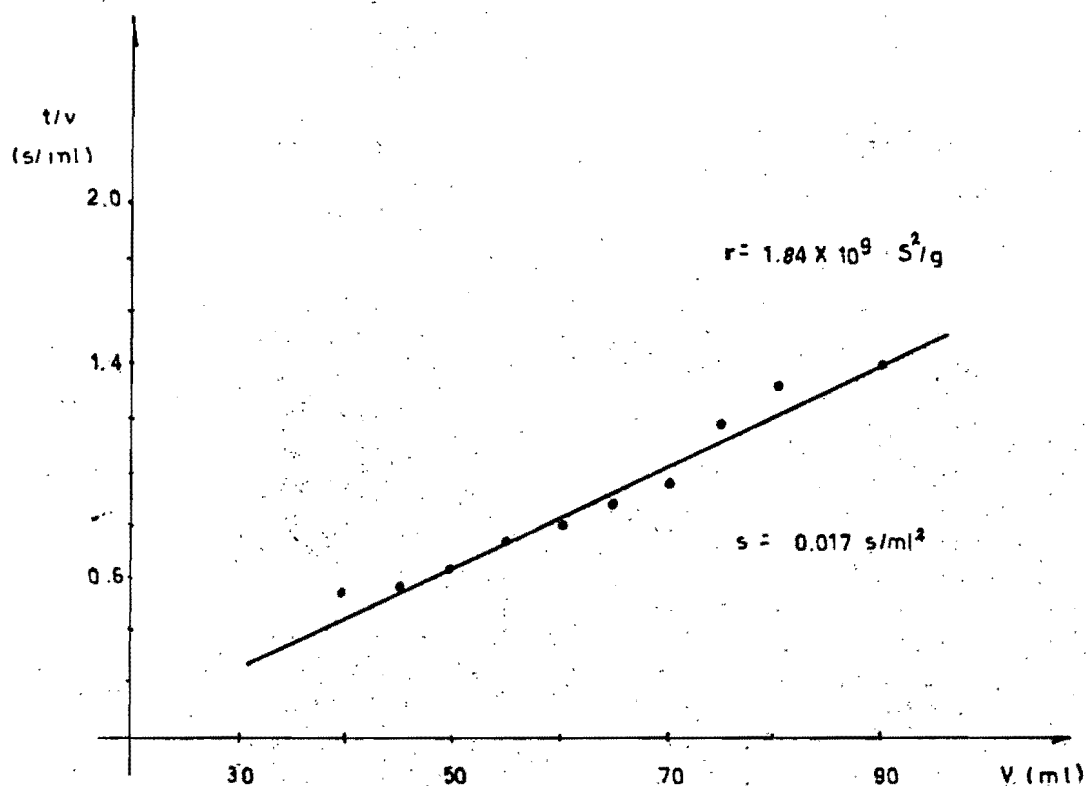


Fig 6.7 Recta  $t/V$  &  $V$  para Cal = 10%, Fe Cl<sub>3</sub> = 26%, Poli = 0.4%

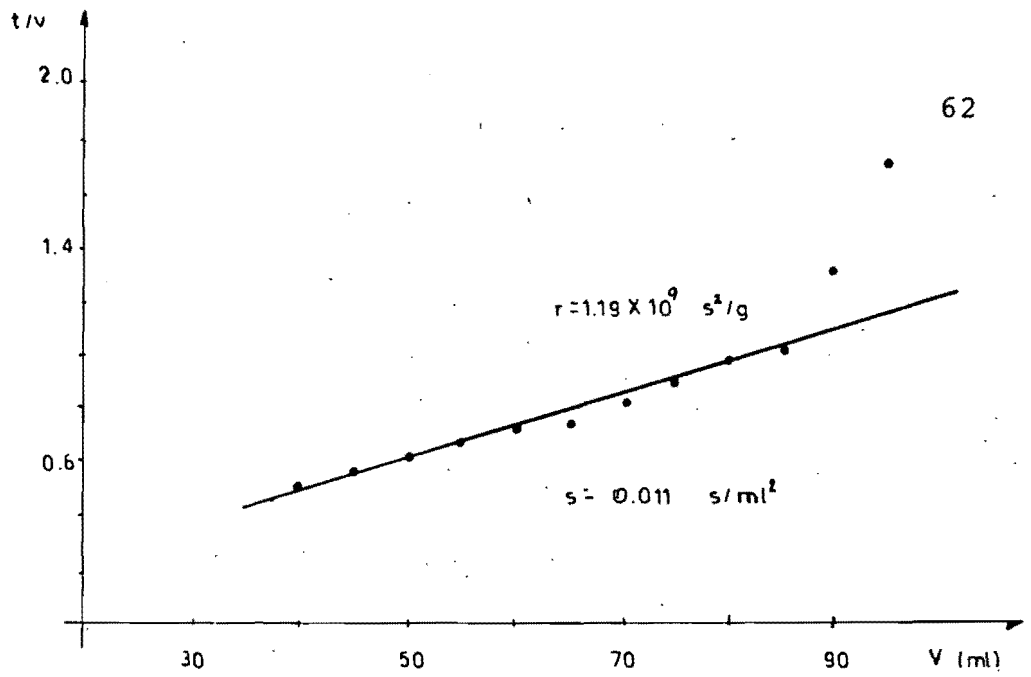


Fig 6.8 Recta  $t/V$  &  $V$  para Cal = 10%, Fe Cl<sub>3</sub> = 26% y Poli = 1.1%

