

01164
lej.
1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE
LA FACULTAD DE INGENIERIA**

**UN NUEVO ENFOQUE EN EL FILTRADO DE AGUA
PARA ABASTECIMIENTO DE
POBLACIONES**

01164
1982

T E S I S

que para obtener el grado de
MAESTRO EN INGENIERIA
p r e s e n t a :
JOSE LUIS RANGEL QUINTANAR

México, D. F.

1982



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 está 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.

I N D I C E

	Pág
1. INTRODUCCION	7
1.1 Objetivos	
1.2 Alcances	
2. TEORIA DEL FILTRADO	10
2.1 Introduucción	
2.2 Mecanismos del Filtrado	
2.3 Hidráulica de Proceso	
2.4 Modelos Matemáticos Existentes	
2.5 Modelo Matemático por Aplicar	
3. MEDIOS FILTRANTES	37
3.1 Antecedentes	
3.2 Selección	
3.3 Obtención	
3.4 Preparación	
3.5 Triturado	
3.6 Tamizado	
3.7 Pruebas Físico-Químicas	
4. MODELO DE LABORATORIO	55
4.1 Modelo Físico	

	Pág
4.2 Fabricación del Agua Problema	
4.3 Operación del Modelo de Laboratorio	
4.4 Secuencia de Prueba	
5. PRUEBAS EN FASE DE FILTRACION	66
6. PROCESAMIENTO DE RESULTADOS	74
6.1 Secuela de Cálculo	
6.2 Números adimensionales	
6.3 Corridas por Computadora	
6.4 Gráficas	
7. SECUELA DE APLICACION	107
8. CONCLUSIONES	107
8.1 Modelo de Laboratorio	
8.2 Medio Filtrante	
8.3 Modelo Matemático y Análisis de Resultados	
9. RECOMENDACIONES	113
9.1 Modelo de Laboratorio	
9.2 Medio Filtrante	
9.3 Modelo Matemático y Análisis de Resultados	
10. BIBLIOGRAFIA	120

11. REFERENCIAS

125

ANEXO I FUNCION ERROR

ANEXO II PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO

1. INTRODUCCION

La población mundial, y en forma especial la de nuestro país, se enfrenta a la inaplazable necesidad de realizar un programa común para intentar satisfacer las demandas generadas por su crecimiento.

En lo que compete a la Ingeniería Ambiental y muy especialmente al rubro agua, el compromiso es de dimensiones mayúsculas, ya que este vital líquido debe ser suficiente en cantidad y calidad para cumplir con los requerimientos y no representar, dentro de lo posible, un factor limitante del crecimiento.

Para alcanzar las metas planteadas, será necesaria la creación de grupos interdisciplinarios, cuya misión sea la de dar un uso más racional a los recursos naturales; y que en lo referen

te el recurso hidráulico, las poblaciones deberán de ser dotadas de agua de calidad adecuada y sobre todo económica.

Es precisamente esta última premisa la que ha motivado el desarrollo del presente trabajo de investigación [1], cuyos objetivos y alcances son:

1.1 OBJETIVOS

- a) Tomando en consideración las referencias (18), (19), (20), (21) y (22) y por la experiencia ganada en anteriores investigaciones, el M en I. Humberto Vidales A. desarrolló un modelo matemático el cual incluye un parámetro aún no considerado en las ecuaciones que interpretan la filtración y cuyo nombre es "coeficiente de dispersión, D". Se planteará y aplicará este modelo a los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio.
- b) La antracita, que trabaja en un medio filtrante dual junto con arena sílica y/o cuarzosa, es un material que no se encuentra en calidad y cantidad suficiente en nuestro país, por lo que el siguiente objetivo será el de probar materiales que puedan sustituirla (23), (24) y (25) y cuya obtención en México sea factible a nivel industrial.

[1] Los datos de laboratorio fueron tomados del proyecto de investigación "Empleo de losas porosas y diversos medios filtrantes en unidades de filtración, 2a. etapa. Diciembre 1980" realizada por Jonguitud, V.; Rangel, J.L.; Iturbe, R., por parte del Instituto de Ingeniería, UNAM para la Comisión de Aguas del Valle de México, S.A.R.H.

- c) Optimizar el funcionamiento del modelo físico del laboratorio, así como establecer una secuela práctica y sencilla de muestreos.

1.2 ALCANCES

- a) Se presentarán resultados de cuatro medios granulares duales en fase de filtración.
- b) Con base en los resultados de laboratorio, los números adimensionales que gobiernan el fenómeno de la filtración serán obtenidos para confirmar la validez de la aplicación del modelo matemático a cualquier medio dual de filtración.
- c) Se proporcionará una secuela sencilla y práctica a seguir para la aplicación del modelo matemático.

2. TEORIA DEL FILTRADO (1) (2)

2.1 Introducción

El objetivo del filtrado consiste en separar las partículas y microorganismos objetables, los cuales no fueron removidos en el pretratamiento.

2.2 Mecanismos del filtrado

El tamaño de las partículas por remover varía desde flóculos relativamente grandes de 1mm hasta coloides, bacterias y virus con tamaños menores a 10^{-3} mm (1μ); variando su caracter eléctrico siendo electropositivas, electronegativas y neutras, o microflóculos con polímeros adsorbidos.

Los mecanismos del filtrado ocurren en dos etapas distintas y complementarias (3).

2.2.1 Mecanismos de transporte

Cernido. Considerando que los intersticios del medio granular varían entre 0.1 y 0.2 mm para granos de 0.5 mm y entre 0.3 y 0.6 mm para los de 1.2 mm, el floc grande que suele tener 0.5 a 2.0 mm de diámetro quedará retenido. El cernido actúa sólo en las capas superficiales del medio poroso y con partículas relativamente fuertes, esto es, partículas que no se disgregan debido al esfuerzo cortante que se presente por el fluir del agua a través del medio poroso.

Sedimentación. Sólo se produce con material suspendido cuya velocidad de asentamiento sea alta y en zonas del lecho donde la carga hidráulica sea baja. La superficie disponible para este fenómeno en los granos, ha sido valorada como una cifra de orden de $440 \text{ m}^2/\text{m}^3$ de medio filtrante.

Intercepción. La adhesión del material suspendido a los granos del medio va aumentando gradualmente con la carrera de filtración a tal medida que las capas superficiales, al colmatarse, permiten que el depósito progrese en profundidad.

Impacto Inercial. Por su poca efectividad en la remoción, puede ignorarse.

Difusión. Al manifestarse movimiento browniano de las partículas en el cuerpo líquido, la tendencia de las partículas pequeñas a difundirse desde áreas de mayor concentración a las de me

nor concentración tomar lugar, este mecanismo sólo es eficiente con suspendidos menores a 1μ .

Diversos autores (4) demuestran que las fuerzas gravitacionales son más importantes que las inerciales en el proceso de filtrado. Con base en la referencia mencionada, teóricamente se puede establecer un tamaño de partícula para el cual la eficiencia de remoción es mínima el cual corresponde a 1μ .

2.2.2 Mecanismos de retención

Fuerzas de Van Der Walls. Actúan a corta distancia. La capacidad de estas fuerzas para atraer o transportar partículas es despreciable, no así su capacidad de retenerlas en la superficie de los granos del filtro (5).

Fuerzas Electrostáticas. Son la combinación de fuerzas coulombicas con las de Van Der Walls (6) y su comportamiento explica porque la mayor o menor dosificación de químicos coagulantes afecta el comportamiento del filtro.

Puente Químico. La adsorción de partículas a los segmentos extendidos de las cadenas poliméricas se presenta al adicionar el químico. Este fenómeno es independiente de fenómenos electrostáticos.

2.3 Hidráulica del proceso

El fenómeno de la filtración es gobernado por la Ley de Darcy, el flujo es laminar mientras el medio está limpio y se mantiene así hasta que se colmata. Al presentarse al menos alguno de los siguientes eventos, el filtro debe ser removido del ciclo de operación y el medio limpiado: la energía total del agua influente comparada con la del efluente decrece, la pérdida de carga resulta ser poco económica, la tasa de flujo no puede ser mantenida con el equipo disponible o cuando la calidad del efluente se deteriora.

2.4 Modelos matemáticos existentes.

2.4.1 Iwasaki e Ives (8), (9)

Partiendo de la ecuación:

$$\frac{dC}{dL} = - \lambda C \quad 2.4.1$$

donde C = concentración volumétrica de partículas

L = profundidad de la capa de lecho filtrante considerado.

λ = módulo de impedimento o eficiencia de la capa dL del filtro.

Esta expresión establece una relación directa entre la reducción de concentración de la suspensión "dC" en la capa dL y la concentración "C" que ingresa a este estrato del medio poroso.

Por lo que λ se convierte en un factor de proporcionalidad:

$$\lambda = \frac{dC/dL}{C} \quad 2.4.2$$

En este modelo se supone que el medio granular se encuentra limpio; esto es $\lambda = \lambda_1$. Al comenzar la colmatación del medio se origina mayor área superficial y con ello mayor eficiencia aumentando linealmente con el depósito específico (λ vs σ):

$$\lambda = \lambda_0 + k\sigma \quad 2.4.3$$

k = coeficiente empírico

Tiempo después, debido a la mayor colmatación, λ empieza a disminuir en proporción:

$$- \frac{\phi \sigma^2}{n_0 - \sigma}$$

expresándose:

$$\frac{dC}{dL} = \left[\lambda_0 + k_1 \sigma - \frac{\phi \sigma^2}{n_0 - \sigma} \right] C \quad 2.4.4$$

C = concentración volumétrica de partículas

L = profundidad de la capa de lecho filtrante considerada

λ_0 = módulo de impedimento o eficiencia de la capa del filtro al inicio de la prueba

k_1 = coeficiente empírico el cual se presenta al iniciarse el depósito de material en el medio poroso

σ = depósito específico

ϕ = coeficiente empírico que toma lugar al colmatarse en su totalidad el filtro

n_0 = porosidad inicial del medio granular

Comentario: El modelo propuesto presenta el fenómeno en forma aparentemente integral, omitiendo factores tan importantes como la variación del tamaño del medio filtrante y el cambio

local en la concentración del floculo depositado.

Cumplé adecuadamente la presente formulación matemática para partículas discretas no floculentas al ser filtradas. Cabe aclarar que el modelo de laboratorio fue un filtro lento con resultados lineales de λ vs σ

2.4.2 Mackrle (Ives modificado) (10), (11) y (12)

Este modelo trata de ser una generalización de todos los presentados. La hipótesis de origen considera que λ es función de la superficie específica del filtro (superficie de material por unidad de volumen).

Cuando el medio granular está limpio ($t = 0$) el filtro se considera constituido por granos esféricos en los cuales el material se deposita, incrementándose con ello λ .

En cuanto σ aumenta el filtro deja de actuar como esferas independientes y el lecho se puede considerar como una masa compuesta de una serie de capilares cilíndricos.

Al combinar ambas fases en el filtrado resulta:

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 + \frac{\beta\sigma}{n_0}\right)^y \left(1 - \frac{\sigma}{n_0}\right)^z \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_\mu}\right)^x \quad 2.4.5$$

$$\beta = \text{constante} = \frac{n_0}{1 - n_0}$$

σ_μ = valor de saturación de σ

x, y, z = constantes empíricas

Dando valores a los exponentes

$$y = 1, z = 0 \text{ y } x = 0$$

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{\lambda\beta}{n_0} \sigma = \lambda_0 + kv \text{ Modelo de Iwasaki}$$

$$y = 1, z = 1 \text{ y } x = 1$$

$$\lambda = \lambda_0 + k\sigma - \frac{\phi\sigma^2}{n_0 - \sigma} \quad \text{Modelo de Ives}$$

y cambiando exponentes se puede llegar al Modelo de Mackrle, Shekhtman y Maroudas.

Comentario: En este caso, el modelo matemático propuesto se convierte en una generalización de trabajos presentados; sin embargo, el alto grado de dificultad para obtener los valores de x , y , z en laboratorio lo hacen impráctico para diseño.

2.4.3 Mintz y Krishtul (13)

Los autores consideran el fenómeno constituido por dos procesos: la adherencia del floc a los granos del lecho y el desprendimiento del mismo al incrementarse la velocidad intersticial.

$$-\frac{dC}{dL} = \lambda_0 C - \frac{\alpha}{V} \sigma \quad 2.4.6$$

α = coeficiente de desprendimiento

V = velocidad de filtración.

El primer término de la ecuación representa el mecanismo de adherencia y el segundo, el de desprendimiento.

Comentario: Se basa en la teoría de transporte de sedimento en medio poroso. Por recientes estudios se ha podido establecer que existen un periodo inicial de maduración del filtro y posterior a este evento ocurre el deterioro. Sin embargo, en este modelo se considera un déficit de eficiencia desde el inicio (14).

2.4.4 Deb (15) (16)

En un intento por aproximarse a la realidad, Deb considera incrementos locales de concentración con respecto al tiempo:

$$\frac{1}{n_0 - \sigma} \frac{dC_a}{dL_a} + \frac{dC_a}{dt_a} = -\lambda_a C_a \quad 2.4.7$$

donde:

$$C_a = \frac{C}{C_0}, \quad L_a = \frac{L}{L}, \quad t_a = \frac{V}{L} t,$$

$$\lambda_a = B \left| \frac{X}{n_0 - \sigma} \right|^k, \quad \lambda_a = \lambda' \frac{L}{V},$$

$$X = \frac{\Sigma S}{N_p \pi d_{50}^2}$$

λ' = Coeficiente de filtración modificado. Expresado en $|T|^{-1}$ a diferencia de Iwasaki $|L|^{-1}$

B = Coeficiente empírico

X = Factor que depende de la superficie total de granos por unidad de volumen del medio (ΣS), diámetro medio de los granos del lecho (d_{50}) y del número de granos por unidad de volumen del filtro (N_p)

k = Exponente empírico

donde: λ_a VS σ puede hallarse con la ecuación:

$$\lambda_a = B \left| \frac{X}{n_0 - \sigma} \right|^k$$

Comentarios: Si bien el autor consideró el período de maduración del filtro, el modelo deberá tomarse con las reservas del caso, ya que la fase de experimentación fue realizada con partículas discretas no floculentas, cuando en la realidad el grado de hidratación (98% agua y 2% sólidos) es determinante en los resultados. Asimismo, Deb empleó un medio filtrante cuyos granos tenían el mismo diámetro, situación antieconómica y por experimentos comparativos inadecuada ya que resta eficiencia al proceso.

2.4.5 Heertjes (17)

Haciendo $k = -\lambda_0/n_0$ se llega al Modelo de Ives (ec 2.4.3)

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 - \frac{\sigma}{n_0} \right) \quad 2.4.8$$

Comentario: Se basa en el concepto de poro aislado (célula unitaria). Se puede observar que $\lambda = 0$ cuando el lecho filtrante se encuentra colmatado, esto es $\sigma = n_0$ lo cual resulta improbable.

2.4.6 Maroudas e Eisenklam

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_\mu} \right) \quad 2.4.9$$

TABLA 2.1. RESUMEN DE LOS MODELOS MATEMATICOS
 $-3C/\partial L = 0$ (C, σ , PARAMETROS DE LOS MODELOS)

Investigador	Tipo de Suspensión (Discreta ó Floculenta)	Función θ	Relación entre los Parámetros y las va- riables Físico-Quí- micas.	Número de Parámetros
Iwasaki (1937)	Discreta (D)	$\lambda_0 (1+K_1\sigma)C$	$\lambda_0 a D^{-1} v_{\infty}^{-1} \cdot 3$	2
Stein (1940)	Floculenta (F)	$\phi_1 = \lambda_0 (1+K_1\sigma)C$ $\phi_2 = \lambda_0 (1-K_2\sigma/1-K_3\sigma)^n \cdot C$	$\lambda_0 a D^2 v_{\infty}^{-3}$	5
Ornatski (1955)	(D)	$(\lambda_0 - K_1\sigma)C$	$\lambda_0 a v_{\infty}^{-1}$	2
Mints (1960, 1966)	(F)	$\lambda_0 (C - \frac{C_0\sigma}{\sigma_u})$	$\lambda_0 a v_{\infty}^{-0.7} D^{-1.7}$	2
Maroudas y Eisenklam (1964)	(D)	$\lambda_0 (1 - \frac{\sigma}{\sigma_u})C$	$\lambda_0 a v_{\infty}^{-1}$	2
Ives (1962, 1967)	(D)	$(\lambda_0 + a_1 \sigma \frac{a_2 \sigma^2}{\epsilon_0 - \sigma})C$ $[\lambda_0 (1 + \frac{b\sigma}{\epsilon_0}) y (1 - \frac{\sigma}{\epsilon_0})^z (1 - \frac{\sigma}{\sigma_u})^x] C$		3 a 5
Ives y Sholji (1965)	(D)	$(\lambda_0 + a_1 \sigma \frac{a_2 \sigma^2}{\epsilon_0 - \sigma})C$	$\lambda_0 a D^{-1} v_{\infty}^{-1} \mu^{-2}$ $a_1 a D^{-1} v_{\infty}^{-1} \mu^{-1.2}$ $a_2 a D^{-1} v_{\infty}^{-1} \mu^{-2}$	3
Ison e Ives (1969)	(D)	$\lambda_0 \delta (a)C$	$\lambda_0 a \mu^{1.4} . d^{0.3} . D^{-1.4} . v_{\infty}^{-4}$	No Especificada
Sakthivadival (1966)	(D)	$(\lambda_0 + K_1\sigma)C$	$\lambda_0 \delta (I.R.G.^*)$	2
Agrawal (1966)	(D), (F)	donde λC $\lambda = \frac{3}{2} (1 - \frac{\epsilon_0}{D}) n$	$\lambda_0 \frac{1 - \epsilon_0}{\mu v_{\infty}} [K_1 \epsilon_p^2 C_0 - K_4 \epsilon_p \epsilon_{m'} \frac{d}{D}]$ $+ \lambda_{\delta}$	3
Heertjes y Lérk (1967)	(F)	$\lambda_0 (1 - \frac{\sigma}{\epsilon_0})C$	$\lambda_0 \frac{K_1 (1 - \epsilon_0) A_1 z}{\mu . D^2 . v_{\infty}}$	1
Litwiniszyn (1967)		$K_1 (\epsilon_0 - \sigma)C - K_4 \sigma$		2
Herzig y outros (1970)		$\frac{\lambda_0 F(\sigma)}{v_{\infty}} C$		2
Dob (1969)	(D)	$\frac{\lambda_1 C}{v_{\infty}} (\epsilon_0 - \sigma) + \frac{\partial C}{\partial t}$	$\lambda_1 = \frac{v_{\infty}}{\Delta L} K_1 (\frac{\delta(\sigma)}{C_0 - \sigma}) K_3$	3
Yao et al. (1970)	microesferas de latex	donde λC $\lambda = \frac{3}{2} (1 - \frac{\epsilon_0}{D}) n$	$\lambda_0 = \delta (n_0)$ $= F [I, N, D, T, G]^*$	2
(Spielman (1968))	emulsión de petróleo	λn $\lambda / f(\sigma)$	$\lambda_0 = \frac{3}{2} (1 - \frac{\epsilon_0}{D}) n_0$ $n_0 = K_1 (t)^2 F [N, Ad]$	1

Spielman y Fitzpatrick (1972) Spielman y Cukor (1972)	microesferas de latex	λn	$\eta_0 = K_1 (N_1)^2 F(N_{Ad}, G^*, NE, T)$	1-2
		$\lambda = f(\sigma)$		
Wright (1973)	(F)	$\lambda_0 \left(1 - \frac{\sigma}{u}\right) C$		2

Comentario: Modelo basado en la hipótesis de una eficiencia global de colisión en un filtro lento y proporcional al esfuerzo cortante del flujo en el medio poroso. Similar al modelo anterior con la variante de σ_{μ} en lugar de σ_0 , donde σ_{μ} es el valor máximo del depósito específico. La expresión ha sido verificada experimentalmente y su aplicabilidad parece limitada, ya que no toma en cuenta un aumento de λ en el inicio de la filtración ni el periodo en que λ permanece prácticamente invariable con el aumento de σ .

2.4.7 Resumen

Existen otros trabajos cuyos resultados se presentan en la Tabla 2.1 los cuales intentan modelar matemáticamente el fenómeno, sin conseguirlo. Lo anterior se debe a que el comportamiento λ vs σ no es lineal; las condiciones propuestas por el investigador son ideales como por ejemplo medio filtrante compuesto por granos sintéticos esféricos, suspensiones cuyas propiedades físico-químicas no son las que realmente existen, etc.

