

*COORDINACIÓN DE TRATAMIENTO Y CALIDAD DEL AGUA  
SUBCOORDINACIÓN DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES*

# Experiencias de deficiencias en diseño de humedales de tratamiento



*Dr. Armando Rivas Hernández*

## Información requerida para el diseño de humedales.

- **Caudal actual y caudal de población futura.**
- **Población actual y población proyectada.**
- **DBO, SST, Nitrógeno total, Fósforo total, coliformes fecales.**
- **Temperatura promedio del mes más frío.**
- **Existencia o no de aguas residuales industriales (tipos y cantidades, por ejemplo rastros, procesadoras de alimento, industrias en las que se descarguen solventes, colorantes, aceites, etc.).**
- **Disponibilidad de terreno (a priori considera un área aproximada de 4.5 m<sup>2</sup>/habitante para esa zona).**
- **Calidad del agua de salida (descarga a cuerpo receptor, tipo de reuso ej; riego, acuacultura, etc.).**

## Información requerida para el diseño de humedales.

- **Tipos de macrófitas de la región que puedan aprovecharse en los humedales (ejemplo: tule, carrizo, etc.).**
- **Disponibilidad y costos de tezontle o de grava.**
- **Tipo de suelo (arcilloso, arenoso, etc.) del sitio donde se construirá el humedal.**
- **Accesibilidad del área donde se planea construir el humedal.**
- **Porcentaje y edad del sistema de alcantarillado.**
- **Distancia del sitio de descarga al sitio asignado para el humedal y tipo de suelo por donde se conducirán las aguas residuales (rocoso, arenoso, arcilloso).**
- **Existencia de un tratamiento, ej: tanque séptico, rejillas.**

## ERRORES COMUNES REALIZADOS DURANTE EL DISEÑO DE LOS HUMEDALES DE TRATAMIENTO

- **Previos al dimensionamiento**
- **Durante el dimensionamiento**
- **Fallas del diseño físico**

## Previos al diseño

- Durante la caracterización de la descarga:
  - Distancia entre el último registro de la población y el sitio donde se ubicará el humedal.
  - Fecha incorrecta de la caracterización:
    - Días festivos en que incrementa la población).
    - Temporadas de tandeo del suministro de agua (incremento de la carga orgánica).
  - Insuficiencia de campañas de muestreo: una muestra puntual puede contener información bastante errónea). 3-5 días con frecuencia cada 4 horas.

- Errores durante la toma de muestras: oportunidad de muestreo (alta DBO puntual), fallas de los equipos de medición, limpieza de frascos o recipientes de muestreo (muestras contaminadas).
  - Estimación incorrecta de los datos de proyecto. Invención de la información.
  - Imitación incorrecta de datos de proyecto con respecto a una comunidad “similar”.
  - Proyección incorrecta de la población.
- 
- Errores durante los análisis de laboratorio. Ej: DBO de 250 y 400 mg/L de la misma muestra.
  - Insuficiencia de bases y criterios para interpretar los resultados de laboratorio (Ej: N Kjeldalh > que NT).

## Errores durante el dimensionamiento

- ¿Cuál modelo usar? (selección del modelo). Criterios económicos, disponibilidad de terreno, desconocimiento de aplicabilidad del modelo.
- Uso de criterios de diseño que podrían no aplicar:
  - Área per cápita (3-10 m<sup>2</sup>/hab, Vymazal, 2003; 2.8 – 3 m<sup>2</sup>/hab, Rivas 2011).
  - Carga orgánica:
    - 4-6 gDBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup> (García et al, 2004) para humedales con 50 – 60 cm de profundidad.
    - 8-12 gDBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup> (Kadlec y Knight, 1996).
    - 15 gDBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup> en humedal inicial (Rivas, 2011) con 50 cm de prof.
  - Profundidad. Se calcula el área superficial y no la transversal en HFS.

- Una sola unidad de humedal es menos eficiente que dividir el área en varios humedales
- Selección de la variante correcta de humedal. Ej: Humedal de flujo vertical para una descarga de servicios sanitarios (altas concentraciones de amonio).
- Suposición incorrecta del porcentaje de reducción del tratamiento anaerobio.
- Se asumen valores de porosidad (conductividad hidráulica) que no coinciden con el tamaño de grano, además que no contemplan el desarrollo de las raíces.

<b>Tipo de Medio</b>	<b>Tamaño de Grano. mm</b>	<b>Porosidad (n)</b>	<b>Conductividad Hidráulica (K<sub>3</sub>) m<sup>3</sup>/ m<sup>2</sup>. día m/día o m/año</b>
<b>Grava fina</b>	<b>16</b>	<b>38</b>	<b>1,000 – 10,000</b>
<b>Grava media</b>	<b>32</b>	<b>40</b>	<b>10,000 – 50,000</b>
<b>Grava gruesa</b>	<b>128</b>	<b>45</b>	<b>50,000 – 250,000</b>

Fuente: EPA, 1993



## Capas con granulometría diferente



# ¿Cuál modelo es el bueno?

Experiencias IMTA en humedales

Constantes cinéticas



Más del 95% de los sistemas mecanizados en el país no incluyen tratamiento avanzado para la remoción de nutrientes (N y P)

Existen varios criterios para el dimensionamiento de los humedales

Las ecuaciones existentes incluyen constantes obtenidas en Europa y Estados Unidos, bajo condiciones diferentes a México: clima, caudal de diseño, calidad del agua residual, geometría, granulometría, especies vegetales, tiempo y eficiencia de operación, etc.

Área: 3 – 10 m<sup>2</sup>/Hab

Reed, 1995

$$\bar{K}_T = K_R \cdot \theta_R^{(T_w - T_R)}$$

EPA, 1988, 2003

$$A = \frac{Q (\ln C_i - \ln C_e)}{\bar{K}_T \cdot dn}$$

Cooper, 1995

$$A = \frac{Q (\ln C_i - \ln C_e)}{\bar{K}}$$

Kadlec y Knight, 1996

$$A = \left( \frac{0.0365 Q}{k_{j_0}} \right) \ln \left( \frac{C_i - C^*}{C_e - C^*} \right)$$

No todas las ecuaciones de diseño incluyen la remoción de nitrógeno, fósforo ni coliformes fecales, lo que también limita su uso (Cooper, et al., 1996).

Comparison of VSB Area Required for BOD Removal Using Common Desing Approaches.

