

Floculación en lecho poroso

(Continuación)

El presente trabajo trata sobre algunos aspectos relacionados con la floculación en un lecho poroso, estudiados con base en la experimentación, en un modelo, del comportamiento de la floculación de un tipo específico de agua.

La floculación en lechos porosos consiste en un lecho de grava, a través del cual se hace circular un determinado caudal del agua a tratar, mezclada intimamente con el coagulante, para lograr la formación de los flocs, que en una posterior sedimentación, produzca la clarificación del agua.

Se ensayaron tres diferentes lechos de grava, con el interés de determinar la granulometría adecuada que optimice el funcionamiento del sistema, teniendo en cuenta que el porcentaje de remoción de turbiedad y de color (objetivo de la floculación) sea el máximo, y estudiando el comportamiento de cada lecho en lo referente a la pérdida de carga, tiempo de retención, rata de flujo y gradiente de velocidad; parámetros éstos que permiten llegar a establecer la eficiencia y funcionalidad de este sistema de floculación.

La fuente de agua cruda para la realización de los ensayos proviene del río Bogotá, afluente a la planta de tratamiento del municipio de Mosquera, Cundinamarca, en donde se desarrolló el estudio.

Los resultados derivados de este trabajo, permiten llegar a la conclusión de que este sistema funciona eficientemente como floculador en tratamiento de aguas; siendo viable su implementación desde varios puntos de vista:

- Se logran reducir los costos de construcción, operación y mantenimiento de floculadores.
- El tiempo de retención y la pérdida de carga en este sistema son considerablemente menores que el de los sistemas convencionales.
- Dados los problemas de funcionamiento de floculadores en las plantas de tratamiento de las poblaciones pequeñas, en nuestro medio, los lechos de grava ofrecen una alternativa para lograr mejores resultados a un menor costo.

Establecer la floculación en lechos porosos no sólo significa una alternativa ante los métodos de tratamiento convencionales, sino que proporciona para esta operación un nuevo método de bajo costo, fácil manejo y funcionamiento, que puede llegar a convertirse en una solución viable cuando se trate de ampliar la cobertura del suministro de agua, en especial hacia aquellas zonas, en donde por las condiciones propias del medio, no se dispone de los recursos técnicos y económicos que se requieren para operar eficientemente una planta de tratamiento con un cierto grado de complejidad y sofisticación.

Un lecho de grava con características definidas bajo condiciones de laboratorio, puede emplearse como floculador en una planta de tratamiento, por cuanto, dependiendo de las características del agua a tratar, pueden obtenerse altas eficiencias en la remoción de la turbiedad y del color, presentando, por otra parte, algunas ventajas si se le compara con los floculadores convencionales —mecánicos o hidráulicos— dado que en un sistema de floculación de esta naturaleza, se obtiene una considerable reducción en el tiempo de retención y en la pérdida de carga.

Siendo la grava un elemento de fácil consecución y los costos de construcción y mantenimiento menores, hacen que este sistema reporte beneficios económicos; cumpliendo la premisa de ampliar la cobertura y mejorar la calidad de los servicios de agua potable, al menor costo posible. De lograrse una aplicabilidad directa con este método, situamos frente a una interesante alternativa para lograr un objetivo esencial de los países en vías de desarrollo frente al reto del suministro de agua potable a su población.

MARIO ORTIZ ARCE
Ingeniero Sanitario
Profesor, Universidad Nacional de Colombia
VELMAR JESUS GONZALEZ QUINTERO
WALDO JESUS ORTIZ ROMERO

GRADIENTE PARA FLOCULADORES EN LECHO POROSO

En un floculador en lecho poroso, el gradiente de velocidad depende del tamaño de la grava, de la rata de flujo, de la pérdida de carga y del área de la

sección transversal del lecho. La ecuación derivada por Camp-Stein para el gradiente:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$$

Puede desarrollarse para obtener una ecuación que permita calcular su valor con base en las características anotadas:

$$G = \sqrt{\frac{g.v.h}{\nu}}$$

en donde:

V = volumen de mezcla, cm³

G = Gradiente en seg.⁻¹

v = Velocidad en cms/seg.

ν = Viscosidad cinemática en cms²/seg.

h = Pérdida de carga, que para medios granulares se ha definido por la ecuación de Forcheimer, contenida en los estudios de Ritcher, como:

P = Potencia promedio disipada en (gr-cm)/sg

$$h = a.v + b.v^2$$

en donde a y b son características del medio granular.

CARACTERISTICAS GRANULOMETRICAS DEL LECHO

En la ecuación de Forcheimer para el cálculo de la pérdida de carga se tienen en cuenta dos (2) parámetros, a y b, que dependen de las características granulométricas del lecho. Estos parámetros se han definido como:

$$a = \frac{0.162 (1 - P)^3 \nu}{\phi_s^2 \cdot D^2 \cdot P^3}$$

$$b = \frac{0.018 (1 - P)}{\phi_s \cdot D \cdot P^3}$$

En donde:

a = Seg./cms.

b = Seg.²/cms.²

P = Porosidad, en tanto por uno.

ν = Viscosidad cinemática en mm.²/seg.

D = Diámetro nominal en mms.

φ_s = Factor de forma.

Los términos que intervienen en el cálculo de los parámetros a y b, se pueden obtener de la manera siguiente:

P = e/(e + 1); siendo: e la relación de vacíos.

$$D = \frac{1.24}{(1.19/L + 0.35)} \text{ con } D \text{ en cms. y:}$$

L (la longitud más larga, medida directamente para cada grano) en centímetros.

$$\phi_s = \frac{4}{2E^2 + \frac{\text{Ln} \cdot (1 + \epsilon)/(1 - \epsilon)}{\epsilon E^4}}$$

con E = L/D; y ε = (1 - 4⁻⁴)^{1/2}

MODELO UTILIZADO PARA LOS ENSAYOS

El modelo, como planta piloto, empleado para la realización de los ensayos en el presente trabajo, consta principalmente de:

A. Tanque de almacenamiento del agua cruda.

Este tanque se emplea para regular el caudal del afluente de agua cruda al floculador; y para asegurar una cabeza hidráulica constante, mediante un rebosadero. El flujo de agua al modelo se realiza por gravedad.

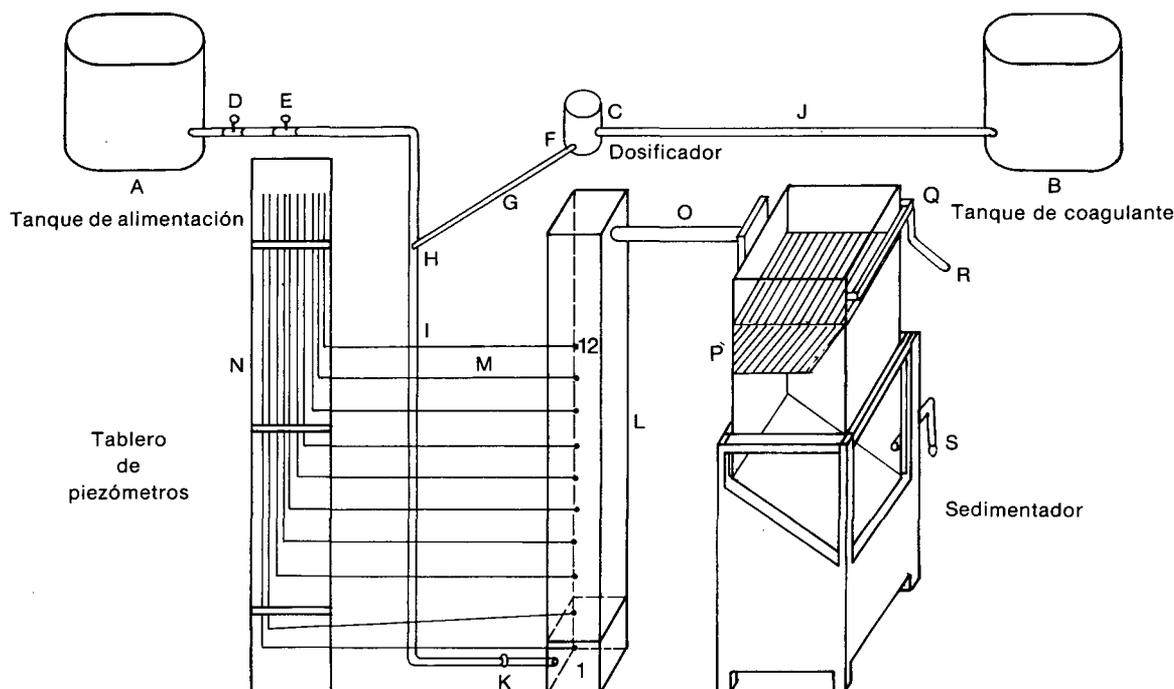


FIGURA Nº 1. Planta piloto.

