

FLOCULADOR HIDRÁULICO DE FLUJO VERTICAL TIPO COX

JORGE ARTURO PEREZ PARRA

Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil

Facultad de Minas, Universidad Nacional, sede Medellín

RESUMEN

El presente trabajo tiene por objeto el estudio experimental de un floculador hidráulico tipo Cox, con base en un modelo construido en el laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Minas. El modelo es evaluado para diferentes condiciones de gradiente de velocidad y tiempo de floculación para un amplio rango de turbiedades. Se estable una relación entre los resultados obtenidos en el ensayo de jarras y los obtenidos en el modelo, se determina la eficiencia del mismo y se presenta una discusión acerca de los parámetros para el diseño de este tipo de unidades.

PALABRAS CLAVES

Floculador cox, Gradiente de velocidad, tiempo de floculación.

ABSTRACT

A Cox-type hydraulic flocculator is tested using a reduced model, built at the Facultad de Minas Hydraulics laboratory. The model is evaluated for a wide range of turbidity values under diverse velocity gradients and flocculation times. A relationship existing between the model results and the "jar test" is presented. The model efficiency was determined, while design parameters are amply discussed.

KEY WORDS

Cox flocculator, velocity gradient, flocculation time.

1. INTRODUCCIÓN

Los floculadores hidráulicos de flujo vertical, tipo Cox, son utilizados en diversas plantas de potabilización en países como Brasil, Argentina, Colombia y República Dominicana, habiendo sido construida la primera unidad de este tipo en el estado Minas Gerais, Brasil en la década de 1960, con base en una idea del ingeniero Charles R. Cox (1).

Al observar el funcionamiento de una de estas unidades en la planta del municipio de San Pelayo, Córdoba y apreciar la buena calidad del floc producido, surgió la idea de construir un modelo a escala del floculador e integrarlo a la planta de tratamiento piloto del laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Minas, con el propósito de evaluar su comportamiento para altas y bajas turbiedades al variar las condiciones de gradiente de velocidad, tiempo de detención, forma de interconexión de las cámaras y caudal de operación.

El floculador hidráulico de flujo vertical evaluado corresponde al tipo Cox, el cual está constituido por compartimientos interconectados por la parte inferior mediante curvas de 90° cuyas bocas de salida están orientadas hacia arriba produciéndose dentro de cada cámara un flujo ascendente-descendente.

No existe una adecuada bibliografía que haga referencia en forma clara ni justifique los parámetros de diseño de este tipo de unidades, y solo se hacen algunos comentarios, recomendaciones y se presentan parámetros y fórmulas de diseño en una publicación del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) (2). Por las anteriores razones el estudio experimental realizado tiene por

finalidad determinar la eficiencia de este tipo de reactor bajo diferentes condiciones de operación, obtener información acerca de su funcionamiento y proponer parámetros para el diseño.

2. DISEÑO DEL MODELO

Para definir la geometría del modelo fueron aplicadas las siguientes recomendaciones (2):

- Relación entre la longitud del tramo recto y el diámetro del orificio, L/D:

$$\frac{L}{D} = 5 \quad ; \quad \frac{L}{D} = 0$$

- Velocidad en los codos, v:

$$0,25 \text{ m/s} \leq v \leq 0,75 \text{ m/s}$$

- Relación largo a ancho de las cámaras, l/a:

$$1,0 \leq \frac{l}{a} \leq 1,3$$

Se utilizan cámaras de planta cuadrada.

Para el cálculo de los gradientes de velocidad que se producen en las interconexiones se utiliza la siguiente fórmula, correspondiente al gradiente instantáneo (3):

$$G = n \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} R^{-0.67} \cdot v^1$$

Donde:

G = Gradiente instantáneo [s^{-1}]

n = Coeficiente de rugosidad de Manning

γ = Peso específico del agua [kgf/m^3]

μ = Viscosidad absoluta [$kgf.s/m^2$]

R = Radio hidráulico [m]

v = Velocidad [m/s]

Los diámetros de los codos se seleccionan de forma que cumplan simultáneamente que la velocidad esté comprendida entre 0,25 m/s y 0,75 m/s y que los gradientes instantáneos producidos fluctúen alrededor del gradiente óptimo seleccionado mediante el ensayo de jarras.

Se verifica la eficiencia para el caso de la utilización de tubos, $L/D = 5$ y para la no utilización de tubos, $L/D = 0$.