2.5 Modelo Matemático por Aplicar (18), (19), (20), (21) y (22)

2.5.1 Generalidades

Flujo. Una medida de la tasa de transferencia de material de un estado físico a otro es el flujo, se puede definir como:

Flujo = Factor de proporcionalidad x fuerza

Las dimensiones del flujo son $ML^{-2}T^{-1}$ ó MT^{-1} , donde "M" es una medida de la cantidad del material acarreado por el flujo (no necesariamente la masa), "L" es una dimensión lineal, y "T" es el tiempo. Dependiendo de la naturaleza del flujo, se originan las unidades de fuerza y factor de proporcionalidad. Las fuerzas actuantes son los mecanismos responsables del flujo y estos mecanismos para el fenómeno que nos ocupa pueden ser: transporte ad vectivo, dispersivo y difusivo. Aunque las diferencias entre estos tres no son muy precisas, es conveniente trata ralos por separado.

Transporte Advectivo. Es el desplazamiento relativo de una porci ón de material bajo la influencia de fuerzas de naturaleza global tales como la corriente del agua y viento, erosión, precipitación pluvial, depósit o de sedimentos, etc. Matemáticamente el flujo de una sustancia por este mecanismo se puede expresar:

$$F = CU \text{ (g cm}^{-2} \text{ seg}^{-1}\text{)}$$

donde

U = es la velocidad en cm seg^{-1}

C = es la concentración de la sustancia en g cm^{-3}

Transporte Difusivo. La difusión de una sustancia en solución es el mecanismo mediante el cual iones o moléculas se mueven por fuerzas de naturaleza intermolecular en la dirección del gradiente de concentración. El flujo unidimensional es:

$$F = - D_M \frac{dC}{dz} \text{ (primera Ley de Fick)}$$

donde

F = masa de soluto que se difunde en la unidad de área por unidad de tiempo, $ML^{-2}T^{-1}$

D_M = coeficiente de difusión molecular, L^2T^{-1}

$\frac{dC}{dz}$ = gradiente de concentración, ML^{-4}

La difusión se presenta en ausencia de movimiento de la solución. Al presentarse el flujo, la difusión es acompañada de dispersión mecánica. Al ya no existir gradiente de concentración, la difusión cesa. El signo negativo en la Ley de Fick indica que la difusión se manifiesta de una concentración mayor a una menor.

Transporte Dispersivo. El proceso de dispersión el cual es de magnitud intermedia entre la difusión molecular y turbulenta es asociado con el flujo de agua en medio poroso. - Cuando los solutos son transferidos

con la misma velocidad y dirección del flujo se denomina advección. Sin embargo, este soluto tiende a difundirse fuera de la trayectoria del flujo, conociéndose como dispersión. El movimiento del fluido genera este fenómeno a diferencia de la difusión, la cual toma lugar a muy bajas velocidades.

Tres mecanismos gobiernan el fenómeno de la dispersión, estos son: la viscosidad del fluido la cual da por resultado velocidades nulas en la frontera de los capilares generando un gradiente de velocidad en la sección del microconducto; la variación tan grande a escala microscópica de la sección a todo lo largo del conducto capilar origina cambios de velocidad y por último, la configuración irregular del conducto (tortuosidad) obligan a que las líneas de corriente fluctúen con respecto a la dirección media del flujo.

La dispersión depende de la viscosidad (μ), densidad (ρ), aceleración de la gravedad (g), velocidad promedio en el poro (U), coeficiente de difusión molecular (D_M), permeabilidad (K), diámetro promedio del grano (d_{50}), etc.

Realizando el análisis dimensional:

2.5.2 Análisis dimensional

Debe haber una relación funcional de la forma:

$$C = f(C_0, v_s, t, X, D)$$

que puesta de otra forma quedará:

$$\phi [C, C_0, v_s, t, X, D] = 0$$

El número de variables físicas independientes es: $m = 6$ y usando el sistema F, L, T, se tendrán 3 números dimensionales que regirán el fenómeno.

Haciendo la siguiente tabla:

Variable	C_0	v_s	X	C	t	D
subíndice	a	b	c	1	2	3
F	1	0	0	1	0	0
L	-3	1	1	-3	0	2
T	0	-1	0	0	1	-1

inicialmente: $\pi_1 = C_0^{a_1} v_s^{b_1} X^{c_1} C$

$$0 = a_1 + 1$$

$$a_1 = -1$$

$$0 = -3a_1 + b_1 + c_1 - 3$$

$$0 = -3(-1) + 0 + c_1 - 3$$

$$c_1 = 0$$

$$0 = -b_1$$

$$b_1 = 0$$

$$\pi_1 = C_0^{-1} V_S^0 X^0 C$$

$$\pi_1 = \frac{C}{C_0}$$

$$\pi_2 = C_0^{a_2} V_S^{b_2} X^{c_2} t$$

$$0 = a_2 + 0$$

$$a_2 = 0$$

$$0 = -3a_2 + b_2 + c_2$$

$$0 = 1 + C_2 \quad \therefore C_2 = -1$$

$$0 = -b_2 + 1$$

$$b_2 = 1$$

$$\pi_2 = C_0^0 V_S^1 X^{-1} t$$

$$\pi_2 = \frac{V_S t}{X}$$

Como

$$t/X = 1/V$$

$$\pi_2 = 1$$

$$\pi_3 = C_0^{a_3} V_S^{b_3} X^{c_3} D$$

$$0 = a_3$$

$$a_3 = 0$$

$$0 = -3a_3 + b_3 + c_3 + 2$$

$$0 = -1 + C_3 + 2 \quad \therefore C_3 = -1$$

$$0 = -b_3 - 1$$

$$b_3 = -1$$

$$\pi_3 = C_0^0 V_S^{-1} X^{-1} D$$

$$\pi_3 = \frac{D}{V_s X} \quad \delta$$

$\pi_3 = \frac{V_s X}{D}$ <p>Número de Peclet</p>

Se concluye que los parámetros adimensionales más importantes son el número de Peclet (Pe) y la relación de concentraciones C/Co. El número de Peclet puede ser interpretado como la velocidad del flujo U (cm seg⁻¹) o depósito q (cm³ cm⁻² seg⁻¹) para un soluto en medio poroso.

Experimentos con trazadores en medios granulares establecen relaciones de dispersión a difusión molecular (D/D_M) localizándose se tres regímenes (consultar gráfica 6.2):

Primero. La difusión molecular es más significativa que la dispersión:

$$D/D_M = 0.7$$

donde la velocidad de flujo es de metros por año -
 $U \approx 10^{-5}$ cm-seg⁻¹; para granos del medio filtrante cuyo radio $r = 10^{-1}$ cm; con $D \approx 10^{-5}$ cm² seg⁻¹. De estos valores $Pe = 10^{-1}$. Para granos más finos - ($r < 10^{-2}$ cm) y menor velocidad de flujo, Pe es menor.

Segundo. Zona de transición en la cual la dispersión y la difusión molecular son significativas:

$$\frac{D}{D_M} = Pe$$

Conforme Pe se incrementa de $Pe \approx 1$ a $Pe \approx 10^2$, el coeficiente de dispersión (D) se incrementa en forma aproximadamente lineal con Pe .

Tercero. La dispersión es más significativa que la difusión molecular:

$$\frac{D}{D_M} = A_0 \left(\frac{U d_{50}}{D_M} \right)^m$$

donde "m" es la pendiente de la curva, cuando $m = 1$:

$$D = A_0 U d_{50}$$

2.5.3 Planteamiento y desarrollo del modelo matemático por aplicar.

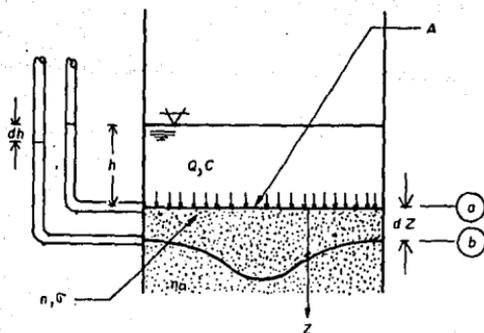


Fig. 2.1 Diagrama de definiciones.

Para el desarrollo de este modelo es necesario hacer las siguientes hipótesis:

1. El volumen de partículas removidas de la suspensión es igual al volumen de partículas acumulado como depósito en los poros del medio filtrante.
2. La eficiencia de remoción del filtro es una función de las condiciones iniciales del filtro y los depósitos acumulados.
3. La acumulación de depósitos aumenta la resistencia al paso del flujo, lo que se refleja en una pérdida de carga haciendo que este flujo sea no permanente.

Del diagrama de definiciones:

Q es el gasto de filtración L^3/T

A es el área transversal del medio filtrante, L^2

C es la concentración en fase líquida, adimensional

$$c = \frac{\text{Volumen de partículas}}{\text{Volumen de líquido}}$$

n_0 es la porosidad inicial del medio filtrante, o sea a $t = 0$

n es la porosidad del medio filtrante a $t > 0$

ν es la viscosidad cinemática, L^2/T

$$n = n(z, t)$$

D es el coeficiente de dispersión, $[L^2/T]$

z es la profundidad en el sentido del flujo, $[L]$

t es el tiempo, $[T]$

q es la concentración en fase sólida

$$q = \frac{\text{Volumen de partículas}}{\text{Volumen de sólidos}}$$

h es la carga de agua sobre el filtro, $[L]$

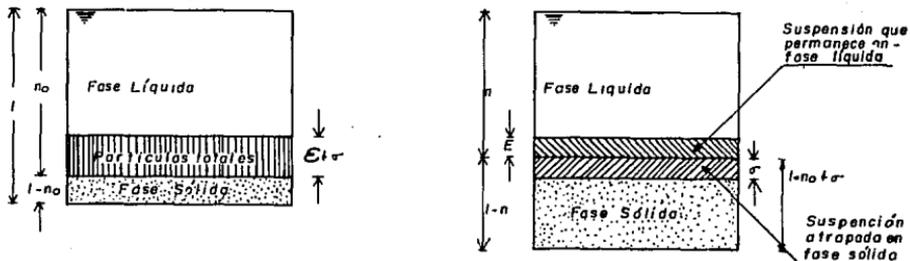
dh es la pérdida de carga correspondiente a $t = 0$ y " dz "

Se establecerá también que en elementos de volumen unitario:

FIGURA 2.2 CONDICIONES EN EL FILTRO PARA CUANDO $\sigma=0$, $\sigma>0$

En (a) para $t = 0$

En (b) para $t > 0$



Por definición, cuando:

el depósito específico es: $\sigma = 0$

$\sigma > 0$

la concentración en fase sólida: $q = 0$

$q = \frac{\sigma}{1 - n_0 + \sigma}$ y

la concentración en fase líquida: $c_0 = \frac{E + \sigma}{n}$

$C = \frac{E}{n}$

y se llega a establecer que:

$$n_o = n + \sigma.$$

Puede ocurrir que $\sigma = 0$ después de un tiempo, o sea a $t > 0$ y esto implica

$$q = 0$$

$$c = c_o$$

Puede ocurrir que σ sea máxima después de un tiempo, o sea a $t > 0$ y esto implica

$$q = c_o$$

$$c = 0$$

Planteando un balance de masa se tendrá:

$$\left[\begin{array}{l} \text{lo que entra} \\ \text{por (a)} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{lo que sale} \\ \text{por (b)} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{acumulación en fase II} \\ \text{quida y en fase sólida} \end{array} \right] \quad 2.5.1$$

o sea:

$$\begin{aligned} \left[QC - AD \frac{\partial}{\partial z}(Cn) \right] dz - \left[\left((QC - AD \frac{\partial}{\partial z}(Cn)) + \frac{\partial}{\partial z}(QC - AD \frac{\partial}{\partial z}(Cn)) \right) dz \right] = \\ = \frac{\partial}{\partial t} \left[(Adz) nC \right] + \frac{\partial}{\partial t} \left[(Adz) (1 - n)q \right] \end{aligned}$$

o bien:

$$- \frac{\partial}{\partial z} (QC - AD \frac{\partial}{\partial z}(Cn)) = A \frac{\partial}{\partial t}(Cn) + A \frac{\partial}{\partial t} ((1 - n)q)$$

$$- \frac{Q}{A} \frac{\partial c}{\partial z} + D \frac{\partial^2}{\partial z^2} (Cn) = \frac{\partial}{\partial t} (Cn) + \frac{\partial q}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial t} (nq)$$

y como $\frac{Q}{A} = v$,

$$\frac{\partial}{\partial t} (Cn) + \frac{\partial q}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial t} (nz) + v \frac{\partial C}{\partial z} = D \frac{\partial^2}{\partial z^2} (Cn)$$

sustituyendo el valor de "n"

$$\frac{\partial}{\partial t} (C(n_o - \sigma)) + \frac{\partial q}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial t} (q(n_o - \sigma)) + v \frac{\partial C}{\partial z} = D \frac{\partial^2}{\partial z^2} (C(n_o - \sigma))$$

$$\begin{aligned} n_o \frac{\partial C}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial t} (C\sigma) + \frac{\partial q}{\partial t} - n_o \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} (q\sigma) + v \frac{\partial C}{\partial z} &= n_o D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \\ &- D \frac{\partial^2}{\partial z^2} (C\sigma) \end{aligned} \quad 2.5.2$$

ya que el valor de "σ" es muy pequeño, al derivar el término que lo contenga será un valor aún menor, por lo que los siguientes términos no se tomarán en cuenta:

$$\frac{\partial}{\partial t} (C\sigma), \quad \frac{\partial}{\partial t} (q\sigma) \quad \text{y} \quad D \frac{\partial^2}{\partial z^2} (C\sigma)$$

y al dividir entre "n_o" queda:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{1}{n_o} \frac{\partial q}{\partial t} - \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{v}{n_o} \frac{\partial C}{\partial z} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial t} \left(\frac{1}{n_o} - 1 \right) + \frac{V}{n_o} \frac{\partial C}{\partial z} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$$

o bien:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \left(\frac{1 - n_o}{n_o} \right) \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{V}{n_o} \frac{\partial C}{\partial z} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \left(\frac{1 - n_o}{n_o} \right) \frac{\partial q}{\partial t} + V_o \frac{\partial C}{\partial z} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad 2.5.3$$

La transferencia de masa puede aceptarse como:

$$C_o = kq$$

esto es, que existe una relación directamente proporcional entre la concentración inicial en fase líquida y la concentración en fase sólida [2], o sea:

$$q = KC_o$$

y derivando con respecto al tiempo

$$\frac{\partial q}{\partial t} = K \frac{\partial C}{\partial t} \quad 2.5.4$$

[2] Al procesar los datos del laboratorio, se podrá comprobar la relación de q Vs C_o (consultar Gráfica 6.1)

reemplazando en 2.5.3

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \left(\frac{1 - n_0}{n_0} \right) K \frac{\partial C}{\partial t} + V_0 \frac{\partial C}{\partial z} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad \text{por lo que:}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} \left[1 + K \left(\frac{1 - n_0}{n_0} \right) \right] + V_0 \frac{\partial C}{\partial z} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad 2.5.5$$

conviniendo en que:

$$1 + K \left(\frac{1 - n_0}{n_0} \right) = G$$

entonces:

$$G \frac{\partial C}{\partial t} + V_0 \frac{\partial C}{\partial z} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad 2.5.6$$

Con las siguientes condiciones frontera:

$$C(z, t) = 0 \quad \text{para } z > 0 \text{ y } t = 0$$

$$C(z, t) = C_0 \quad \text{para } z = 0 \text{ y } t > 0$$

$$\lim_{z \rightarrow \infty} C(z, t) = 0 \quad \text{para } t > 0$$

arreglando:

$$\frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{V_0}{D} \frac{\partial C}{\partial z} - \frac{G}{D} \frac{\partial C}{\partial t} = 0 \quad 2.5.7$$

empleando una transformada de Laplace, esta ecuación diferencial parcial se convierte en la siguiente ecuación ordinaria:

$$\frac{d^2 \bar{c}}{dz^2} - \frac{V_0}{D} \frac{d\bar{c}}{dz} - \frac{G}{D} s \bar{c} = 0 \quad 2.5.8$$

en donde $\bar{c} = \int_0^{\infty} c e^{-st} dt$

La ecuación 2.5.8 es de la forma general:

$$ay'' + by' + c = 0$$

donde:

$$a = 1$$

$$b = -\frac{V_0}{D}$$

$$c = -\frac{Gs}{D}$$

entonces:

$$y_1 = \exp \left[\frac{V_0}{2D} + \left[\left(\frac{V_0}{2D} \right)^2 + \frac{Gs}{D} \right]^{1/2} \right] z$$

$$y_2 = \exp \left[\frac{V_0}{2D} - \left[\left(\frac{V_0}{2D} \right)^2 + \frac{Gs}{D} \right]^{1/2} \right] z$$

cuya solución general está dada por la expresión:

$$\bar{c} = A \exp \left\{ \frac{V_0}{2D} + \left[\left(\frac{V_0}{2D} \right)^2 + \frac{Gs}{D} \right]^{1/2} \right\} z + B \exp \left\{ \frac{V_0}{2D} - \left[\left(\frac{V_0}{2D} \right)^2 + \frac{Gs}{D} \right]^{1/2} \right\} z \quad 2.5.$$

para la solución particular se aplicarán las condiciones frontera:

$$\lim_{z \rightarrow \infty} C(z, t) = 0 \quad \text{para } t > 0$$

o sea:

$$0 = Ae^{\infty} + Be^{-\infty}$$

$$0 = A(\infty) + B(0)$$

lo que implica que $A = 0$

quedando:

$$C = B \exp \left\{ \frac{V_0}{2D} - \left[\left(\frac{V_0}{2D} \right)^2 + \frac{G}{D^2 s} \right]^{1/2} \right\} z \quad 2.5.10$$

considerando las condiciones frontera:

$$\bar{C}(z, t) = \frac{C_0}{s} \quad \text{para } z = 0, t > 0$$

$$\frac{C_0}{s} = Be^0 \quad \text{para } e^0 = 1$$

$$\frac{C_0}{s} = B$$

Sustituyendo en 2.5.10

$$\bar{C} = \frac{C_0}{s} \exp \left\{ \frac{V_0}{2D} - \left[\left(\frac{V_0}{2D} \right)^2 + \frac{G}{D^2 s} \right]^{1/2} \right\} z \quad 2.5.11$$

efectuando operaciones y separando términos:

$$\frac{\bar{c}}{c_o} = \frac{1}{s} \exp \left\{ \frac{V_o z}{2D} - \left[\frac{V_o^2}{4D^2} + \frac{G}{D} s \right]^{1/2} z \right\}$$

$$\frac{\bar{c}}{c_o} = \frac{1}{s} \exp \left\{ \frac{V_o}{2D} z + z \left(\frac{G}{D} s - \frac{V_o^2}{4D^2} \right)^{1/2} \right\} \quad 2.5.12$$

aplicando la transformación inversa según Banks y Ali (18)

$$\frac{c}{c_o} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{z - V_o t / G}{2\sqrt{Dt/G}} \right) + \exp \frac{V_o z}{D} \operatorname{erfc} \left(\frac{z + V_o t / G}{2\sqrt{Dt/G}} \right) \right] \quad 2.5.13$$

donde:

$$\operatorname{erfc} X = 1 - \operatorname{erf} X$$

siendo:

$$\operatorname{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy$$

3. MEDIOS FILTRANTES

3.1 Antecedentes

Como se mencionó en el primer capítulo, uno de los objetivos de esta investigación es el de encontrar un medio filtrante que sustituya a la antracita en un lecho dual con fines de potabilización de aguas.

3.2 Selección de los materiales (23), (24) y (25)

Filtración en lecho dual es el término aplicado a los filtros cuyo medio granular está graduado tanto por densidad como por tamaño en el cual el medio menos denso y más grueso es el superficial; y el más denso y fino se estratifica en la parte profunda. Tal filtración logra cumplir con el requerimiento

de que la suspensión que será filtrada pase primero a través de los poros de los granos gruesos y luego a través de los poros de un medio más fino.

Para cumplir con las características mencionadas se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica tratando de localizar información en la cual se reportaran ensayos realizados con materiales con características físico-químicas similares a las de la antracita. Algunos materiales sintéticos y pétreos fueron recomendados pero por su alto costo de obtención para nuestro país fueron descartados (26), (27) y (28), detectándose únicamente el huesillo de coco (29).

Con base en la experiencia del M en I. Humberto Vidales y por consultas realizadas con Investigadores del Instituto de Geología de la UNAM, fueron propuestos la piedra pómez y el tezon-tle.

3.3 Obtención de los materiales

En el caso de la antracita y la arena sílica no fue un problema su adquisición ya que el proveedor (AFSA Tratamientos de Aguas) las suministró en cantidad adecuada y con la granulometría requerida.

La roca pumítica fue adquirida a vendedores y transportistas de materiales lo cuales la trasladaron de grandes bancos -

existentes en las márgenes del Río Tula. El suministro fue en fragmentos con granulometrías diversas mayores a 4 cms.

El tezontle se compró directamente a casas comerciales del ramo de la construcción. Al igual que el caso anterior, el proveedor lo suministró con granulometría no uniforme y en tamaños mayores a los 3 cms.