B. Tanque de almacenamiento del coagulante.

De este tanque se conduce el coagulante por una conexión a la conducción del agua cruda al floculador, de modo que en una caída de aproximadamente 1.50 metros desde el punto de entrada del coagulante, hasta el punto de entrada al floculador, se produce la mezcla rápida.

C. Columna de floculación.

La columna de floculación está construida en acrílico transparente para permitir la observación del grado de colmatación, formación y característica del floc a lo largo del lecho de grava. Esta columna tiene una sección cuadrada de 0.15 metros de lado y una altura de 2.00 metros. Para uniformar el flujo a través de ella se ha provisto un falso fondo de 0.20 metros, con nueve (9) orificios simétricos. A partir del falso fondo y a lo largo de la columna, tiene un orificio cada 0.15 metros, para permitir la conexión de los piezómetros a fin de medir la pérdida de carga, y con ella, el estado de colmatación del lecho.

D. Sedimentador.

En este trabajo se utilizó un sedimentador de placas inclinadas, construido en acrílico, con una salida inferior a manera de purga de lodos, y canaletas en la parte superior para la recolección del agua tratada.

Los piezómetros conectados a la columna de floculación van sobre un tablero, para permitir la lectura directa de la pérdida de carga.

La instalación de la Planta Piloto se muestra en la figura número uno (1).

de sus características físico-químicas permite establecer el tratamiento a seguir, para entrar a evaluar luego, la operación del sistema. Este estudio, particularmente, se realizó en la planta de tratamiento del municipio de Mosquera, Cundinamarca; para la caracterización del afluente se realizaron los ensayos de turbiedad, color, alcalinidad y pH en un número estadísticamente representativo.

La funcionabilidad del sistema se evalúa con base en los parámetros siguientes: Pérdida de carga, porcentaje de remoción de turbiedad y de color, tiempo de retención y gradiente de velocidad.

En el trabajo presente se utilizaron tres (3) granulometrías con sus características definidas, manteniendo una altura del lecho de 1.60 metros, correspondientes a las fracciones:

- Pasa tamiz 1 1/2" — Retiene Tamiz 1"
- Pasa Tamiz 1" — Retiene Tamiz 3/4"
- Pasa Tamiz 3/4" — Retiene Tamiz 1/2"

No se consideraron tamaños menores a 1/2" por cuanto se presenta prefiltración en el lecho y la colmatación del mismo no permite realizar carreras de mayor duración.

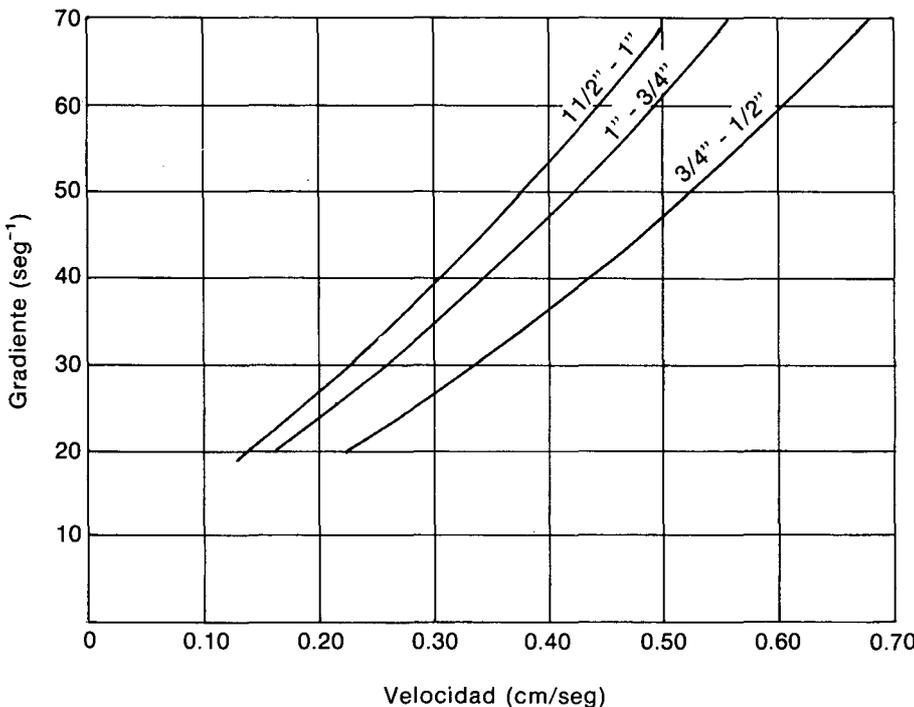
Con estas granulometrías se proyectaron nueve (9) carreras correspondientes a los gradientes de 60, 40 y 20 seg^{-1} para cada lecho. Para todas las carreras se utilizó la dosis óptima de ensayo de Jarras diario y se tomaron muestras a la salida del sedimentador, para la determinación de las características físico-químicas del agua tratada.

Operación del sistema

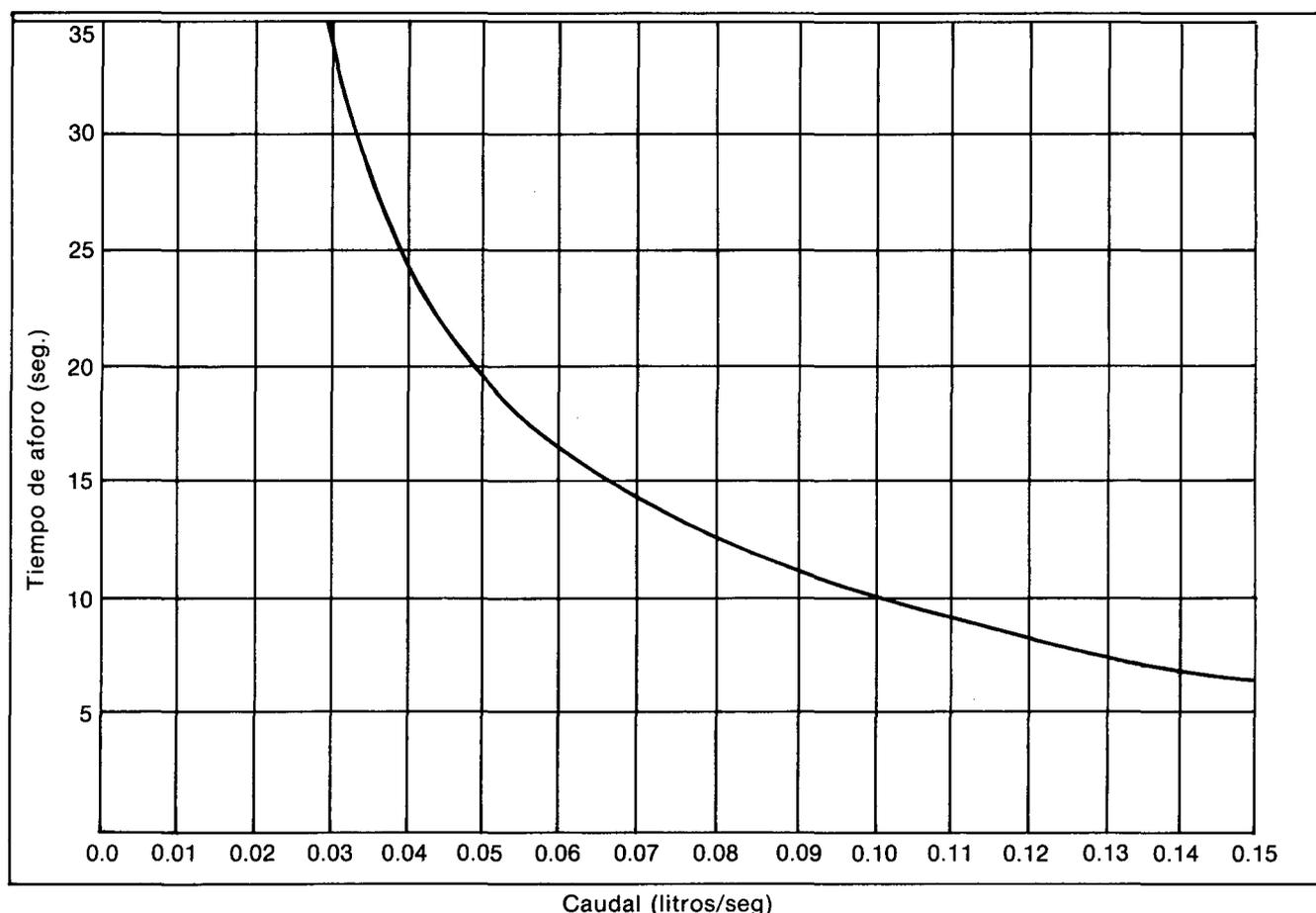
El agua afluente a la planta de tratamiento se bombea al tanque de almacenamiento del agua cruda. En este tanque se asegura la condición de

METODOLOGIA

La calidad del agua a tratar tiene una incidencia determinante en la floculación; el conocimiento



GRAFICA N° 1
Relación entre velocidad (cm/seg)
y Gradiente (seg⁻¹) para cada lecho



GRAFICA Nº 2 Correlación Caudal - Tiempo de aforo

cabeza constante mediante un rebosadero. Para cada ensayo se determina el caudal (litros por segundo), correspondiente a la rata de flujo proyectadas en M^3/M^2 -día; realizándose el flujo hacia la columna por gravedad. En la columna de floculación se pueden observar la formación de los flocs, sus características y el estado de colmatación del lecho.

