

## 1. EVALUACIÓN Y ANÁLISIS TÉCNICO – ECONÓMICO

### 9.1 Remoción de Pesticidas

Se realizó el análisis técnico y el estudio de viabilidad económica a los siete sistemas de adsorción estudiados: pentaclorofenol en carbón activado granular mineral (PCF en MG), carbendazim en carbón activado granular de cáscara de coco (CBD en CC), carbendazim en carbón activado granular de lignito (CBD en CM), carbendazim en carbón activado granular de hullabituinosa (CBD en HB), paraquat en carbón activado granular de cáscara de coco (PQT en CC), paraquat en carbón activado granular de lignito (PQT en CM) y paraquat en carbón activado granular de hullabituinosa (PQT en HB).

El análisis consistió en ver el efecto de las combinaciones de estos siete sistemas operados a siete flujos diferentes con cinco concentraciones diferentes propuestas para el alimentación. Este efecto se midió en términos de tiempo de agotamiento o de regeneración (para el estudio técnico) y en tres parámetros de rentabilidad (para el estudio económico).

Con base a la siguiente fórmula <sup>(10)</sup>, se procedió al cálculo del tiempo de agotamiento. Se tomó como concentración de efluente el límite máximo permisible de 0.00003 ppm (NOM-127- SEMARNAT-1999), como concentración del alimentación se propusieron 0.0001, 0.01, 0.5, 1 y 2 ppm (las dos primeras localizadas en la Unión Europea y el resto en México). Los flujos que se consideraron fueron de 1741.05, 15614.7, 62451.5, 139824.2, 248977.45, 389907.6 y 778851.6 m<sup>3</sup>/año, por ser flujos bien definidos económicamente<sup>(20)</sup> para adsorbedores comerciales que ya están relacionados a un volumen, mismo que se utilizó para calcular la masa de carbón activado granular según la densidad promedio de este material. Los datos de masa adsorbida, corresponden al 25% de la masa adsorbida máxima de los estudios al

equilibrio realizados por lotes y descritos en las secciones 8.1.4, 8.1.6 y 8.1.8. Se consideró un tiempo de contacto de 15 minutos.

$$\left(\frac{x}{m}\right)_b = \frac{x_b}{m_{CAG}} = Q \left( C_o - \frac{C_b}{2} \right) \frac{t_b}{m_{CAG}}$$

$\left(\frac{x}{m}\right)_b$  = masa adsorbida [g/g]

$x_b$  = masa de contaminante adsorbida [g]

$m_{CAG}$  = masa de adsorbente en la columna [g]

$Q$  = flujo volumétrico [m<sup>3</sup>/día]

$C_o$  = concentración del influente [g/m<sup>3</sup>]

$C_b$  = concentración del efluente (rompimiento)  
[g/m<sup>3</sup>]

$t_b$  = tiempo de regeneración (rompimiento) [días]

Proceso	$(x/m)_{\max}$ Gráfico	$(x/m) =$ $0.25(x/m)_{\max}$
PCF en CAG MG	0.230	0.058
CBD en CAG CC	0.100	0.025
CBD en CAG CM	0.180	0.045
CBD en CAG HB	0.250	0.063
PQT en CAG CC	0.094	0.024
PQT en CAG CM	0.013	0.003
PQT en CAG HB	0.035	0.009

Adsorbedores				Flujo m <sup>3</sup> /día (EBCT = 15min)	Flujo m <sup>3</sup> /año (EBCT = 15min)
V (m <sup>3</sup> )	h (m)	D (m)	m <sub>CAG</sub> (g)		
0.05	1.59	0.20	20824.00	4.77	1741.05
0.45	1.52	0.61	185333.60	42.78	15614.7
1.78	1.53	1.22	743000.32	171.10	62451.5
3.99	1.52	1.83	1663004.64	383.08	139824.2
7.11	1.52	2.44	2960339.84	682.13	248977.45
11.13	1.52	3.05	4633756.48	1068.24	389907.6
22.23	3.04	3.05	9257933.92	2133.84	778851.6

Alimentación	0.50000 g/m <sup>3</sup>	
Efluente	0.00003 g/m <sup>3</sup>	NOM-SEMARNAT-127-1999 (Plaguicidas)

Tabla 15. Parámetros de Diseño de los Adsorbedores Estudiados

Se desarrolló una hoja de cálculo que permitió conocer los tiempos de agotamiento de los siete sistemas para las cinco diferentes concentraciones del alimentación. En azul se marca la celda que corresponde a dicha concentración, ésta puede ser modificada accediendo al archivo para calcular los tiempos de agotamiento a cualquier otra concentración de interés para la alimentación. A continuación se presentan los resultados para la concentración intermedia de 0.5 ppm.