La adquisición del huesillo de coco fue problemática, ya que son pocas las firmas comerciales que lo industrializan. Coco Colima, S. A. fue la empresa proveedora. La presentación a la venta de este material fue en trozos de corteza cuyo tamaño fue mayor a los 4 cms.

3.4 Preparación de los materiales

Debido a que los materiales fueron adquiridos en el período de lluvias, se necesitó secarlos en un horno con objeto de hacerlos más manejables al triturado, caso especial fue el huesillo de coco, ya que por su constitución se requirió un cepillado superficial para eliminar la cubierta fibrosa.

La fabricación de cada uno de ellos, previo a las pruebas de laboratorio, obedeció a las características granulométricas generalmente empleadas, tales como: coeficiente de uniformidad (Cu) y tamaño efectivo (E).

Para la arena y antracita se adoptaron valores típicos; y para el resto de los materiales, a falta de información y con objeto de estar en igualdad de condiciones, se tomaron iguales valores que los clásicos para atracita.

3.5 Triturado (fig 3.1, 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6)

En el triturado de los materiales se empleó un equipo de quijadas (Soil Test Inc., 3 H.P.) el cual no resultó ser el óptimo para este tipo de materiales, ya que se producen grandes cantidades de "finos" no utilizables en el proceso de filtrado.

3.6 Tamizado (fig 3.2)

Los requisitos granulométricos del material filtrante por emplear fueron:

	Arena	Otros
Coefficiente de uniformidad (Cu)	1.40	1.50
Tamaño efectivo (E), cm	0.063	0.091

Después de triturados, los materiales presentarán los siguientes resultados para análisis granulométrico:

TABLA 3.1 ANALISIS GRANULOMETRICO DE LOS MATERIALES EMPLEADOS

Malla No.	mm	Peso (Kg) Retenido	%	Entero %	Acum. %
8	2.38	7.160	13.7	14	14
16	1.00	7.941	15.2	15	29
30	0.51	3.853	7.4	7	36
100	0.149	17.535	33.6	34	70
Charola	Finos	15.712	30.1	30	100

PIEDRA POMI

$$\Sigma = 52.201$$

Malla No.	mm	Peso (Kg) Retenido	%	Entero %	Acum. %
8	2.38	16.103	22.8	23	23
16	1.00	18.097	25.6	26	49
30	0.51	8.244	11.7	12	61
100	0.149	18.129	25.7	26	87
Charola	Finos	10.027	14.2	14	100

TEZONTLE

$$\Sigma = 70.600$$

Malla No.	mm	Peso (Kg) Retenido	%	Entero %	Acum. %
8	2.38	24.354	65.3	65	65
16	1.00	5.096	13.7	14	79
30	0.51	2.789	7.5	8	87
100	0.149	2.589	6.9	7	94
Charola	Finos	2.441	6.4	6	100

HUESILLO

$$\Sigma = 37.269$$

Recordando que el material granular disponible para filtración para cumplir con $E = 0.091$ cm se encuentra únicamente entre las mallas 16 y 30, se procedió a eliminar lo retenido hasta la criba 8 y lo que pasa la número 30.

De esta manera se realizó un segundo cribado obteniéndose:

TABLA 3.2 GRANULOMETRIA EMPLEADA EN LA FABRICACION DE LOS MEDIOS FILTRANTES.

Malla No.	mm	Peso (Kg) Retenido	Porciento %	Entero %	Acum. %
16	1.00	0.332	7.7	.8	.8
18	0.96	0.900	20.8	21	29
20	0.84	0.900	20.8	21	50
24	0.71	1.415	32.8	32	82
30	0.51	0.772	17.9	18	100
		$\Sigma = 4.319$		100	

MATERIAL FILTRANTE: ARENA

Malla No.	mm	Peso (Kg) Retenido	Porciento %	Entero %	Acum. %
12	1.41	0.651	25.6	26	26
14	1.19	0.651	25.6	26	52
16	1.00	0.163	6.4	6	58
18	0.96	0.488	19.2	19	77
20	0.84	0.586	23.1	23	100
		$\Sigma = 2.539$			

MATERIAL FILTRANTE: TEZONTLE, PIEDRA POMITICA Y HUESILLO DE COCO.

Con estos valores se dibujó en papel logarítmico las rectas de los materiales (Gráfica 3.1).

Para el cribado fue empleado un juego de cribas vibradoras de 25" de diámetro y posteriormente un equipo ROT TAP (Testing Sieve Shaker, Mod B, 1/4 H.P.) implementado con un juego de cribas de Serie Tyler del No. 12 al 30.

3.6.1 Rendimientos

Como ya se mencionó el proceso de triturado empleado no fue el mejor y es por esto que los valores que se reportan a continuación resultaron ser muy bajos.

De la Tabla 3.1:

M A T E R I A L	Huesillo de Coco	Roca Pumítica	Tezontle
Peso muestra antes de triturar, Kg.	37.270	52.200	70,600
Peso muestra utilizable para filtración (retenido malla 12 a 20(, Kg	8.137	7.537	21.732
Procentaje aprovechable	21.833	14.439	30.782

TABLA 3.3 RENDIMIENTOS DE LOS MATERIALES

Para la piedra pómez, el rendimiento resultó poco alentador (14.43%). La razón radica fundamentalmente en la estructura del material. Se tiene la certeza que con otro proceso de triturado, se le sacará mayor partido.

El bajo rendimiento que se obtuvo para el huesillo de coco (21.8%) es atribuible en gran medida al procedimiento empleado, ya que se hizo necesario pasar hasta 28 veces la muestra por la trituradora.

El 37.8% fue el rendimiento más alto registrado, correspondiendo al tezontle. Si bien es bajo, como en los casos anteriores, es posible elevarlo sustancialmente con otros procedimientos de quebrado.

3.7 Pruebas físico-químicas

Los materiales fueron sometidos a las pruebas físicas de: dureza, peso específico, porosidad y pérdidas por ignición; y a las químicas de: solubilidad al ácido clorhídrico y solubilidad al hidróxido de sodio. Con objeto de tener certeza en los resultados, cada prueba se hizo un mínimo de dos veces y en el caso del peso específico del tezontle, la prueba se repitió seis veces para tener la seguridad de que los resultados obtenidos eran representativos.

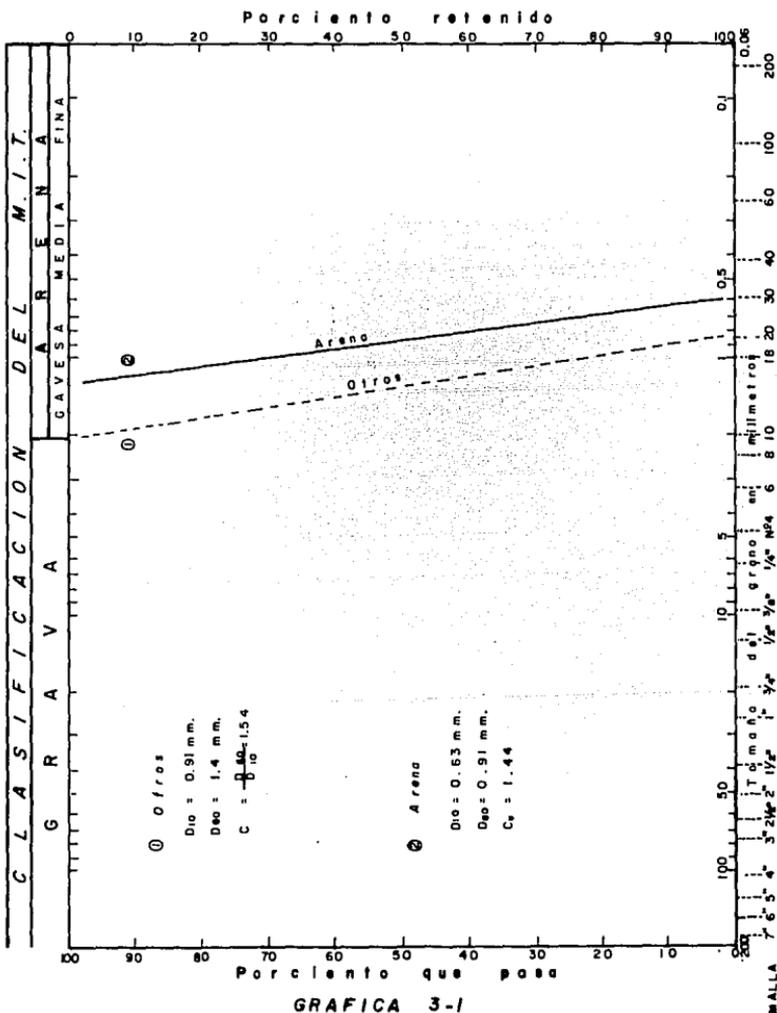
Cabe aclarar que ninguna de las referencias consultadas proporcionó normas de materiales para filtrado y es por esto que los resultados obtenidos deberán ser considerados con criterio enfocado a las condiciones reales de operación.

Los procedimientos analíticos de las pruebas se presentan en el Anexo I.

Los resultados de los ensayos se presentan en la Tabla 3.4; y en la Tabla 3.5, el resumen de los mismos.

GRAFICA GRANULOMETRICA DE MATERIALES PARA FILTRACION

46



D E T E R M I N A C I O N E S

M A T E R I A L	POROSIDAD				SOLUBILIDAD			Na OH		DUREZA	
	V_t	W_m	P.E.	V_m	V_v	P(%)	W_m	$W_{(m)NaOH}$	Δ	%	(Esc. de MOH)
PIEDRA POMEZ	190	75	1.63	46.02	143.99	76.00	10	9.8955	0.1045	1.05	3
	195	75	1.63	46.01	148.99	76.40					
						P(%) = 76.20					
TEZONTLE	117.5	75	2.44	30.74	86.76	74	5	4.9783	0.0217	0.43	4
	116.0	75	2.44	30.74	85.26	74					
						P(%) = 74					
ARENA											
COCO							5	4.5338	0.4662	9.32	3
ANTRACITA							10	9.8992	0.1008	1.01	3

V_t = Vol. total
 W_m = Peso muestra
P.E. = Peso específico
 V_m = Volumen muestra
 V_v = Volumen vacío = $V_t - V_m$
P% = Porosidad en % = $V_v / V_t \times 100$
 $W_{(m)NaOH}$ = Peso-muestra después de 24 hrs en NaOH

TABLA 3.4 DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS FISICO-QUIMICAS DE LOS MATERIALES DE FILTRACION

D E T E R M I N A C I O N E S

M A T E R I A L	PESO				ESPECIFICO				IGNICION				SOLUBILIDAD				HCl	
	W_m	W_{ma}	W_{m+ma+a}	W_{m+a}	Adesp.	V_m	P.E.	V_{c+m}	$W_{(c+m)a}$	Δ	%	W_m	$W_{(m)HCl}$	Δ	%			
PIEDRA POMEZ	75	154.75	682.35	527.60	452.60	47.40	1.58	46.7378	46.5960	0.1418	0.64	10	9.1642	0.8358	8.36			
	50	156.30	676.40	520.10	470.10	29.90	1.67	32.0730	31.7631	0.3099	4.2	10	9.2950	0.7050	7.05			
								P.E. = 1.63			% = 2.42				% = 7.71			
TEZONILE	75	154.60	700.00	545.40	470.40	29.60	2.53	50.4316	50.3494	0.0822	0.32	10	9.7716	0.2204	2.28			
	30	156.40	673.65	517.25	487.25	12.75	2.35	48.9380	48.8820	0.0560	0.23	10	9.7866	0.2134	2.13			
								P.E. = 2.44			% = 0.28				% = 2.21			
ARENA	75	153.30	699.60	546.30	471.30	28.70	2.61	37.5373	37.4527	0.0846	0.66	10	9.9414	0.0586	0.59			
	75	154.65	699.45	544.80	469.80	30.20	2.48	33.1440	33.0909	0.0531	0.63	10	9.8760	0.1240	1.24			
								P.E. = 2.55			% = 0.65				% = 0.92			
COCO	75	115.20	643.75	528.55	453.55	46.45	1.61	52.2846	42.7310	9.5536	34.6	10	9.8593	0.1407	1.41			
	50	156.55	671.60	515.05	465.05	34.95	1.43	45.2730	40.0320	5.2410	25.46	10	9.7740	0.2260	2.26			
								P.E. = 1.52			% = 30.03				% = 1.84			
ANTRACITA	75	156.15	681.70	525.55	450.55	49.45	1.52	31.5143	30.3732	1.1391	16.69	10	9.9786	0.0214	0.21			
	75	147.75	682.15	534.40	459.40	40.60	1.85	51.4615	50.3460	1.1155	4.17	10	9.9870	0.0130	0.13			
								P.E. = 1.69			% = 10.43				% = 0.17			

W_m = peso muestra(g)
 W_{ma} = peso matraz (g)
 W_{m+ma+a} = peso matraz + muestra + agua
 W_{m+a} = peso muestra + agua

Adesp. = agua desplazada
 V_m = volumen muestra
 P.E. = peso específico
 W_{c+m} = peso crisol + muestra

TABLA 3.4 (CONTINUACION)

TABLA 3.5 CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES DE FILTRACION

MATERIAL	PESO ESPECIFICO	POROSIDAD (%)	DUREZA (MOHS)	PERDIDA IGNICION (%)	SOLUBILIDAD	
					HCL (%)	NaOH (%)
Piedra Pómez	1.63	76.20	3	2.42	7.71	1.05
Tezontle	2.44	74.00	4	0.28	2.21	0.43
Huesillo Coco	1.52	77.00	3	30.03	1.84	9.32
Antracita	1.69	55.00	3	10.43	0.17	-
Arena	2.55	44.00	7	0.65	0.92	-

Como comentario a las Tablas mencionadas, el peso específico reportado para el huesillo de coco y para la piedra pómez son similares, con el mínimo valor correspondiendo al primero.

El peso específico del tezontle resultó ser muy superior a lo esperado. Por su similitud con el de la arena, en la operación de retrolavado se presentó una mezcla total de ambos materiales, sin embargo las pruebas se continuaron a pesar de este valor obtenido ya que solo influye en la fase de limpieza del material y no en la de filtrado.

El alto peso específico se debe básicamente a la alta proporción de fierro en el material. Por lo anterior se deduce que existen varias clases de tezontle dependiendo de la concentración de los constituyentes. Esta precaución debe ser extensiva a cualquier material pétreo.

Referente a la porosidad, resultó ser semejante para el huesillo de coco, roca pumítica y tezontle. Esto se debe a que el tamaño de partícula para cada material fue igual y las pequeñas variaciones se deben a la forma de grano y estructura particular.

En cuanto a dureza, los materiales resultaron tener igual o mayor que la de la antracita, por lo cual esta condición fue satisfecha.

La piedra pómez y el tezontle registraron pérdidas menores por ignición, lo cual es lógico tomando en cuenta que se trata de materiales pétreos; caso contrario en el huesillo de coco, ya que por su origen orgánico se obtuvieron pérdidas de un 30%, sin embargo no parecen ser excesivamente altas si se toma en cuenta que la temperatura de prueba fue de 650°C. Por lo que el resultado de la prueba no es factor limitante para el empleo de este material.

La solubilidad al ácido clorhídrico resultó ser alta para la piedra pómez (7.71%); y en el caso del hidróxido de sodio, fue

alto para el huesillo de coco (9.32%) sin embargo, la interpretación de estos datos debe ser tomada con cautela, ya que las condiciones de prueba jamás se presentarán en la realidad.

Como resumen de esta etapa del estudio, se concluye que tanto la roca pumítica como el huesillo de coco son materiales que pueden ser usados en combinación con la arena de origen sílico o cuarzoso en un lecho dual para filtración.

Por lo que respecta al tezontle, aunque cumple con las características físico-químicas, la variedad empleada en el estudio no puede utilizarse eficientemente en lechos duales de filtración.

Es necesario por lo tanto en futuros estudios emplear otro tipo de tezontle más ligero que cumpla con los valores especificados.

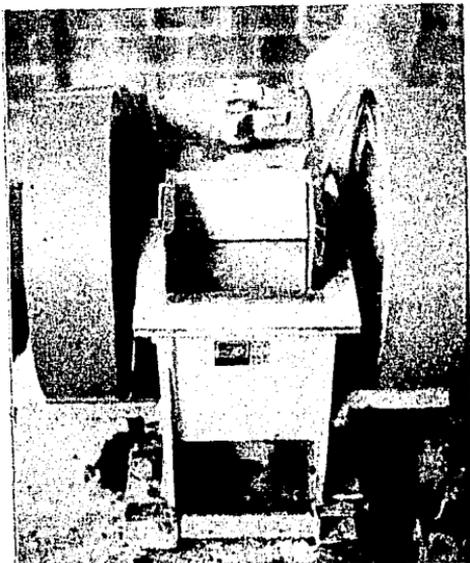


Fig 3.1 TRITURADORA EMPLEADA EN LA FABRICACION DE LOS MEDIOS FILTRANTES

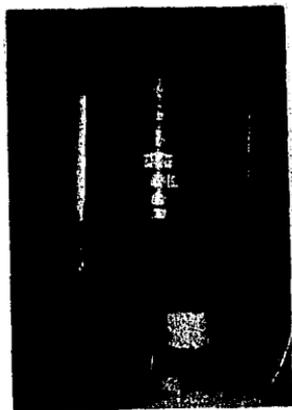


Fig 3.2 EQUIPO ROT-TAP PARA CLASIFICAR EL MEDIO GRANULAR.



Fig 3.3 MATERIAL A SUSTITUIR: ANTRACITA

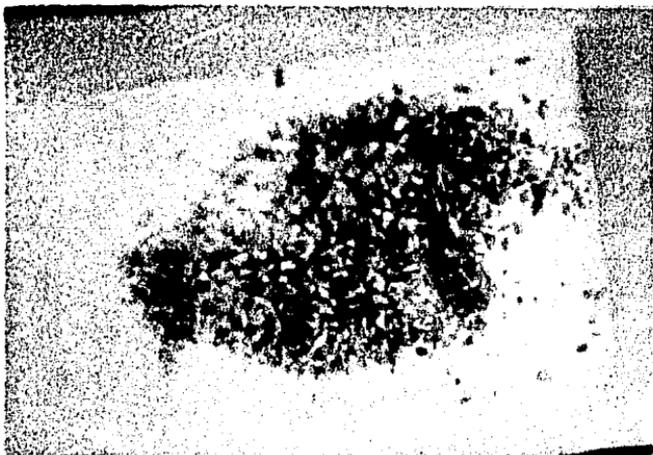


Fig 3.4 ROCA PUMITICA TRITURADA Y CLASIFICADA, MISMAS CARACTERISTICAS FISICAS QUE LAS DE LA ANTRACITA.



Fig 3.5 HUESILLO DE COCO LISTO PARA SER COLOCADO EN EL MODELO DE LABORATORIO



Fig 3.6 TEZONTLE CLASIFICADO

4. MODELO DE LABORATORIO

4.1 Modelo físico

El modelo físico de laboratorio se muestra en las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3 en forma diagramática en la Figura 4.4 y está compuesto por:

1. Tubería de red de agua potable ($\phi = 2''$)
2. Tubería de red para alimentación de retrolavado ($\phi = 1''$)
3. Tubería de alimentación de cárcamo
4. Cárcamo de bombeo (1100 l)
5. Motor 1/4 HP con propela de 4"
6. Tubería para alimentación del dosificador
7. Dosificador
8. Bomba centrífuga 7 1/2 HP
9. Tubería alimentación tinaco

10. 2 tinacos (2200 l)
11. Electroniveles monofásicos
12. Válvulas (ϕ 1") influente
13. Columnas (0.0156 m² sección para filtración)
14. Válvulas (ϕ 1") efluente
15. Tubería efluente (ϕ 1")
16. Desague (ϕ 2")
17. Control eléctrico de bomba

Dadas las limitaciones volumétricas para la fabricación del agua problema y la disponibilidad de personal para trabajar en forma continua períodos mayores de 72 hrs, se estableció una carga superficial (C_s) adecuada a las condiciones imperantes y a velocidades altas reportadas en la literatura (5 a 25 m/hr).

$$C_s = 16.28 \text{ m/hr} = 390.72 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$$

por lo que sí:

$$\text{Area filtrante} = (0.125\text{m})^2 = 0.0156 \text{ m}^2$$

$$Q = AV = 0.0156 \text{ m}^2 \times 16.28 \text{ m/hr} \times 10^6 \text{ ml/m}^3 \times 1/3600 \text{ hr/seg}$$

$$= 70.55 \text{ ml/seg}$$

Para ensayos de 72 hrs.

$$\begin{aligned}\text{Volumen de agua por columna} &= 70.55 \text{ ml/seg} \times 72 \text{ hrs}/3600 \text{ seg/hr} \\ &= 18.29 \times 10^6 \text{ ml} = 18.29 \text{ m}^3\end{aligned}$$

$$\text{Volumen de agua para dos columnas} = 36.58 \text{ m}^3$$

Si el volumen total de los dos tinacos era de 2.2 m^3 .

$$\text{llenado de tinacos} = 36.58 \text{ m}^3/3 \text{ días} \times 2.2 \text{ m}^3 = 5.54 \text{ veces por día}$$

Por lo que los tinacos debieron llenarse 6 veces diarias, cada 4 horas; y el cárcamo 12 veces cada 2 horas.