Desing criteria  
 Flow (Q) = 400 m<sup>3</sup>/d (105,680 gpd)  
 Influent BOD<sub>5</sub> (C<sub>i</sub>) = 125 mg/L  
 Effluent BOD<sub>5</sub> (C<sub>e</sub>) = 30 mg/L

Design Approach	Rate Constant	Loading Constant	Other Factors	Required Area m <sup>2</sup> (ac)
This Manual		6 g/m <sup>2</sup> -d (54 lb/ac-d)		8,330 (2.0)
European (Cooper, 1990)	K <sub>BOD</sub> = 0.1/d			5,710 (1.4)
Kadlec & Knight (1996)		180 m/yr (590 ft/yr)	Background Concentration <sup>2</sup> = 10 mg/L	1,420 (0.4)
Reed, et al. (1995)	Temperature Dependent <sup>2</sup> K <sub>10</sub> = 0.62/d K <sub>20</sub> = 1.104/d		Water Depth <sup>1</sup> = 0.4 m (16") Media Porosity <sup>1</sup> = 0.38	at 10°C, 6,090 (1.5) at 20°C, 3,400 (0.8)
TVA (1993)		5.3 g/m <sup>2</sup> -d (48 lb/ac-d)	Derived from TVA desing Assumes septic tank effluent	9,430 (2.3)

<sup>1</sup>Values chosen by user, these are not necessarily the values recommended by the design's author.

<sup>2</sup>Values calculated per instructions of desing's author.

Fuente: Desing\_Manual2000 EPA

## Datos del proyecto

PARÁMETRO	C <sub>i</sub> agua cruda	% de reducción	C <sub>i</sub> , después del anaerobio, mg/L	C <sub>e</sub>
DBO, mg/L	450	30,00%	315,00	30
NT, mg/L	72	12,00%	63,36	15
PT, mg/L	14	0,00%	14,00	5
CF, NMP/100ml	2,75E+07	90,00%	2.750.000	1,00E+03
SST, mg/l	350	30,00%	245,00	30

Población real definitiva	1.890 Hab
Dotación	200 L/hab.d
Pérdidas	20,00%
Aportación	160 L/hab.d
Caudal	3,500 L/s

Equipo	Criterio de diseño	Área (m <sup>2</sup> ) para la remoción de:					Área máxima		Área/hab
		DBO	NT	PT	CF	SST	m <sup>2</sup>		m <sup>2</sup>
1	Subterráneo, Cooper	7.111	4.357	3.114	23.948	6.351	23.948	2,395	12,67
2	Subterráneo, Kadlec	2.087	6.223	9.494	9.213	128	9.494	0,949	5,02
3	EPA	6.591	4.039	2.886	22.198	5.887	22.198	2,220	11,75
4	Superficial Kadlec	11.049	7.637	9.494	12.180	625	12.180	1,218	6,44

# Comparativa de modelos de diseño

## Experiencias IMTA en humedales

## Constantes cinéticas

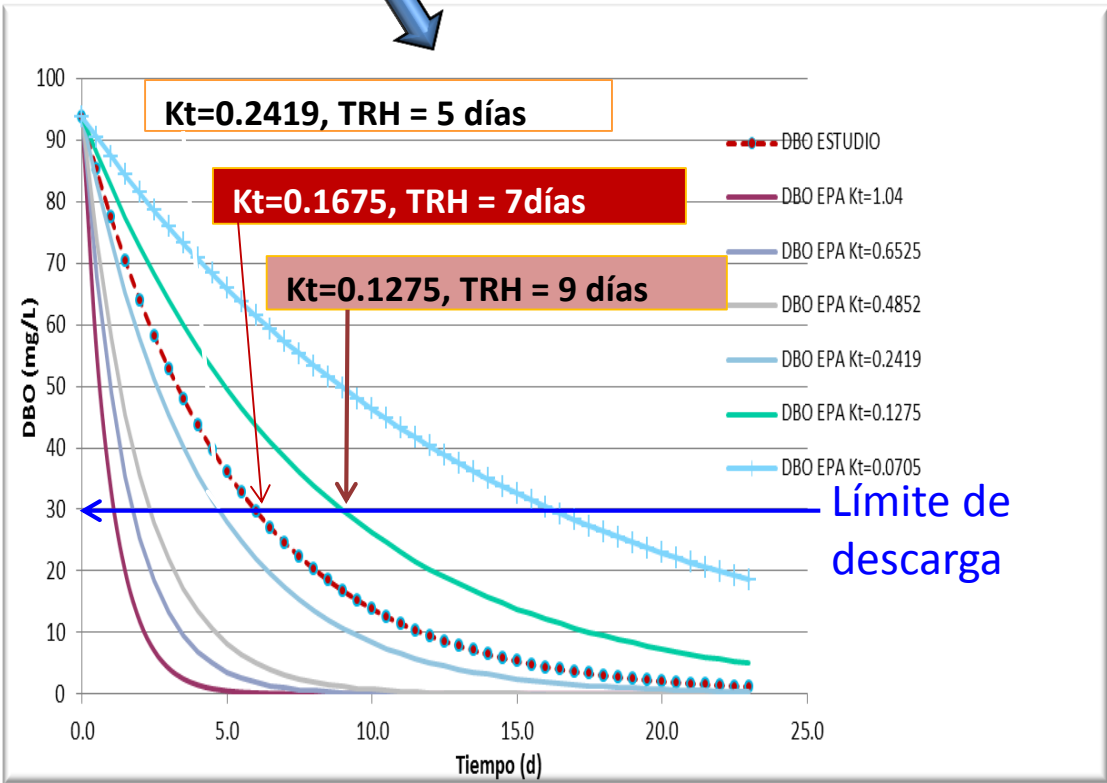
## Sensibilidad de la ecuación

$$A = \frac{Q (\ln C_i - \ln C_e)}{K_T dn}$$

$$K_T = K_{20} (1.06)^{(T-20)}$$

$$K_{20} = 0.678 \text{ d}^{-1}$$

$$A = \left( \frac{0.0365 Q}{k_{20}} \right) \ln \left( \frac{C_i - C^*}{C_e - C^*} \right)$$



Área: 3 – 10 m<sup>2</sup>/Hab  
(Vymazal, 2008)

Área: 2.8 m<sup>2</sup>/Hab  
(Cucuchucho)