Las Figuras 1 y 2 presentan los resultados del ensayo de jarras realizado utilizando el agua cruda que alimenta el modelo y la Figura 3 muestra el esquema del modelo estudiado.

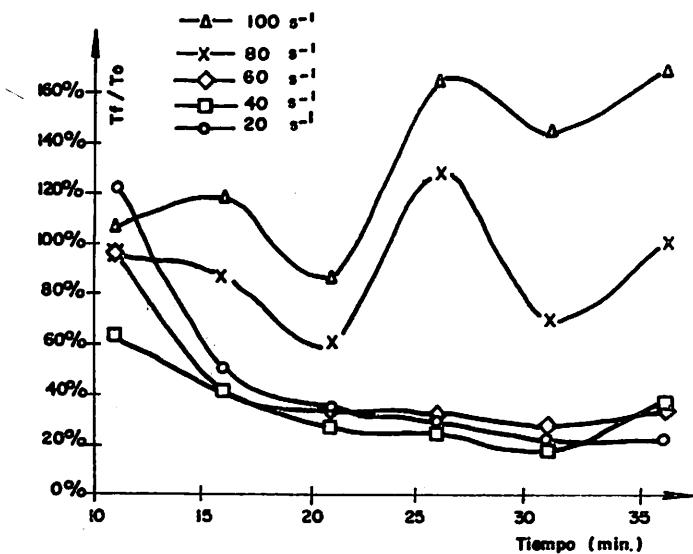


Figura 1 Turbiedad remanente vs periodo de flocculación

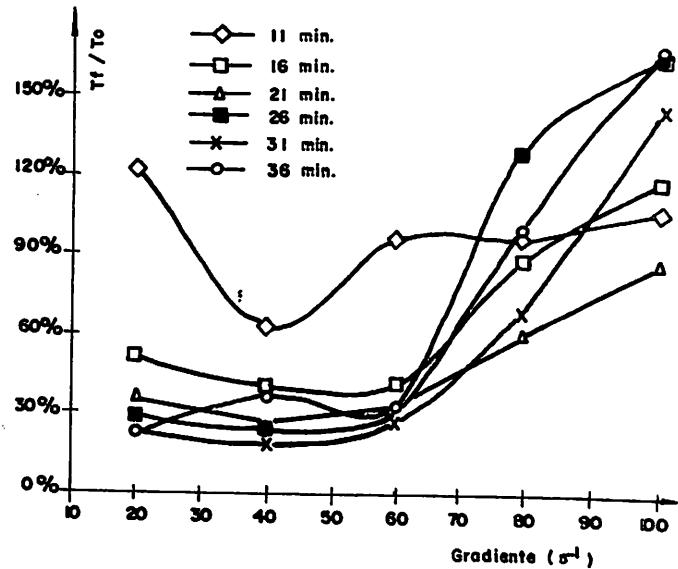


Figura 2 Turbiedad remanente vs gradiente de velocidad

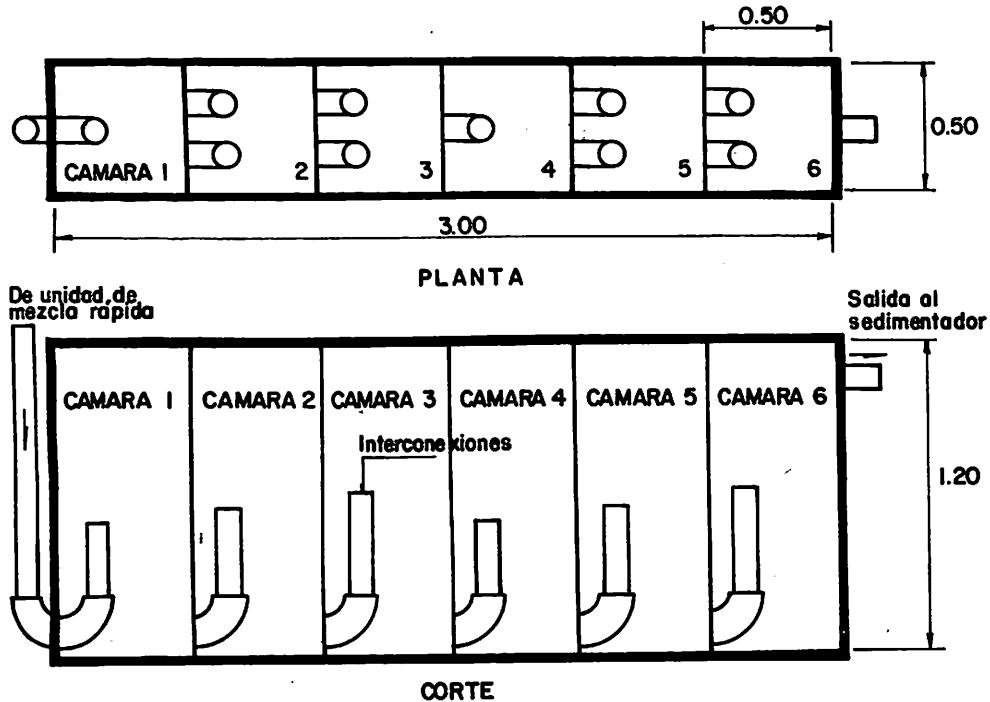


Figura 3 Esquema del modelo

Los gradientes instantáneos y las velocidades de flujo en los codos, obtenidos para diferentes combinaciones de diámetros de interconexión y diferentes caudales de operación, se presentan en la Tabla 1.

3. EXPERIMENTACIÓN

El modelo es operado para diferentes valores de turbiedad de agua cruda, caudal de operación, gradiente de velocidad en las interconexiones y tiempo de detención.

La evaluación de la eficiencia del reactor se realiza mediante la determinación de la turbiedad del agua cruda y de la turbiedad de las muestras tomadas del tercio superior de la profundidad de cada una de las cámaras, midiendo la turbiedad después de 20 min de sedimentación y determinando la eficiencia de remoción de turbiedad para diferentes tiempos de retención y diferentes gradientes instantáneos en los codos de interconexión.

En la primera etapa de la investigación (1), el modelo se evalúa para las siguientes condiciones:

- Caudal de operación: 1,0 l/s
- Tiempo de retención por cámara: 5 min
- Tiempo de retención total: 30 min

Se utilizan los siguientes gradientes de velocidad en los codos de interconexión:

- Gradiente constante de 10 s^{-1}