La calibración de las válvulas del influente para ajustar el gasto constante se realizó bajo el sistema tiempo contra volumen (ml/seg).

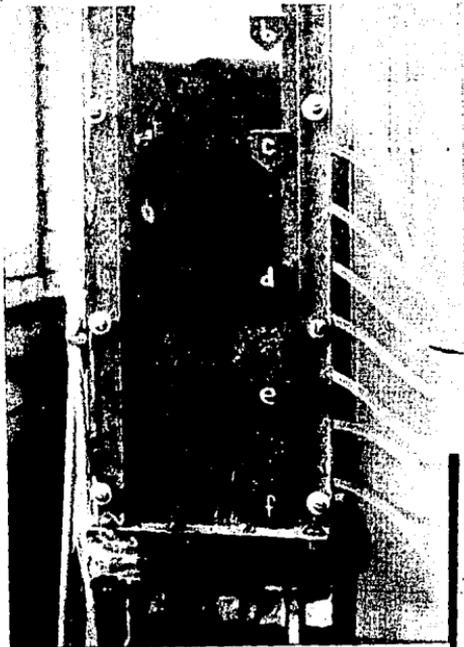
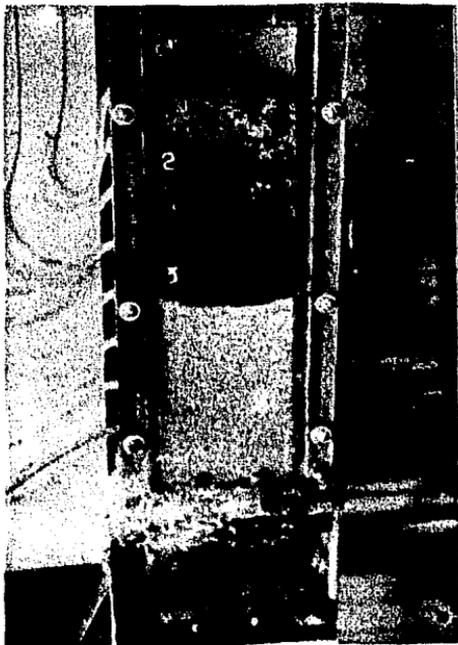


Fig 4.1 LECHO DUAL DE ARENA SILICA Y ANTRACITA. SE APRECIAN LOS PIEZOMETROS A LA DERECHA DE LA COLUMNA; Y EN EL LADO OPUESTO LOS PUNTOS DE MUESTREO

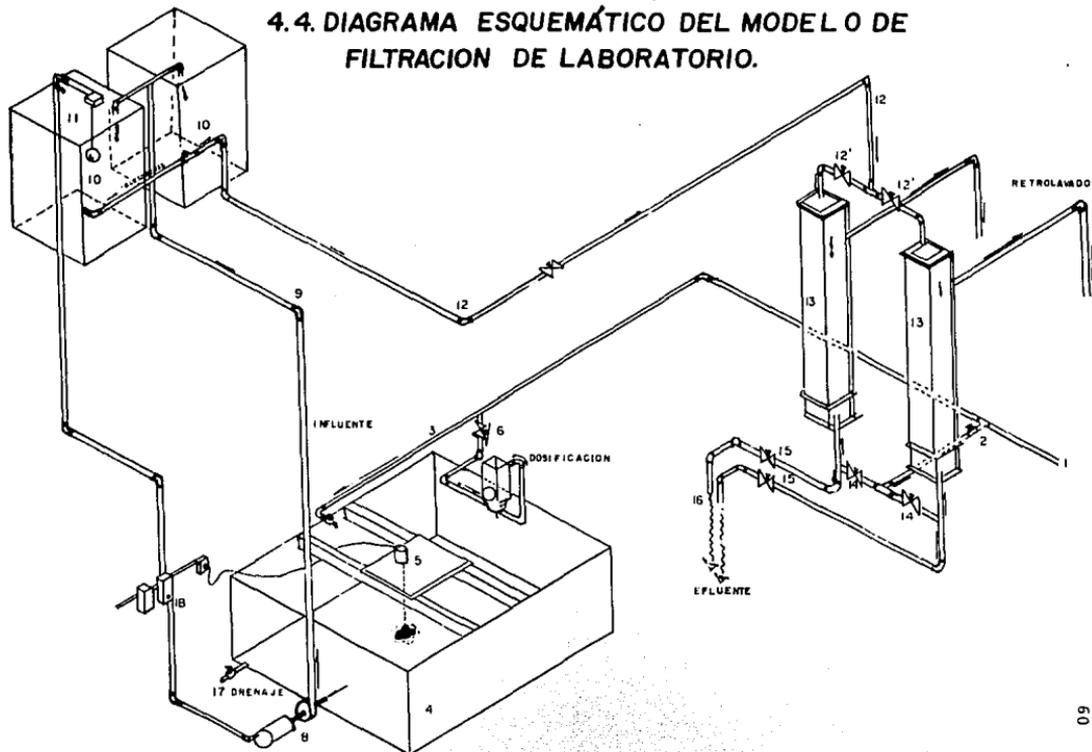
Fig 4.2 MEDIO DUAL COM PUESTO POR PIEDRA POMEZ Y ARENA SILICA EL PROCESO DE CARGADO DE LA COLUMNA ES ILUSTRADO





ig 4.3 LA COLUMNA CONTIENIENDO HUESILLO DE COCO Y ARENA SILI-
CA TERMINA LA PRUEBA. ES PATENTE LA COLMATACION EN
PROFUNDIDAD EN AMBOS MEDIOS GRANULARES.

FIGURA N°.
4.4. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL MODELO DE
FILTRACION DE LABORATORIO.



4.2 Fabricación del agua problema

Lo mejor en este tipo de pruebas es procesar agua cuyo color, turbiedad y demás características físico-químicas sean las reales, sin embargo, debido a los grandes volúmenes requeridos - (12 m³/día, aproximadamente de 24 a 36 m³/corrida) fue necesario fabricar el agua problema.

Para producir un agua similar a la que se origina a la salida de un sedimentador donde queda un residual en suspensión de producto químico y flóculo se realizaron gran cantidad de pruebas de jarras, variando la dosificación de cada una de las siguientes alternativas en combinación con variaciones de pH:

Arcilla:	Caolín
Coagulante:	Sulfato de aluminio Al ₂ (SO ₄) ₃
Polielectrolito:	Cat-floc
Coagulante + Arcilla + Polielectrolito:	Al ₂ (SO ₄) ₃ + Caolín + + Cat-floc

Cabe aclarar que el empleo de Caolín obedeció a la nula turbiedad del agua cruda (agua del sistema de abastecimiento de Ciudad Universitaria); y el empleo de polielectrolito sirvió para facilitar la formación del flóculo y darle tamaño y consistencia similares a las reales.

La dosificación final de productos químicos fue:

Sulfato de aluminio	8 mg/l
Caolín	15 mg/l
Polielectrolito	0.0209 ml/l

4.3 Operación del modelo de laboratorio

La experimentación se realizó con espesores filtrantes de 40 cm. El gasto de entrada fue siempre constante.

Al arranque de la prueba, fue necesario fabricar pantallas distribuidoras del gasto influente con objeto de no perturbar el medio granular. En las primeras horas se tuvo la precaución, mediante el ajuste de la válvula del efluente, de mantener una carga hidráulica sobre el lecho para no agitarlo.

Posteriormente fue conectada una manguera al tubo de efluente a la cual se le variaba la altura sobre el piso con objeto de mantener carga constante sobre el medio filtrante.

Al progresar la colmatación del filtro, las pérdidas se incrementaban originando un aumento de carga sobre la superficie granular hasta desbordar por la parte superior de la columna; en este momento, aunque el gasto efluente permanecía constante, la carga superficial no, por lo que se concluía la prueba.

4.4 Secuencia de prueba

A continuación del llenado de columnas con material, se procedió a purgar el aire tanto de las tuberías como del medio filtrante. Fueron calibradas las válvulas de influente para - - 352.75 ml/5 seg.

La preparación del agua problema se verificó cada 2 horas consistiendo en llenar el cárcamo hasta la marca de 1.1 m³. Durante el llenado, y aprovechando la turbulencia en el tanque, fueron adicionándose en forma gradual los productos químicos. Al alcanzar el nivel de agua la marca mencionada, fue conectado el agitador mecánico y al mismo tiempo la bomba llevaba el agua problema a los tinacos.

Primero se agregó 16.5 gr de caolín ($0.0155 \text{ gr/l} \times 1100 \text{ l} = 16.5 \text{ gr}$ por cárcamo) para crear turbiedad; después, 8.80 gr de sulfato de aluminio ($8 \times 10^{-3} \text{ gr/l} \times 1100 \text{ l} = 8.80 \text{ gr}$ por cárcamo) para flocular; y por último, 23 ml de polielectrolito - ($0.0209 \text{ ml/l} \times 1100 \text{ l} = 23 \text{ ml}$ por cárcamo) para ayuda floculante. Para este último, se formó primero una solución concentrada (23 ml de Cat-floc/5 l de agua) la cual, mediante un dosificador, fue incorporado en forma proporcional a la velocidad de llenado del cárcamo.

Se consideró que al pasar el agua problema por la bomba, estu-

vo sujeta a un mezclado rápido, y que el flóculo formado en el cárcamo fue destruido para reconstruirse en los tinacos, lugar donde el tiempo de retención fue de aproximadamente dos horas.

En cada llenado de tinacos, se verificó el calibrado de válvulas.

El período de muestreo se realizó cada hora para profundidad del lecho dual de 40 cms.

Para los puntos de muestreo, se perforó una de las paredes del modelo de laboratorio a 0, 10, 20, 30 y 40 cms a partir de la base, correspondientes a: efluente, mitad del primer estrato (arena), interfase de los medios granulares, mitad del segundo estrato (antracita o sustituto) e influente, respectivamente. A estas perforaciones les fueron conectadas unas mangueras de plástico para la toma de muestras. Según la referencia bibliográfica, la suma de estos cinco goteos no debe exceder del 5% del gasto influente (30) y (31).

Para evitar fugas del medio filtrante a través de las mangueras se colocó entre el medio filtrante y la pared del modelo, una malla con abertura menor al tamaño más pequeño de grano.

Fueron empleados 45 seg. desde la toma de muestra del influente hasta la del efluente, tiempo teórico requerido para que -

una partícula del gasto viaje a toda la profundidad del lecho dual a la velocidad de 390.72 m/dfa.

Al mismo tiempo en que se tomaban las 10 muestras de las dos columnas (primero lechos duales de arena-antracita y arena - piedra pómez, luego de arena-huesillo de coco y arena-tezon-
tle) se leía el nivel en piezómetros. Se aclara que se contó con un piezómetro por punto de muestreo (5 por columna de fil-
tración).

Una vez colectadas las muestras de ambas columnas, a cada una se le determinó la turbiedad con un equipo HACH modelo 2100 A. Para cada serie de lecturas, Co correspondió a la turbiedad del influente y C a la de las muestras tomadas a diferentes profundidades.

5. PRUEBAS EN FASE DE FILTRACION

INSTITUTO DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

DOSIFICACION: 15.0 mg/l Caolín
8.0 mg/l Sulfato de Aluminio
0.0209 mg/l Polielectrólito
MATRACES DEL 1 AL 5: ROCA PUMITICA - ARENA SILICA
MATRACES DEL 6 AL 10: ANTRACITA - ARENA SILICA

HOJA No. 1/4
FECHA: 21/X/80
INICIO: 18:00 HRS

N U M E R O		HORA	TURBIEDAD	TEMP
MUESTRA	MATRAZ	MUESTREO	(UNIT)	(°C)
1	1	20:00	4.90	17.3
	2		4.00	
	3		2.25	
	4		2.90	
	5		1.90	
	6		5.00	
	7		3.25	
	8		2.20	
	9		2.00	
	10		1.30	
2	1	21:00	5.10	16.5
	2		4.50	
	3		4.00	
	4		2.30	
	5		1.90	
	6		6.00	
	7		3.15	
	8		2.50	
	9		2.00	
	10		1.45	

N U M E R O		HORA	TURBIEDAD	TEMP
MUESTRA	MATRAZ	MUESTREO	(UNT)	(°C)
3	1	22:00	5.70	16.4
	2		4.50	
	3		2.90	
	4		2.50	
	5		1.55	
	6		6.00	
	7		3.20	
	8		2.00	
	9		1.50	
	10		1.15	
4	1	23:00	7.50	16.3
	2		4.10	
	3		2.90	
	4		2.00	
	5		1.60	
	6		7.60	
	7		4.10	
	8		2.10	
	9		1.50	
	10		1.15	

INSTITUTO DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

DOSIFICACION: 15.0 mg/l Caolín, 8.0 mg/l Sulfato de Aluminio, .
0.0209 mg/l Polielectrólito
MATRACES DEL 1 AL 5: ROCA PUMITICA - ARENA SILICA
MATRACES DEL 6 AL 10: ANTRACITA - ARENA SILICA

HOJA No. 2/4
FECHA: 21-22/X/80

N U M E R O		HORA	TURBIEDAD	TEMP
MUESTRA	MATRAZ	MUESTREO	(UNT)	(°C)
5	1	24:00	6.60	16.2
	2		3.60	
	3		3.00	
	4		1.80	
	5		1.50	
	6		7.00	
	7		2.60	
	8		1.85	
	9		1.30	
	10		1.05	
6	1	1:00	6.90	16.1
	2		2.80	
	3		1.75	
	4		1.30	
	5		0.80	
	6		6.25	
	7		2.05	
	8		1.30	
	9		1.00	
	10		0.60	
7	1	2:00	6.00	16.0
	2		2.60	
	3		1.70	
	4		1.00	
	5		0.75	
	6		6.50	
	7		2.00	
	8		1.25	
	9		0.75	
	10		0.50	

N U M E R O		HORA	TURBIEDAD	TEMP
MUESTRA	MATRAZ	MUESTREO	(UNT)	(°C)
8	1	3:00	7.25	15.9
	2		3.00	
	3		1.95	
	4		1.10	
	5		0.80	
	6		6.00	
	7		2.40	
	8		1.40	
	9		0.80	
	10		0.60	
9	1	4:00	6.30	15.7
	2		3.40	
	3		2.80	
	4		0.95	
	5		0.75	
	6		6.20	
	7		2.95	
	8		1.30	
	9		0.90	
	10		0.70	
10	1	5:00	6.00	15.7
	2		3.20	
	3		2.80	
	4		0.80	
	5		0.70	
	6		5.90	
	7		2.00	
	8		1.25	
	9		0.90	
	10		0.60	

INSTITUTO DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

DOSIFICACION: 15.0 mg/l Caolín, 8.0 mg/l Sulfato de Aluminio

0.0209 mg/l Polielectrólito

MATRACES DEL 1 AL 5: ROCA PUMITICA - ARENA SILICA

MATRACES DEL 6 AL 10: ANTRACITA - ARENA SILICA

HOJA No. 3/4

FECHA: 22/X/80

N U M E R O		HORA	TURBIDEAD (UNT)	TEMP (°C)
MUESTRA	MATRAZ			
11	1	6:00	5.65	15.50
	2		2.45	
	3		1.65	
	4		0.85	
	5		0.70	
	6		5.95	
	7		1.90	
	8		1.10	
	9		0.80	
	10		0.60	
12	1	7:00	5.70	15.50
	2		2.45	
	3		1.50	
	4		0.80	
	5		0.70	
	6		6.00	
	7		1.95	
	8		1.45	
	9		0.95	
	10		0.80	
13	1	8:00	6.05	15.50
	2		2.45	
	3		1.40	
	4		0.75	
	5		0.65	
	6		5.90	
	7		1.90	
	8		1.40	
	9		1.00	
	10		0.80	

N U M E R O		HORA	TURBIDEAD (UNT)	TEMP (°C)
MUESTRA	MATRAZ			
14	1	9:00	6.45	19.5
	2		2.45	
	3		1.35	
	4		0.75	
	5		0.65	
	6		7.20	
	7		1.90	
	8		1.50	
	9		1.20	
	10		0.90	
15	1	10:00	5.75	20.1
	2		2.00	
	3		1.25	
	4		0.90	
	5		0.55	
	6		4.45	
	7		1.45	
	8		1.20	
	9		1.10	
	10		0.55	
16	1	11:00	4.40	20.3
	2		2.45	
	3		1.35	
	4		0.70	
	5		0.55	
	6		4.00	
	7		1.40	
	8		1.30	
	9		0.60	
	10		0.50	

INSTITUTO DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

DOSIFICACION: 15.0 mg/l Caolín
8.0 mg/l Sulfato de Aluminio
0.0209 mg/l Polielectrólito

HOJA No. 4/4
FECHA: 22/X/80

MATRACES DEL 1 AL 5: ROCA PUMITICA - ARENA SILICA, DEL 6 AL 10: ANTRACITA - ARENA SILICA

N U M E R O		HORA	TURBIEDAD	TEMP
MUESTRA	MATRAZ	MUESTREO	(UNT)	(°C)
17	1	12:00	5.10	20.5
	2		2.10	
	3		1.05	
	4		0.50	
	5		0.45	
	6		5.50	
	7		1.45	
	8		1.05	
	9		0.70	
	10		0.45	
18	1	13:00	4.75	20.5
	2		1.75	
	3		0.90	
	4		0.40	
	5		0.40	
	6		5.05	
	7		1.40	
	8		0.70	
	9		0.50	
	10		0.35	
19	1	14:00	5.05	21.0
	2		1.75	
	3		0.80	
	4		0.35	
	5		0.30	
	6		5.05	
	7		1.50	
	8		0.80	
	9		0.35	
	10		0.30	

N U M E R O		HORA	TURBIEDAD	TEMP
MUESTRA	MATRAZ	MUESTREO	(UNT)	(°C)
20	1	15:00	7.0	19.5
	2		1.75	
	3		0.80	
	4		0.30	
	5		0.30	
	6		6.50	
	7		1.05	
	8		0.95	
	9		0.27	
	10		0.20	
21	1	16:00	8.45	19.0
	2		1.95	
	3		0.85	
	4		0.30	
	5		0.25	
	6		8.50	
	7		-	
	8		0.70	
	9		0.25	
	10		0.15	
22	1	17:00	5.70	19.0
	2		1.45	
	3		0.75	
	4		0.25	
	5		0.23	
	6		6.00	
	7		-	
	8		0.70	
	9		0.30	
	10		0.05	

INSTITUTO DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

DOSIFICACION: 15.0 mg/l CAOLIN
8.0 mg/l SULFATO DE ALUMINIO
0.0209 ml/l POLIELECTROLITO
MATRACES DEL 1 AL 5: HUESILLO DE COCO-ARENA SILICA
MATRACES DEL 6 AL 10: TEZONTLE -ARENA SILICA

HOJA No. 1/3
FECHA: 14/X/80
INICIO: 11:00 HRS

N U M E R O		HORA MUESTREO	TURBIDAD (UNT)	TEMP. (°C)
MUESTRA	MATRAZ			
1	1	13:00	7.00	20.0
	2		6.30	
	3		5.70	
	4		5.30	
	5		4.95	
	6		7.00	
	7		6.45	
	8		6.05	
	9		5.70	
	10		5.40	
2	1	14:00	7.00	20.0
	2		6.30	
	3		5.65	
	4		5.40	
	5		5.10	
	6		7.00	
	7		6.50	
	8		6.15	
	9		5.85	
	10		5.60	
3	1	15:00	6.60	20.0
	2		5.30	
	3		4.45	
	4		2.95	
	5		1.90	
	6		6.25	
	7		3.70	
	8		2.60	
	9		2.10	
	10		1.70	

N U M E R O		HORA MUESTREO	TURBIDAD (UNIT)	TEMP (°C)
MUESTRA	MATRAZ			
4	1	16:00	8.90	19.5
	2		7.00	
	3		4.90	
	4		3.60	
	5		2.70	
	6		9.80	
	7		5.30	
	8		3.50	
	9		3.30	
	10		2.50	
5	1	17:00	9.20	19.0
	2		6.50	
	3		5.50	
	4		3.40	
	5		2.60	
	6		9.40	
	7		4.50	
	8		3.20	
	9		2.70	
	10		2.60	
6	1	18:00	3.80	18.0
	2		2.50	
	3		2.30	
	4		1.30	
	5		1.20	
	6		3.40	
	7		1.90	
	8		1.30	
	9		1.30	
	10		1.00	

INSTITUTO DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

DOSIFICACION: 15.0 mg/1 CAOLIN
8.0 mg/1 SULFATO DE ALUMINIO
0.0209 ml/1 POLIELECTROLITO
MATRACES DEL 1 AL 5: HUESILLO DE COCO-ARENA SILICA
MATRACES DEL 6 AL 10: TEZONTLE-ARENA SILICA