La medición del tiempo de retención en el floculador se efectúa antes de la iniciación de cada ensayo, determinando el tiempo que tarda una partícula de agua en atravesar el lecho poroso. La manera más común, en la práctica, para efectuar esta determinación es mediante el empleo de trazadores. Particularmente utilizamos un colorante y medimos su paso a través del lecho, tomando como el tiempo de retención, el período que transcurre entre la aparición de la máxima concentración del colorante a la entrada del floculador y a la salida del mismo.

Para establecer la eficiencia del sistema, se toman muestras del agua cruda y del agua tratada y se miden, en ambos casos, los mismos parámetros para establecer las comparaciones respectivas. Las muestras del agua tratada se toman a la salida del sedimentador a intervalos de una hora. A estas muestras se les aplican los ensayos de turbiedad, color, pH y alcalinidad.

La pérdida de carga permite establecer el grado de colmatación del lecho poroso; se evalúa cada una (1) o dos (2) horas, con base en las lecturas piezométricas. De este modo se puede conocer la pérdida de carga para cada uno de los piezómetros.

ANÁLISIS Y EVALUACION DE RESULTADOS

Dentro de los objetivos que motivaron la realización del presente estudio, se considera en primer término, la funcionalidad de un lecho poroso como floculador, evaluada con base en los aspectos que gobiernan su comportamiento, mencionados anteriormente. Por otra parte debe destacarse el tipo de granulometría más adecuado, que permita la optimización del funcionamiento del floculador. Son estos aspectos de especial interés para entrar a detallar a continuación, de acuerdo con lo observado en el transcurso de los ensayos realizados y con los resultados obtenidos.

Pérdida de carga

La rata de flujo influye en la pérdida de carga y, por ende, en la carrera; se nota que para ratas de trabajo superiores a los $250 M^3/M^2$ -día, la pérdida de carga es mayor (en razón a la mayor presión ejercida en el lecho), y durante la duración del ensayo se produce una cierta colmatación; en tanto que siendo las ratas de

trabajo del orden de 100 M³/M²-día, el lecho se colmata más rápidamente, estabilizándose la pérdida de carga como indicativo de su colmatación.

Se han graficado los datos de pérdida de carga en función del tiempo de funcionamiento del floculador, encontrándose una tendencia a la variación escalonada, independientemente de la rata de trabajo. Se ha tratado de explicar este escalonamiento por la expansión cíclica del lecho, durante su funcionamiento. Al expandirse las capas superiores debido a la presión ejercida desde abajo por una incipiente colmatación, deja pasar los flocs retenidos y la pérdida de carga tiende a estabilizarse, para luego aumentar al quedar retenidos nuevos flocs en el lecho.

Eficiencia en la remoción de turbiedad y de color

La turbiedad y el color residuales, como porcentaje de la turbiedad y del color del afluente al floculador respectivamente, dan una medida de la eficiencia del lecho poroso como floculador para plantas de tratamiento de agua potable. La remoción del color y de la turbiedad constituyen los objetivos más inmediatos de la floculación, y son los parámetros que determinan la eficacia del proceso; y en este caso, determinan y comprueban la funcionalidad de este sistema. En efecto, si se observan las tablas en donde se consignan las características del agua floculada y sedimentada, se encuentra que el promedio de remoción de turbiedad y de color, para todos los ensayos, es de 76.52% y de 67.7%. Esto como promedio, no deja duda de que es un buen inicio para el propósito de determinar un lecho óptimo que dé el mejor rendimiento en el proceso de clarificación del agua.

Se observa, además, que las ratas correspondientes a gradientes altos, dan eficiencias mayores, como se indica en la respectiva tabla, donde se ha condensado para cada ensayo, la eficiencia en la clarificación, cuantificada como porcentajes de remoción de turbiedad y de color. Por ejemplo, para una rata de 377 M³/M²-día, (gradiente de 60 seg⁻¹), la eficiencia en la remoción de turbiedad es de 83.2% y de color es de 70.0%.

Características de la floculación

Se observó para cada ensayo, qué características presentaba el floc, en lo referente a su tamaño, velocidad de sedimentación y abundancia en su

formación. Dentro de estos aspectos lo más destacable puede resumirse así:

Para las ratas correspondientes a los gradientes altos, se presenta un floc grande, fácilmente sedimentable, con poca o escasa acumulación a la salida del floculador; pues la velocidad del agua lo lleva fácilmente al sedimentador de placas inclinadas, en donde se forma, en corto tiempo, un depósito de lodos. Este hecho permite llegar a la conclusión de que para ratas altas se proyectan carreras más amplias, puesto que el continuo arrastre de los flocs no permite la colmatación rápida del lecho, redundante esto en un mayor rendimiento.

Para las ratas correspondientes a los gradientes bajos, se forma algo que bien podríamos denominar microflocs, pues a lo largo del lecho se puede notar la formación de un floc pequeño, retenido en los poros del lecho y que se acumula a la salida del floculador. Esto conlleva a que la duración de la carrera sea menor (la pérdida de carga se estabiliza más rápidamente) y a que se disminuya la eficacia del proceso, puesto que estos flocs no son de rápida sedimentación.

Tiempo de retención

El tiempo de retención se calcula mediante la expresión siguiente: $t_{ret} = (v/L) \cdot P$ (seg.)

en donde:

t_{ret} = Tiempo de retención en el floculador, en seg.

L = Longitud del lecho, en centímetros.

v = Velocidad media de flujo, en cms/seg.

P = Porosidad del lecho, en tanto por uno.

Con esta expresión se calculan los tiempos de retención para cada ensayo, para compararlos con los medidos en la práctica, observando que no se presenta una diferencia notable; de donde se concluye que esta expresión se puede utilizar a fe de su comprobación práctica.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de los resultados que el presente estudio arrojó sobre la floculación con lechos porosos, puede concluirse y se comprueba, una vez más, la eficiencia de este sistema; anotando que se obtuvieron porcentajes de remoción de turbiedad del orden de 83.3% y de remoción de color del 70%.

Se insiste en que la calidad del agua es factor deter-

TABLA I
Características físicas y geométricas del lecho

Fracción	G _s	L (mm.)	D (mm.)	E	ε	P	φ _s	a	b
1 1/2" - 1"	2.53	39.20	18.97	2.066	0.100	0.41	0.4405	1.14 × 10 ⁻²	1.843 × 10 ⁻²
1" - 3/4"	2.54	30.109	16.64	1.9675	0.100	0.422	0.5346	8.873 × 10 ⁻²	1.556 × 10 ⁻²
3/4" - 1/2"	2.58	24.32	14.776	1.646	0.999	0.437	0.7381	5.044 × 10 ⁻³	1.14 × 10 ⁻²

minante para preestablecer ciertas variables dentro del tratamiento, tales como dosis y tipo de coagulante, por ejemplo. Aunque dentro de la teoría de la floculación en lechos porosos, existen parámetros que mantienen una tendencia afín, independientes de la calidad del agua a tratar, la Planta Piloto adquiere una importancia especial, por cuanto su aplicabilidad es directa y centrada en un proyecto específico. Antes de recomendar este sistema de floculación, se debe tener en cuenta su importancia y se hace necesario proyectar ensayos para una propuesta de diseño. A continuación, se enuncian las conclusiones que particularmente se extraen del trabajo presente en lo referente a los factores inherentes a la floculación con lecho poroso.