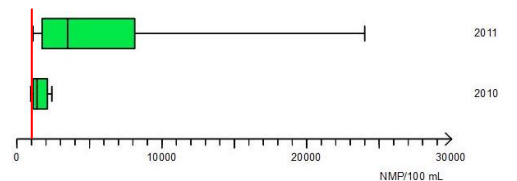
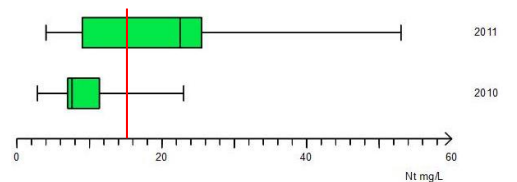
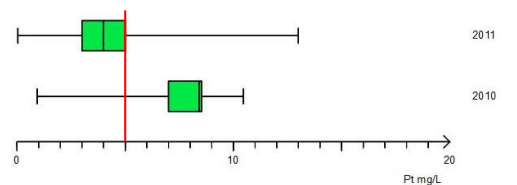
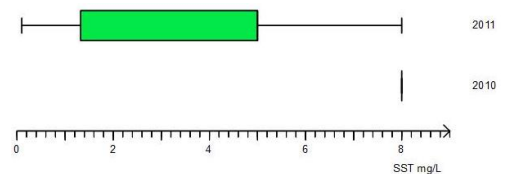
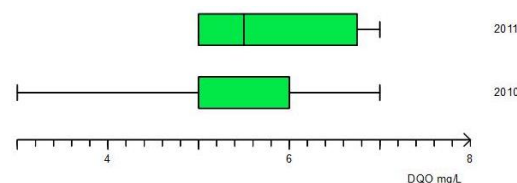
Área: 3.0 m<sup>2</sup>/Hab  
(Santa Fe de la Laguna)

# “DETALLES” DE LAS CONSTANTES”

La constante de la constante es que es inconstante, es dinámica.

Cambia con el tiempo de operación. Reduce la eficiencia de remoción.

## Resultados humedal de Cucuchucho



Cucuchucho						
	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Valor mínimo	0	0	0	0	6	5
Cuartil bajo	0	0	0	0	6	5
Mediana	0	0	0	0	6	6
Cuartil alto	0	0	0	0	6	7
Valor máximo	0	0	0	0	6	7

Cucuchucho						
	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Valor mínimo	0	0	0	0	8	0.1
Cuartil bajo	0	0	0	0	8	1
Mediana	0	0	0	0	8	5
Cuartil alto	0	0	0	0	8	5
Valor máximo	0	0	0	0	8	8

Cucuchucho						
	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Valor mínimo	0	0	0	0	8	5
Cuartil bajo	0	0	0	0	8	13
Mediana	0	0	0	0	8	18
Cuartil alto	0	0	0	0	8	22
Valor máximo	0	0	0	0	8	25

Cucuchucho						
	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Valor mínimo	0	0	0	0	11	4
Cuartil bajo	0	0	0	0	11	9
Mediana	0	0	0	0	11	23
Cuartil alto	0	0	0	0	11	26
Valor máximo	0	0	0	0	11	53

Cucuchucho						
	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Valor mínimo	0	0	0	0	1.10E+03	1.10E+03
Cuartil bajo	0	0	0	0	1.10E+03	1.73E+03
Mediana	0	0	0	0	1.10E+03	3.50E+03
Cuartil alto	0	0	0	0	1.10E+03	8.13E+03
Valor máximo	0	0	0	0	1.10E+03	2.40E+04

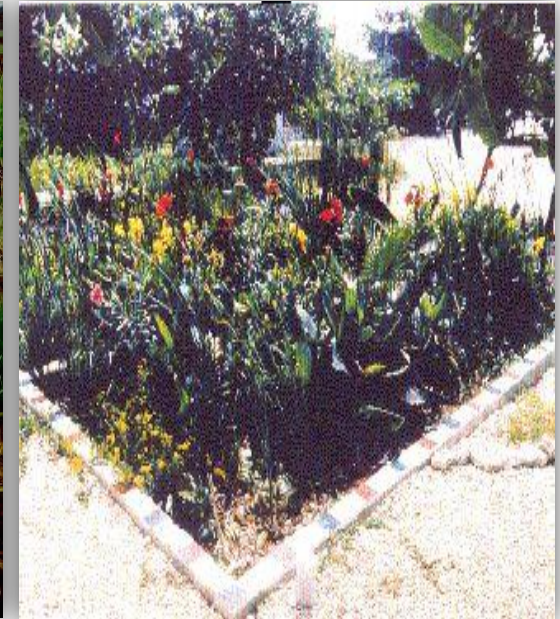
Cambia a lo largo del humedal. Depende del parámetro evaluado.

El área calculada mediante los diversos modelos de diseño no definen la relación largo ancho (geometría), ni el comportamiento hidráulico, aspectos que impactan de manera importante la eficiencia de reducción de contaminantes.



# “DETALLES” DE LOS MODELOS DE DIMENSIONAMIENTO

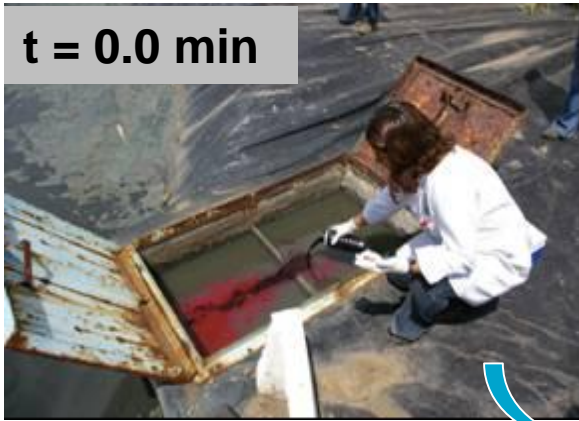
No definen los aspectos hidráulicos (geometría, tamaño, etc.)