Proceso	$(x/m)_{\max}$ Gráfico	(x/m)	$m_{CAG}$ (g)	Q (m <sup>3</sup> /día)	$t_{\text{agotamiento}}$ (días)	$t_{\text{agotamiento}}$ (años)
PCF en CAG MG	0.230	0.058	20824.00	4.77	502.06	1.38
			185333.60	42.78	498.22	1.36
			743000.32	171.10	499.40	1.37
			1663004.64	383.08	499.25	1.37
			2960339.84	682.13	499.10	1.37
			4633756.48	1068.24	498.86	1.37
			9257933.92	2133.84	498.96	1.37
CBD en CAG CC	0.100	0.025	20824.00	4.77	218.29	0.60
			185333.60	42.78	216.62	0.59
			743000.32	171.10	217.13	0.59
			1663004.64	383.08	217.06	0.59
			2960339.84	682.13	217.00	0.59
			4633756.48	1068.24	216.89	0.59
			9257933.92	2133.84	216.94	0.59
CBD en CAG CM	0.180	0.045	20824.00	4.77	392.92	1.08
			185333.60	42.78	389.91	1.07
			743000.32	171.10	390.84	1.07
			1663004.64	383.08	390.71	1.07
			2960339.84	682.13	390.60	1.07
			4633756.48	1068.24	390.41	1.07
			9257933.92	2133.84	390.49	1.07
CBD en CAG HB	0.250	0.063	20824.00	4.77	545.72	1.50
			185333.60	42.78	541.55	1.48
			743000.32	171.10	542.83	1.49
			1663004.64	383.08	542.66	1.49
			2960339.84	682.13	542.50	1.49
			4633756.48	1068.24	542.23	1.49
			9257933.92	2133.84	542.34	1.49
PQT en CAG CC	0.094	0.024	20824.00	4.77	205.19	0.56
			185333.60	42.78	203.62	0.56
			743000.32	171.10	204.10	0.56
			1663004.64	383.08	204.04	0.56
			2960339.84	682.13	203.98	0.56
			4633756.48	1068.24	203.88	0.56
			9257933.92	2133.84	203.92	0.56
PQT en CAG CM	0.013	0.003	20824.00	4.77	28.38	0.08
			185333.60	42.78	28.16	0.08
			743000.32	171.10	28.23	0.08
			1663004.64	383.08	28.22	0.08
			2960339.84	682.13	28.21	0.08
			4633756.48	1068.24	28.20	0.08
			9257933.92	2133.84	28.20	0.08
PQT en CAG HB	0.035	0.009	20824.00	4.77	76.40	0.21
			185333.60	42.78	75.82	0.21
			743000.32	171.10	76.00	0.21
			1663004.64	383.08	75.97	0.21
			2960339.84	682.13	75.95	0.21
			4633756.48	1068.24	75.91	0.21
			9257933.92	2133.84	75.93	0.21

Tabla 16. Cálculo del tiempo de agotamiento para  $C_0 = 0.5$  ppm

Conocidos los tiempos de regeneración de las 245 combinaciones (7\*7\*5) y los estimados económicos de un estudio realizado en 1986 para adsorbedores comerciales de las características ya descritas<sup>(20)</sup>, se procedió a llenar las bases de datos que alimentan un programa que permite calcular tres parámetros de rentabilidad: Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Rendimiento (TIR) y Período de Recuperación de la Inversión (PRI), los cuales indican la viabilidad económica de un proyecto al ser mayor que cero, mayor que el costo de capital y menor a la mitad del tiempo de vida económica del proyecto, respectivamente. Todos los cálculos económicos se realizaron en dólares americanos.