Lecho de grava

Para evitar prefiltración con la consiguiente colmatación del lecho de una manera rápida, deben preferirse granulometrías por encima de 3/4". Nótese la reducción de la eficiencia de la remoción de turbiedad y de color para el lecho número tres (3), (fracción 3/4" - 1/2"), en donde se presenta sólo una buena eficiencia para la rata de trabajo más baja, por prefiltración en el lecho; pero en este caso la colmatación del lecho no permite carreras de mayor duración. Nótese que:

- Fracción: 1 1/2" - 1"
Remoción de turbiedad promedio: 81.3' (para todos los ensayos).
Remoción de color promedio: 68.9%.
- Fracción: 1" - 3/4"
Remoción de turbiedad promedio: 82.9%.

Remoción de color promedio: 65.8%.

— Fracción: 3/4" - 1/2":

Remoción de turbiedad promedio: 65.4%

Remoción de color promedio: 68.6%

Tiempo de retención

El tiempo de retención, para este experimento, oscila entre los 90 y los 600 segundos, (1.5 a 10 minutos). Esto representa con respecto a los floculadores convencionales una reducción hasta del 66.6% (Mark Hammer recomienda para floculadores convencionales tiempos de retención no menores de 30 minutos).

Rata de flujo

Hemos determinado que la rata de flujo para el óptimo funcionamiento del floculador debe ser alta para este tipo de agua, pues permite el continuo arrastre de los flocs hacia el sedimentador, evitándose así, una pronta colmatación del lecho, lo que ocasionaría un lavado frecuente.

Si bien es cierto que se recomienda aumentar la altura de agua sobre el lecho para evitar la colmatación del mismo, cuando se trabaja con ratas bajas, con las ratas altas se produce un floc pesado y fácilmente sedimentable; en tanto que para ratas bajas se produce un floc muy pequeño, microfloc.

Recomendamos para el tratamiento con ratas bajas, menores de 100 M³/M²-día, eliminar la sedimentación y llevar el agua con los microflocs directamente a la filtración, para que sean retenidos por los filtros y se obtenga una clarificación con mayores resultados satisfactorios.

TABLA II
Floculación en lecho poroso

Fecha 08-V-84

Ensayo Nº 1

Características del lecho						Parámetros del ensayo			
Fracción	G _s	L (mm.)	D (mm.)	a (seg/cm)	b (seg ² /cm ²)	Rata (M ³ /M ²)día	G (cm/seg)	V (cm/seg-1)	t _{retencion} (seg)
1 1/2"-1"	2.53	39.20	18.97	1.141 × 10 ⁻²	1.84 × 10 ⁻²	377	60	0.436	120

Hora	Lecturas piezométricas (cm)												Características de la muestra				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Nivel	UT	Color	pH	Alcalin.
0	174.3	170.5	170.7	170.5	170.6	170.6	170.7	170.9	170.9	170.9	170.7	170.6	170.5	2.6	50	6.68	180
1	174.4	170.7	170.8	170.6	170.8	170.9	170.9	171.0	171.0	170.9	170.9	170.6	170.5	4.2	10	6.54	140
2	175.0	170.7	170.9	170.8	170.9	170.9	170.9	171.0	171.0	171.0	171.0	170.8	170.5	4.1	10	6.53	134
3	175.5	170.8	170.9	170.9	170.9	170.9	171.0	171.0	171.0	171.0	171.0	170.9	170.5	4.7	15	6.57	140
4	176.4	170.9	170.9	171.0	171.0	171.0	171.0	171.0	171.0	171.1	171.0	170.9	170.5	5.3	30	6.15	167
5	178.9	171.0	171.0	171.0	171.0	171.0	171.0	171.0	171.0	171.2	171.0	171.0	170.5	6.4	20	6.47	136
22	180.2	171.0	171.0	171.0	171.0	171.0	171.0	171.0	171.1	171.2	171.2	171.0	170.5	5.0	25	6.33	110
23														5.5	20	6.62	156
24														4.5	10	6.14	92
25	180.6	171.0	171.0	171.0	171.1	171.0	171.1	171.0	171.1	171.3	171.2	171.0	170.5	2.0	10	6.56	150
26	181.0	171.0	171.0	171.0	171.1	171.1	171.1	171.1	171.1	171.3	171.2	171.0	170.5	3.5	10	6.36	112
27	184.2	171.0	171.0	171.0	171.1	171.1	171.1	171.2	171.2	171.3	171.2	171.0	170.5	5.6	15	6.38	130
28	184.4	171.0	171.1	171.0	171.1	171.1	171.2	171.2	171.3	171.4	171.2	171.0	170.5	6.5	15	6.35	120
29	184.6	171.0	171.2	171.1	171.1	171.2	171.3	171.2	171.3	171.4	171.3	171.1	170.5	5.5	15	6.48	136
48	185.0	171.1	171.2	171.2	171.2	171.3	171.3	171.2	171.3	171.4	171.3	171.1	170.5	3.5	20	6.42	130
49	185.5	171.1	171.2	171.3	171.3	171.3	171.3	171.3	171.4	171.4	171.3	171.1	170.5	3.5	15	6.50	140
50	186.0	171.1	171.3	171.3	171.4	171.3	171.4	171.4	171.4	171.4	171.4	171.3	170.5	3.8	10	6.31	110
51	186.9	171.2	171.3	171.3	171.4	171.4	171.4	171.4	171.4	171.5	171.4	171.4	170.5	3.0	15	6.41	120
52	189.0	171.2	171.4	171.3	171.4	171.4	171.4	171.4	171.4	171.5	171.5	171.4	170.5	5.0	10	6.20	100
53	189.2	171.5	171.5	171.5	171.5	171.6	171.6	171.6	171.6	171.6	171.6	171.4	170.5	5.2	5	6.00	80

TABLA III
Pérdida de carga en los piezómetros 2 - 7 - 12

Ensayo Nº 1 Fracción 11/2" - 1"
Rata (M³/M² día) 377

Tiempo en horas	Pérdida de carga Cms		
	2	7	12
0	3.8	3.6	3.7
1	3.7	3.5	3.8
2	4.3	4.1	4.2
3	4.7	4.5	4.6
4	5.5	5.4	5.5
5	7.9	7.9	7.9
22	9.2	9.2	9.2
25	9.6	9.5	9.6
26	13.2	9.9	10.0
27	10.2	13.1	13.2
28	13.4	13.2	13.4
29	13.6	13.3	13.5
48	13.9	13.7	13.9
49	14.4	14.2	14.4
50	14.9	14.6	14.7
51	15.7	15.5	15.5
52	17.8	17.6	17.6
53	17.7	17.8	17.8

TABLA IV
Remoción de turbiedad y de color

Ensayo Nº 1 Fracción 11/2" - 1"
Rata (M³/M²-día) 377

Agua cruda			
Turb. inic.	Color inic.	pH	Alcal.
26	50	6.67	183

Agua tratada					
Turb.	Color	pH	Alcal.	Remoc. turb.	Remoc. color
4.36	15	6.38	125.5	83.2%	70.0%

Tiempo en horas	Turb. eflu.	Color eflu.	Remoc. turb. %	Remoc. color %
0	—	—	—	—
1	4.2	10	83.8	80.0
2	4.1	10	84.2	80.0
3	4.7	15	81.9	70.0
4	5.3	30	79.6	40.0
5	6.4	20	75.3	60.0
22	5.0	25	80.8	50.0
23	5.5	20	78.8	60.0
24	4.5	10	82.6	80.0
25	2.0	10	92.3	80.0
26	3.5	10	86.5	80.8
27	5.6	15	78.4	70.0
28	6.5	15	75.0	70.0
29	5.5	15	78.8	70.0
48	3.5	20	86.5	60.0
49	3.5	15	86.5	70.0
50	3.8	10	85.4	80.0
51	3.0	15	88.6	70.0
52	3.0	10	88.6	80.0
53	3.2	5	88.7	90.0

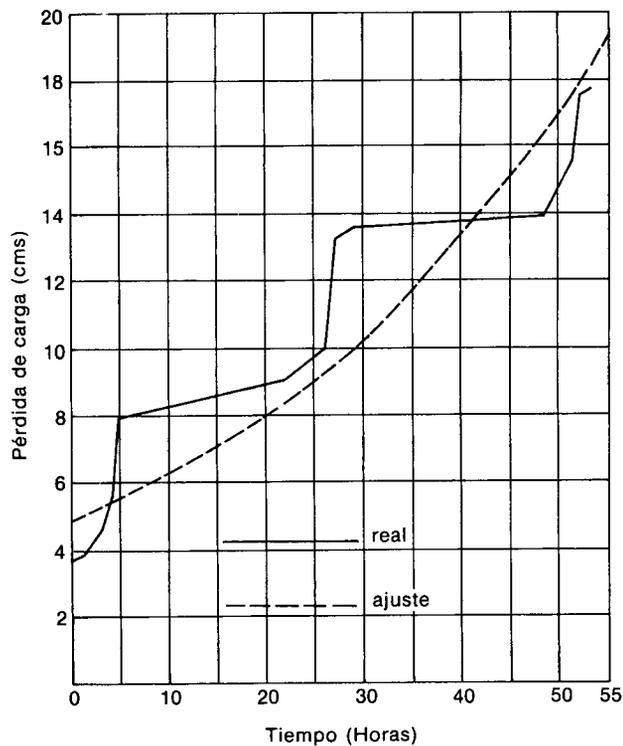
Pérdida de carga

Para la pérdida de carga, se obtuvo una correlación exponencial con el tiempo de funcionamiento y la rata de trabajo, como se aprecia en las gráficas números 6, 10 y 14.