HOJA No. 2/3
FECHA: 14/X/80

N U M E R O		HORA MUESTREO	TURBIEDAD (UNT)	TEMP (°C)
MUESTRA	MATRAZ			
7	1	19:00	3.40	18.0
	2		2.20	
	3		2.10	
	4		1.10	
	5		1.00	
	6		3.10	
	7		1.70	
	8		1.25	
	9		1.10	
	10		1.10	
8	1	20:00	5.10	17.0
	2		3.50	
	3		2.80	
	4		1.60	
	5		1.20	
	6		5.50	
	7		2.30	
	8		2.00	
	9		1.40	
	10		1.30	
9	1	21:00	5.20	17.0
	2		3.65	
	3		3.50	
	4		1.85	
	5		1.25	
	6		5.05	
	7		2.35	
	8		1.75	
	9		1.40	
	10		1.30	

N U M E R O		HORA MUESTREO	TURBIEDAD (UNT)	TEMP (°C)
MUESTRA	MATRAZ			
10	1	22:00	6.70	16.5
	2		4.75	
	3		3.50	
	4		2.00	
	5		1.40	
	6		6.65	
	7		3.15	
	8		2.00	
	9		1.50	
	10		1.40	
11	1	23:00	8.60	16.5
	2		5.00	
	3		4.30	
	4		1.75	
	5		1.60	
	6		6.80	
	7		3.40	
	8		1.60	
	9		1.60	
	10		1.40	
12	1	24:00	6.50	16.1
	2		5.00	
	3		3.55	
	4		1.95	
	5		1.55	
	6		6.75	
	7		3.15	
	8		2.20	
	9		1.70	
	10		1.70	

INSTITUTO DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

DOSIFICACION: 15.0 mg/l CAOLIN
8.0 mg/l SULFATO DE ALUMINIO
0.0209 ml/l POLIELECTROLITO
MATRACES DEL 1 AL 5: HUESILLO DE COCO-ARENA SILICA
MATRACES DEL 6 AL 10: TEZONTLE-ARENA SILICA

HOJA N°: 3/3
FECHA: 15/X/80

N U M E R O		HORA MUESTREO	TURBIEDAD (UNT)	TEMP. (°C)
MUESTRA	MATRAZ			
13	1	1:00	6.55	16.0
	2		5.25	
	3		5.05	
	4		1.70	
	5		1.60	
	6		7.15	
	7		3.25	
	8		2.05	
	9		1.75	
	10		1.50	
14	1	2:00	6.50	15.8
	2		5.05	
	3		3.45	
	4		1.50	
	5		1.25	
	6		6.25	
	7		3.50	
	8		1.80	
	9		1.60	
	10		1.45	
15	1	3:00	7.80	15.8
	2		4.40	
	3		3.70	
	4		1.45	
	5		1.40	
	6		8.50	
	7		3.20	
	8		1.75	
	9		1.40	
	10		1.25	

N U M E R O		HORA MUESTREO	TURBIEDAD (UNT)	TEMP. (°C)
MUESTRA	MATRAZ			
16	1	4:00	8.50	15.3
	2		4.50	
	3		3.55	
	4		1.75	
	5		1.20	
	6		6.50	
	7		2.90	
	8		1.55	
	9		1.50	
	10		1.50	
17	1	5:00	6.55	15.0
	2		4.50	
	3		3.70	
	4		1.55	
	5		1.45	
	6		7.80	
	7		3.55	
	8		1.60	
	9		1.55	
	10		1.45	

6. PROCESAMIENTO DE RESULTADOS

6.1 Secuela de cálculo.

Los valores conocidos en la ecuación 2.5.13 son:

z Profundidad puntos de muestreo

V_0 La velocidad inicial está expresada por

$$V_0 = \frac{Q}{An}$$

t Tiempo de recorrido de la partícula a través de las profundidades de muestreo.

$$t = \frac{S}{V}$$

G El valor de "K" en la ecuación $q = K C_0$, fue obtenido al relacionar C_0 VS q (donde $q = C_0 - C$) para todos los materiales filtrantes, y por el método de mínimos cuadrados obtener la expresión de la recta dibujada en la gráfica 6.1 [1]

[1] Por claridad de la gráfica, solo se situaron algunos de los puntos referidos.

$$q = 0.787 C_0$$

por lo que: $G = 1 + 0.787 \left(\frac{1-N_0}{N_0} \right)$

C/C_0 Reportado en tablas 6.2

Ya que no es posible despejar el valor de "D" en la Ecuación 2.5.13, se procedió a elaborar un programa de computadora alimentado con los datos anteriores y por prueba-error se obtuvo el valor de "D" (tabla 6.3).

Con los valores de la velocidad "V" y la dispersión "D" se construyó la gráfica en papel semilogaritmico de cuatro por dos ciclos (Gráfica 6.3). La expresión matemática hallada fue:

$$\text{LOG } D = 0.3308 + 1.4001 \text{ LOG } V$$

Calibración de los parámetros adimensionales obtenidos al graficar en papel semilogaritmico las relaciones Reynolds VS Peclet y Reynolds VS Schmidt. En cada caso las ecuaciones obtenidas fueron:

Re VS Pe (Gráfica 6.4)

ROCA PUMITICA: $Pe = 0.1356$

TEZONTLE: $Pe = 0.083$

HUESILLO DE COCO: $Pe = 0.0645$

ANTRACITA: $Pe = 0.0511$

Re VS Sc (Gráfica 6.5)

ROCA PUMITICA: $\log Re = 0.8501 + 1.0442 \log Sc$

TEZONTLE: $\log Re = 0.3937 + 1.9381 \log Sc$

HUESILLO DE COCO: $\log Re = 1.0328 + 1.2227 \log Sc$

ANTRACITA: $\log Re = 0.9024 + 1.3986 \log Sc$

TABLAS 6.1

ESPESOR DEL MEDIO DUAL = 0.40 m

VALOR DE "q"

ROCA PUMITICA

Q = 58 cm /seg Vo = 0.4871 cm/seg					
hora	21:00	22:00	23:00	24:00	
h	Co-C	Co-C	Co-C	Co-C	Co-C
10	0.900	0.60	1.20	3.4	3.00
20	2.650	1.10	2.80	4.6	3.60
30	2.000	2.80	3.20	5.5	4.80
40	3.000	3.20	4.15	5.9	5.10

	50 0.4199	52 0.4367	53 0.4451	48 0.4031	26 0.2184	28 0.2352	20 0.1680	19 0.1596	4 0.0336	2 0.0168	
Hora	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00
	Co-C	Co-C	Co-C	Co-C							
10	4.10	3.40	4.25	2.90	2.80	3.20	3.25	3.60	4.00	3.75	1.95
20	5.15	4.30	5.30	3.50	3.20	4.00	4.20	4.65	5.10	4.50	3.05
30	5.60	5.00	6.15	6.35	5.20	4.80	4.90	5.30	5.70	4.95	3.70
40	6.10	5.25	6.45	5.55	5.30	4.95	5.00	5.40	5.80	5.20	3.85

Q = 2 cm /seg Vo = 0.0168 cm/seg						
hora	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
h	Co-C	Co-C	Co-C	Co-C	Co-C	Co-C
10	3.00	3.00	3.30	5.25	6.50	4.25
20	4.05	3.85	4.25	6.20	7.60	4.95
30	4.60	4.35	4.70	6.70	8.15	5.45
40	4.65	4.35	4.75	6.70	8.20	5.45

ESPEJOR DEL MEDIO DUAL = 0.40

CINCO PUNTOS DEL MUESTREO

ANTRACITA					
Q = 58 cm /seg Vo = 0.6749 cm/seg					
hora	20:30	21:00	22:00	23:00	24:00
h	Co-C	Co-C	Co-C	Co-C	Co-C
10	1.75	2.85	2.80	3.50	4.40
20	2.80	3.50	4.00	5.50	5.15
30	3.00	4.00	4.50	6.10	5.70
40	3.70	4.55	4.85	6.45	5.95

	50 0.5818	52 0.6091	53 0.6167	48 0.5585	26 0.3025	28 0.3258	20 0.2327	19 0.2211	4 0.0465	2 0.0233	
hora	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00
h	Co-C	Co-C	Co-C	Co-C							
10	4.20	4.50	3.60	3.25	3.90	4.15	4.05	4.00	5.30	3.00	2.60
20	4.95	5.25	4.60	4.90	4.65	4.85	4.55	4.50	5.70	3.25	2.70
30	5.25	5.75	5.20	5.30	5.00	5.15	5.05	4.90	6.00	3.35	3.40
40	5.65	6.00	5.40	5.50	5.30	5.35	5.20	5.10	6.70	3.90	3.50

Q = 2 cm /seg Vo=0.0233 cm/seg						
hora	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
h	Co-C	Co-C	Co-C	Co-C	Co-C	Co-C
10	4.05	3.65	3.55	5.45	-	-
20	4.45	4.35	4.25	5.55	7.80	5.30
30	4.80	4.55	4.70	6.23	8.25	5.70
40	5.05	4.70	4.75	6.30	8.35	5.95

ESPEJOR DEL MEDIO DUAL = 0.40 m

CINCO PUNTOS DE MUESTREO

HUESILLO DE COCO

Q = 76 cm /seg
Vo = 0.6317 cm/seg

hora	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00
h	Co-C											
10	0.70	0.70	1.30	1.90	2.70	1.30	1.20	1.60	1.55	1.95	3.60	1.50
20	1.30	1.35	2.15	4.00	3.70	1.50	1.30	2.30	1.70	3.20	4.30	2.95
30	1.70	1.60	4.05	5.30	5.80	2.50	2.30	3.50	3.35	4.70	6.85	4.55
40	2.05	1.90	4.70	6.20	6.60	2.60	2.40	3.90	3.95	5.30	7.00	4.95

Q = 50 cm /seg
Vo = 0.41558 cm/seg

hora	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00
h	Co-C	Co-C	Co-C	Co-C	Co-C
10	1.30	1.45	3.40	4.00	2.05
20	1.50	3.05	4.10	4.95	2.85
30	4.85	5.00	6.35	6.75	5.00
40	4.95	5.25	6.40	7.30	5.10

ESPEJOR DEL MEDIO DUAL \Rightarrow 0.40 m

CINCO PUNTOS DE MUESTREO

TEZONTLE

$Q = 76 \text{ cm /seg}$
 $V_0 = 0.6573 \text{ cm/seg}$

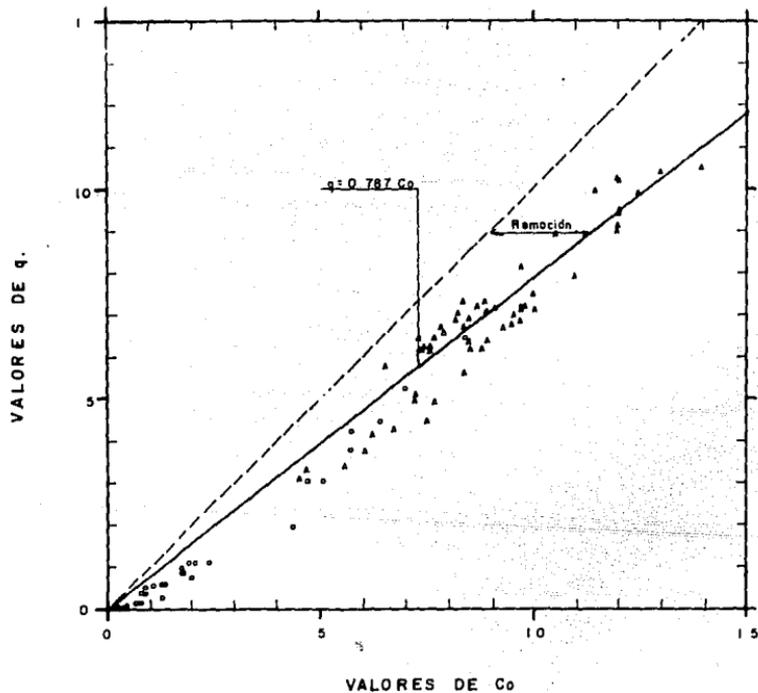
hora	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00
h	Co-C											
10	0.55	0.50	2.55	4.50	4.90	1.50	1.40	3.20	2.70	3.50	3.40	3.60
20	0.95	0.85	3.65	6.30	6.20	2.10	1.85	3.50	3.30	4.65	5.20	4.55
30	1.30	1.15	4.15	6.50	6.70	2.10	2.00	4.10	3.65	5.15	5.20	5.05
40	1.60	1.40	4.55	7.30	5.80	2.40	2.15	4.20	3.75	5.25	5.40	5.05

$Q = 50 \text{ cm /seg}$
 $V_0 = 0.4324 \text{ cm/seg}$

hora	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00
h	Co-C	Co-C	Co-C	Co-C	Co-C
10	3.90	2.75	5.30	3.60	4.25
20	5.10	4.45	6.75	4.95	6.20
30	5.40	4.65	7.10	5.00	6.25
40	5.65	4.80	7.25	5.00	6.35

ESTADÍSTICA
 DE LA
 BIBLIOTECA

GRAFICA DE Co Vs q



GRAFICA 6.1

TABLA 6.2 VALOR C/Co

MATERIAL: ROCA PUMITICA
 ESPESOR FILTRO: 0.40 m
 SECCION FILTRO: 0.125 x 0.125 m
 PROSIDAD MEDIO GRANULAR: 0.762

$$V_o = \frac{Q \left(\frac{\text{cm}^3}{\text{seg}} \right)}{A(\text{cm}^2) \times n}$$

		58								
		Vo (cm/seg)								
		0.4871								
		z/hora	20:30	21:00	22:00	23:00	24:00	PROM		
	10	0.816	0.882	0.789	0.547	0.545	0.7158			
	20	0.592	0.784	0.509	0.387	0.454	0.5452			
	30	0.459	0.451	0.439	0.267	0.273	0.3768			
	40	0.388	0.373	0.272	0.213	0.227	0.2946			
Q (cm ³ /seg)	50	52	53	48	26	28	20	19	4	
Vo (cm/seg)	0.4199	0.4367	0.4451	0.4031	0.2184	0.2352	0.1680	0.1596	0.0336	
	z/hora	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00
	10	0.4060	0.433	0.414	0.540	0.533	0.434	0.430	0.405	0.380
	20	0.2540	0.233	0.269	0.444	0.467	0.292	0.263	0.231	0.209
	30	0.188	0.167	0.152	0.151	0.133	0.150	0.140	0.124	0.116
	40	0.116	0.125	0.110	0.120	0.117	0.124	0.123	0.107	0.100
Q (cm ³ /seg)	2									
Vo (cm/seg)	0.0168									
	z/hora	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	PROM
	10	0.348	0.557	0.412	0.368	0.347	0.200	0.231	0.254	0.3396
	20	0.217	0.307	0.206	0.189	0.158	0.114	0.100	0.132	0.1778
	30	0.156	0.159	0.098	0.084	0.069	0.043	0.035	0.044	0.1055
	40	0.096	0.125	0.088	0.084	0.059	0.043	0.030	0.040	0.070

TABLA 6.2 VALOR C/Co

MATERIAL: ANTRACITA
 ESPESOR FILTRO: 0.40 m
 SECCION FILTRO: 0.125 x 0.125 m
 POROSIDAD MEDIO GRANULAR: 0.762

		58								
		0.6749								
		z/hora	20:30	21:00	22:00	23:00	24:00	PROM		
		10	0.650	0.525	0.533	0.539	0.371	0.5236		
		20	0.440	0.417	0.333	0.276	0.264	0.3460		
		30	0.400	0.333	0.250	0.197	0.186	0.2736		
		40	0.260	0.242	0.192	0.151	0.150	0.1990		
Q (cm ³ /seg)	50	52	53	48	26	28	20	19	4	
Vo (cm/seg)	0.5818	0.6051	0.6167	0.5585	0.3025	0.3258	0.2327	0.2211	0.0465	
z/hora	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	
10	0.3280	0.308	0.400	0.476	0.339	0.303	0.325	0.322	0.264	
20	0.2080	0.192	0.233	0.210	0.212	0.185	0.242	0.237	0.208	
30	0.160	0.115	0.133	0.145	0.153	0.134	0.158	0.169	0.167	
40	0.096	0.077	0.100	0.113	0.102	0.101	0.133	0.136	0.125	
Q (cm ³ /seg)	2									
Vo (cm/seg)	0.0233									
z/hora	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	PROM	
10	0.326	0.350	0.264	0.277	0.297	0.162	-	-	0.0279	
20	0.270	0.325	0.191	0.139	0.158	0.146	0.082	0.117	0.1785	
30	0.247	0.150	0.127	0.099	0.069	0.042	0.029	0.050	0.1016	
40	0.124	0.125	0.082	0.069	0.059	0.031	0.018	0.008	0.0646	

TABLA 6.2 VALOR C/Co

MATERIAL: HUESILLO DE COCO
 ESPESOR FILTRO: 0.40 m
 SECCION FILTRO: 0.125 x 0.125 m
 POROSIDAD MEDIO GRANULAR: 0.77

Q(cm ³ /seg) V(cm/seg)		76 0.63169											
z/hora	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00	PROM
10	0.720	0.710	0.803	0.787	0.707	0.658	0.647	0.686	0.702	0.709	0.581	0.769	0.7065
20	0.580	0.660	0.674	0.551	0.598	0.605	0.618	0.549	0.678	0.522	0.500	0.546	0.5897
30	0.400	0.250	0.386	0.404	0.370	0.342	0.324	0.314	0.356	0.299	0.203	0.300	0.3290
40	0.340	0.290	0.288	0.303	0.283	0.316	0.294	0.235	0.240	0.209	0.186	0.238	0.2602

Q(cm ³ /seg) V(cm/seg)		50 0.41558				
z/hora	1:00	2:00	3:00	4:00	PROM	
10	0.802	0.777	0.564	0.529	0.6718	
20	0.779	0.531	0.474	0.418	0.5518	
30	0.260	0.231	0.189	0.206	0.2246	
40	0.244	0.192	0.179	0.141	0.1954	

TABLA 6.2 VALOR C/Co

MATERIAL: TEZONTLE
 ESPESOR FILTRO: 0.40 m
 SECCION FILTRO: 0.125 x 0.125 m
 POROSIDAD MEDIO GRANULAR: 0.74

Q (cm ³ /seg) V (cm/Seg)		76 0.6573											
z/hora	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00	PROM
10	0.540	0.490	0.592	0.541	0.479	0.559	0.548	0.418	0.465	0.474	0.500	0.467	0.5061
20	0.400	0.350	0.416	0.357	0.340	0.382	0.403	0.364	0.347	0.301	0.235	0.326	0.3518
30	0.320	0.290	0.336	0.337	0.277	0.382	0.355	0.255	0.257	0.226	0.235	0.252	0.2852
40	0.280	0.250	0.272	0.255	0.287	0.294	0.306	0.236	0.277	0.211	0.206	0.252	0.2605
Q (cm ³ /seg) V (cm/seg)		50 0.4324											
z/hora	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	PROM							
10	0.455	0.560	0.374	0.446	0.455	0.4580							
20	0.287	0.288	0.206	0.238	0.205	0.2448							
30	0.245	0.256	0.165	0.231	0.199	0.2192							
40	0.210	0.232	0.147	0.231	0.186	0.2012							

6.2 NUMEROS ADIMENSIONALES

OBTENCION DEL NUMERO DE REYNOLDS (Re)

MATERIAL: ROCA PUMITICA
 DIAMETRO 50: 0.11 cm

1 t (°C)	2 V _o (cm/seg)	3 v (cm ² /seg)	0.11 x 2 / 3 Re
17.3	0.4871	0.0107934	4.96424
16.5	0.4871	0.0110155	4.86415
16.4	0.4871	0.0110564	4.84615
16.3	0.4871	0.0110843	4.83395
16.2	0.4871	0.0111122	4.82182
16.1	0.4199	0.0111401	4.14619
16.0	0.4367	0.011168	4.30131
15.9	0.4451	0.0111969	4.37273
15.7	0.4031	0.0112547	3.93978
15.7	0.2184	0.0112547	2.13457
15.5	0.2352	0.0113075	2.28804
15.5	0.16798	0.0113075	1.64412
15.5	0.1596	0.0113075	1.55259
19.5	0.0336	0.010231	0.36126
20.1	0.0168	0.01008	0.18333
20.3	0.0168	0.01003	0.18425
20.5	0.0168	0.009984	0.18510
20.5	0.0168	0.009984	0.18510
21.0	0.0168	0.009863	0.18737
19.5	0.0168	0.010231	0.18063
19.0	0.0168	0.010351	0.17813
19.0	0.0168	0.010357	0.17843

OBTENCION DEL NUMERO DE REYNOLDS (Re)