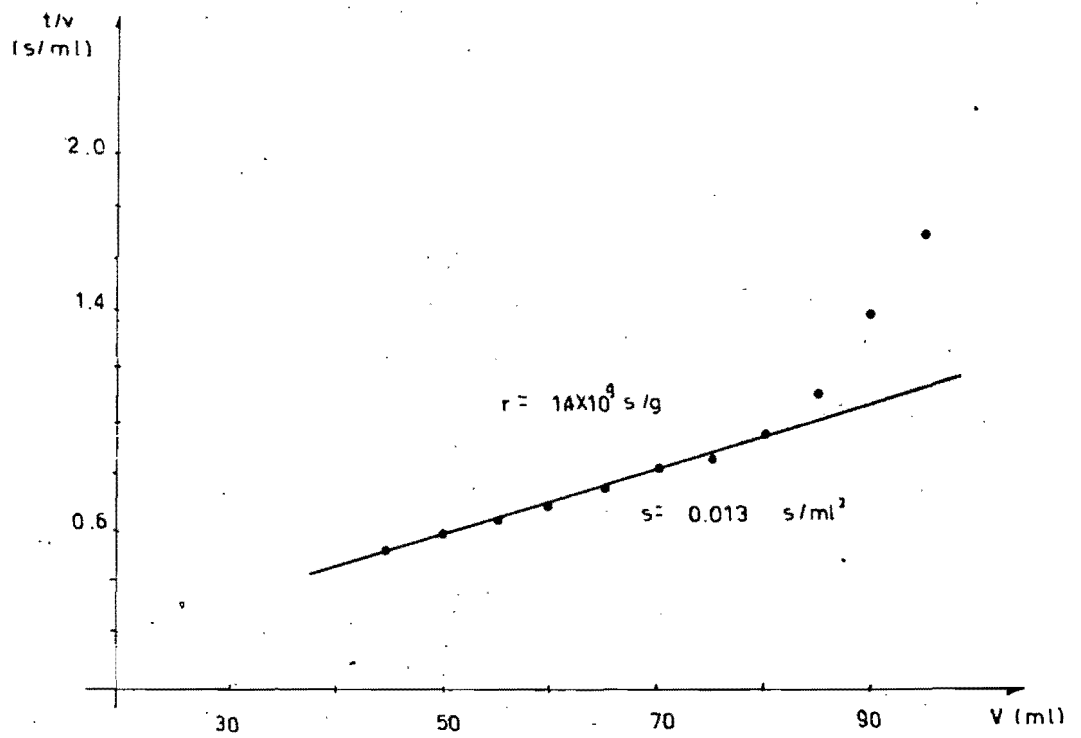


Fig 6.9 Recta  $t/V$  &  $V$  para Cal = 10%, Fe Cl<sub>3</sub> = 26%, Poli = 1.8%

De igual manera que en el caso anterior, se grafican las resistencias específicas contra dos dosis de polielectr $\acute{o}$ lito correspondientes ya que la cal y el cloruro f $\acute{e}$ rrico se mantuvieron constantes (figura 6.10).

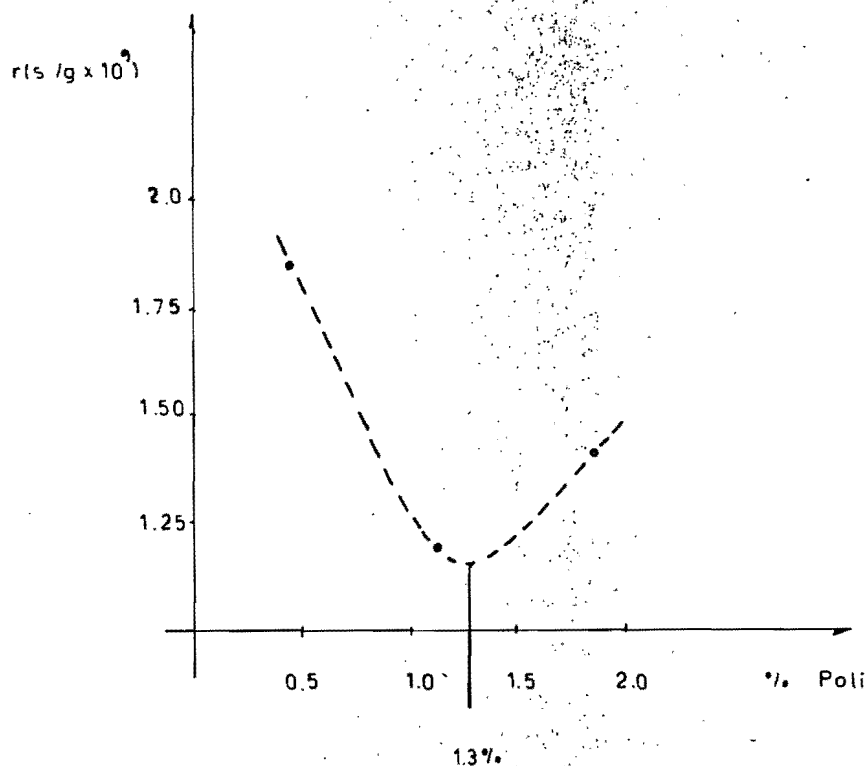


Fig 6.10 Curva resistencia específica  $\forall$  dosis de Polielectr $\acute{o}$ lito

Como ya se mencion $\acute{o}$ , b $\acute{a}$ sicamente se emple $\acute{o}$  Cal y Fe Cl $_3$  para acondicionar qu $\acute{m}$ icamente los lodos, sin embargo se est $\acute{a}$ n presentando los valores obtenidos en una prueba -- preliminar correspondiente a un lodo mucho menos concentrado que el de estudio donde se utiliz $\acute{o}$  Cal, Fe Cl $_3$  y -

polielectrolito con el objeto de mostrar que aunque las dosis de  $CaCl_2$  y  $FeCl_3$  son distintas la resistencia específica mínima es de aproximadamente el 50% de la resistencia de los lodos bajo estudio; sin embargo, en ese caso no se formó ninguna torta en el aparato "leaf" ya que la concentración de sólidos fué demasiado baja (aprox. - 0.6%).