En estas gráficas se aprecia el aumento de la pérdida de carga con el tiempo de funcionamiento, como era de esperarse, por la colmatación del lecho poroso.

Obtener una correlación múltiple para la pérdida de carga, con el tiempo de funcionamiento y la rata de flujo, sería un resultado interesante, disponiéndose para esto de un mayor número de ensayos.

Sin embargo, se presentan a consideración los



Pérdida de carga para la carrera

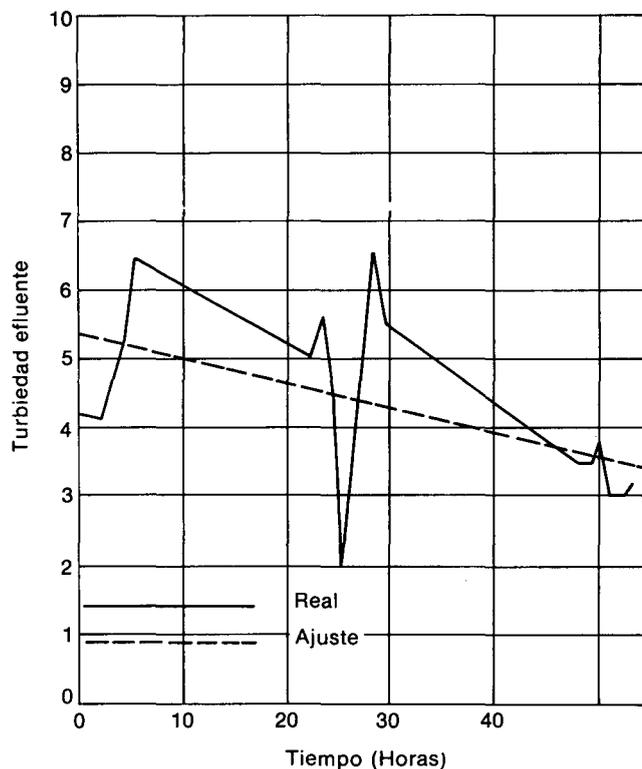
Ensayo Nº 1
Rata: 377 M³/M² - día

ajustes para la rata más alta, en cada uno de los lechos ensayados, de la pérdida de carga, en función del tiempo de funcionamiento del floculador:

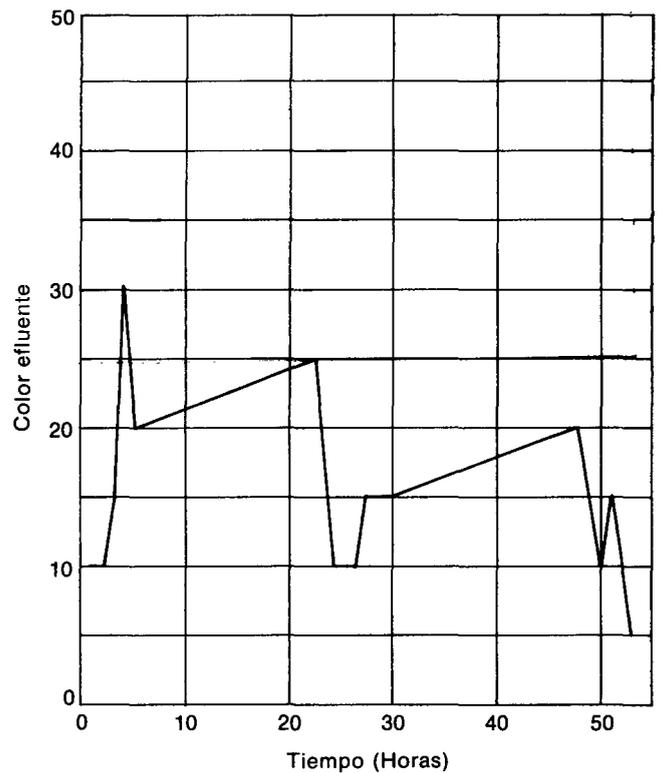
- Lecho 1 1/2" - 1"
 $hf = 3.55 \cdot t^{0.37}$; con $r^2 = 0.94368$
- Lecho 1" - 3/4"
 $hf = 4.896 \cdot t^{0.13}$; con $r^2 = 0.95363$
- Lecho 3/4" - 1/2":
 $hf = 15.80 \cdot (1.018^t)$; con $r^2 = 0.49225$

En donde:

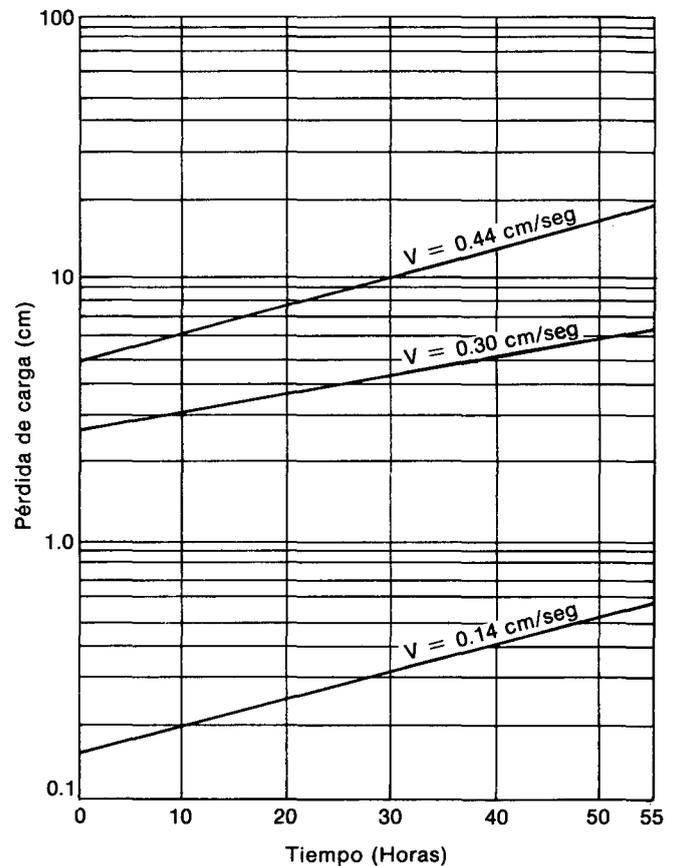
hf = Pérdida de carga en centímetros.
 t = Tiempo de funcionamiento en horas.



GRAFICA Nº 4 Turbiedad efluente durante la carrera
 Ensayo Nº 1
 Turbiedad inicial: 26 UT
 Dosis de coagulante: 120 mg./litro



GRAFICA Nº 5. Color efluente durante la carrera
 Ensayo Nº 1
 Color inicial: 50
 Dosis de coagulante: 120 mg./litro



GRAFICA Nº 6 Correlación Pérdida de carga - Tiempo para las velocidades proyectadas.
 Lecho: 1 1/2" - 1"

TABLA V
Floculación en lecho poroso

Fecha 03-V-84
Ensayo N° 4

Características del lecho					Parámetros del ensayo				
Fracción	G _s	L (mm)	D (mm)	a (seg/cm)	b (seg ² /cm ²)	Rata (M ³ /M ² -día)	G (seg ⁻¹)	V (cm/seg)	t _{retención} (seg)
1" - 3/4"	2.54	30.109	16.64	8.873 × 10 ⁻²	1.556 × 10 ⁻²	419	60	0.485	90