MATERIAL: ANTRACITA
 DIAMETRO 50: 0.11 cm

1 t (°C)	2 V ₀ (cm/seg)	2 v (cm ² /seg)	0.11 x 2 / 3 Re
17.3	0.6749	0.0107934	6.87818
16.5	0.6749	0.0110155	6.73950
16.4	0.6749	0.0110564	6.71457
16.3	0.6749	0.0110843	6.69767
16.2	0.6749	0.0111122	6.68086
16.1	0.5818	0.0111401	5.74483
16.0	0.6051	0.011168	5.95997
15.9	0.6167	0.0111969	6.05855
15.7	0.5585	0.0112547	5.45861
15.7	0.3025	0.0112547	2.95654
15.5	0.3258	0.0113075	3.16940
15.5	0.2327	0.0113075	2.26372
15.5	0.2211	0.0113075	2.15087
19.5	0.0465	0.010231	0.49995
20.1	0.0233	0.01008	0.25427
20.3	0.0233	0.01003	0.25553
20.5	0.0233	0.009984	0.25671
20.5	0.0233	0.009984	0.25671
21.0	0.0233	0.009863	0.25986
19.5	0.0233	0.010231	0.25051
19.0	0.0233	0.010357	0.24747
19.0	0.0233	0.010357	0.24747

OBTENCION DEL NUMERO DE REYNOLDS (Re)

MATERIAL: HUESILLO DE COCO
 DIAMETRO 50: 0.11 cm

1	2	3	$0.11 \times 2 / 3$
t (°C)	V_o (cm/seg)	V (cm ² /seg)	Re
20.0	0.63169	0.010105	6.87639
20.0	0.63169	0.010105	6.87639
20.0	0.63169	0.010105	6.87639
19.5	0.63169	0.010231	6.79170
19.0	0.63169	0.010357	6.70908
18.0	0.63169	0.010618	6.54416
18.0	0.63169	0.010618	6.54416
17.0	0.63169	0.010889	6.38129
17.0	0.63169	0.010889	6.38129
16.5	0.63169	0.0110155	6.30801
16.5	0.63169	0.0110155	6.30801
16.4	0.63169	0.0110564	6.28468
16.0	0.41558	0.0111680	4.09328
15.8	0.41558	0.0112258	4.07221
15.8	0.41558	0.0112258	4.07221
15.3	0.41558	0.0113603	4.02399
15.0	0.41558	0.011457	3.99003

OBTENCION DEL NUMERO DE REYNOLDS (Re)

MATERIAL: TEZONTLE
 DIAMETRO 50: 0.11 cm

1	2	3	$0.11 \times 2 / 3$
t (°C)	v_o (cm/seg)	v (cm ² /seg)	Re
20.0	0.65720	0.010105	7.15408
20.0	0.65720	0.010105	7.15408
20.0	0.65720	0.010105	7.15408
19.5	0.65720	0.010231	7.06598
19.0	0.65720	0.010357	6.98001
18.0	0.65720	0.010618	6.80844
18.0	0.65720	0.010618	6.80844
17.0	0.65720	0.010889	6.63899
17.0	0.65720	0.010889	6.63899
16.5	0.65720	0.0110155	6.56275
16.5	0.65720	0.0110155	6.56275
16.4	0.65720	0.0110564	6.53848
16.0	0.43243	0.0111680	4.25925
15.8	0.43243	0.0112258	4.23732
15.8	0.43243	0.0112258	4.23732
15.3	0.43243	0.0113603	4.18715
15.0	0.43243	0.011457	4.15181

OBTENCION DEL NUMERO DE PECKET (Pe)

MATERIAL: ROCA PUNITICA
 DIAMETRO 50: 0.11 cm

ESPEJOR DEL MEDIO FILTRANTE = 40 cm
 PUNTOS DE MUESTREO = 5

1	2	3	2 / 3		
V (cm / seg)	0.11 x 1	D	Pe	NOTAS	
0.4871	0.053581	1.03765	0.051630	ELIMINADO	
0.4119	0.045309	0.346	0.133260		
0.4367	0.048037	0.333	0.144200		
0.4451	0.048961	0.338	0.144800		
0.4031	0.044341	0.451	0.098317		
0.2184	0.024024	0.237	0.101367		
0.2352	0.025872	0.190	0.136168		
0.16798	0.0184778	0.124	0.149014		
0.1596	0.017556	0.106	0.165600		
0.0336	0.003696	0.032	0.115500		
0.0168	0.001848	0.011	0.168000		
			MEDIA		0.135608

OBTENCION DEL NUMERO DE PECLET (Pe)

MATERIAL: ANTRACITA
 DIAMETRO 50: 0.11 cm

ESPEJOR DEL MEDIO FILTRANTE = 40 cm
 PUNTOS DE MUESTREO = 5

1 V (cm/seg)	2 0.11 x l	3 D	2 / 3 Pe	NOTAS
0.6749	0.074239	2.473	0.0300198	
0.5818	0.063998	1.185	0.0540067	
0.6051	0.066561	1.058	0.062912	
0.6767	0.074437	1.208	0.0561564	
0.5585	0.061435	1.288	0.0476979	
0.3025	0.033275	0.627	0.0530701	
0.3258	0.035838	0.620	0.0578032	
0.2327	0.025597	0.580	0.0503877	
0.2211	0.024321	0.504	0.482559	
0.465	0.005115	0.100	0.05115	
0.0233	0.002563	0.0376	0.006 MEDIA	ELIMINADO 0.0511459

OBTENCION DEL NUMERO DE PECLET (Pe)

MATERIAL: HUESILLO DE COCO
 DIAMETRO 50: 0.11 cm

ESPELOR DEL MEDIO FILTRANTE = 40 cm
 PUNTOS DE MUESTREO = 5

1 V (cm/seg)	2 0.11 x 1	2 D	2 / 3 Pe	N O T A S
0.6317 0.4156	0.063487 0.045716	1.141 0.673 MEDIA	0.0608991 0.0679254 0.0644122	

OBTENCION DEL NUMERO DE PECLET (Pe)

MATERIAL: TEZONTLE
 DIAMETRO 50: 0.11 cm

ESPELOR DEL MEDIO FILTRANTE = 40 cm
 PUNTOS DE MUESTREO = 5

1 V (cm/seg)	2 0.11 x 1	3 D	2 / 3 Pe	N O T A S
0.6573 0.4324	0.072303 0.047564	1.088 0.455 MEDIA	0.0664449 0.104536 0.0854954	

VALORES PARA LA GRAFICA REYNOLDS VS PECKET

MATERIAL	Re	Pe
ROCA PUMITICA	4.14619	0.13326
	4.30131	0.14420
	4.37273	0.14480
	3.93978	0.098317
	2.13457	0.101367
	2.28804	0.136168
	1.63412	0.149014
	1.55259	0.1656
	0.36126	0.1155
	0.18283	0.1680
ANTRACITA	6.74216	0.0300198
	5.74483	0.0540067
	5.95997	0.062912
	6.05855	0.0561564
	5.45861	0.0476979
	2.95654	0.0530701
	3.16940	0.0578032
	2.26372	0.0503877
	2.15087	0.6482559
	0.49995	0.05115
HUESILLO DE COCO	6.573463	0.0608991
	4.050344	0.0679254
TEZONTLE	6.838923	0.0664449
	4.21457	0.104536

OBTENCION DEL NUMERO DE SCHMIDT (Sc)

MATERIAL	T(°C)	V(cm ₁ ² /seg)	D(cm ₂ ² /seg)	2 / 1 = Sc
ROCA PUMITICA	16.64*	0.0110124	1.03765	94.22560
	16.10	0.0111401	0.3400	30.52037
	16.00	0.011168	0.3330	29.81734
	15.90	0.0111969	0.03380	30.18693
	15.70	0.0112547	0.4510	40.07215
	15.70	0.0112547	0.2370	21.05787
	15.50	0.0113075	0.1900	16.80301
	15.50	0.0113075	0.1240	10.96617
	15.50	0.0113075	0.1060	9.37431
	19.50	0.010231	0.0200	1.95484
	19.99	0.0101108	0.0075	0.74178

* Temperatura promedio una misma velocidad de filtración

OBTENCION DEL NUMERO DE SCHMIDT (Sc)

MATERIAL	T(°C)	$v(\text{cm}_1^2/\text{seg})$	$D(\text{cm}_2^2(\text{seg}))$	$2 / 1 = Sc$
ANTRACITA	16.54	0.0110124	2.473	224.56504
	16.10	0.0111401	1.185	106.37247
	16.00	0.011168	1.058	94.73496
	15.90	0.0111969	1.208	107.88700
	15.70	0.0112547	1.288	114.44108
	15.70	0.0112547	0.627	55.71006
	15.50	0.0113075	0.620	54.83086
	15.50	0.0113075	0.508	44.92593
	15.50	0.0113075	0.504	44.57219
	19.50	0.010231	0.100	9.77422
	19.99	0.0101108	0.376	37.18796

OBTENCION DEL NUMERO DE SCHMIDT (Sc)

MATERIAL	T(°C)	v(cm ² /seg)	D(cm ² /seg)	2 / 1 = Sc
HUESILLO DE COCO	18.16	0.0105837	1.141	107.80729
	15.58	0.0112874	0.673	59.62401

OBTENCION DEL NUMERO DE SCHMIDT (Sc)

MATERIAL	T(°C)	v(cm ² /seg)	D(cm ² /seg)	2 / 1 = Sc
TEZONTLE	18.16	0.0105837	1.088	102.79959
	15.58	0.0112874	0.455	40.31044

VALORES PARA LA GRAFICA REYNOLDS VS SCHMIDT

MATERIAL	Re	Sc
ROCA PUMITICA	anulado por excesivo <u>va</u> lor V'	94.22560
	4.14619	30.52037
	4.30131	29.81734
	4.37273	30.18693
	3.93978	40.07215
	2.13457	21.05787
	2.28804	16.80301
	1.63412	10.96617
	1.55259	9.37431
	0.36126	1.95484
	0.18283	0.74178
ANTRACITA	anulado por excesivo <u>va</u> lor V'	224.56504
	6.7446	106.37247
	5.74483	94.73496
	5.95997	107.88700
	6.05855	114.44108
	5.45861	55.71006
	2.95654	54.83086
	3.16940	44.92593
	2.26372	44.57219
	2.15087	9.77422
	0.49995	37.18796
HUESILLO DE COCO	6.573463	107.80729
	4.050344	59.62401
TEZONTLE	6.838923	102.79959
	4.21457	40.31044

TABLA 6.3 DATOS PARA CORRIDAS EN COMPUTADORA

MATERIAL: ROCA PUMITICA
 DIAMETRO 50: 0.11 cm
 POROSIDAD: 0.762
 G: 1.2458

ESPESOR DEL MEDIO FILTRANTE: 40 cm
 PUNTOS DE MUESTREO: 5

z (cm)	V (cm/seg)	t (seg)	C/Co	D (cm ² /seg)
10	0.4871	20.53	0.7158	0.7600
20	0.4871	41.06	0.5452	1.0956
30	0.4871	61.59	0.3768	1.3350
40	0.4871	82.12	0.2946	0.9600
			MEDIA	1.03765
10	0.4119	24.28	0.406	0.450
20	0.4119	48.56	0.254	0.300
30	0.4119	72.83	0.188	0.280
40	0.4119	97.11	0.166	0.330
			MEDIA	0.340
10	0.4367	22.90	0.433	0.491
20	0.4367	45.80	0.253	0.320
30	0.4367	68.70	0.167	0.260
40	0.4367	91.60	0.125	0.260
			MEDIA	0.333
10	0.4451	22.47	0.4141	0.500
20	0.4451	44.93	0.269	0.370
30	0.4451	67.40	0.152	0.240
40	0.4451	89.87	0.110	0.240
			MEDIA	0.338
10	0.4031	24.81	0.540	0.453
20	0.4031	49.62	0.444	0.900
30	0.4031	74.42	0.151	0.225
40	0.4031	99.23	0.120	0.225
			MEDIA	0.451
10	0.2184	45.79	0.533	-
20	0.2184	91.58	0.467	0.491
30	0.2184	137.36	0.133	0.100
40	0.2184	189.15	0.117	0.120
			MEDIA	0.237
10	0.2352	42.52	0.434	0.260
20	0.2352	85.03	0.292	0.230
30	0.2352	127.55	0.150	0.130
40	0.2352	170.06	0.124	0.140
			MEDIA	0.190

TABLA 6.3

DATOS PARA CORRIDAS EN COMPUTADORA

MATERIAL: ROCA PUMITICA

DIAMETRO 50: 0.11 cm

POROSIDAD: 0.762

G: 1.2458

ESPESOR DEL MEDIO FILTRANTE: 40 cm

PUNTOS DE MUESTREO: 5

z (cm)	V (cm/seg)	T (seg)	C/Co	D (cm ² /seg)
10	0.16798	59.53	0.430	0.135
20	0.16798	119.06	0.263	0.180
30	0.16798	178.59	0.140	0.085
40	0.16798	238.12	0.123	0.095
			MEDIA	0.124
10	0.1596	62.66	0.405	0.175
20	0.1596	125.31	0.231	0.100
30	0.1596	187.97	0.124	0.070
40	0.1596	250.63	0.107	0.080
			MEDIA	0.106
10	0.0336	297.62	0.380	0.032
20	0.0336	595.24	0.209	0.018
30	0.0336	892.86	0.116	0.013
40	0.0336	1190.48	0.100	0.017
			MEDIA	0.020
10	0.0168	595.24	0.3396	0.011
20	0.0168	1190.48	0.1778	0.007
30	0.0168	1785.71	0.1055	0.006
40	0.0168	2380.95	0.070	0.006
			MEDIA	0.0075

TABLA 6.3 DATOS PARA CORRIDA EN COMPUTADORAS

MATERIAL: ANTRACITA
 DIAMETRO 50: 0.11 cm
 POROSIDAD: 0.55
 G: 1.6439

ESPESOR DEL MEDIO FILTRANTE: 40 cm
 PUNTOS DE MUESTREO: 5

z (cm)	V (cm/seg)	t (seg)	C/Co	D (cm ² /seg)
10	0.6749	14.82	0.5236	3.10
20	0.6749	29.34	0.3460	1.59
30	0.6749	44.45	0.2732	2.30
40	0.6749	59.27	0.1990	2.90
			MEDIO	2.473
10	0.5818	17.19	0.3280	0.680
20	0.5818	34.38	0.2080	1.300
30	0.5818	51.56	0.1600	1.500
40	0.5818	68.75	0.0960	1.260
			MEDIO	1.185
10	0.6051	16.53	0.308	0.210
20	0.6051	33.05	0.192	1.300
30	0.6051	49.58	0.115	1.100
40	0.6051	66.11	0.077	1.120
			MEDIO	1.058
10	0.6167	16.22	0.400	0.730
20	0.6167	32.40	0.233	1.400
30	0.6167	48.65	0.133	1.300
40	0.6167	64.86	0.100	1.400
			MEDIO	1.208
10	0.5585	17.91	0.476	1.150
20	0.5585	35.81	0.210	1.300
30	0.5585	53.72	0.145	1.300
40	0.5585	71.62	0.113	1.400
			MEDIO	1.288
10	0.3025	33.06	0.3390	0.357
20	0.3025	66.12	0.2120	0.700
30	0.3025	99.17	0.1530	0.750
40	0.3025	132.23	0.1020	0.700
			MEDIO	0.627
10	0.3258	30.69	0.3030	0.380
20	0.3258	61.39	0.1850	0.650
30	0.3258	92.08	0.1340	0.700
40	0.3258	122.77	0.1010	0.750
			MEDIO	0.620

TABLA 6.3 TABLAS PARA CORRIDAS EN COMPUTADORA

MATERIAL: ANTRACITA
 DIAMETRO 50: 0.11 cm
 POROSIDAD: 0.55
 G: 1.6439

ESPESOR DE MEDIO FILTRANTE: 40 cm
 PUNTOS DE MUESTREO: 5

Z (cm)	V (cm/seg)	t (seg)	C/Co	V (cm ² /seg)
10	0.2327	42.97	0.3250	0.270
20	0.2327	85.95	0.2420	0.500
30	0.2327	128.92	0.1580	0.590
40	0.2327	171.90	0.1330	0.670
			MEDIO	0.580
10	0.2211	45.23	0.3220	0.260
20	0.2211	90.46	0.2370	0.520
30	0.2211	135.69	0.1690	0.595
40	0.2211	180.91	0.1360	0.640
			MEDIO	0.504
10	0.0465	215.06	0.2640	0.055
20	0.0465	430.11	0.2080	0.100
30	0.0465	645.16	0.1670	0.120
40	0.0465	860.22	0.1250	0.125
			MEDIO	0.100
10	0.0233	429.18	0.2793	0.0275
20	0.0233	858.34	0.1785	0.043
30	0.0233	1287.55	0.1016	0.040
40	0.0233	1716.74	0.0646	0.040
			MEDIO	0.0376

TABLA 6.3 TABLA PARA CORRIDAS DE COMPUTADORA

MATERIAL: HUESILLO DE COCO
 DIAMETRO 50: 0.11 cm
 PROSIDAD: 0.77
 G: 1.2350

ESPEJOR DEL MEDIO FILTRANTE: 40 cm
 PUNTOS DE MUESTREO: 5

z (cm)	V (cm/seg)	t (seg)	C/Co	D (cm ² /seg)
10	0.6317	15.83	0.765	1.100
20	0.6317	31.66	0.5897	1.415
30	0.6317	47.49	0.3290	1.100
40	0.6317	63.32	0.2602	0.950
			MEDIO	1.141
10	0.4156	24.06	0.6718	1.036
20	0.4156	48.13	0.5518	0.931
30	0.4156	72.19	0.2246	0.350
40	0.4156	96.25	9.1954	0.380
			MEDIO	0.673

TABLA 6.3 TABLA PARA CORRIDAS EN COMPUTADORA

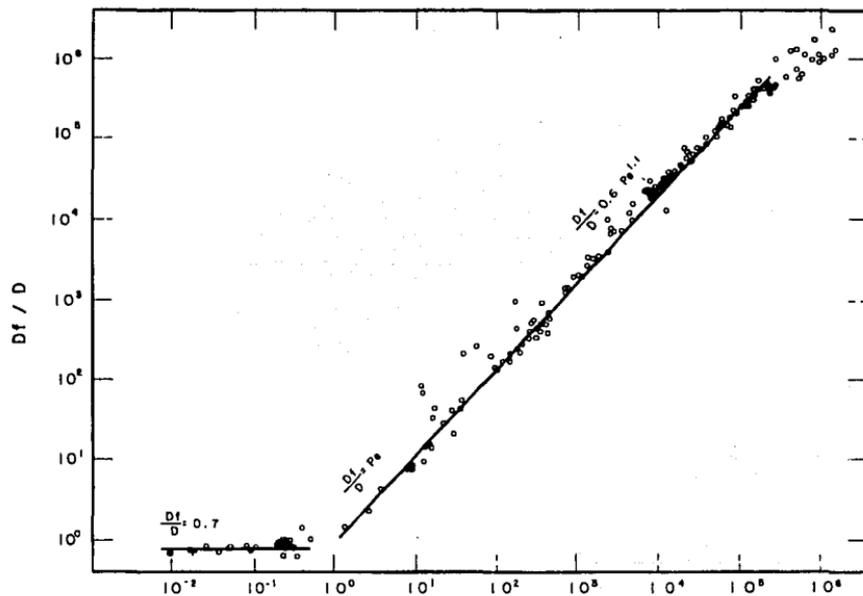
MATERIAL: TEZONTLE
 DIAMETRO 50: 0.11 cm
 POROSIDAD: 0.74
 G: 1.2765

ESPESOR DEL MEDIO FILTRANTE: 40 cm
 PUNTOS DE MUESTREO: 5

z (cm)	V (cm/seg)	t (seg)	C/Co	D (cm ² /seg)
10	0.6573	15.21	0.5061	0.750
20	0.6573	30.43	0.3518	1.200
30	0.6573	45.64	0.2852	1.100
40	0.6573	60.86	0.2605	1.300
			MEDIO	1.088
10	0.4324	23.13	0.4580	0.480
20	0.4324	46.25	0.2448	0.350
30	0.4324	69.38	0.2192	0.450
40	0.4324	92.51	0.2012	0.540
			MEDIO	0.455

6.4 G R A F I C A S

COEFICIENTE DE DISPERSION D_f EN FLUJO COMO UNA FUNCION
DEL NUMERO DE PECLET = Pe .