- b) Aparato "leaf". Una vez determinada la carga del filtro bajo diferentes condiciones de operación, ésta se relaciona con el tiempo de formado, el vacío aplicado y la concentración de alimentación haciendo las siguientes consideraciones:

Determinación de  $n$ . Si  $P$  y  $c$  se mantienen constantes, - la ec. 3.6 se transforma en:

$$L_f = K_1 (1/t_f^n) \quad ; \quad K_1 = 35.7 (P^{1-5}/\mu r_0)^{1/2} c^m =$$

$$= cte$$

que en forma logarítmica:

$$\log L_f = -n \log t_f + \log K_1$$

por lo que la pendiente de una gráfica logarítmica de -

$L_f$  y  $t_f$  será - n.

Determinación de S. Si  $t_f$  y  $c$  se mantienen constantes, -  
la ec. 3.16 se transforma en:

$$L_f = K_2 P^{(1-S)/2} ; K_2 = 35.7 (1/\mu r_0)^{1/2} (c^m/t_f n) = cte$$

que en forma logarítmica:

$$\log L_f = [(1-S)/2] \log P + \log K_2$$

por lo que la pendiente de una gráfica logarítmica de --  
 $L_f$  y  $P$  será  $(1-S)/2$ .

Determinación de m. Si  $t_f$  y  $P$  se mantienen constantes, -  
la ec. 3.16 se transforma en:

$$L_f = K_3 c^m ; K_3 = 35.7 (P^{1-S}/\mu r_0)^{1/2} (1/t_f n)$$

que en forma logarítmica:

$$\log L_f = m \log c + \log K_3$$

por lo que la pendiente de una gráfica logarítmica de --  
 $L_f$  y  $c$  genera una línea recta de pendiente m.

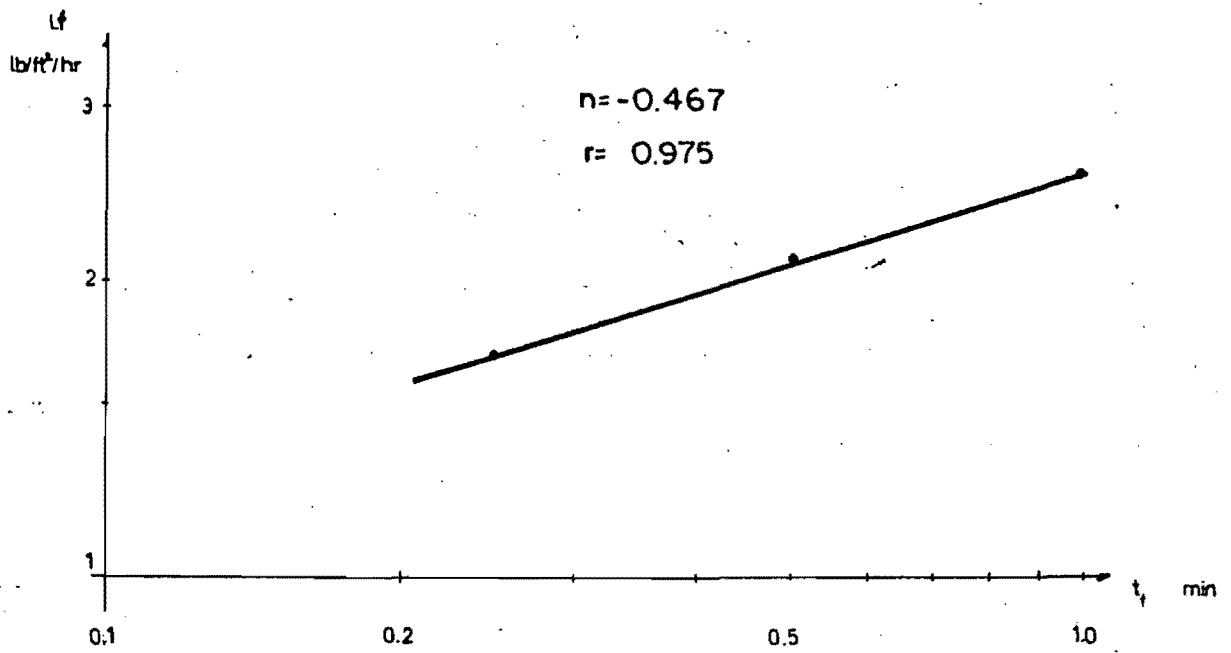
Determinación de  $n_0$ . De la ec. 3.16, una gráfica de  $L_6$  vs  $35.7 (P^{1-s}/\mu)^{1/2} (C^m/t_6^n)$  genera una línea recta de pendiente  $(1/n_0)^{1/2}$ .

Puesto que  $n_0$  es sólo función de la naturaleza de los lodos, es constante para todos los experimentos realizados con el mismo lodo.