- Gradiente constante de 50 s^{-1}
- Gradiente constante de 60 s^{-1}
- Gradiente constante de 140 s^{-1}
- Gradiente constante de 220 s^{-1}
- Gradiente decreciente de $220, 140, 60, 50, 50$ y 10 s^{-1}

Para todos los casos anteriores se utiliza $L/D = 5$ y $L/D=0$.

Los resultados obtenidos se muestran en las Tablas 2 y 3

Tabla 1 Velocidad de flujo y gradiente instantáneo para diferentes combinaciones de diámetros y caudales de operación de 0,6, 0,8, 1,0 y 1,2 l/s

Número de tubos	Diámetro [pulg]	Velocidad [m/s]				Gradiente instantáneo [s ⁻¹]			
		0,6 l/s	0,8 l/s	1,0 l/s	1,2 l/s	0,6 l/s	0,8 l/s	1,0 l/s	1,2 l/s
1	2,0	0,30	0,39	0,49	0,59	102,81	158,29	221,26	290,79
1	3,0	0,13	0,18	0,22	0,26	23,22	35,74	49,96	65,66
2	1,5	0,26	0,35	0,44	0,53	65,66	101,10	141,32	185,73
2	2,0	0,15	0,20	0,25	0,30	22,85	35,17	49,17	64,62
2	2,5	0,09	0,13	0,16	0,19	10,07	15,51	21,68	28,49
2	3,0	0,07	0,09	0,11	0,13	5,16	7,94	11,10	14,59
3	1,5	-	-	0,29	-	-	-	58,62	-

Tabla 2 Eficiencia de remoción de turbiedad. L/D = 5

T ₀ [UTN]	Gradiente [s ⁻¹]	Remoción de turbiedad, [(T ₀ - T _f)/T ₀] x 100					
		Cámara 1	Cámara 2	Cámara 3	Cámara 4	Cámara 5	Cámara 6
350	Decreciente*	90,57	93,43	95,71	97,23	97,83	98,03
210	50 (2x2")	63,33	74,29	83,33	90,00	93,33	92,86
204	50 (1x3")	84,31	87,25	88,97	91,42	92,16	92,40
48	Decreciente*	44,48	50,73	83,11	87,34	91,23	92,19
39	10 (2x3")	34,96	54,07	75,28	81,82	86,18	88,44
38	60 (3x1½")	15,18	52,53	71,66	81,49	87,00	88,03
32	50 (2x2")	36,64	41,37	55,69	67,28	70,87	68,53
24	50 (1x3")	24,44	45,59	56,74	67,42	70,68	71,10
21	220 (1x2")	10,30	28,18	47,00	56,23	60,77	62,93