# Evaluación con rodamina TW

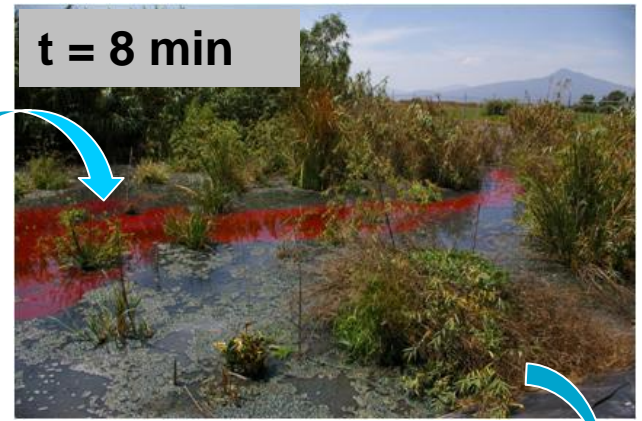
t = 0.0 min



t = 2 min



t = 8 min



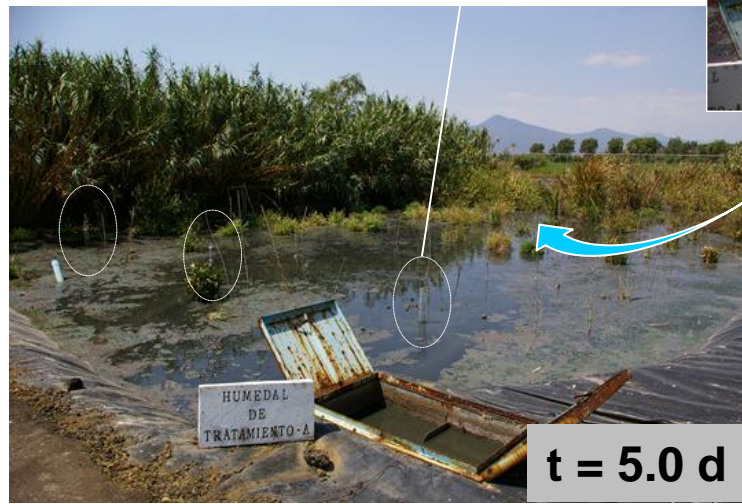
**Introducción del colorante Flujo superficial del trazador en el humedal**



**Toma de muestras**



t = 28 min



t = 5.0 d



t = 51 min

## Cálculo del tiempo real de retención hidráulica y de la constante de dispersión del humedal del sobrenadante A

Punto de muestreo	Ci (ppb) Prom.	$\bar{t} = \frac{\sum t_i C_i}{\sum C_i}$	$d = \frac{1}{4\pi (C_{\max} / C_o)^2}$	$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i}{\sum C_i} - \bar{t}^2$
		Tiempo Real con colorante (d)	Constante Dispersión	Varianza $\sigma$
1	<b>53.8</b>	<b>1.04</b>	<b>0.8119</b>	<b>0.904</b>
2	52.6	1.00	1.0168	0.838
4	48.5	0.95	0.7785	0.694
5	28.6	3.97	1.7191	26.448
6	94.7	1.32	0.4245	1.141
7	83.4	1.33	0.3767	0.745
8	59.3	1.34	0.8857	0.817
9	44.4	1.87	1.9928	0.960
11	70.2	6.38	0.8600	33.850
12	68.3	1.42	1.1399	1.029
13	89.3	1.68	0.5038	0.656
14	72.5	4.57	0.4245	24.936
15	77.8	4.34	0.4616	20.126
16	135.3	2.41	0.3397	0.552
17	67.6	0.72	0.3917	0.062
18	42.5	1.43	0.4334	0.106
19	100.8	5.24	0.4076	29.917
20	100.4	0.63	0.4117	0.056

Pnto de muestreo	Ci (ppb) Prom.	$\bar{t} = \frac{\sum t_i C_i}{\sum C_i}$	$d = \frac{1}{4\pi (C_{\max} / C_o)^2}$	$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 C_i}{\sum C_i} - \bar{t}^2$
		Tiempo Real con colorante (d)	Constante Dispersión	Varianza $\sigma$
21	42.5	1.76	0.5585	0.252
22	42.1	2.30	0.5652	0.480
23	57.7	0.80	0.4076	0.039
24	91.3	4.84	0.4379	24.761
25	93.3	2.10	0.5393	1.028
26	40.3	3.03	1.4924	220.199
27	74.6	3.06	0.6002	0.273
28	42.2	3.10	0.7470	0.405
29	10.0	3.19	1.9928	0.643
30	0.8	1.69	0.6000	1.264
31	1.0	2.22	0.6700	1.775
32	26.7	3.19	1.3101	0.304
33	59.4	11.10	1.2642	30.173
34	0.9	2.25	0.8000	1.724
35	2.9	3.09	0.5600	0.928
<b>36</b>	<b>78.4</b>	<b>12.11</b>	<b>0.9264</b>	<b>24.438</b>
37	0.6	1.59	0.8700	1.250