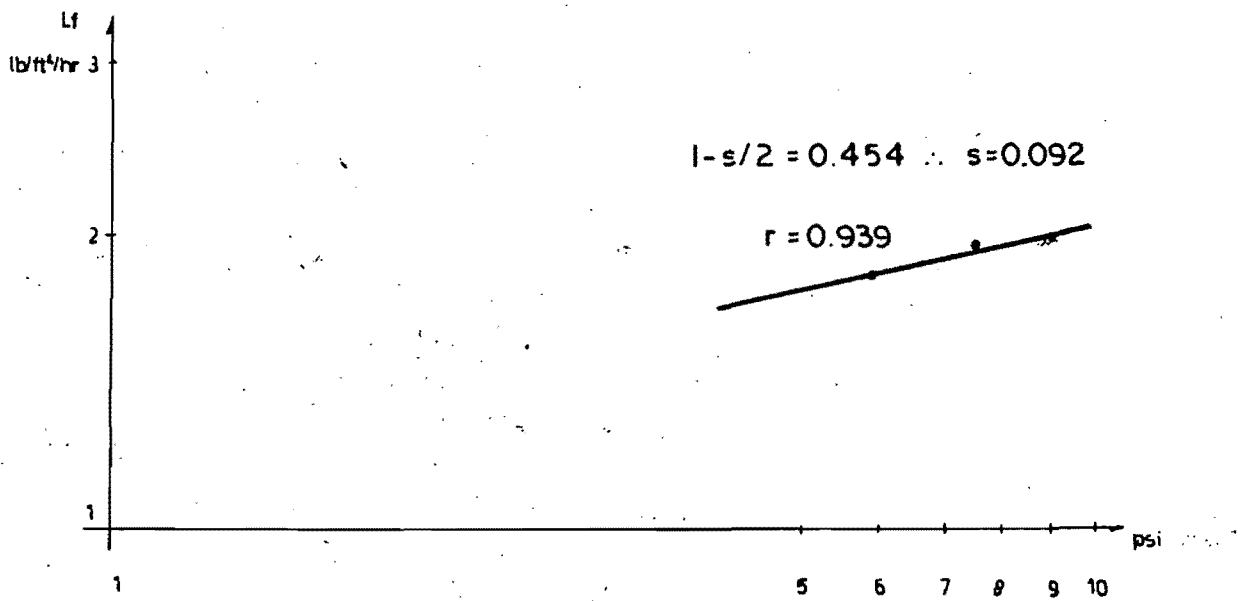
En las figuras 6.11 y 6.12 se presentan las gráficas anteriormente mencionadas, el valor de la constante correspondiente a partir de la pendiente calculada por mínimos cuadrados y también se anota el coeficiente de correlación calculado con el objeto de tener una idea de la aproximación de los datos obtenidos.

Para la determinación de  $n$ , se consideraron las corridas 1 y 3, en las que  $P$  y  $c$  se mantuvieron constantes; para determinar  $s$ , se usaron las corridas 6 a 8 en las que  $t_6$  y  $c$  se mantuvieron constantes, y en la determinación de  $m$ , se emplearon las corridas 2, 4 y 5.

Como todas fueron hechas con el mismo lodo, para determinar  $n_0$  se utilizaron de la 1 a la 8.



a)



b)

Fig 6.11 Determinación de  $n$  (a) y  $s$  (b)

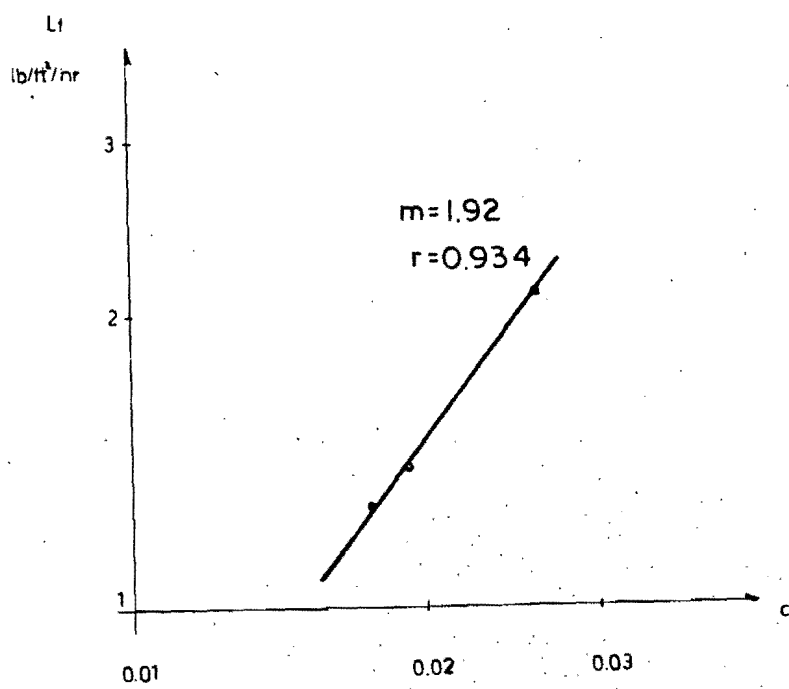


Fig 6.12 Determinación de  $m$



Una vez conocidas las constantes, éstas se aplican al miembro derecho de la ec. 3.16 para después graficarlo contra  $L_f$ . Esta secuela de cálculo se presenta en la tabla 5.5 y la gráfica  $L_f$  vs  $35.7 (P^{1-5}/\mu)^{1/2} (C^m/t_f^n)$  en la figura 6.13, así como la determinación de  $r_0$ . En esta determinación, se eliminarían 3 puntos que se disparan totalmente de la recta a la que se acercan los demás, con lo cual el valor de  $r_0 = 0.004$ .

En la figura 6.14, se muestra la variación observada en el contenido de humedad para distintos tiempos de secado, durante el experimento; esta característica varió entre 80 y 90%.