* Cuando los gradientes se ordenan 220, 140, 60, 50, 50 y 10 s⁻¹

Tabla 3 Eficiencia de remoción de turbiedad. L/D = 0

T ₀ [UTN]	Gradiente [s ⁻¹]	Remoción de turbiedad, [(T ₀ - T _f)/T ₀] x 100					
		Cámara 1	Cámara 2	Cámara 3	Cámara 4	Cámara 5	Cámara 6
204	50 (1x3")	91,67	92,40	93,87	96,37	97,30	97,55
175	60 (3x1½")	70,86	82,29	87,14	90,86	93,14	94,80
135	50 (2x2")	72,59	82,96	88,89	91,85	95,59	95,70
130	140 (2x1½")	60,77	78,08	86,15	90,77	93,46	95,58
125	50 (2x2")	72,00	70,40	74,00	74,40	71,60	66,00
78	140 (2x1½")	58,51	69,26	76,37	83,82	87,27	89,99
58	60 (3x1½")	58,43	73,03	58,32	72,67	82,52	86,37
48	10 (2x3")	44,27	61,76	80,07	84,99	88,19	89,90
23	50 (1x3")	35,95	52,73	73,72	81,16	84,51	88,58

En la segunda etapa de la investigación (4) el modelo es operado para las siguientes condiciones

- Caudal de operación: 0,6 l/s
 - . Tiempo de retención por cámara: 8,33 min
 - . Tiempo de retención total: 50 min
 - . Gradiente decreciente de 103, 66, 23, 23, 10 y 5 s⁻¹
 - . L/D: 5
- Caudal de operación: 0,8 l/s
 - . Tiempo de retención por cámara: 6,25 min
 - . Tiempo de retención total: 37,7 min
 - . Gradiente decreciente de 158, 101, 35, 35, 16 y 8 s⁻¹
 - . L/D: 5
- Caudal de operación: 1,0 l/s
 - . Tiempo de retención por cámara: 5 min
 - . Tiempo de retención total: 30 min
 - . Gradiente decreciente de 221, 141, 50, 50, 22 y 11 s⁻¹
 - . L/D: 5
- Caudal de operación: 1,2 l/s
 - . Tiempo de retención por cámara: 4,17 min
 - . Tiempo de retención total: 25 min
 - . Gradiente decreciente de 291, 186, 65, 65, 28 y 15 s⁻¹
 - . L/D: 5

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4. Si en dicha tabla aparecen celdas sin dato, significa que se utiliza para esos casos un número menor de cámaras.

Se considera alta turbiedad del agua cruda un valor igual o superior a 130 UTN y baja turbiedad un valor menor que 130 UTN.

La eficiencia del reactor se determina tomando muestras de cada una de las cámaras y dejando sedimentar en una jarra durante 20 min. Es decir la eficiencia del reactor se define en función de su capacidad de producir flóculos sedimentables.

Se presenta a continuación la Tabla 5 que resume los principales resultados.

Según la American Water Works Association (AWWA) (5), el rango de valores del gradiente de velocidad está comprendido entre 100 y 5 s⁻¹ y el rango del Número de Camp está comprendido entre 30000 y 150000.

4. CONCLUSIONES

- Durante el proceso de experimentación en el modelo, se observa que la floculación ocurre de manera importante en las cámaras de floculación por la forma en que el flujo direccionado en forma ascendente mediante la tubería de entrada a cada cámara choca con el flujo de retorno de sentido descendente que va encaminado hacia el codo de salida de la cámara, lo cual forma un manto de lodos que se localiza en el segundo tercio de la profundidad de la cámara. Dicho manto se forma debido a que los flóculos provenientes de la cámara anterior chocan con los que se desplazan en forma descendente dentro de la cámara. La parte inferior del manto de lodos se va decantando produciendo un efecto de barrido pero, parte de los flóculos son también enviados a la cámara siguiente, volviendo a producir en ésta el mismo efecto, y así sucesivamente hasta la última cámara de floculación. Por consiguiente este tipo de reactor cumple el doble efecto de flocular y sedimentar.
 - En la medida en que es utilizado un rango de gradiente escalonado mas alto, se disminuye el tiempo de floculación que produce la mayor eficiencia del reactor.
- Para el rango de gradiente 103, 66, 23, 23, 10 y 5 s⁻¹ el tiempo de floculación óptimo es del orden de 33 min. Para el rango de gradiente 221, 141, 50, 50, 22 y 11 s⁻¹ y para el rango 220, 140, 60, 50, 50 y 10 s⁻¹ el tiempo de floculación óptimo es del orden de 25 min y para el rango de gradiente 291,