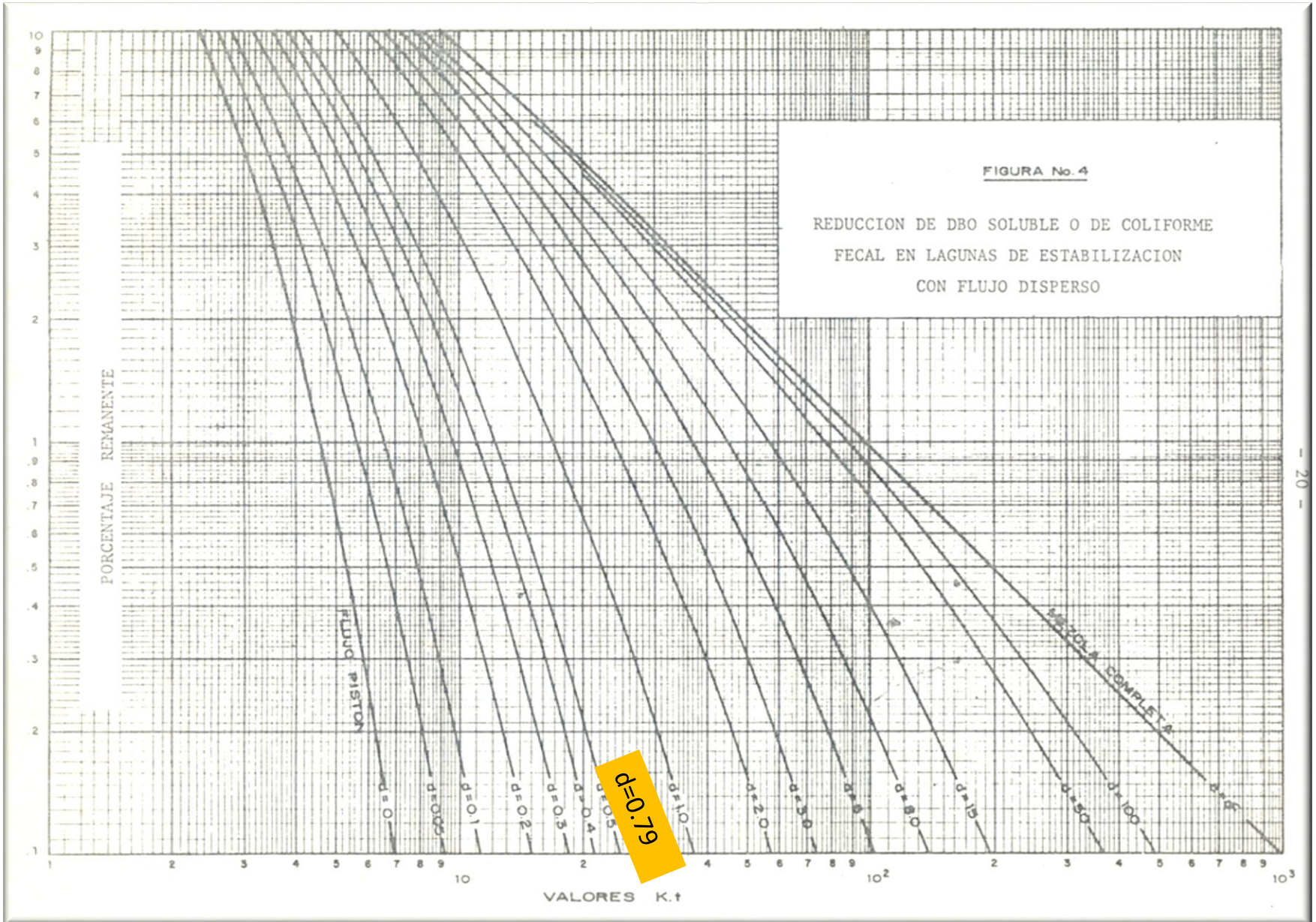
TRH, Q medido = 12.5 d

TRH, Q trazador = 2.9 d

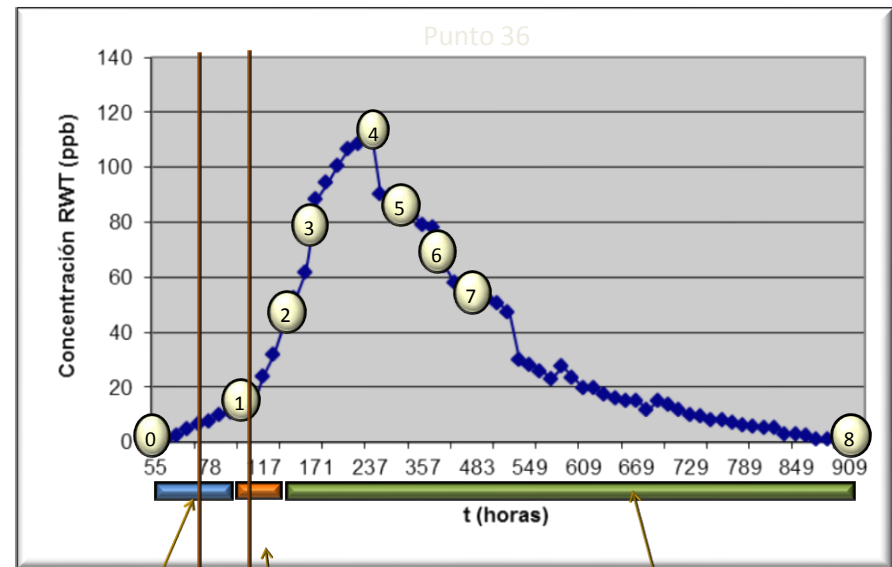
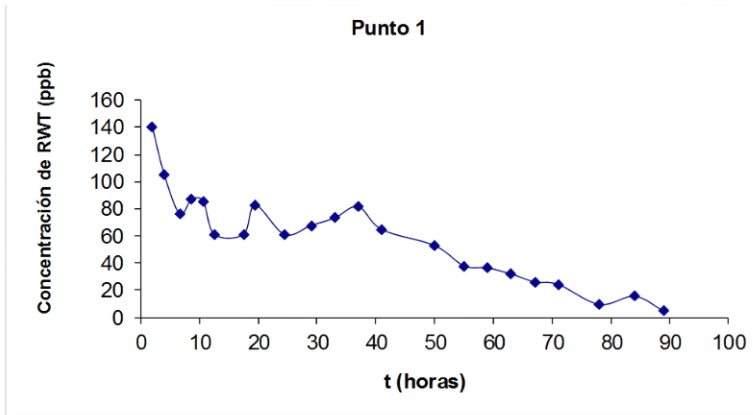
Constante dispersión = 0.79