Haciendo un resumen de los parámetros de diseño tenemos:

$n = -0.467$	$(r = 97.5)$
$S = 0.092$	$(r = 93.9)$
$m = 1.92$	$(r = 93.4)$
$r_0 = 0.004$	$(r = 99.5)$

Por tanto, la ecuación de diseño será:

$$L_f = 35.7 (P^{1-5}/\mu r_0)^{1/2} (C^m/t_f^n)$$

$$L_f = 35.7 (P^{1-0.092}/\mu(0.004))^{1/2} (C^{1.92}/t_f^{-0.467})$$

TABLA 6.5 VALORES PARA DETERMINAR  $R_0$

Corrida No	$L_\delta$	$p^{1-5}$ $p^{1-0.092}$ $p^{0.908}$	$C^m$ $C^{1.92}$	$t_\delta^n$ $t_\delta^{0.467}$	$35.7(P^{1-5}/\mu)^{1/2}$ $(C^m/t_\delta^n)$
1	1.34	7.23	0.0009	1.91	0.046
2	2.10	7.23	0.0009	1.38	0.063
3	2.56	7.23	0.0009	1.0	0.871
4	0.759	7.23	0.0005	1.38	0.035
5	.650	7.23	0.0003	1.38	0.021
6	1.63	5.01	0.0009	0.827	0.097
7	1.91	6.13	0.0009	0.827	0.097
8	1.95	7.23	0.0009	0.827	0.105