Tabla 4 Eficacia de remoción de turbiedad. $L/D = 5$

T0 [UTN]	Gradiente [s-1]	Remoción de turbiedad, $[(T_0 - T_f)/T_0] \times 100$					
		Cámara 1	Cámara 2	Cámara 3	Cámara 4	Cámara 5	Cámara 6
	TR [min]	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33
150	Decreciente*1	92,67	93,33	96,00	96,00	93,33	91,33
46	Decreciente*1	52,17	71,74	81,52	80,43	-	-
45	Decreciente*1	40,00	53,33	57,78	62,22	66,67	64,44
38	Decreciente*1	74,74	76,32	75,79	82,63	82,89	-
37	Decreciente*1	16,22	27,03	32,43	37,84	37,84	-
	TR [min]	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25
175	Decreciente*2	94,57	94,40	91,43	90,29	94,86	-
45	Decreciente*2	48,89	37,78	75,56	75,56	-	-
28	Decreciente*2	10,71	3,57	42,86	42,86	67,86	-
25	Decreciente*2	-25,00	-4,17	16,67	41,67	50,00	0,00
24	Decreciente*2	33,33	41,67	33,33	33,33	62,50	58,33
	TR [min]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
92	Decreciente*3	77,17	79,35	80,43	81,52	81,52	81,52
45	Decreciente*3	48,89	60,00	68,89	73,33	77,78	-
45	Decreciente*3	55,56	66,67	71,11	73,33	77,78	-
45	Decreciente*3	64,44	68,89	77,78	71,11	-	-
43	Decreciente*3	53,49	55,81	62,79	67,44	76,74	-
43	Decreciente*3	46,51	53,49	62,79	65,12	72,09	-
40	Decreciente*3	37,50	32,50	57,50	65,00	67,50	67,50
38	Decreciente*3	-5,26	23,68	23,68	28,95	47,37	73,68
30	Decreciente*3	50,00	70,00	70,00	70,00	-	-
	TR [min]	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17
74	Decreciente*4	48,65	74,32	81,08	81,08	82,43	-
55	Decreciente*4	45,45	41,82	60,00	67,27	63,64	56,36
30	Decreciente*4	33,33	60,00	72,67	68,33	-	-
25	Decreciente*4	-12,00	-8,00	56,00	66,00	64,00	-
18	Decreciente*4	27,78	16,67	44,44	56,67	11,11	22,22
18	Decreciente*4	-11,11	11,11	44,44	66,67	66,67	44,44

*1 Cuando los gradientes se ordenan 103, 66, 23, 23, 10 y 5 s⁻¹ ($Q = 0,6 \text{ l/s}$)

*2 Cuando los gradientes se ordenan 158, 101, 35, 35, 16 y 8 s⁻¹ ($Q = 0,8 \text{ l/s}$)

*3 Cuando los gradientes se ordenan 221, 141, 50, 50, 22 y 11 s⁻¹ ($Q = 1,0 \text{ l/s}$)

*4 Cuando los gradientes se ordenan 291, 186, 65, 65, 28 y 15 s⁻¹ ($Q = 1,2 \text{ l/s}$)

T_h = Tiempo de retención por cámara

- 186, 65, 65, 28 y 15 s⁻¹ el tiempo de floculación óptimo es del orden de 17 min.
- Cuando se utiliza el gradiente constante en todos los codos de interconexión de las cámaras, el tiempo de retención óptimo permanece constante para todos los gradientes aplicados, siendo del orden de 25 a 30 min.

- Si se comparan los resultados obtenidos en el modelo y en el ensayo de jarras, se observa lo siguiente:
 - El rango de tiempo óptimo de floculación obtenido en el modelo coincide con el rango obtenido en el ensayo de jarras.
 - Al aplicar en el modelo un gradiente constante de 60 s⁻¹ y un tiempo de floculación

Tabla 5 Gradiente, tiempo de retención, Número de Camp y eficiencia.