E.R. DBO<sub>5</sub> = 94 %

# Modelo hidráulico humedal del sobrenadante A



# Cálculo del tiempo real de retención hidráulica y de la constante de dispersión del humedal del sobrenadante A

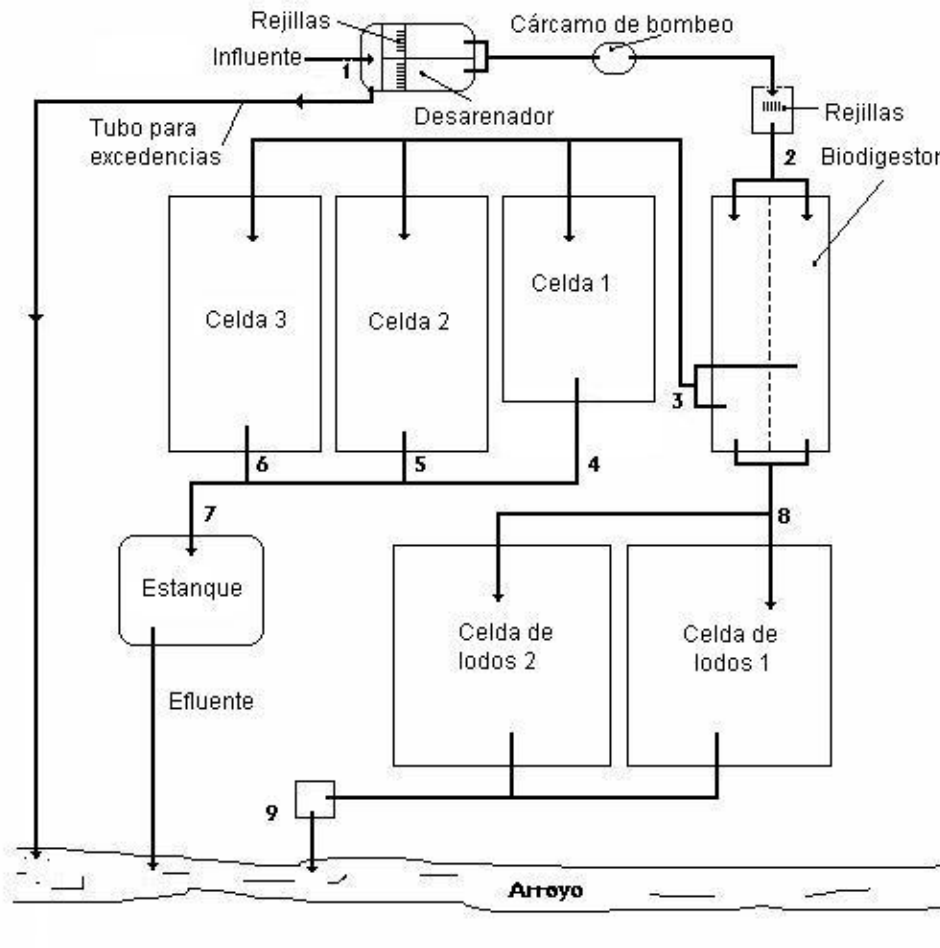


Flujo superficial  
descartado

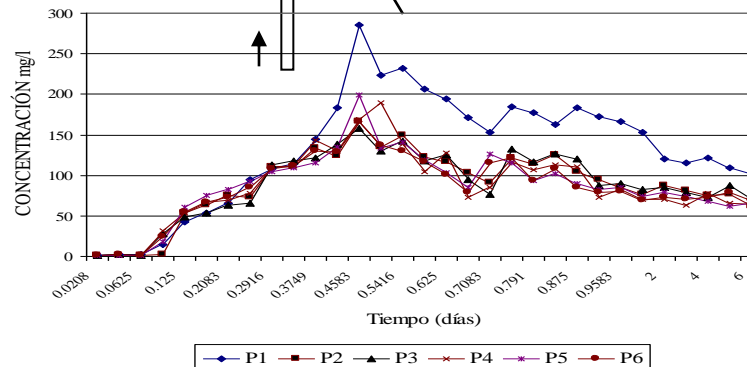
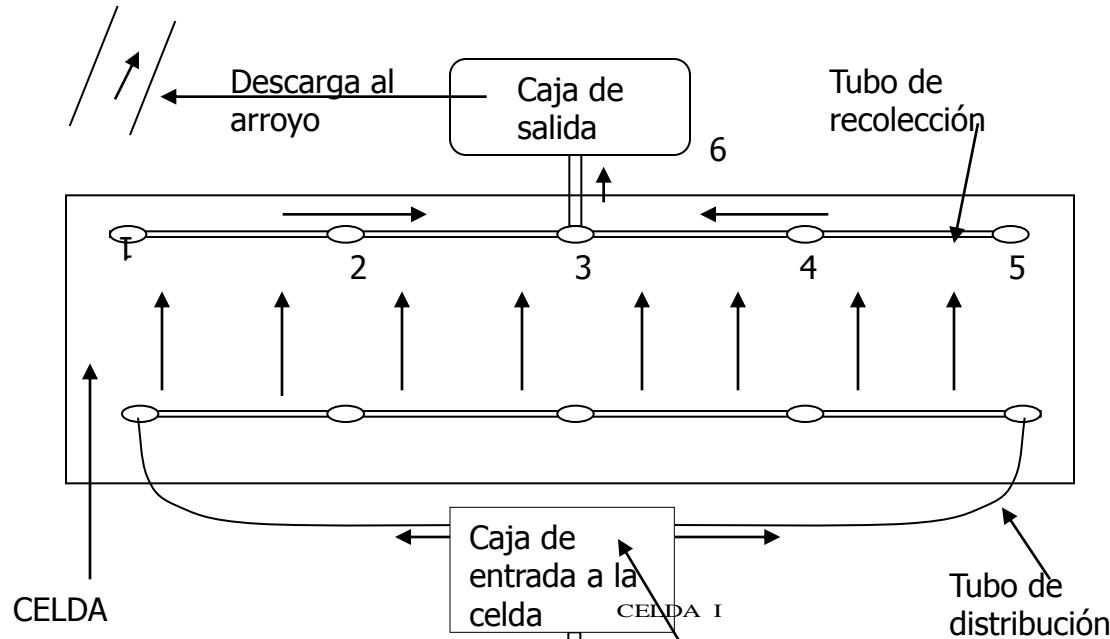
Flujo pistón