$$\mu_{21^\circ C} = 0.98475 \text{ c P}$$

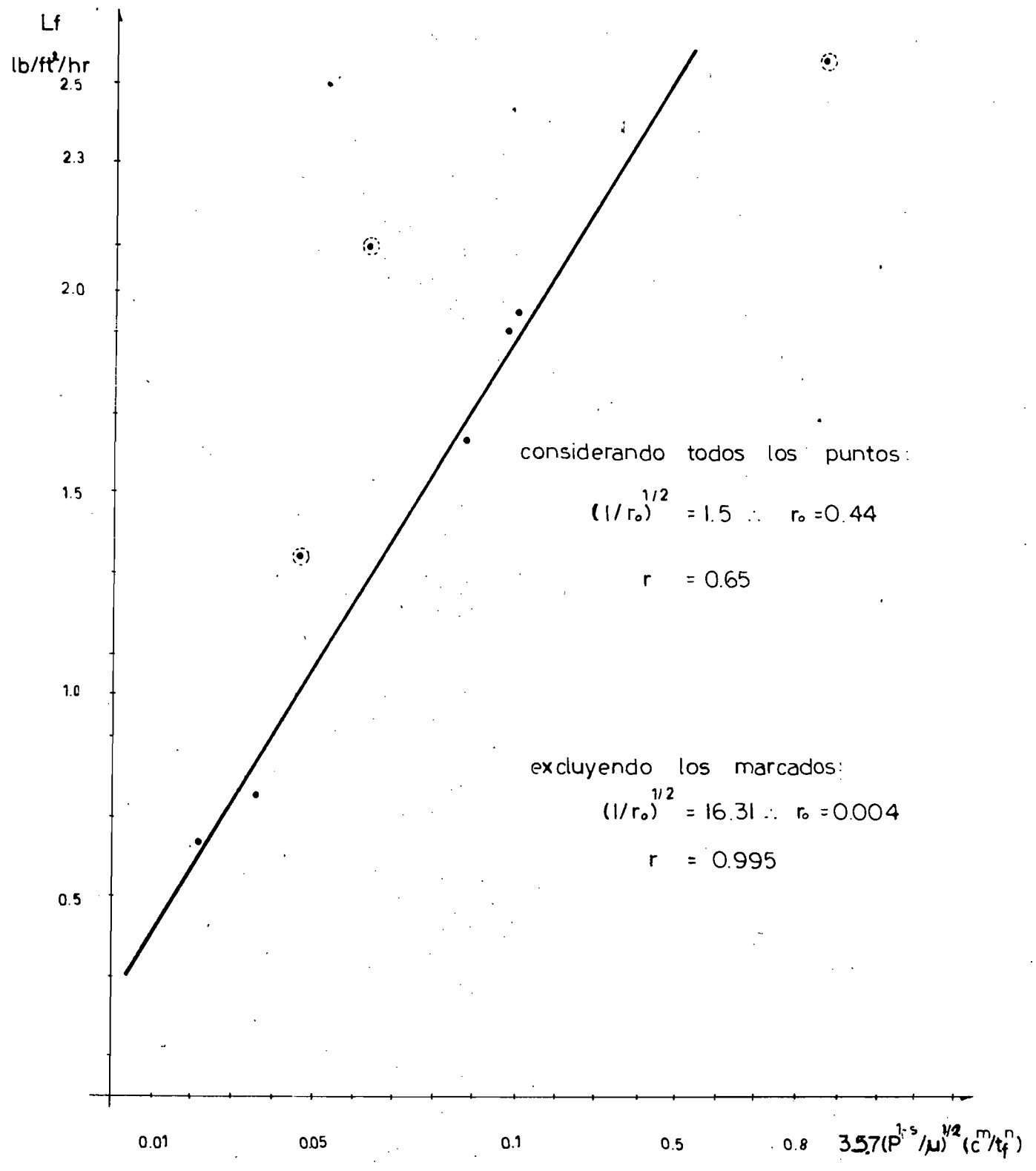


Fig 6.13 Determinación de  $r_0$

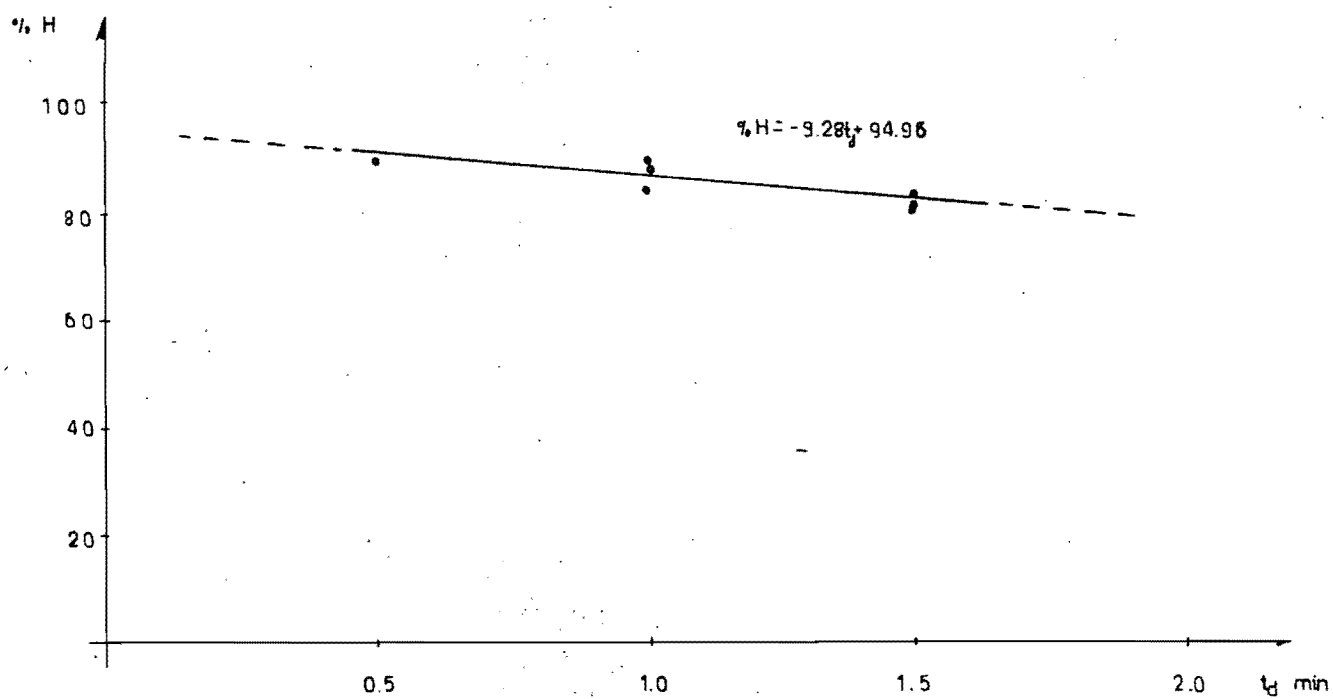


Fig 6.14 Relación % H contra  $t_d$ , tiempo de secado

## 7. APLICACION DE RESULTADOS

Para ejemplificar la forma en que se emplean los parámetros - determinados en este estudio así como su importancia en el di seño de filtros de vacío, se asumirán los siguientes datos:

Sea un digestor aerobio con:

Producción de lodos:  $276.76 \text{ m}^3/\text{día}$

Grado de estabilización: 49%

Concentración de sólidos: 4%

Asumiendo que el lodo, antes de ser acondicionado químicamen- te para ser filtrado entra a un espesador de gravedad donde - se pretende obtener una concentración del 8%, se determinará:  
a) el requerimiento de coagulante y b) el área de filtro- necesaria para obtener un 85% de humedad y una sumergencia --

del 30%, con un vacío de 20 pulg Hg y a una temperatura de líquido de 21°C.

- a) Como la dosis de coagulante es del 16% en peso de sólidos secos, este valor corresponde a:

$$80\,000 \text{ g/m}^3 (0.16) = 12\,800 \text{ g/m}^3 = 12.8 \text{ Kg/m}^3$$

por tanto, la cantidad de coagulante requerida por día -- una vez espesados los lodos será:

$$\frac{276.76 \times 0.04}{0.08} \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times 12.8 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 1771.26 \text{ Kg/día}$$

$$= 1.80 \text{ ton/día}$$

Es decir, se requerirán 1.8 ton/día de cal y la misma -- cantidad diaria de  $\text{Fe Cl}_3$ .

- b) Sabemos que el tiempo de un ciclo del tambor del filtro -- está dado por la expresión:

$$t_c = t_f + t_d$$

donde

$t_f$  tiempo de formado

$t_d$  tiempo de secado

Si el tambor gira a velocidad constante, es válido que:

$$t_f/t_c = \frac{t_f}{t_f + t_d} = \frac{\% \text{ sumergencia}}{100}$$

Ahora bien, si se desea una humedad del 85%, de la figura --- 5.14, se requiere un tiempo de secado de aproximadamente 1 -- min, el tiempo de formación de acuerdo a la expresión ante--- rior y para un 30% de sumergencia será:

$$t_f = 1 \frac{0.3}{(1-0.3)} = 0.42 \text{ min}$$

Checando el % de sumergencia:

$$\frac{0.42}{1.42} = 0.30$$

El rendimiento del filtro será:

$$L_f = 35.7 (P^{1-0.092} / \mu 0.004)^{1/2} (c^{1.92} / t_f^{-0.467})$$

Para  $P = 20 \text{ pulg Hg} = 9.8 \text{ lb/plg}^2$

$$\mu_{21} = 0.98475 \text{ cP}$$

$$c = 0.08$$

$$t_f = 0.42 \text{ min}$$

$$L_f = 35.7 (9.8^{0.908} / 0.98475 (0.004)^{1/2} (0.08^{1.92} / 0.42^{-0.467}))$$