Gradiente interconexiones [s ⁻¹]	Gradiente medio [s ⁻¹]	Tiempo óptimo floculación [min]	Número de Camp G.T	Eficiencia [%]	
				Alta turbiedad	Baja turbiedad
10	10	30	18000	*	89
50	50	30	90000	94	76
60	60	30	108000	95	87
140	140	30	252000	*	90
220	220	30	396000	*	63
103,66,23,23,10,5	38	30	68400	94	70
158,101,35,35,18,8	59	25	106200	95	64
221,141,50,50,22,11	83	25	149400	81	71
220,140,60,50,50,10	88	25	158400	98	91
291,186,65,65,28,15	108	17	110160	83	64
Promedio				91	77

* No se experimentó

total de 30 min, se obtiene la mayor eficiencia del reactor, esto es 95% para alta turbiedad y 87% para baja turbiedad. Aplicando un gradiente constante de 50 s⁻¹ y un tiempo de floculación total de 30 min, se obtiene una eficiencia de 94% para alta turbiedad y 76% para baja turbiedad.

Según la Figura 2, el rango óptimo de gradiente obtenido en el ensayo de jarras está comprendido en el rango 40 a 60 s⁻¹.

Lo anterior indica que los valores obtenidos mediante el ensayo de jarras para los parámetros tiempo y gradiente de floculación pueden ser utilizados como parámetros de diseño de este tipo de estructuras, ya que con dichos valores el modelo presenta una alta eficiencia para todo el rango de turbiedades de agua cruda estudiado.

- La eficiencia del floculador es mayor para alta turbiedad, lo cual se debe a una mejor formación del manto de lodos en todas las cámaras.
- Tanto para alta como para baja turbiedad la eficiencia del reactor es la misma para L/D = 5 y L/D = Q, lo cual indica que no es necesaria la utilización de tubos de extensión; sin embargo

durante la experimentación se observó que dicha prolongación redirecciona el flujo en sentido ascendente, lo cual favorece la formación del manto de lodos y disminuye los cortocircuitos entre la entrada y la salida de cada cámara.

- La mayor eficiencia para alta y baja turbiedad se obtiene en el caso de la aplicación de un gradiente decreciente 220, 140, 60, 50, 50 y 10 s⁻¹ y un tiempo de retención del orden de 25 min, y se obtiene una eficiencia semejante en el caso de la aplicación de un gradiente constante de 60 s⁻¹ y un tiempo de retención del orden de 30 min.
- La eficiencia del floculador es mayor para el caso de la aplicación de un rango de gradientes escalonados de valor bajo, con un tiempo de residencia alto, que para el caso de la aplicación de un rango de gradientes escalonados de valor alto, con un tiempo de residencia bajo.
- Para toda la gama de gradientes utilizados en las interconexiones, se presenta una buena eficiencia, lo que parece indicar que gran parte del proceso se realiza al interior de las cámaras por efecto del manto de lodos.

5. BIBLIOGRAFÍA

1. MONTOYA M., Santiago F.y GUTIERREZ R., Juan F. Floculación en Reactores Cox o Alabama. Tesis Ingeniería Civil. Director Jorge Arturo Pérez P. Medellín, Universidad Nacional de Colombia. Facultad Nacional de Minas, 1995. 117 p.
2. CEPIS. Criterios de Diseño de Plantas de Tratamiento de Agua. Lima, 1983. 230 p.
3. DIEZ H., Guillermo I. y ZAPATA G. Juan F. Obras de Captación en la Quebrada La Gómez. Experimentación en Planta Piloto en las Unidades de Floculación y Filtración. Tesis Ingeniería Civil. Director Jorge Arturo Pérez P. Medellín, Universidad Nacional de Colombia. Facultad Nacional de Minas, 1997. 163 p.
4. PEREZ P. Jorge Arturo. Manual de Potabilización del Agua. 3 ed. Medellín, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, 1997. 507 p.
5. AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. Water Quality and Treatment - A Handbook of Community Water Supplies. McGRAW-HILL, INC. 4 ed, USA. 1990.

Para mayor información marque el número 9 en el desprendible final



compañía colombiana de consultores s.a.

"Ingeniería un puente entre el hombre y la naturaleza"

- Planeación Regional y Urbana
- Vías y Transporte
- Ingeniería Hidráulica e Hidrología
- Ingeniería Ambiental y de Saneamiento
- Ingeniería Electro-Mecánica
- Ingeniería de Suelos y Fundaciones
- Arquitectura
- Ingeniería Estructural
- Estudios Económicos
- Programación de Obras, Costo y Presupuestos
- Sistemas de Información Geográfica

Transversal 37 71-22 Teléfono 412 22 22, FAX 415 04 40
Apartado Aéreo 50870. E-Mail cccsa@epm.net.co

Medellín - Colombia