<b>Concepto:</b>	<b>Clave y unidad:</b>	<b>Fuente:</b>
Costo de equipo nuevo	CEN (\$USD)	Referencia (20)
Cantidad de empaque	CE (kg)	Análisis Técnico
Precio del empaque	E (\$USD/kg)	Proveedores
Ganancia por reuso de residuos	GRR (\$USD)	<sup>a)</sup>
Costos por energía eléctrica	Electricidad (\$USD)	Referencia (20)
Costos de regeneración	Regeneración (\$USD)	<sup>a)</sup>
Reactivos Utilizados	Reactivos	Análisis Técnico
Cantidad de reactivos	CR (kg/m <sup>3</sup> )	Análisis Técnico
Precio del reactivo	R (\$USD/kg)	Proveedores
Costos de disposición de residuos	Disposición (\$USD)	<sup>a)</sup>
Gastos Administrativos	GA (\$USD)	Referencia (20)
Inverso del tiempo de agotamiento	Regeneraciones/año	Análisis Técnico

Tabla 17. Datos que deben proporcionarse al programa para el cálculo de los parámetros de rentabilidad

Con respecto a estos conceptos se deben hacer algunos comentarios:

<sup>a)</sup> En el caso de adsorción, no se generarán residuos que puedan ser comercializados, pero tampoco se tendrá que incurrir en el gasto de disposición del adsorbente agotado por completo en forma anual o bianual, como comúnmente se hace. Se planeó el proyecto considerando que la regeneración quedará a cargo del proveedor de CAG, quien se compromete a dejar el material con las propiedades de uno nuevo por un costo del 60% de su precio y considerando pérdidas del 5% en cada regeneración por

conversión a polvo fino que debe sustituirse. De tal forma, que en la inversión inicial se consideró un equipo y doble cantidad de material adsorbente, para vaciar el adsorbedor, dar mantenimiento y llenar con el material que se guarda en almacén, mientras se regenera la primera carga.

Con ayuda de este programa se hizo un análisis de sensibilidad para todas las combinaciones en el punto de equilibrio económico (no existen ganancias ni pérdidas), así se determinó que el precio de venta por m<sup>3</sup> tratado fuera el mínimo para que el VPN fuera positivo, resultando lo siguiente para los años 1986 y 2005:

PCF en CAG MG						
Flujo (m <sup>3</sup> /año)	Co (g/m <sup>3</sup> )	VPN (\$USD)	TIR (%)	PRI (años)	\$VtaEquilibrio	\$VtaEquilibrio
		1986	1986	1986	(\$USD) 1986	(\$USD) 2005
1741.05	0.0001	38.27	10	6.32	5.33	9.35
1741.05	0.0100	36.69	10	6.32	5.33	9.35
1741.05	0.5000	16.99	10	6.33	5.34	9.36
1741.05	1.0000	54.58	10	6.32	5.36	9.40
1741.05	2.0000	12.43	10	6.33	5.38	9.43
15614.70	0.0001	2.36	10	6.32	1.23	2.16
15614.70	0.0100	515.74	10	6.26	1.24	2.17
15614.70	0.5000	339.25	10	6.28	1.25	2.19
15614.70	1.0000	148.39	10	6.30	1.26	2.21
15614.70	2.0000	249.23	10	6.29	1.29	2.26
139824.20	0.0001	2394.71	10	6.21	0.34	0.60
139824.20	0.0100	2267.34	10	6.22	0.34	0.60
139824.20	0.5000	670.62	10	6.28	0.35	0.61
139824.20	1.0000	3695.91	11	6.16	0.37	0.65
139824.20	2.0000	291.45	10	6.30	0.39	0.68
248977.45	0.0001	5903.40	11	6.12	0.26	0.46
248977.45	0.0100	5676.58	11	6.13	0.26	0.46
248977.45	0.5000	2862.48	10	6.22	0.27	0.47
248977.45	1.0000	8232.00	11	6.05	0.29	0.51
248977.45	2.0000	2145.57	10	6.24	0.31	0.54
778851.60	0.0001	25137.46	12	5.92	0.17	0.30
778851.60	0.0100	24427.91	12	5.93	0.17	0.30
778851.60	0.5000	15584.53	11	6.07	0.18	0.32
778851.60	1.0000	6166.48	10	6.21	0.19	0.33
778851.60	2.0000	13551.43	11	6.10	0.22	0.39