Lecturas piezométricas (cm)														Características de la muestra			
Hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Nivel	UT	Color	pH	Alcalin.
0	176.0	171.2	171.1	171.2	171.2	171.3	171.3	171.2	171.3	171.4	171.2	170.8	171.0	18	40	6.55	160
1	176.1	171.3	171.4	171.2	171.2	171.3	171.3	171.2	171.3	171.3	171.0	171.0	171.0	5.0	20	6.28	132
2	176.2	171.4	171.4	171.4	171.4	171.4	171.3	171.3	171.3	171.3	171.2	170.9	171.0	5.6	40	6.65	160
3	176.4	171.5	171.5	171.4	171.5	171.4	171.5	171.5	171.5	171.4	171.4	171.0	171.0	5.2	15	6.54	144
4	176.5	171.6	171.6	171.5	171.5	171.4	171.4	171.4	171.5	171.5	171.5	170.9	171.0	3.9	15	6.26	134
5	176.5	171.5	171.5	171.4	171.5	172.4	171.5	171.5	171.5	171.5	171.5	171.0	171.0	3.9	15	6.52	140
6	176.8	171.6	171.6	171.5	171.5	171.4	171.5	171.5	171.5	171.4	171.2	170.8	171.0	3.6	5	6.31	120
24	176.9	171.6	171.6	171.6	171.6	171.5	171.5	171.6	171.6	171.6	171.2	170.8	171.0	3.4	10	6.44	122
25	177.0	171.5	171.5	171.4	171.5	171.5	171.5	171.6	171.7	171.7	171.4	170.8	171.0	3.5	10	6.51	130
26	178.0	171.9	171.9	171.8	171.7	171.5	171.6	171.6	171.6	171.7	171.4	171.1	171.0	3.0	10	6.50	130
27	178.4	171.6	171.6	171.6	171.6	171.7	171.8	171.7	171.6	171.7	171.5	171.0	171.0	3.8	5	6.39	120
28	178.5	171.6	171.6	171.6	171.6	171.7	171.8	171.7	171.6	171.7	171.5	171.0	171.0	3.8	5	6.38	120
29	178.5	171.8	171.8	171.7	171.7	171.6	171.8	171.9	171.9	171.9	171.7	171.0	171.0	2.5	10	6.37	110
30	178.7	171.9	171.8	171.8	171.8	171.6	171.7	171.8	171.7	171.6	171.3	171.0	171.0	2.6	5	6.31	100
48	179.3	172.0	172.0	172.0	171.9	171.8	171.8	171.9	171.8	171.7	171.5	170.9	171.0	2.5	5	6.23	124
49	179.5	171.9	171.9	171.8	171.9	171.8	171.8	171.9	171.9	171.6	171.6	171.0	171.0	2.7	10	6.50	130
50	179.6	172.0	172.0	172.1	172.1	172.1	172.1	172.1	172.1	171.8	171.9	171.0	171.0	1.8	15	6.30	124
51	179.8	172.0	172.0	172.1	172.0	172.0	172.1	172.0	171.9	171.9	171.9	171.0	171.0	2.0	5	6.38	112
52	180.1	172.1	172.1	172.1	172.0	172.0	172.1	172.0	171.9	171.9	171.9	171.0	171.0	2.5	20	6.36	150
53	180.2	172.2	172.2	172.1	172.0	172.0	172.1	172.0	171.9	171.9	171.9	170.9	171.0	4.5	5	6.32	110
54	180.2	172.2	172.2	172.1	172.0	172.0	172.1	172.0	172.9	171.9	171.9	170.9	171.0	4.0	10	6.34	112

TABLA VI
Pérdida de carga en los piezómetros 2 - 7 - 12

Ensayo N° 4 Fracción 1" - 3/4"
Rata (M³/M²-día) = 419

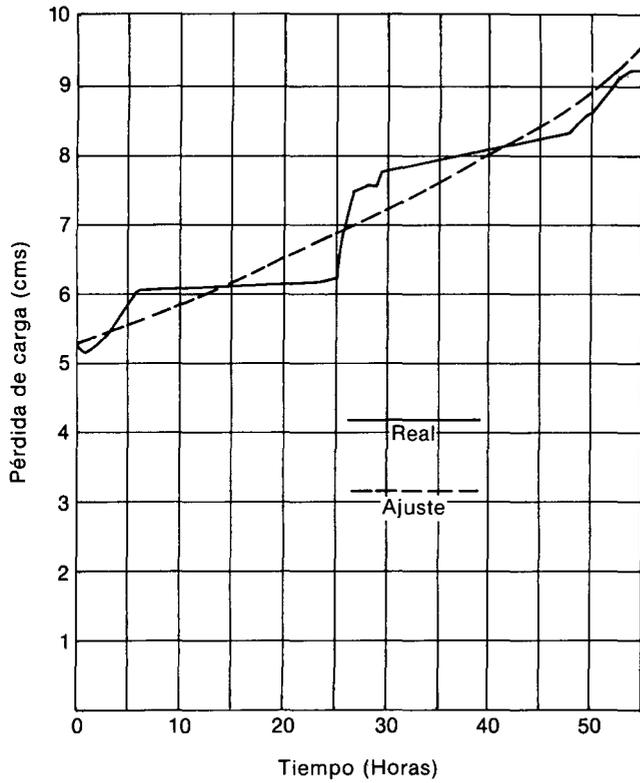
Tiempo en horas	Pérdida de carga Cms		
	2	7	12
0	4.8	4.7	5.2
1	4.8	4.8	5.1
3	4.8	4.9	5.3
4	4.9	5.0	5.5
5	5.0	5.0	5.5
6	5.2	5.3	6.0
24	5.3	5.4	6.1
25	5.5	5.5	6.2
26	6.1	6.4	6.9
27	6.8	6.6	7.4
28	6.9	6.7	7.5
29	6.9	6.7	7.5
30	6.8	7.6	7.7
48	7.3	7.5	8.3
49	7.6	7.7	8.5
50	7.6	7.5	8.6
51	7.8	7.7	8.8
52	8.0	8.0	9.1
53	8.0	8.1	9.2
54	8.0	8.1	9.2

Agua cruda					
Turb. inic.	Color inic.	pH	Alcal.		
21	50	6.64	166		
Agua tratada					
Turb.	Color	pH	Alcal.	Remoc. turb.	Remoc. color
3.5	10	6.42	125	83.3%	80.0%

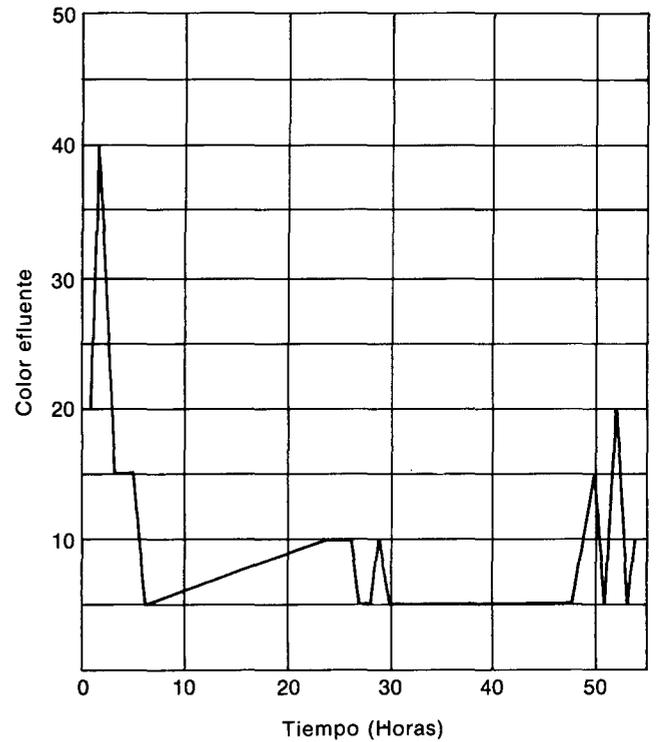
Tiempo en Horas	Turb. eflu.	Color Eflu.	Remoc. turb. %	Remoc. Color %
0				
1	5.0	20	77.27	66.66
2	5.6	40	74.54	33.33
3	5.2	15	76.36	75.00
4	3.9	15	82.27	75.00
5	3.9	15	82.27	75.00
6	3.6	5	83.64	91.66
24	3.4	10	84.54	83.33
25	3.5	10	84.09	83.33
26	3.0	10	86.36	83.33
27	3.8	5	82.73	91.66
28	3.8	5	82.73	91.66
29	2.5	10	88.63	83.33
30	2.6	5	88.18	91.66
48	2.5	5	88.63	91.66
49	2.7	10	87.73	83.33
50	1.8	15	91.82	75.00
51	2.0	5	90.90	91.66
52	2.5	20	88.63	66.66
53	4.5	5	79.54	91.66
54	4.0	10	81.81	83.33