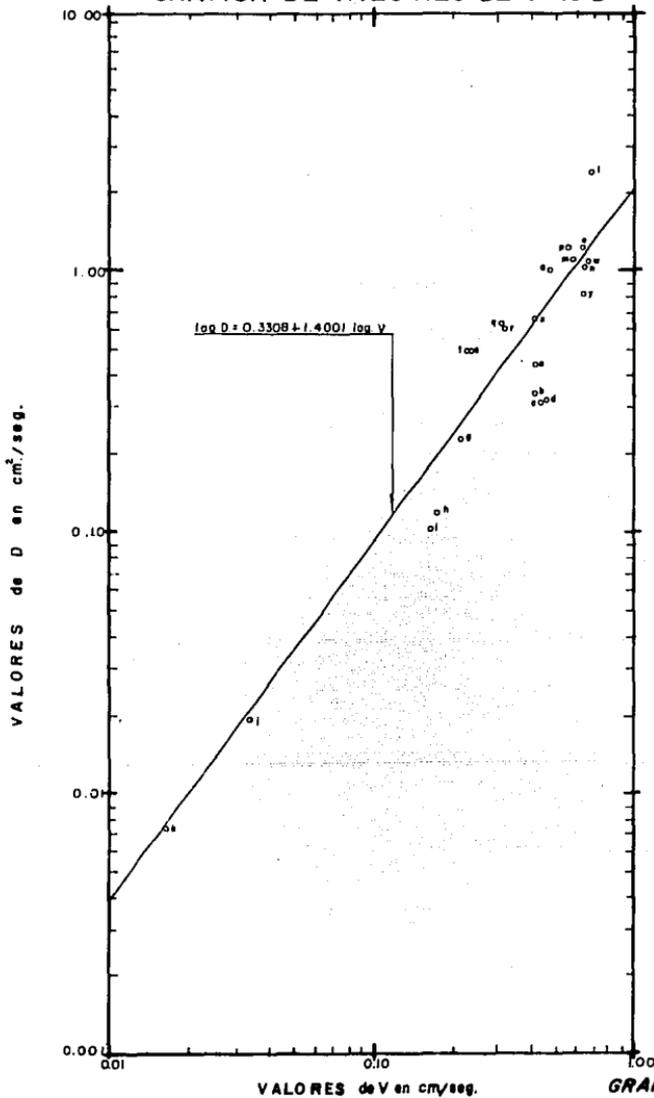


$$Pe = \frac{2rU}{D} = \frac{2r q}{\phi D}$$

GRAFICA 6.2

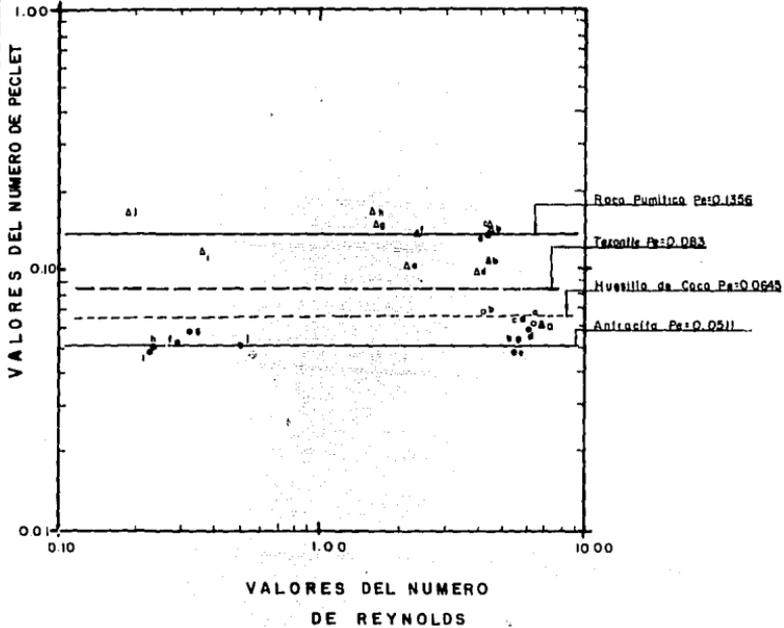
GRAFICA DE VALORES DE V VS D

104



GRAFICA 6.3

GRAFICA REYNOLDS Vs PECLET

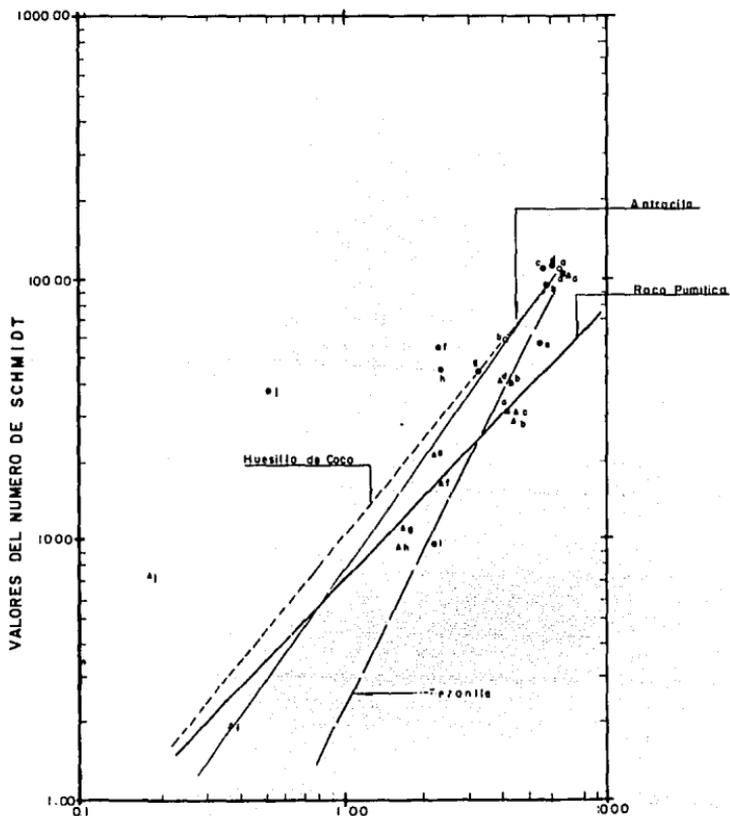


SIMBOLOGIA.

- Δ ROCA PUNITICA.
- \blacktriangle TEZONTLE.
- \circ HUESILLO DE COCO.
- \bullet ANTRACITA.

GRAFICA REYNOLDS VS SCHMIDT

106



VALORES DEL NUMERO DE
REYNOLDS

SIMBOLOGIA.

- △ ROCA PUMITICA.
- ▲ TEZONTLE.
- HUESILLO DE COCO.
- ANTRACITA.

GRAFICA 6. 5

7. SECUELA DE APLICACION

Se sugiera una secuela de diseño consistente en:

- a) Elección de: Tasa de filtración
Eficiencia de remoción
Clase y características fisicoquímicas del material usado como medio filtrante.
- b) Determinación del coeficiente de dispersión según la ley.

$$\log D = 0.3308 + 1.4001 \log V$$

- c) Determinación del espesor del lecho dual formado por el 50% superior correspondiente al material elegido como medio filtrante y el 50% inferior correspondiente a arena sílica mediante la fórmula:

$$c/c_o = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \frac{z - v_o t/G}{2 \sqrt{Dt/G}} \right] + \left[\exp \left(\frac{v_o z}{D} \right) \operatorname{erfc} \frac{z + v_o t/G}{2 \sqrt{Dt/G}} \right]$$

z es el espesor deseado.

8. CONCLUSIONES

8.1 Referentes al modelo de laboratorio

- . En términos generales el modelo empleado fue suficiente y adecuado para alcanzar los fines planteados. El tamaño y forma de las columnas de filtración fue el correcto, ya que las cargas hidráulicas sobre el medio fueron las típicas y se logró evitar el efecto de "pared".
- . El impulsor de la bomba aunado al mezclado mecánico en la tina de fabricación del agua problema resultó ser un buen sistema para incorporar la arcilla, el floculante y polielectrolito al agua.

- Por lo que respecta al medidor de flujo empleado para cuantificar el gasto influente, no fue el indicado para manejar flujos pequeños.

8.2 Referentes al medio filtrante.

- La roca pumítica resultó ser buen sustituto de la antracita al filtrado. La obtención de la granulometría deseada fue laboriosa y costosa bajo las condiciones empleadas durante esta investigación.
- El huesillo de coco no se descarta como medio filtrante por sus características físico-químicas presenta ciertas limitaciones; sin embargo, se recomienda su empleo en lugares donde no se cuenta con piedra pómez y gastos pequeños por tratar.
- La variedad de tezontle empleada se descarta definitivamente, ya que su peso específico no es el adecuado para producir, después del retrolavado, una adecuada estratificación del medio dual.
- La arena sílica del medio dual, se comportó generalmente en forma uniforme para los materiales propuestos. Mejores eficiencias de remoción en la interfase de medios fueron observadas en el caso de la antracita y roca pumítica.

- Las eficiencias de remoción obtenidas son satisfactorias en todos los casos. Valores de turbiedad menores a una UNT fueron frecuentes (pruebas en fase de filtración).

8.3 Referentes al modelo matemático y análisis de resultados

- Se confirmó, la correcta selección de variables para la obtención de los números adimensionales (gráficas 6.4 y 6.5).
- Mayores variaciones de gasto sobre todo en el caso del huesi-de coco y tezontle fueron requeridos con objeto de tener mayor número de puntos para construir las gráficas 6.4 y 6.5.
- A números de Reynolds bajos (menos de 1.00) la filtración la gobierna el régimen laminar y el comportamiento del sistema es menos uniforme y difícil de predecir. Se observa en las gráficas 6.4 y 6.5 mayor dispersión de los puntos en esta zona.
- Tal parece que variaciones del número de Reynolds (velocidad de filtración) no afectan al número de Peclet; esto es que para mantenerse constante, varía Schmidt (dispersión).
- Al aumentar la velocidad aumenta la dispersión (gráfica 6.3) lo cual parece obligar al filtro a un comportamiento más uniforme (gráficas 6.4 y 6.5).

- Se confirmó que no existe una relación lineal de D VS V y de ambas con respecto al régimen hidráulico (gráfica 6.3).
- A mayor C_0 mayor remoción. Del análisis de las gráficas 6.1, se confirma que es más difícil remover baja turbiedad.
- El modelo matemático propuesto resultó ser más racional que los propuestos con anterioridad, ya que esto involucra variables que intervienen en el fenómeno y que aún no habían sido considerados por su complejidad.

9. RECOMENDACIONES

9.1 Referentes al modelo de laboratorio

- . Con el fin de capacitar a la cuadrilla de operación, en el manejo del modelo y aplicación de registros es recomendable realizar corridas previas con agua clara.

- . Antes de iniciar la prueba es conveniente llevar a cabo el "descremado" del medio granular, esto es, retrolavar por un par de horas con el objeto de eliminar finos y estratificar adecuadamente el medio múltiple.

- . Una corrida previa por espacio de 3 ó 4 horas con el agua problema, condicionará el medio granular nuevo.

- . Emplear un rotómetro con precisión y exactitud para manejar pequeños gastos (20 a 100 ml/seg). Esto es con objeto de tener confiabilidad de lecturas.
- . Instalar válvulas de aguja, ya que el ajuste de otro tipo de accesorio para los gastos que se manejan es difícil.
- . Tubería única para abastecer los tinacos con agua problema es desechable, así como tuberías indendientes de abastecimiento a cada columna con objeto de garantizar que el influente es homogéneo en los modelos de laboratorio.
- . En los tanques elevados deberán colocarse agitadores mecánicos con una velocidad tal que impida el sedimentado y la ruptura del floc.
- . El medio filtrante deberá ser colocado cuando la columna haya sido lavada y esté perfectamente seca. Se esparcirá en capas evitando descargarlo desde lo alto de la columna, esto se logra permitiendo que los granos resbalen dentro de un perfil de aluminio
- . La colocación de una pantalla deflectora perpendicular al flujo influente es benéfica para evitar perturbación del medio poroso.

- . Para iniciar las pruebas se recomienda mantener cerradas las válvulas de efluente hasta que la carga hidrostática sobre el filtro sea la nominal de operación.
- . Una vez logrado lo anterior se retira la mampara deflectora, se purga el aire y se abren totalmente las válvulas de efluente, gobernando la carga hidráulica sobre el medio granular con el cambio de altura de las mamparas de efluente.
- . Incrementar en 15 centímetros la altura de piezómetro sobre la altura de las columnas.
- . Preferible marcar en el tablero de piezómetro el cero de la escala en el nivel superior del filtro y de 10 en 10 centímetros hacia abajo.
- . Para facilitar lectura sobre piezómetros, colocar una pequeña bolita negra de caucho.
- . Se recomienda variar la concentración y tipo de polielectrolito. El trabajar con flocúlos blandos y duros aportará mayores datos.
- . Al igual que el caso anterior valdría la pena probar con otra arcilla.

- . En la medida de lo posible se recomienda realizar las pruebas de laboratorio en la zona donde se construirá el prototipo para que factores tales como agua problema, temperatura, etc., sen incluidos.
- . Es posible que alguno de los medios filtrantes empleados libere alguno de sus constituyentes al estar procesando agua, por lo que se considera necesario realizar las pruebas necesarias para confirmar la nula presencia de compuestos en el efluente.
- . Se recomienda invariablemente la realización de pruebas de laboratorio para evaluar el comportamiento del filtro propuesto para las condiciones a las cuales será sometido. Cada influente es un caso particular.

9.2 Referentes al medio filtrante

- . Adquirir los materiales en época de estiaje.
- . El tezontle no se descarta como medio filtrante, sin embargo, se recomienda seleccionar un tipo cuyo peso específico sea cercano a 1.5.
- . Un estudio de explotación a escala industrial de los materiales complementaría el presente trabajo.

9.3 Referentes al modelo matemático y análisis de resultados

- Con objeto de contar con mayor número de datos estadísticos se sugiere variar los gastos influentes.
- Un juego de gráficas derivadas de la presente investigación las cuales relacionarán eficiencias, velocidades de filtración y números adimensionales para encontrar directamente el espesor del medio dual serían un complemento ideal, ya que en lugar de calcular espesor del medio dual para la remoción deseada, directamente se podría obtener el dato de gráficas, sin necesidad de hacerlo por computadora.
- El controlar la pérdida de carga a diferentes profundidades del lecho filtrante es una de las observaciones más valiosas. Analizando la forma como la pérdida de carga se manifiesta dentro del filtro, se puede saber donde queda retenida la mayor cantidad de materia suspendida y que tanto penetra el floc.
- Por lo anterior sería conveniente establecer en el modelo matemático el Número de Euler que involucra la pérdida de carga. Esto permitiría confrontar los resultados.
- Aparentemente se podría plantear una relación Re VS Sc y Re VS Pe promedio para los materiales estudiados y que esto se

podiera considerar aplicable para otros medios. Se sugiere el estudio de la validéz de este planteamiento.

10. BIBLIOGRAFIA

11. REFERENCIA

10. BIBLIOGRAFIA

1. Arboleda Valencia J., "Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua", OPS Serie Técnica 13, 1973 p 296-341
2. Weber Walter J., "Physicochemical Processes for Water Quality Control", Wiley-Interscience, 1972. p 139-198.
3. O'Melia, Ch. R. y Stumm, "Theory of Water Filtration", Jour. AWWA, Vol 59, p 1393, Nov. 1967.
4. Isan C.R., Ives, K.J., "Removal Mechanisms in Deep Bed Filtration", Chemical Engineering Science, Vol 24, p 717, 1969.

5. Ives, K. J., & Gregory, J., "Surface Forces in Filtration", Proc. Soc. for Water Treatment and Examination, Vol 15, p 93, 1966.
6. Kaufman, Warren J., "Recent Theoretical Concepts of - - Filtration", California, p 25, 1969.
7. Di Bernardo Luiz, "Teoria da Filtracão", Revista DAE, 1981, p. 49-67.
8. Gregory, John, "Determination of Filter Media Zeta Potential", Jour ASCE, vol 94, No. SA3, p 571-574, 1968.
9. Ives, Kenneth J. & Sholji, Ihsan, "Research on Variables Affecting Filtration I", Proc ASCE, Vol 91, No. SA4, 19 p, 1965.
10. Ives, K. J., "Theory of Filtration", Special Subject No. 7, Proc. Inter Water. Supp. Cong. Exhib., Viena 1969.
11. Ives, K. J., "Mathematical Models of Deep Bed Filtration", Nato Advances Study Institutes Series, Series-E: Applied Sciences, Vol 2, 1975
12. Fox, D.M. & Cleasby, J. L., "Experimental Evaluation of Sand Filtration Theory", Jour Sanitary Engineering Division, Proceedings ASCE, Vol 92, No. SA5, 1966.

13. Wright, A.M.; Kavanaugh, M.C. & Pearson, E.A., "Filtration Kinetics in Water and Wastewater", First Annual Progress Report, University of California, 1970.
14. Camp, Thomas R., "Theory of Water Filtration", Jour ASCE, Vol 90, No. SA4, 30 p, 1964.
15. Deb, Arun K., "Numerical Solution of Filter Equations", Proc. ASCE, Vol. 96, No. SA2, p 195-210, 1970.
16. Deb, Arun K., "Theory of Sand Filtration", Proc. ASCE, Vol 95, No. SA3, p 399-422, 1969.
17. Heertjes, P.M. & Lerk, C.F., "The Functioning of Deep Bed Filters, Part II". The Filtration of Flocculated - - - Suspensions Transactions of Institute of Chemical Engineering (45), T 138, 1967.
18. Bank, R.B. & Ali, I., "Dispersion and Adsorption in Porus Media Flow", Jour. Hydraulics Div., ASCE, p 13-31, 1964.
19. Ogata, A. and Banks, R.B. "A solution of differential equations of longitudinal dispersion in porus media", U.S. Geological Survey Professional Paper 411A, Washington, 1964.

20. Lerman, A., "Geochemical Processes", Wiley-Interscience Pub., 1979.
21. Crank, J., "The Mathematics of Diffusion", 2a. ED., Clarendon Press Oxford, 1975.
22. Fried, J. J., "Developments in Water Science", Elsevier, 1975.
23. Mohankd Shyam S. "Multilayer Filtration", Jour. San. Engr. Div. Proc. ASCE. 1969.
24. Given, D.P.; Lash, L. D., "What to look for in Granular Media Filters", Environtech Corp., Salt Lake City, Utah. Chem. Engr. Prog. Vol 74, No. 12 p 50-54, 1978.
25. Aultman W.W., Hazen Richrd, et al, "Specifications for Filtering Material", Jour AWWA SC-T, p 290-304, 1949.
26. Stanley, W.E., "Filtering Materials for Water Works", Jour. AWWA 23 P 1283-1291, 1979.
27. Moergeli, B; Ives, K.J., "New Media for Effluent Filtration" Sulzer Brothers LTD, Winterthar, Switz, Water Res., Vol 13, No. 10, p 1001-1007, 1979.

28. Logsdon, Gary S.; Schleppanbach, Frank, "Filtration Works Out Asbestos Fibers", Water and Sewage Works, Vol 126, No. 10, p 44-47, 1970.
29. Kardile, M.E., "A New Unconventional Treatment Plant - - Varangaon", Jour. Indian Water Works Ass., Vol X, No. 1, p 109-118, 1978.
30. Avner Adin, Baumann R., and Cleasby J., "The Application of Filtration Theory to Pilot-Plant Design", Minist of Inter, AWWA, Vol 71, No. 1, p 17-27, 1979.
31. Ashok K., Singhal and Memmer Roger, "Bench-Scale Tests for In-Situ Filter Media Cleaning at Owasso, Mich". Jour. AWWA. Water Technology Quality, 1979.

11. REFERENCIAS

1. Ives, K.J. & Sholji, I., "Research on Variables Affecting Filtration II", Jour. San Engr. Div., Proc. ASCE, 91: SA4:1 (Aug. 1965).
2. Yao, K. & O'Melia, C.R., "Particle Transport in Aqueous Flow Through Porous Media", 16 th Ann. Conf. Hydr. Div. ASCE MIT, Cambridge, Mass (1968)
3. Water-1977 "Characterization of Performance of Full Scale Tertiary Wastewater Granular Media Filters", Fitzpatrick, Joseph A.; Swanson Charles L. Northwestern Univ. AICHE Sym Series 178, Vol 74, N. 178, p 215 (13).

4. "The Design and Sizing of Granular Media Filtration Systems for Industrial Waste Treatment", Metzner Anthony V. Ecodyne Corp, NJ. Presented at Purdue Univ Industrial Waste 33RD Conf. Lafayette, May 9-11, 78 p 32 (5)
5. "Influence of Particle Characteristics on Wastewater Filter Performance", Fitzpatrick Joseph A. Northwester Univ, - - Presented at ACS 175th Ntl Meeting, Anaheim, Mar 12-17, 78, p 256 (3).
6. "Simulation of the Dynamic Behavior of Deep Bed Filters" Tien, Chi; Turian, Raffi M.; Pendse, Hemant Syracuse Univ. N.Y. AICHE Symp Ser Vol 75 N 190, Water - 1978, Pap - - presented at a Conf. 1978. Publ by AICHE, New York, N.Y. 1979 p 82-86.
7. "Role of Retained Particles in Deep Bed Filtration" O'Melia, Charles R.; Ali, Waris., Univ. of NC, Chapel Hill., Prog. Water Technol Vol 10, N. 5; Int Conf on Water Pollut Res, 9th (pt1) Stockholm, Swed, Jun 12-26 1978. Publ 1978 p 167-182.
8. "Making Optimum use of Filter Media in Wastewater Filtration Maxwell", Mark J.; Linstedt K.D.; Work S.W.; Bennett E.R. Black and Veatch Consulting Engineers, Colo, Water & - - Sewage Works, Dec 77, Vol 124, N. 12, p 56 (6).