Tabla 18. Costo de venta / m<sup>3</sup> tratado. PCF en MG

CBD en CAG CC						
Flujo (m <sup>3</sup> /año)	Co (g/m <sup>3</sup> )	VPN (\$USD)	TIR (%)	PRI (años)	\$VtaEquilibrio	\$VtaEquilibrio
		1986	1986	1986	(\$USD) 1986	(\$USD) 2005
1741.05	0.0001	4.93	10	6.33	5.32	9.33
1741.05	0.0100	2.06	10	6.33	5.32	9.33
1741.05	0.5000	36.33	10	6.32	5.35	9.38
1741.05	1.0000	9.56	10	6.33	5.37	9.42
1741.05	2.0000	14.49	10	6.33	5.42	9.50
15614.70	0.0001	227.36	10	6.29	1.23	2.16
15614.70	0.0100	201.67	10	6.30	1.23	2.16
15614.70	0.5000	512.53	10	6.26	1.26	2.21
15614.70	1.0000	269.83	10	6.29	1.28	2.24
15614.70	2.0000	312.04	10	6.29	1.33	2.33
139824.20	0.0001	4413.74	11	6.12	0.34	0.60
139824.20	0.0100	4183.61	11	6.13	0.34	0.60
139824.20	0.5000	2215.87	10	6.22	0.36	0.63
139824.20	1.0000	87.16	10	6.31	0.38	0.67
139824.20	2.0000	439.10	10	6.29	0.43	0.75
248977.45	0.0001	1084.77	10	6.28	0.25	0.44
248977.45	0.0100	675.00	10	6.29	0.25	0.44
248977.45	0.5000	5631.78	10	6.13	0.28	0.49
248977.45	1.0000	1761.93	10	6.25	0.30	0.53
248977.45	2.0000	2434.94	10	6.23	0.35	0.61
778851.60	0.0001	10080.60	11	6.14	0.16	0.28
778851.60	0.0100	8798.78	11	6.17	0.16	0.28
778851.60	0.5000	24345.99	12	5.93	0.19	0.33
778851.60	1.0000	12176.42	11	6.11	0.21	0.37
778851.60	2.0000	14187.51	11	6.08	0.26	0.46

Tabla 19. Costo de venta / m<sup>3</sup> tratado. CBD en CC

CBD en CAG CM						
Flujo (m <sup>3</sup> /año)	Co (g/m <sup>3</sup> )	VPN (\$USD)	TIR (%)	PRI (años)	\$VtaEquilibrio	\$VtaEquilibrio
		1986	1986	1986	(\$USD) 1986	(\$USD) 2005
1741.05	0.0001	52.27	10	6.32	5.33	9.35
1741.05	0.0100	50.48	10	6.32	5.33	9.35
1741.05	0.5000	20.88	10	6.32	5.34	9.36
1741.05	1.0000	48.40	10	6.32	5.36	9.40
1741.05	2.0000	45.00	10	6.32	5.39	9.45
15614.70	0.0001	126.95	10	6.31	1.23	2.16
15614.70	0.0100	110.94	10	6.31	1.23	2.16
15614.70	0.5000	373.33	10	6.28	1.25	2.19
15614.70	1.0000	91.94	10	6.31	1.26	2.21
15614.70	2.0000	56.77	10	6.31	1.29	2.26
139824.20	0.0001	3512.74	11	6.16	0.34	0.60
139824.20	0.0100	3369.31	11	6.17	0.34	0.60
139824.20	0.5000	978.10	10	6.27	0.35	0.61
139824.20	1.0000	3192.70	11	6.18	0.37	0.65
139824.20	2.0000	2894.55	10	6.19	0.40	0.70
248977.45	0.0001	7893.61	11	6.06	0.26	0.46
248977.45	0.0100	7638.20	11	6.07	0.26	0.46
248977.45	0.5000	3409.41	10	6.20	0.27	0.47
248977.45	1.0000	7335.34	11	6.08	0.29	0.51
248977.45	2.0000	6774.50	11	6.09	0.32	0.56
778851.60	0.0001	5064.76	10	6.23	0.16	0.28
778851.60	0.0100	4265.78	10	6.24	0.16	0.28
778851.60	0.5000	17293.65	11	6.04	0.18	0.32
778851.60	1.0000	3359.82	10	6.25	0.19	0.33
778851.60	2.0000	1713.17	10	6.28	0.22	0.39