$$L_f = 8.37 \text{ lb/ft}^2/\text{hr}$$

Ahora bien, la carga del filtro por ciclo será:

$$L_c = 8.37 \text{ lb/ft}^2/\text{hr} (0.30) = 2.5 \text{ lb/ft}^2/\text{hr}$$

Si se considera que no todo el tambor va a ejercer vacío ya - que en una parte de él se elimina el lodo y se lava el medio-filtrante, se aplica un coeficiente de 0.9:

$$L_c = 2.5 (0.9) = 2.3 \text{ lb/ft}^2/\text{hr}$$

Si se asume que el filtro trabajará 20 hrs/día (planta grande), el área será:

$$\begin{aligned} \text{Lodo producido} &= 138.38 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times 0.08 = 11.07 \text{ ton/día} \\ &= 24\,383 \text{ lb/día} \end{aligned}$$

$$\text{Area requerida} = \frac{24\,383 \text{ lb/día} \times \text{día}/20 \text{ hrs}}{2.3 \text{ lb/ft}^2/\text{hr}}$$

$$\begin{aligned} \text{Area requerida} &= 530 \text{ ft}^2 \\ &= 49.2 \text{ m}^2 \end{aligned}$$



#### 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Los lodos estudiados, pueden ser filtrados siempre y --- cuando este proceso sea precedido de un espesamiento adecuado.
2. La concentración de sólidos en la pasta resultante varió entre 10 y 17%.
3. Los requerimientos de coagulante para disminuir la resistencia específica a un mínimo de  $0.323 \times 10^{10}$  s<sup>2</sup>/g fué -- del 16%, en peso de sólidos secos, de cal y 16% de cloruro férrico.
4. Aunque los porcentajes de coagulante son altos, no están muy fuera de los rangos recomendados por la bibliografía (2-12 %).

5. Durante las pruebas preliminares, se pudo observar que - el uso de polielectrolitos tal vez diera mejor resultado, aunque económicamente quizá no sería el coagulante adecuado.
6. La resistencia específica mínima obtenida después del -- acondicionamiento químico está arriba del rango encontrado en la bibliografía para el caso de lodos digeridos -- ( $0.3$  a  $4.07 \times 10^8 \text{ s}^2/\text{g}$ ), lo cual indica que el lodo en - estudio a la concentración de operación a nivel laboratorio es difícil de filtrar o que requirió, un área de filtro mayor a la necesaria.
7. Respecto al valor de  $n$ , este parámetro resulto ser negativo apareciendo siempre positivo en la bibliografía. - Apparently, no tiene que ser extraño ya que en las corridas de filtración utilizadas para evaluar este parámetro el tiempo de formación va aumentando y hay oportunidad de formar una torta mayor. Por otro lado, el tiempo de secado va disminuyendo y por tanto la concentración - de sólidos va disminuyendo también. Por lo que el signo de la pendiente de la recta estará en función de que tasa sea mayor, si la de acumulación de lodo en el medio - filtrante o la de flujo del agua a través de la torta.

7. Si se lograran las condiciones de operación asumidas en el ejemplo de aplicación, aún para una concentración del 8%, el rendimiento del filtro sería bajo comparado con el valor de diseño propuesto por Metcalf:  $3.5 \text{ lb/ft}^2/\text{hr}$ .
8. Considerando la alcalinidad de la parte líquida del lodo ( $1400 \text{ mg/l Ca CO}_3$ ), la parte volátil de los sólidos ---- (30%), y la parte fija (70%), la demanda química de coagulante sería aproximadamente de 0.85%, sin embargo, en las pruebas preliminares se pudo observar que aún en ese rango, la resistencia específica no era tan baja comparada con la que se logró al aumentar la dosis de coagulante.

Para fines prácticos se recomienda:

Realizar una serie de pruebas con el embudo Buchner utilizando únicamente polielectrolitos y bajo las condiciones de operación reales para evaluar económicamente el empleo de este tipo de coagulante.

Con las constantes determinadas, buscar una concentración del lodo que garantice un rendimiento del filtro adecuado (económicamente) y buscar el proceso de espesamiento que logre dicha concentración.



DEPTO

Realizar estudios utilizando otro tipo de acondicionamiento - al lodo antes de filtrarlo y establecer comparaciones para encontrar un rendimiento óptimo.

Llevar a cabo pruebas de laboratorio para encontrar si es económicamente atractivo el empleo de filtro-ayudas (tales como diatomita, perlita, fibras de celulosa, etc.) los cuales se emplean tradicionalmente en la industria para mejorar la filtrabilidad de productos similares a los lodos.