TABLA VII
Remoción de turbiedad y de color

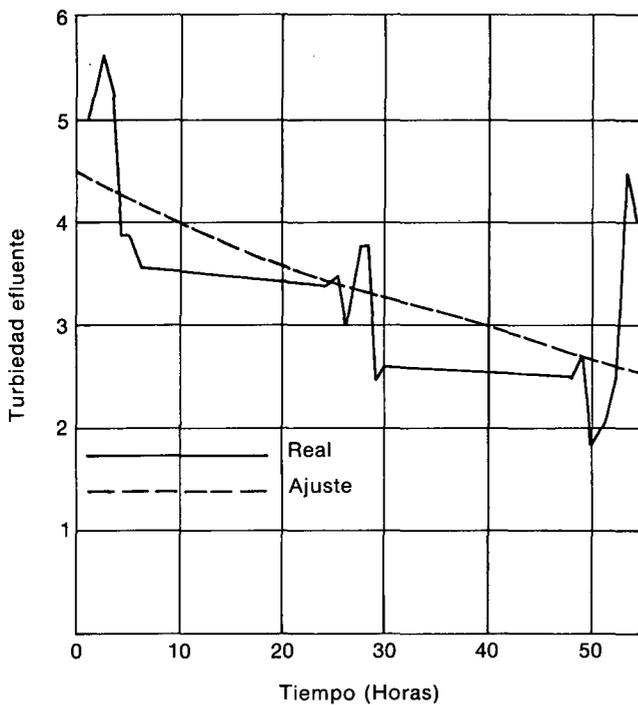
Ensayo N° 4 Fracción 1" - 3/4"
Rata (M³/M²-día) = 419



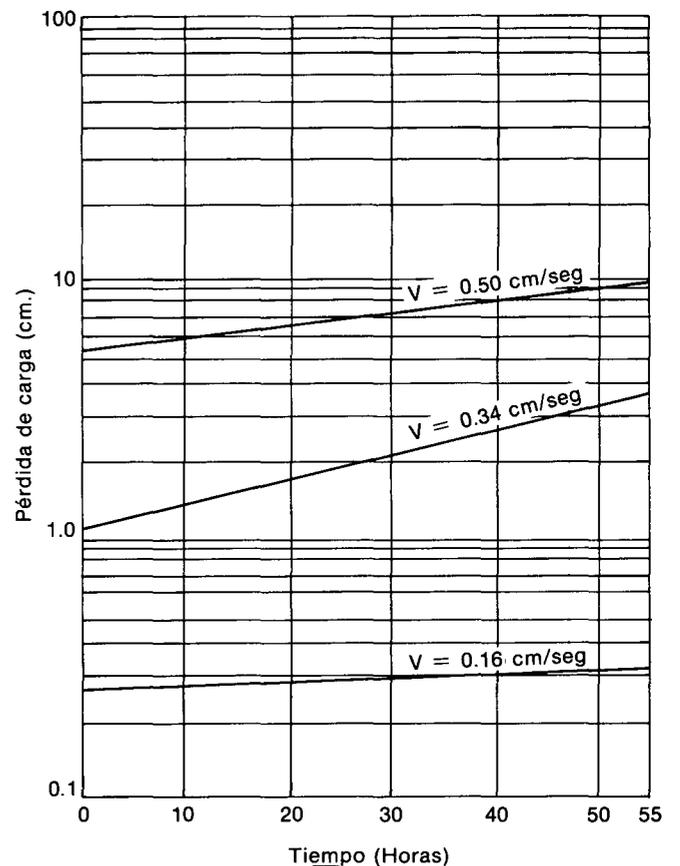
GRAFICA Nº 7 Pérdida de carga para la carrera
Ensayo Nº 4
 Rata: 419 (M³/M²-día)



GRAFICA Nº 9 Color efluente durante la carrera
Ensayo Nº 4
 Color inicial: 50
 Dosis de coagulante: 120 mg./litro



GRAFICA Nº 8 Turbiedad efluente durante la carrera
Ensayo Nº 4
 Turbiedad inicial: 21 UT
 Dosis de coagulante: 120 mg./litro



GRAFICA Nº 10 Correlación Pérdida de carga - Tiempo para velocidades proyectadas
 Lecho: 1" - 3/4"

TABLA VIII
Floculación en lecho poroso

Fecha 06-VI-84
Ensayo Nº 7

Características del lecho						Parámetros del ensayo			
Fracción	G _s	L (mm)	D (mm)	a (seg/cm)	b (seg ² /cm ²)	Rata (M ³ /M ² día)	G (seg ⁻¹)	V (cm/seg)	t _{retención} (seg)
3/4" - 1/2"	2.58	24.32	14.776	5.044 × 10 ⁻³	1.14 × 10 ⁻²	514	60	0.595	186

Hora	Lecturas piezométricas (cm)												Características de la muestra				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Nivel	UT	Color	pH	Alcalin.
0	188.5	172.0	172.0	172.0	172.0	172.0	172.0	171.9	171.9	171.9	171.8	171.3	170.5	—	—	—	—
1	189.5	172.0	172.0	172.0	172.0	172.1	171.9	171.8	171.8	171.8	171.8	171.5	170.5	4.9	50	6.75	160
3	190.2	172.1	172.1	172.1	172.0	172.0	172.0	171.9	171.9	171.8	171.8	171.3	170.5	5.5	25	6.56	138
5	190.5	172.2	172.2	172.2	172.1	172.1	172.1	172.1	172.0	172.0	171.7	171.2	170.5	3.9	20	6.63	140
7														3.5	15	6.43	124
26	191.5	172.4	172.5	172.4	172.5	172.4	172.4	172.3	172.2	172.2	172.0	171.0	170.5	3.8	20	6.74	210
27														3.9	15	6.36	124
28	191.5	172.6	172.7	172.6	172.6	172.4	172.5	172.4	172.4	172.3	172.2	171.4	170.5	3.5	15	6.36	120
29	194.5	173.0	172.9	172.8	172.6	172.5	172.5	172.4	172.1	172.0	172.0	171.3	170.5	3.8	15	6.38	124
30	194.6	173.0	173.0	172.9	172.7	172.7	172.6	172.5	172.5	172.3	171.9	171.1	170.5	3.2	20	6.36	120
46	196.2	173.9	173.8	173.4	173.2	173.2	173.0	173.0	172.6	172.4	172.0	171.4	170.5	3.9	15	6.66	110
48	197.7	174.5	174.2	173.9	173.8	173.4	173.4	173.2	172.9	172.5	172.1	171.2	170.5	4.2	15	6.52	116
50	204.2	175.0	174.8	174.4	174.0	173.8	173.7	173.4	173.0	172.7	172.5	171.3	170.5	4.0	20	6.12	120
52	207.4	175.5	175.0	174.5	174.4	174.0	173.8	173.5	173.2	173.0	172.5	171.3	170.5	3.5	10	6.91	130
53	208.7	175.6	175.2	174.6	174.5	174.1	173.9	173.7	173.3	173.1	172.5	171.3	170.5	3.2	10	6.70	136
54	300.2	176.1	175.5	175.0	174.9	174.4	174.2	173.9	173.5	173.1	172.5	171.3	170.5	3.6	15	6.56	110

TABLA X
Remoción de turbiedad y de color

Ensayo Nº 7 Fracción 3/4" - 1/2"
Rata (M³/M²-día) 514.00

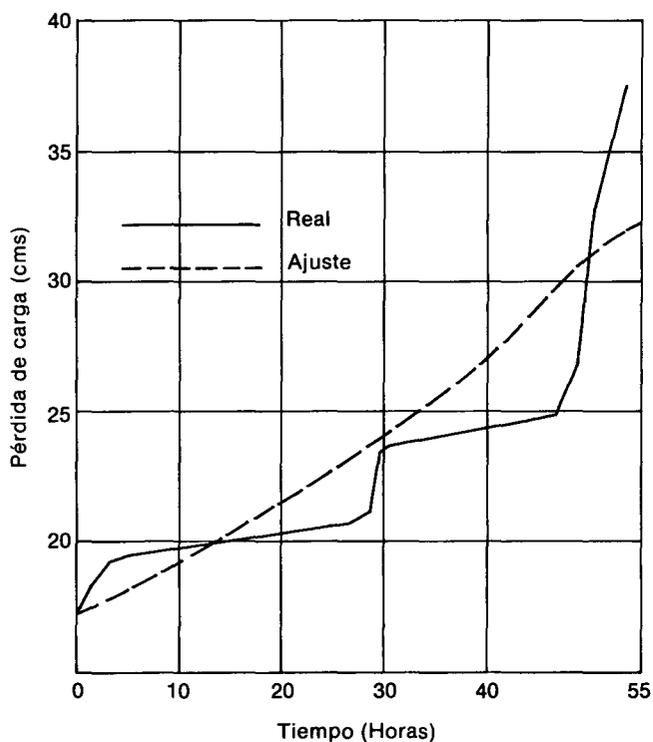
Agua cruda					
Turb. inic.	Color inic.	pH	Alcal.		
16	60	6.90	190		
Agua tratada					
Turb.	Color	pH	Alcal.	Remoc. turb.	Remoc. color
3.9	18	6.54	132	75.6%	70.0%