Tabla 20. Costo de venta / m<sup>3</sup> tratado. CBD en CM



CBD en CAG HB						
Flujo (m <sup>3</sup> /año)	Co (g/m <sup>3</sup> )	VPN (\$USD)	TIR (%)	PRI (años)	\$VtaEquilibrio	\$VtaEquilibrio
		1986	1986	1986	(\$USD) 1986	(\$USD) 2005
1741.05	0.0001	45.50	10	6.32	5.33	9.35
1741.05	0.0100	44.13	10	6.32	5.33	9.35
1741.05	0.5000	35.13	10	6.32	5.34	9.36
1741.05	1.0000	24.61	10	6.32	5.35	9.38
1741.05	2.0000	4.20	10	6.33	5.37	9.42
15614.70	0.0001	66.69	10	6.31	1.23	2.16
15614.70	0.0100	54.40	10	6.31	1.23	2.16
15614.70	0.5000	501.56	10	6.26	1.25	2.19
15614.70	1.0000	408.70	10	6.27	1.26	2.21
15614.70	2.0000	222.98	10	6.29	1.28	2.24
139824.20	0.0001	2971.98	11	6.19	0.34	0.60
139824.20	0.0100	2861.98	10	6.19	0.34	0.60
139824.20	0.5000	2125.24	10	6.22	0.35	0.61
139824.20	1.0000	1283.14	10	6.26	0.36	0.63
139824.20	2.0000	4378.65	11	6.13	0.39	0.68
248977.45	0.0001	6931.00	11	6.09	0.26	0.46
248977.45	0.0100	6735.11	11	6.09	0.26	0.46
248977.45	0.5000	5452.34	11	6.13	0.27	0.47
248977.45	1.0000	3971.70	11	6.18	0.28	0.49
248977.45	2.0000	1010.42	10	6.28	0.30	0.53
778851.60	0.0001	2054.37	10	6.28	0.16	0.28
778851.60	0.0100	1441.58	10	6.29	0.16	0.28
778851.60	0.5000	23685.20	11	5.94	0.18	0.32
778851.60	1.0000	19155.21	11	6.01	0.19	0.33
778851.60	2.0000	9827.84	11	6.15	0.21	0.37

Tabla 21. Costo de venta / m<sup>3</sup> tratado. CBD en HB

PQT en CAG CC						
Flujo (m <sup>3</sup> /año)	Co (g/m <sup>3</sup> )	VPN (\$USD)	TIR (%)	PRI (años)	\$VtaEquilibrio	\$VtaEquilibrio
		1986	1986	1986	(\$USD) 1986	(\$USD) 2005
1741.05	0.0001	4.92	10	6.33	5.32	9.33
1741.05	0.0100	1.87	10	6.33	5.32	9.33
1741.05	0.5000	27.10	10	6.32	5.35	9.38
1741.05	1.0000	50.27	10	6.32	5.38	9.43
1741.05	2.0000	36.37	10	6.32	5.43	9.52
15614.70	0.0001	227.35	10	6.29	1.23	2.16
15614.70	0.0100	200.01	10	6.30	1.23	2.16
15614.70	0.5000	429.69	10	6.27	1.26	2.21
15614.70	1.0000	104.14	10	6.31	1.28	2.24
15614.70	2.0000	508.27	10	6.26	1.34	2.35
139824.20	0.0001	4413.62	11	6.12	0.34	0.60
139824.20	0.0100	4168.80	11	6.13	0.34	0.60
139824.20	0.5000	1474.04	10	6.25	0.36	0.63
139824.20	1.0000	3317.45	11	6.17	0.39	0.68
139824.20	2.0000	2205.99	10	6.22	0.44	0.77
248977.45	0.0001	1084.54	10	6.28	0.25	0.44
248977.45	0.0100	648.62	10	6.29	0.25	0.44
248977.45	0.5000	4310.84	11	6.17	0.28	0.49
248977.45	1.0000	7532.73	11	6.07	0.31	0.54
248977.45	2.0000	5563.80	11	6.13	0.36	0.63
778851.60	0.0001	10079.91	11	6.14	0.16	0.28
778851.60	0.0100	8716.25	11	6.17	0.16	0.28
778851.60	0.5000	20213.84	11	5.99	0.19	0.33
778851.60	1.0000	3911.98	10	6.24	0.21	0.37
778851.60	2.0000	23955.24	12	5.93	0.27	0.47