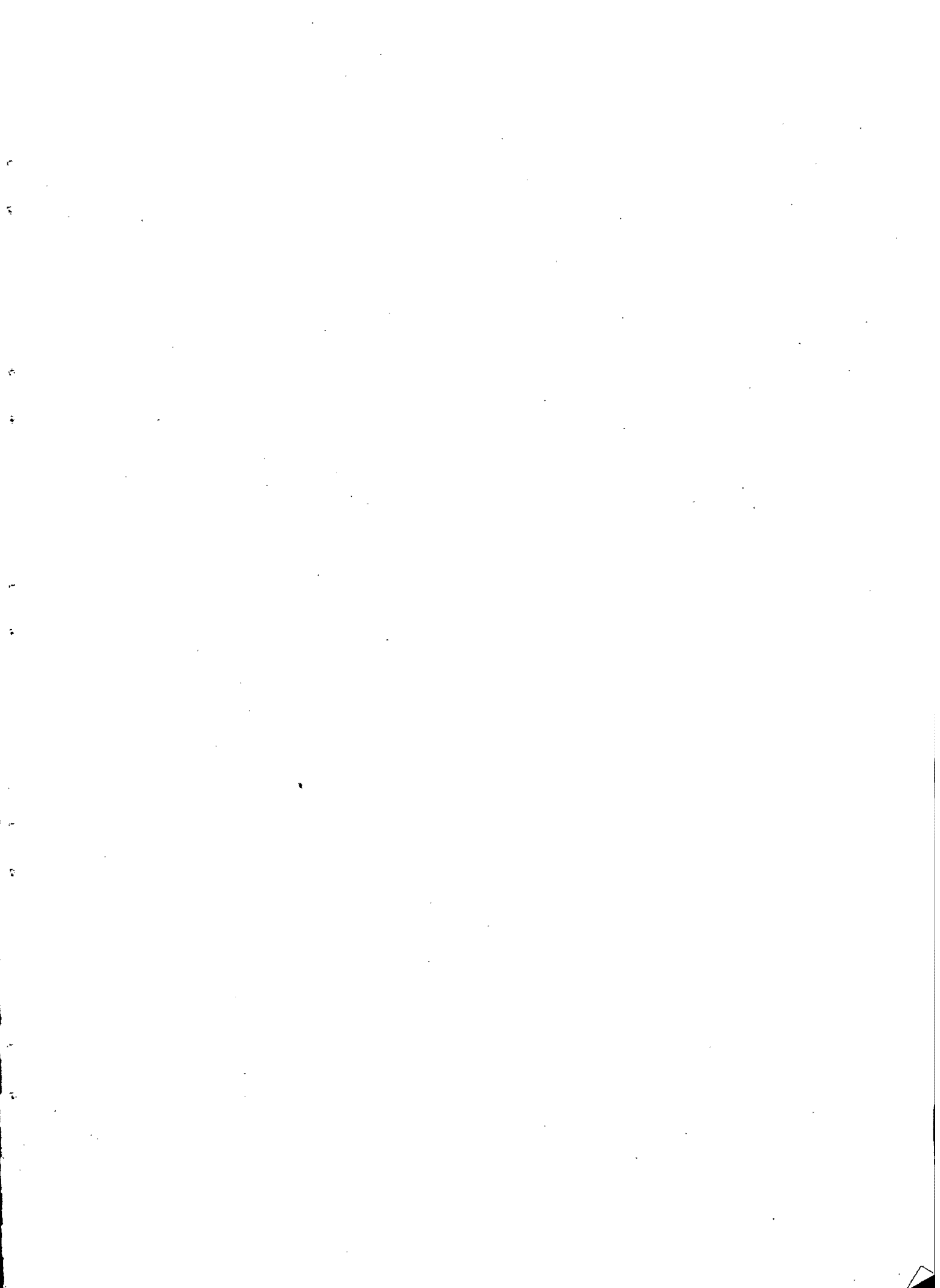
Similarmente a la actividad anterior, estudiar el efecto de adicionar a los lodos materiales industriales de desecho (como bagazo de caña, cascarilla de arroz, etc.), cuyo efecto es similar al de los filtro-ayudas, teniendo como ventaja adicional el hecho de ser materiales orgánicos que facilitarían la disposición final de los lodos por incineración o bien como fertilizantes y mejoradores de suelos.

#### BIBLIOGRAFIA

- R.S. Ramalho, "Introduction to Wastewater Treatment Processes". Academic Press. Inc., N.Y. 1977.
- U.S. Environmental Protection Agency, "Process Design - Manual for Sludge Treatment and Disposal". Technology - Transfer. 1974.
- Larry D. Benefield and Clifford W. Randall. "Biological Process Design for Wastewater Treatment". Prentice-Hall, Inc; N.J. 1980.
- Water Pollution Control Federation. "Wastewater Treatment Plant Design". Manual of Practice No. 8. Lancaster Press. Inc. Lancaster, Pa. 1977.
- Fair Gordon, John Geyer y Daniel Okun, "Purificación de Aguas y Tratamiento y Remoción de Aguas Residuales", -- Vol. 2 "Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales", --

prólogo de ....., traducción de Salvador Ayanegui, revisión de Armando Patiño. Limusa, S.A. 1979.

- George E. Barnes. "Tratamiento de Aguas Negras y Desechos Industriales". UTEHA, México. 1967.
- W.W. Eckenfelder and D.L. Ford. "Water Pollution Control", "Experimental Procedures for Process Design". Jenkins Publishing Company; N.Y. 1970.
- Metcalf and Eddy. "Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse". McGraw-Hill Book Company. 1972.
- John W. Clark, Warren Viessman, Jr., Mark J. Hammer. "Water Supply and Pollution Control". Harper and Row Publishers, Inc. 1977.



5. Kountz, R.R., and Forney, Cr., Jr; "*Metabolic Energy -- Balances in a Total Oxidation Activates Sludge Systems*". *Sewage and Industrial Waste*. (1959).
6. Reynolds, T.D. "*Aerobic Digestion of Thickened Waste Activated Sludge*", *Proceedings of the 28 th Industrial -- Waste Conference, Purdue University, West. Lafayette, - Ind.* (1973).
7. J.K. Nelson, M.A.H. Tavery. "*Chemical Conditioning Alternatives and Operational Control for Vacuum Filtra----tion*". *Journal of Water Pollution Control Federation*. - March. (1978). Vol. 50 No. 3. Part. One.