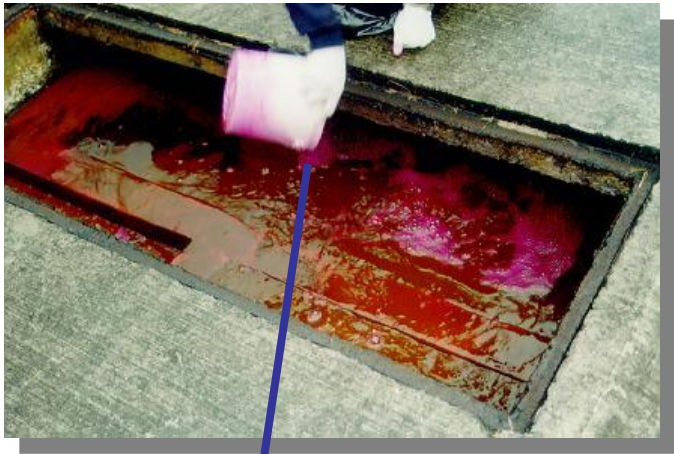
Flujo mezclado

# Ubicación de los puntos de muestreo. Planta Quilehltla.



# Prueba de dispersión. Uso de Rhodamina W como trazador

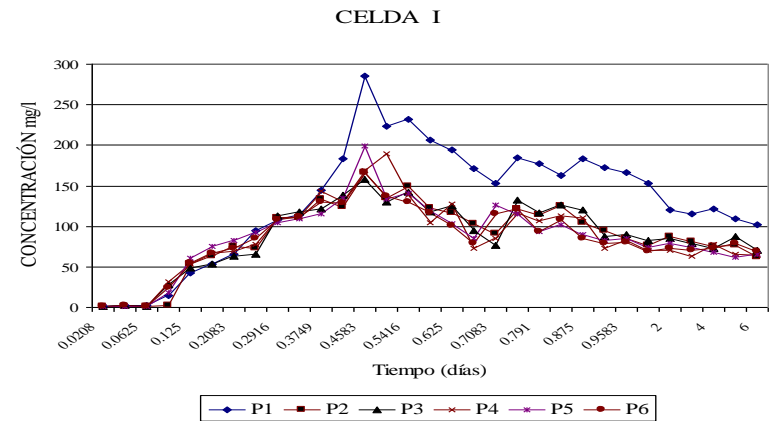
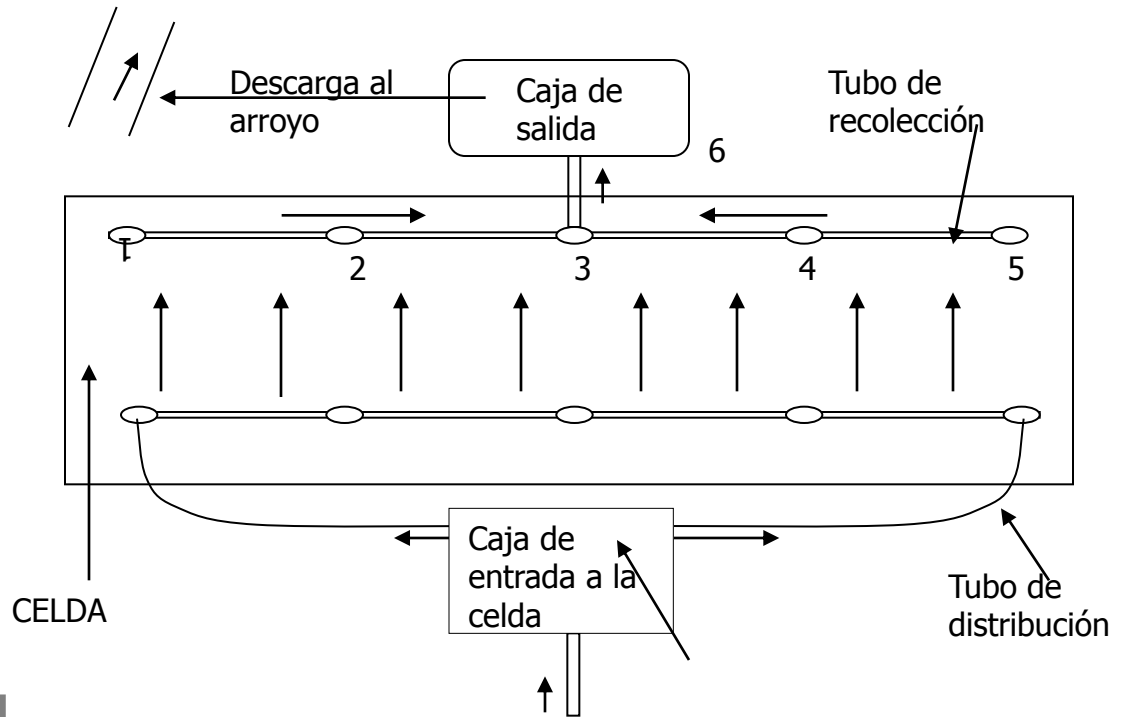




**Introducción del trazador**



**Desplazamiento del trazador**

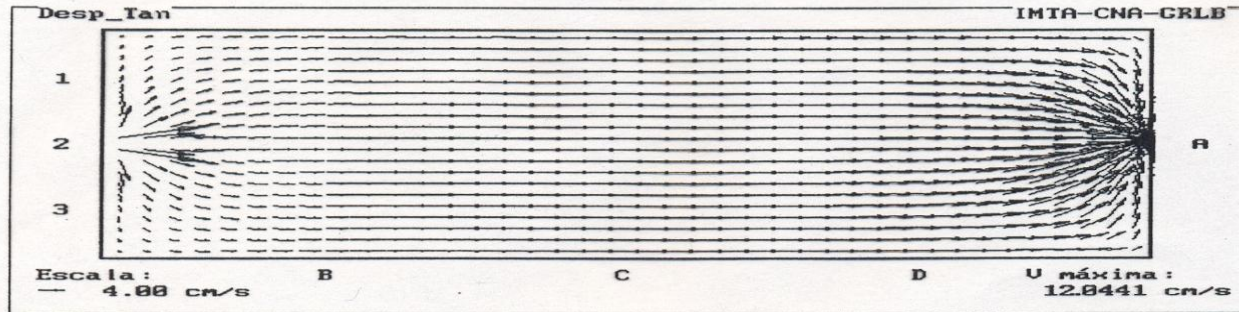


Punto de muestreo	Constante de dispersión	Tiempo de retención (días)		
		Con el gasto de diseño (350m³/d)	Con el gasto medido (312.768m³/d)	
<b>CELDA I</b>				
Punto 1	0.8101	<b>4.3104</b>	<b>4.00552</b>	1.0729
Punto 2	0.8416			1.0236
Punto 3	<b>0.8454</b>			<b>1.0598</b>
Punto 4	0.8675			0.9873
Punto 5	0.8635			0.9847
<b>Punto 6</b>	<b>0.8699</b>			1.0312
<b>CELDA II</b>				
Punto 1	0.8073	<b>4.6903</b>	<b>5.2486</b>	0.8426
Punto 2	0.8183			<b>0.9027</b>
Punto 3	0.8343			0.9141
Punto 4	0.8350			0.8579
Punto 5	0.8350			0.8696
Punto 6	0.8451			0.8806
<b>CELDA III</b>				
Punto 1	0.7655	<b>4.6903</b>	<b>5.2486</b>	0.9329
Punto 2	0.8115			<b>0.9337</b>
Punto 3	0.8211			0.8905
Punto 4	0.8275			0.8338
Punto 5	0.8182			0.8374
Punto 6	0.8242			0.8476



MÓDULO A				
Punto de muestreo	Constante de dispersión	Tiempo de retención (días)		
		Con el gasto de diseño (14.25 m <sup>3</sup> /d)	Con el gasto medido (101.122 m <sup>3</sup> /d)	Con el gasto de la dispersión $TR = \frac{\sum TC}{\sum C}$
<b>Primera celda con plantas acuáticas</b>				
Punto 2	0.8764	4.8315	0.2269	1.2432
Punto 4	0.8782	4.8315	0.2269	1.4949
<b>Laguna</b>				
Punto 5	0.7566	43.84	7.002	2.0357
Punto 6	0.6777	43.84	7.002	2.1084
<b>Segunda celda con plantas acuáticas</b>				
Punto 7	0.6596	4.8315	0.2269	2.5430
Punto 8	0.8588	4.8315	0.2269	1.8520
Punto 9	0.9031	4.8315	0.2269	1.7263
<b>Salida del sistema</b>				
Punto 10	1.1884			0.7845
<b>TIEMPO DE RETENCIÓN TOTAL POR MÓDULO, (DÍAS)</b>		<b>53.5</b>	<b>7.45</b>	<b>6.25</b>
<b>MÓDULO B</b>				
<b>TIEMPO DE RETENCIÓN TOTAL POR MÓDULO (DÍAS)</b>		<b>53.5</b>	<b>7.95</b>	<b>5.2349</b>