Tabla 22. Costo de venta / m<sup>3</sup> tratado. PQT en CC

PQT en CAG CM						
Flujo (m <sup>3</sup> /año)	Co (g/m <sup>3</sup> )	VPN (\$USD)	TIR (%)	PRI (años)	\$VtaEquilibrio	\$VtaEquilibrio
		1986	1986	1986	(\$USD) 1986	(\$USD) 2005
1741.05	0.0001	52.08	10	6.32	5.33	9.35
1741.05	0.0100	27.00	10	6.32	5.33	9.35
1741.05	0.5000	34.00	10	6.32	5.54	9.71
1741.05	1.0000	38.99	10	6.32	5.75	10.08
1741.05	2.0000	25.24	10	6.32	6.18	10.84
15614.70	0.0001	125.19	10	6.31	1.23	2.16
15614.70	0.0100	431.00	10	6.27	1.24	2.17
15614.70	0.5000	5.67	10	6.32	1.44	2.53
15614.70	1.0000	411.52	10	6.27	1.66	2.91
15614.70	2.0000	168.01	10	6.30	2.08	3.65
139824.20	0.0001	3496.92	11	6.16	0.34	0.60
139824.20	0.0100	1510.87	10	6.25	0.34	0.60
139824.20	0.5000	2405.46	10	6.21	0.55	0.96
139824.20	1.0000	1334.14	10	6.26	0.76	1.33
139824.20	2.0000	3912.83	11	6.15	1.19	2.09
248977.45	0.0001	7865.44	11	6.06	0.26	0.46
248977.45	0.0100	4328.99	11	6.17	0.26	0.46
248977.45	0.5000	5959.77	11	6.12	0.47	0.82
248977.45	1.0000	4018.37	11	6.18	0.68	1.19
248977.45	2.0000	135.57	10	6.31	1.10	1.93
778851.60	0.0001	4976.64	10	6.23	0.16	0.28
778851.60	0.0100	20210.64	11	5.99	0.17	0.30
778851.60	0.5000	25389.68	12	5.91	0.38	0.67
778851.60	1.0000	19175.92	11	6.01	0.59	1.03
778851.60	2.0000	7000.11	10	6.19	1.01	1.77

Tabla 23. Costo de venta / m<sup>3</sup> tratado. PQT en CM

PQT en CAG HB						
Flujo (m <sup>3</sup> /año)	Co (g/m <sup>3</sup> )	VPN (\$USD)	TIR (%)	PRI (años)	\$VtaEquilibrio	\$VtaEquilibrio
		1986	1986	1986	(\$USD) 1986	(\$USD) 2005
1741.05	0.0001	45.42	10	6.32	5.33	9.35
1741.05	0.0100	35.64	10	6.32	5.33	9.35
1741.05	0.5000	22.53	10	6.32	5.41	9.49
1741.05	1.0000	57.38	10	6.32	5.50	9.64
1741.05	2.0000	10.60	10	6.33	5.66	9.92
15614.70	0.0001	66.04	10	6.31	1.23	2.16
15614.70	0.0100	505.90	10	6.26	1.24	2.17
15614.70	0.5000	383.49	10	6.28	1.32	2.31
15614.70	1.0000	172.45	10	6.30	1.40	2.45
15614.70	2.0000	277.97	10	6.29	1.57	2.75
139824.20	0.0001	2966.18	10	6.19	0.34	0.60
139824.20	0.0100	2180.39	10	6.22	0.34	0.60
139824.20	0.5000	1089.55	10	6.27	0.42	0.74
139824.20	1.0000	3907.54	11	6.15	0.51	0.89
139824.20	2.0000	134.04	10	6.31	0.67	1.17
248977.45	0.0001	6920.67	11	6.09	0.26	0.46
248977.45	0.0100	5521.46	11	6.13	0.26	0.46
248977.45	0.5000	3569.71	10	6.19	0.34	0.60
248977.45	1.0000	204.63	10	6.30	0.42	0.74
248977.45	2.0000	1887.17	10	6.25	0.59	1.03
778851.60	0.0001	2022.05	10	6.28	0.16	0.28
778851.60	0.0100	23941.78	11	5.94	0.17	0.30
778851.60	0.5000	17747.73	11	6.03	0.25	0.44
778851.60	1.0000	7220.40	10	6.19	0.33	0.58
778851.60	2.0000	12492.82	11	6.11	0.50	0.88