9. "Models for Prediction of Concentration & Head Loss Profiles in Granular Bed Filtration", Adin Avner; Rebhun - - Mehaem (Iowa State Univ) and; (Israel Inst of Technology), Research, New Orleans, Jun 20-25, 76, Vol 2, p 17-5 (23).
10. "Direct Filtration Using Pleyelectrolyte Coagulants", - - - Letterman, R.D.; Sama Rami R.; DiDomenico E.J. Illinois Inst of Technology, Presented at AWWA 96th Annual Conf: Water Technology and Research New Orleans, Jun 20-25, 76, Vol 2, p 15-6 (18).
11. "How Cost Effective is Direct Filtration", Fulton George P. Metcalf & Eddy, N.Y. American City, Jan 77, Vol 92, N. 1, p 43 (9).
12. "High - Rate Direct Filtration" Hutchinson W.R. Ontario Ministry of Env. AWWA, Jun 76, Vol 68 No. 6, p 292 (17).
13. "Economic Analysis of Granular-Bed Filtration", Letterman, Raymond D. Syracuse Univ. Syracuse, N. Y. ASCE J. Environ Eng Div Vol 106 N. 2 Apr 1980 p 279-291.
14. "Direct Filtration Particle Removal with Polymers" Dulman, C.S.; Saatci, A.M.; Baumann, E.R. Iowa State Univ, Amex, AICHE Symp Ser Vol 75, N. 190, Water-1978, Pap Presented at Conf, 1978. Publ by AICHE, New York, N.Y., 1979 p 87-98.

15. "Polyelectrolyte Selection for Direct Filtration" Stump, Vernon L.; Novak, John T. Mid-mo Eng. J Am Water Works Assoc Vol 71 N. 6 Jun 1979 p 338-342.
16. "New Concept of Filterability", Ives, Kenneth J. Univ. Coll London, Engl, Prog Water Technol Vol 10, N. 5; Int Conf on Water Pollut Res, 9th (pt 1) Stockholm, Swed, Jun 12-26 1978. Publ 1978 p 123-137.
17. "Turbidity Control as an Aid in Water Filtration and - - Treatment" Postgate, E., HF Instrum Co, Bolton, Ont. Filtr Sep Vol 15, N 6 Nov-Dec 1978 p 610, 612, 614.
18. "Some Practical Experience in Direct Filtration" Monsevizt, J. T.; Rexing, D. J.; Williams, R.G.; Heckler, J. South Nev Water Syst, J Am Water Works Assoc. Vol 70, N 10 Oct 1978 p 684-588.
19. "Filtration Sem Dashes 1. Hydraulic Considerations and Back-Washing Operations in Granular Bed Filtration" - - Cleasby, John L. Iowa State Univ, Ames, Public Water Supply Eng Conf, 19th Annu, Proc; Water Treat, pt 2, Champaign, Ill, Apr 5-7 1977 Publ by Univ of Ill, Urbana, 1977 p 7-22.
20. "Cost Reduction While Maintaining Performance During in

- Depth Filtration for Potable Water Treatment" McNaughton, J. Water Res. Cent, Madmenham, Bucks, Engl Filtr Sep Vol 15 N 3 May-Jun 1978 p 253-254, 256, 259-261.
21. "Comparison of Two and Three Layer Granular Bed Filters for Treating Reservoir Water". Lekkas, T.D.; Fox, G.T. McNaughton, J.G. Imp. Coll. of Sci & Technol, London, Engl, J. Inst Water Eng Sci Vol 32 N 3, May 1978 p 239-248.
 22. "Direct Filtration of Waters Containing Humic Materials" Edzwald, James K.; Galser, Harolf T. Clarkson Coll of Technol, Postdma, N. Y. Am Chem Soc Div Enfiron Chem - Prepr Vol 18, N 1; Prepr. for Natl Meet, 175 th, Anaheim, Calif, Mar 12-17 1978, Publ by Am Chem Soc, New York, N.Y., 1978 p 253-255.
 23. "Prediction of Granular Water Filter Performance for Optimum Design" Adin, A. Environ Prot Serv, Jerusalem, Isr., Filtr Sep Vol 15, N 1 Jan-Feb 1978 p 55, 57-60.
 24. "Solution for Granular Bed Filtration Equations", Adin, A. Iowa State Univ of Sciand Technol, Ames. ASCE J. - - - Environ Eng Div Vol 104, N. 3, Jun 1978 p 471-484.

25. "Mixing of Polyelectrolytes for Direct Filtration", Stump, Vernon L.; Novak, John T. Univ of Mo, Columbia AWWA Annu Conf, 97th, Proc, Anaheim, Calif, May 8-13 1977, Publ by AWWA, Denver, Colo, 1977 pt 1 Pap 14A-2, 18 p.
26. "Organic Polymers Replace Alum and Improve Water Quality in Ithaca". Terrell, Donald L. City of Ithaca Water Plant, N. Y. J Am Water Works Assoc Vol 69, N 5, May 1977 p 263-266.
27. "Role of Water Treatment, Industrial in the Filtration of Colloidal Particles from Water and Wastewater". Shuste, William W.; Wang, Lawrence K. Resselaer Polutech Inst, Troy, N. Y. Sep Purif Methods Vol 6, N 1, 1977 p 153-187.
28. "Experience in the use of Polyurethane foam as a Filter Material in Treating Oil-Containing Wastewaters". - - Oboznyi, V.F.; Pichakchi, I. D.; Shimkovich, V.V. All Union Sciu-Res Inst for Water Conserv, USSR Chem Technol Fuels Oils b 12 N 11-13 Nov-Dec 1976.
29. "Influence of Water-Soluble Polymers and Electrolytes on the Permeability of Weak-Filtering Dispersed Systems" Olodovskii, P.P.; Murashko, M.G. Cent Sci-Res Inst of the Complex Use of Water Resour Minist Water J Wng Phys Vol 30, N 2 Feb 1976 p 222-227.

30. "Investigation of the Porous Structure of Filter Material".
Michlin, I. Ben-Gurion Univ of the Negev, Beer Sheva,
Isr. Proc of the Ntl Conf on Complete Wateuse, 2nd,
Water's Interface with Energy, Air and Solids, Chicago,
Ill, May 4-8 1975 Publ by AICHE, New York, N. Y. 1975
p 624-627.

31. "Integration of Filtration Equations and Parameter Opti-
mization Techniques". Payatakes, A.C.; Turian, R.M.; -
Tien, C. Syracuse Univ, N.Y. Proc of the World Congr
on Water Resour, 2nd; Water for Human Needs, New Delhi
India, Dec 12-16 1975 Publ by Int Water Resour Assoc,
Indian Comm, New Delhi, 1975, Vol 5, p 241-251.

32. "Design and Operation of Granular Media Filters for Water
and Wastewater Treatment". Kamura, Susumu. James M. -
Montgomery, Consult Eng, Inc. Pasadena, Calif. Natl -
Chem Eng Conf, 3rd, Proc: Treat, Recycle and Disposal
of Wastes, Mildura, Victoria, Aust, Aug 20-23, 1975,
Pap T65-T-68. Publ by Natl Chem Eng Conf, Monash Univ,
Clayton, Aust, 1975.

33. "Pretreatment for Direct Filtration". DiDomenico, Edward;
Sama, Rami Reddy; Letterman, R. D. III Inst of Technol,
Chicago. AWWA Annu Conf, 95th, Proc, Minneapolis, Minn,
Jun 0-12, 1975, Pap 17-3. 20 p Sponsored by AWWA, Den-
ver, Colo, 1975.

34. "Scientific Basis of Filtration" Ives, Kenneth James
(Ed.) Univ Coll, Dep of Civ and Munic Eng, London, Engl.
NATO Adv Study Inst on the Sci Basis of Filtr, Proc, -
Pap, Cambridge, Engl, Jul 2-20 1973 Publ by Noordhoff
Int Publs (NAT Adv Study Inst Ser E: Appl-Sci, Vol 2),
Leyden, Neth, 1975, 444 p.
35. "Design and Operation of High-Rate Filters Sem Dashes I".
Kawara, Susumu. James M. Montgomery, Consult Eng, Inc.
Pasadena, Calif, J. Am Water Works Assoc Vol 67, N 10,
Oct 1975 p 535-544.
36. "Advances in the Design of Granular Bed Filters" Fitz-
patrick, J. A.; Zitnay, L.W.; Spielman, L.A., Northwest
Univ, Evanston, Ill., World Filtr Congr, Paris, Fr, May
14-17 1974 Pap A.7, t p Publ by Halsted Press, Div
of Joh Wiley and Sons, New York, N. L. 1974.
37. "Specifications for Granular Filter Media" Ives, K. J.
Univ. Coll, London, Engl. Effluent Water Treat J. Vol
15, N 6, Jun 1975 p 296, 298-299, 301-305.
38. "Effect of Media Intermixing on Dual Media Filtration".
Cleasby, John, L.; Sjkora, Gary D. Iowa State Univ,
Ames. ASCE j. Environ Eng Div Vol 101, N 4, Aug 1975,
p 503-516.

39. "Particles, Polymers, and Performance in Filtration" - -
Habibian, Mohammad T.; O'Melia, Charles R. Quanta Consult
Eng, Tehran, Iran, ASCE J Environ Eng Div, Vol 101,
N 4, Aug 1975 p 567-583.
40. "Zeta Potential Controls Direct Filtration Coagulation"
Letterman, Raymond D.; Tanner, Roy D. Water Sewage Works,
Vol 121, N 8, Aug 1974 p 62-65.
41. "Berry Seed Shell as Filter Media" Bhole, A.G.; Nashikkar,
J. T., Visvesvaraya Reg Coll of Eng, Nagpur, India, J
Inst Eng (India) Public Health Eng Div Vol 54, Part PH2
Feb 1974, p 45-47.
42. "Determining Specific Deposit by Backwash Technique". - -
Hsiung, Kou-ying, Neptune MicroFLOC, Inc, Corvallis, Oreg,
ASCE J Environ Eng Div Vol 100, N EE2, Apr 1974, Pap -
10449 p 359-361.
43. "High-Rate Contact Flocculation Sem Dashes Filtration with
Cationic Pleyelectrolytes". Adin, Avner; Rebhun, Menahem,
J Am Water Works Assoc Vol 66, N 2, Feb 1974 p 109-117.
44. "Direct-Filtration Studies for Metropolitan Toronto". - -
Tredgett, R. G. Proctor & Redfern Group, Toronto, Ont.
J Am Water Works Assoc, Vol 66, N 2, Feb 1974, p 103-109.

45. "Series Filtration Using Local Filter Media". Frankel, Richard J. Southeast Asia Technol Co, Bangkok, Thailand. J Am Water Works Assoc, Vol 66, N 2, Feb 1974 p 124-127.
46. "Investigation of the Influences of some Physicochemical Variables on Porous-Media Filtration". Boyd, Russell H.; Ghosh, Mrigank M. Ebasco Serv, Inc. New York, N.Y. J Am Water Works Assoc, Vol 66, N 2, Feb 1974 p 94-98.
47. "Recent Advances in Filtration Research". Fitzpatrick, - Joseph A.; Spielman, Lloyd A. Northwest Univ, Div Water, Air Waste Chem, Gen Pap Vol 13, N 1, for Meet Apr 8-13 1973 p 98.
48. "Investigations on Variability of Filtration Coefficient in the Flow on Water Solutions Through Artificial Porous Medium". Skawinski, R. Bull Acad Pol Sci, Ser Sci Tech, Vol 20, N 12, 1972, p 491-494.
49. "Filter Media Development and Innovation". Ward, A. S. - Loughborough Univ of Technol, Filtr Sep, Vol 10, N 1 Jan-Feb 1973, 5 p Between p 61 and 73.
50. "Performance of Plastic Filter Cloths as a Replacement for Granular Filter Materials". Calhoun, Charles C. Jr.; Compton, Joseph, R., Strohm, William E. Jr. U S Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg Miss Highw Res Rec, N. 373, 1971 p 74-85.

A N E X O I
FUNCION ERROR

- 1. DEFINICION

- 2. TABLA

1. FUNCION ERROR

La función error " $\text{erf } x$ " aparece frecuentemente en la solución de ecuaciones diferenciales parciales describiendo reacciones químicas y de difusión. La función error es definida como la integral:

$$\text{erf } x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy$$

donde " y " es una variable de integración y " x " es un número positivo o negativo.

Los valores límites de $\text{erf } x$ son:

$$\text{erf } 0 = 0 \quad , \quad \text{erf } \infty = 1 \quad , \quad \text{y} \quad \text{erf } (-\infty) = 1$$

El complemento de $\operatorname{erfc} x$ se define como:

$$\operatorname{erfc} x = 1 - \operatorname{erf} x$$

o como una integral:

$$\operatorname{erfc} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-y^2} dy$$

Para "x" positiva, los límites de $\operatorname{erfc} x$ son

$$\operatorname{erfc} 0 = 1 \quad \text{y} \quad \operatorname{erfc} \infty = 0 \quad (\text{Tabla A.1})$$

Para "x" negativa

$$\operatorname{erfc} (-x) = \begin{array}{l} 1 - \operatorname{erf} (-x) \\ 1 + \operatorname{erf} x \\ 2 - \operatorname{erfc} x \end{array}$$

TABLA A.1 LA FUNCION ERROR Y SU COMPLEMENTO PARA VALORES
NEGATIVOS Y POSITIVOS DEL ARGUMENTO x^a

x	$\text{erfc } x$	$\text{erfc } x$	x	$\text{erfc } x$	$\text{erfc } x$
$-\infty$	- 1.0	2.0	0	0	1.0
-3.0	- 1.0	2.0	0.1	0.1125	0.8875
-2.8	- 0.9999	1.9999	0.2	0.2227	0.7773
-2.6	- 0.9998	1.9998	0.3	0.3286	0.6714
-2.4	- 0.9993	1.9993	0.4	0.4284	0.5716
-2.2	- 0.9981	1.9981	0.5	0.5205	0.4795
-2.0	- 0.9953	1.9953	0.6	0.6039	0.3961
-1.8	- 0.9891	1.9891	0.7	0.6778	0.3222
-1.6	- 0.9763	1.9763	0.8	0.7421	0.2579
-1.4	- 0.9523	1.9523	0.9	0.7969	0.2031
-1.2	- 0.9103	1.9103	1.0	0.8427	0.1573
-1.0	- 0.8427	1.8427	1.2	0.9103	0.0897
-0.9	- 0.7969	1.7969	1.4	0.9523	0.0477
-0.8	- 0.7421	1.7421	1.6	0.9763	0.0237
-0.7	- 0.6778	1.6778	1.8	0.9891	0.0109
-0.6	- 0.6039	1.6039	2.0	0.9953	0.0047
-0.5	- 0.5205	1.5205	2.2	0.9981	0.0019
-0.4	- 0.4284	1.4284	2.4	0.9993	0.0007
-0.03	- 0.3286	1.3286	2.6	0.9998	0.0002
-0.2	- 0.2227	1.2227	2.8	0.9999	0.0001
-0.1	- 0.1125	1.1125	3.0	1.0	0
0	0	1.0	∞	1.0	0

A N E X O I I

CARACTERIZACION DE MEDIOS FILTRANTES
PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO

1. PESO ESPECIFICO
2. POROSIDAD
3. DUREZA
4. SOLUBILIDAD EN ACIDO CLORHIDRICO
5. SOLUBILIDAD EN HIDROXIDO DE SODIO
6. IGNICION

PROPIEDADES FISICO-QUIMICAS

Los procedimientos empleados en la caracterización de los medios filtrantes fueron tomados de *Calidad del Agua Cepis 13* - (ref 6).

1. PESO ESPECIFICO (S)

a) Equipo:

Estufa

Balanza

Pipeta

Vaso de precipitados (500 ml)

Matraz aforado (250 ml)

Desecador

b) Procedimiento:

b1) Secar muestra de medio filtrante que se quiere --
analizar durante 24 horas a 103°C.

- b2) Pesar una muestra de 150 gr, colocándola en un vaso de precipitados de 400 ml.
- b3) Añadir 100 ml agua destilada y hervir durante 5 - minutos a fin de expulsar el aire.
- b4) Pesar un matraz desecado de 250 ml.
- b5) Enfriar y llevar la muestra a ese matraz. Completar con agua destilada hasta la marca.
- b6) Pesar matraz con agua y medio filtrante.
- b7) $S = \frac{\text{Peso muestra}}{\text{Vol. muestra}}$

c) Cálculos:

c1) $V \text{ muestra} = V_a + V_b$

V_a = volúmen de agua más muestra

V_b = volúmen agua desplazada = c - d

c = peso matraz más muestra más agua menos peso matraz

d = 150 gr

2. POROSIDAD

Utilizando método de Hulbert y Feben.

a) Equipo:

Balanza

Tubo de Jackson

Probeta

Tapón de goma

b) Procedimientos:

- b1) Colocar 150 gr en un tubo Jackson de 0.75 m de -- largo y 0.028 m de diámetro y llenarla con agua - hasta la mitad. La muestra debe haberse lavado - previamente para eliminar tierra y polvo que pu- diera contener.

- b2) Agitar para extraer el aire
- b3) Si el agua está turbia, decantar repetidamente -- hasta que se clarifique.
- b4) Llenar el tubo con agua completamente y colocarle un tapón de goma de modo que no queden burbujas - de aire adentro.
- b5) Rotar el tubo rápidamente 150 grados.
- b6) Cuando la arena se sedimente en el fondo del tubo, rotarlo de nuevo rápidamente 180 grados y colocarlo en un soporte a fin de que permanezca verticalmente sin perturbaciones.
- b7) Marcar en el tubo el borde superior de la arena y removerla con todo y agua.
- b8) Añadir agua hasta la marca que se hizo en el tubo y medir este volúmen en un cilindro graduado.

c) Cálculos:

$$p \% = \frac{\text{volúmen vacío}}{\text{volúmen muestra}} \times 100$$

Volúmen vacío = volúmen medido - volúmen muestra

Volúmen medido = volúmen total

Volúmen muestra = $\frac{\text{Peso de muestra}}{\text{Peso específico}}$

3. DUREZA

Se determinó empleando la escala de Mohs:

Material	Clasificación
Talco	1
Yeso	2
Calcita	3
Fluorita	4
Apatita	5
Ortoclasa	6
Cuarzo	7
Topacio	8
Coridón	9
Diamante	10

El grado de dureza del material en estudio se determina de --
acuerdo al grado de dureza del material que lo "raya" y el --
que es "rayado".

4. SOLUBILIDAD EN ACIDO CLORHIDRICO

a) Equipo:

Estufa

Matraz (500ml)

Balanza

b) Procedimiento:

b1) Lavar una muestra de 10 gr. con agua destilada, -
desecharla a 103°C durante 24 horas y pesarla.

b2) Sumergirla en solución de H Cl al 30% (al volú---
men) preparado, diluyendo 4 volúmenes de H Cl (pe
so específico 1.18 - 1.20) con 10 volúmenes de --
agua destilada.

b3) Dejar la muestra así durante 24 hrs. entre 18 y -
20°C.

b4) Sacarla, lavarla con agua destilada, desecar y pesarla de nuevo.

c) Cálculo:

$$\% \text{ Solubilidad} = \frac{\text{Pérdida de peso}}{\text{Peso original}} \times 100$$

5. SOLUBILIDAD EN HIDROXIDO DE SODIO

a) Equipo:

Estufa

Matraz

Balanza

b) Procedimiento:

b1) Lavar una muestra de 10 g con agua destilada, desecarla a 103°C durante 24 hrs y pesarla.

b2) Sumergirla en solución de Hidróxido de sodio al 10%.

b3) Dejar la muestra así durante 24 hrs entre 18 y 20°C.

b4) Sacarla, lavarla en agua destilada, desecar y pe-

sarla de nuevo.

c) Cálculo:

$$\% \text{ Solubilidad} = \frac{\text{Pérdida de peso}}{\text{Peso original}} \times 100$$

6. IGNICION

a) Equipo:

Balanza

Cápsula de porcelana

Mufla

b) Procedimiento:

b1) Se toma una cápsula y se lleva a peso constante - después de calcinación (700 °C).

b2) Se toman aproximadamente 20 g de material lavado y desecado.

b3) Se colocan en la cápsula, se pesan y se meten en una mufla a 700°C durante 1 hr.

b4) Se meten al desecador para poner a temperatura --

ambiente y se vuelven a pesar.

- b5) La diferencia de pesos, dividida entre la diferencia del peso inicial y el peso de la cápsula, es el porcentaje de material perdido por ignición.