TABLA IX
Pérdida de carga en los piezómetros 2 - 7 - 12

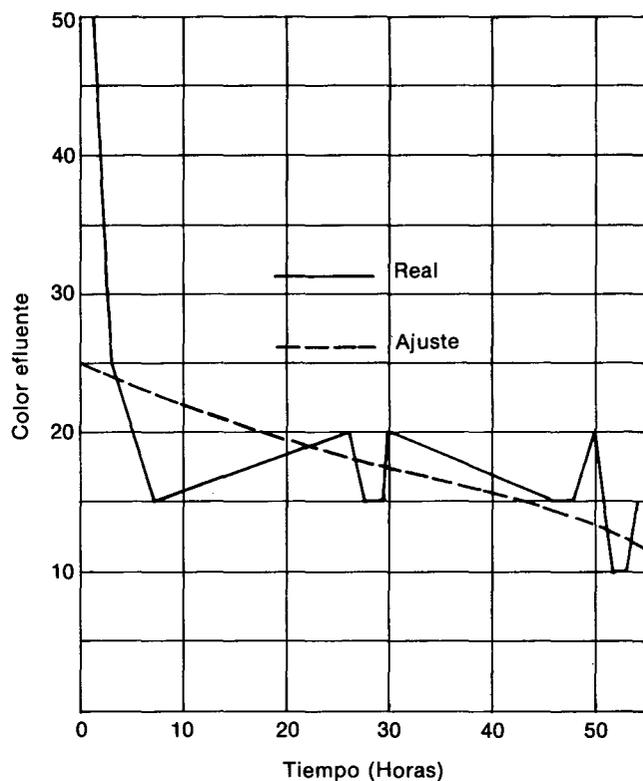
Ensayo Nº 7 Fracción 3/4" - 1/2"
Rata (M³/M²-día) 514

Tiempo en horas	Pérdida de carga Cms.		
	2	7	12
0			
1	16.5	16.5	17.2
3	17.5	17.6	18.0
5	18.1	18.2	18.9
7	18.3	18.4	19.3
26	19.1	19.1	20.5
28	18.9	19.0	20.1
29	21.5	22.0	23.2
30	21.6	22.0	23.5
46	22.3	23.2	24.8
48	23.2	24.3	26.5
50	29.2	30.5	32.9
52	31.9	33.6	36.1
53	33.1	34.8	37.4
54	124.1	126.0	128.9

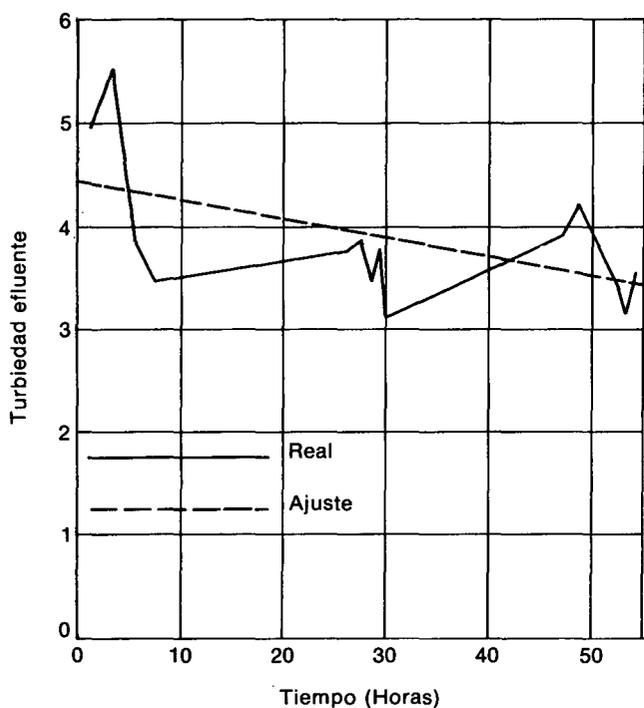
Tiempo en horas	Turb. eflu.	Color eflu.	Remoc. turb. %	Remoc. color %
0				
1	4.9	50	69.38	16.7
3	5.5	25	65.63	58.33
5	3.9	20	75.63	66.67
7	3.5	15	78.13	75.00
26	3.8	20	75.63	66.67
27	3.9	15	75.63	75.00
28	3.5	15	78.12	75.00
29	3.8	15	76.25	75.00
30	3.2	20	80.0	66.67
46	3.9	15	75.62	75.00
48	4.2	15	73.75	75.00
50	4.0	20	75.00	66.67
52	3.5	10	78.12	83.33
53	3.2	10	80.00	83.33
54	3.6	15	77.5	75.00



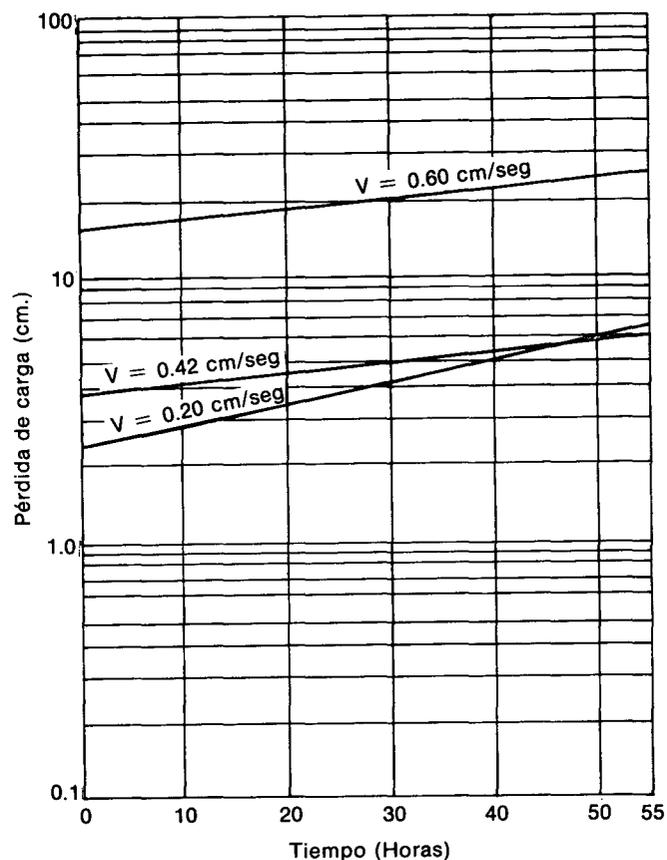
GRAFICA N° 11 Pérdida de carga para la carrera
 Ensayo N° 7
 Rata: 514 (M³/M² - día)



GRAFICA N° 13 Color efluente durante la carrera
 Ensayo N° 7
 Color inicial: 60
 Dosis de coagulante: 120 mg./litro



GRAFICA N° 12 Turbiedad efluente durante la carrera
 Ensayo N° 7
 Turbiedad inicial: 16 UT
 Dosis de coagulante: 120 mg./litro



GRAFICA N° 14
 Correlación Pérdida de carga - Tiempo
 para velocidades proyectadas
 Lecho: 3/4" - 1/2"

TABLA XI
Remoción
de
turbiedad - Color

Ensayo	Fracción	Rata	% UT	% C
1	1 1/2" - 1"	377	83.2	70.0
2		255	84.9	70.0
3		117	75.7	66.6
4	1" - 3/4"	419	83.3	80.0
5		292	82.2	50.0
6		100	83.2	67.3
7	3/4" - 1/2"	514	75.6	70.0
8		366	38.5	67.1
9		192	82.1	68.7

TABLA XII
Tiempo de retención medido
Vs.
Tiempo de retención calculado

Ensayo	Fracción	Rata	tr med.	tr calc.
1	1 1/2" - 1"	377	120	150
2		255	240	222
3		117	600	482
4	1" - 3/4"	419	90	138.5
5		292	180	198.8
6		100	570	417
7	3/4" - 1/2"	514	186	117.5
8		366	205	165.3
9		192	355	315

BIBLIOGRAFIA

1. ARBOLEDA V. Jorge. *Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua*. CEPIS, Lima, 1973.
2. FAIR, GEYER, OKUN. *Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales*. Editorial Limusa, México, 1981.
3. HAMMER, Mark. *Water Waste - Water technology*. John Wiley & Sons Inc, New York, 1975.
4. RITCHER, Carlos. *Water treatment for small communities*.