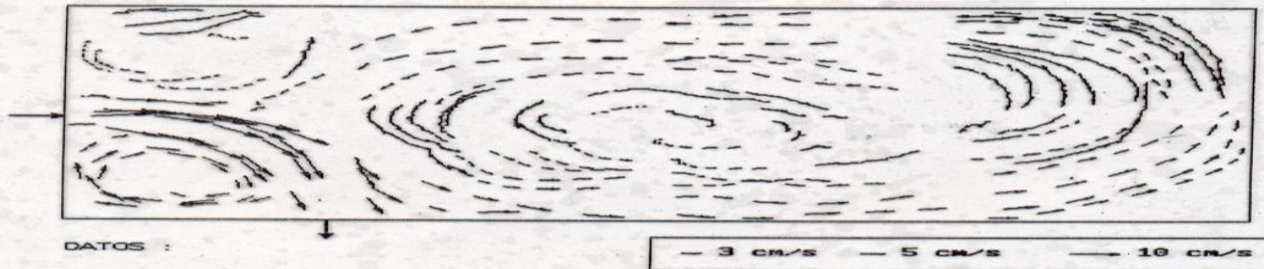
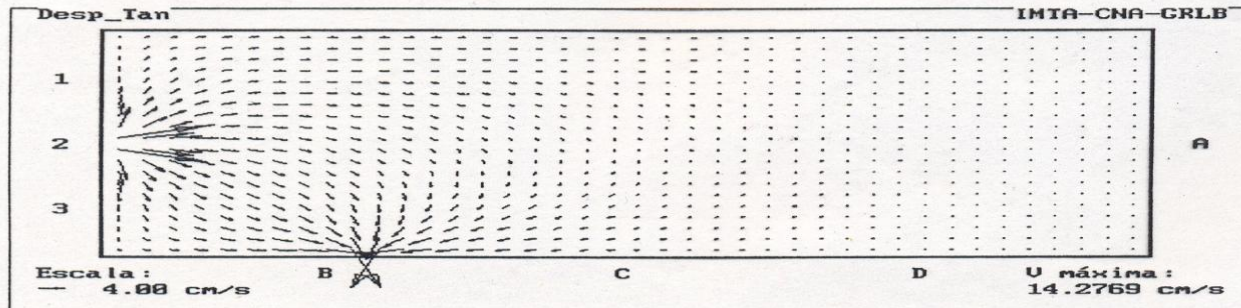
Los resultados de las diferentes pruebas experimentales se presentan en las láminas de la 1 a la 7, mostrando el campo de velocidades simulado en el modelo numérico. Se debe destacar que fue seleccionada en todos los casos una velocidad de 4 cms/s como escala de velocidades.



Despliegue del campo de velocidades  
Resultados a la(s) 2 hr(s) Prueba 1

Lámina 1. Resultados de la Prueba # 1

## Pruebas hidráulicas

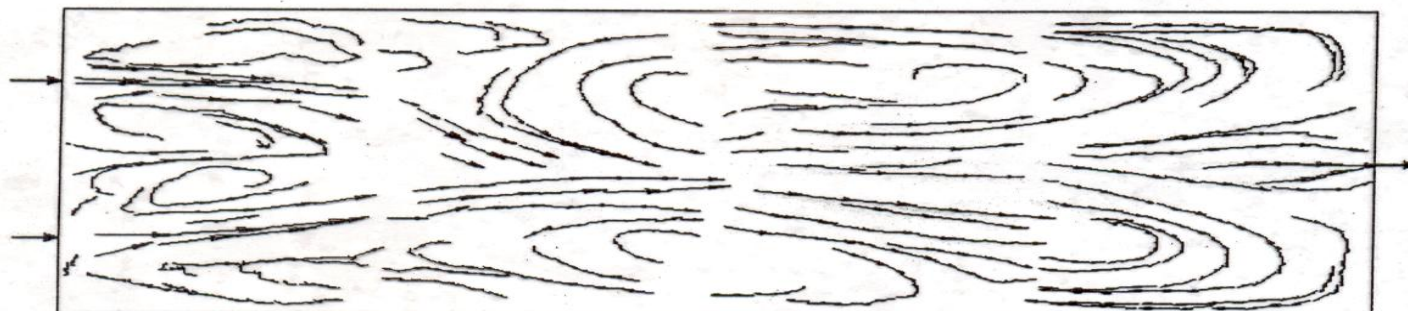


DATOS :

Alimentación canal : 2  
Descarga compuerta : B  
Gasto (l/s) : 5

Tirante (m) : 0.145  
Velocidad máxima (m/s) : 0.145

Lámina 16. Campo de velocidades para la prueba 2



DATOS :

Alimentación canal : 1 y 3

Descarga compuerta : A

Gasto (l/s) : 8

— 3 cm/s — 5 cm/s — 10 cm/s

Tirante (m) : 0.16

Velocidad máxima (m/s) : 0.145

Lámina 18. Campo de velocidades para la prueba 4



DATOS :

Alimentación canal : 1 y 3

Descarga compuerta : C

Gasto (l/s) : 8

— 3 cm/s — 5 cm/s — 10 cm/s

Tirante (m) : 0.16

Lámina 19. Campo de velocidades para la prueba 5

# Aplicación del conocimiento



Evitar experiencias de **subdimensionamiento** permite prevenir pérdidas económicas y daño ambiental.




Planta de Tratamiento de aguas Residuales (anaerobia-humedales)

Inversión total 12,412,000.00

Norma cumplida NOM-001-ECOL-1996

Flujo a tratar 15 lps 1,300 m<sup>3</sup>/d

beneficiarios 4,000 habitantes



Capacidad real de tratamiento 1.0 L/s

## Aplicación del conocimiento



Evitar experiencias de **sobredimensionamiento** permite prevenir pérdidas económicas y daño ambiental.







# Errores del diseño físico

## UBICACIÓN DEL SITIO



- Zonas inundables. Generan molestias y costos de mantenimiento.





Desarenador subdiseñado,  
alta velocidad de flujo



Inexistencia de  
desarenador



Serie de rejillas



- Presencia de basuras por falta de rejillas.
- Cortos circuitos

# ESTRUCTURA DE DESVIACIÓN DE CAUDAL



By - pass

## Deficiencias de estructuras para medición de caudal



Vertedores rectangulares



Vertedor triangular



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

Método volumétrico



## Colocación de tuberías



## Tamaño de registros y estructuras de control de caudal



- Estructuras de derivación soldadas

## Protección de las instalaciones



Mallas ciclónicas



Uso de cercas



Por su amable atención

Mil gracias