Tabla 24. Costo de venta / m<sup>3</sup> tratado. PQT en HB

Al comparar estas tablas de la 18 a la 24 con la tabla 15 de parámetros de diseño, resulta evidente el hecho de que mientras menor sea el valor de masa adsorbida, es decir, la adsorción sea menos eficiente, el costo de venta por m<sup>3</sup> tratado es mucho mayor. Sin embargo, el flujo tiene un impacto económico global de mayor importancia, en cada caso resultan gráficas de este tipo:

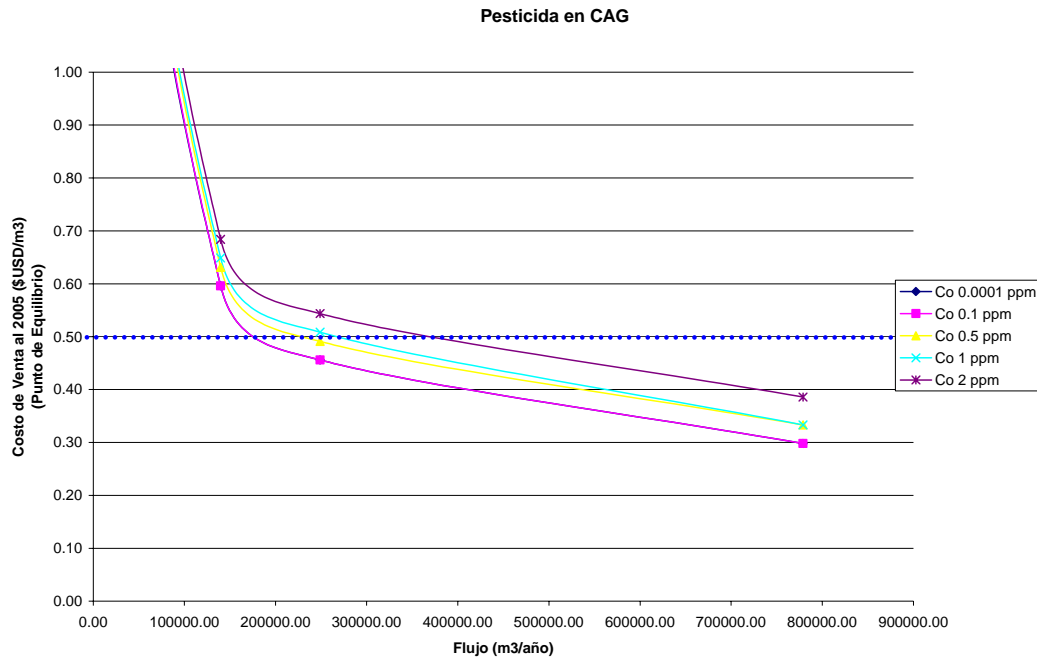


Figura 7. Comparación de costos de venta/m<sup>3</sup> tratado a diferentes flujos y concentraciones de alimentación. Pesticidas.

donde se puede observar que las combinaciones que quedan por debajo de la línea azul de \$0.50 USD - que corresponde a la cuota de saneamiento cobrada por SOAPAP - son rentables y las que quedan por arriba no. De tal forma que es el flujo el que determina la rentabilidad del proyecto.

Cuando la capacidad de adsorción es demasiado baja (del orden de 0.003 g soluto/g adsorbente) se tiene un gráfico de este tipo:

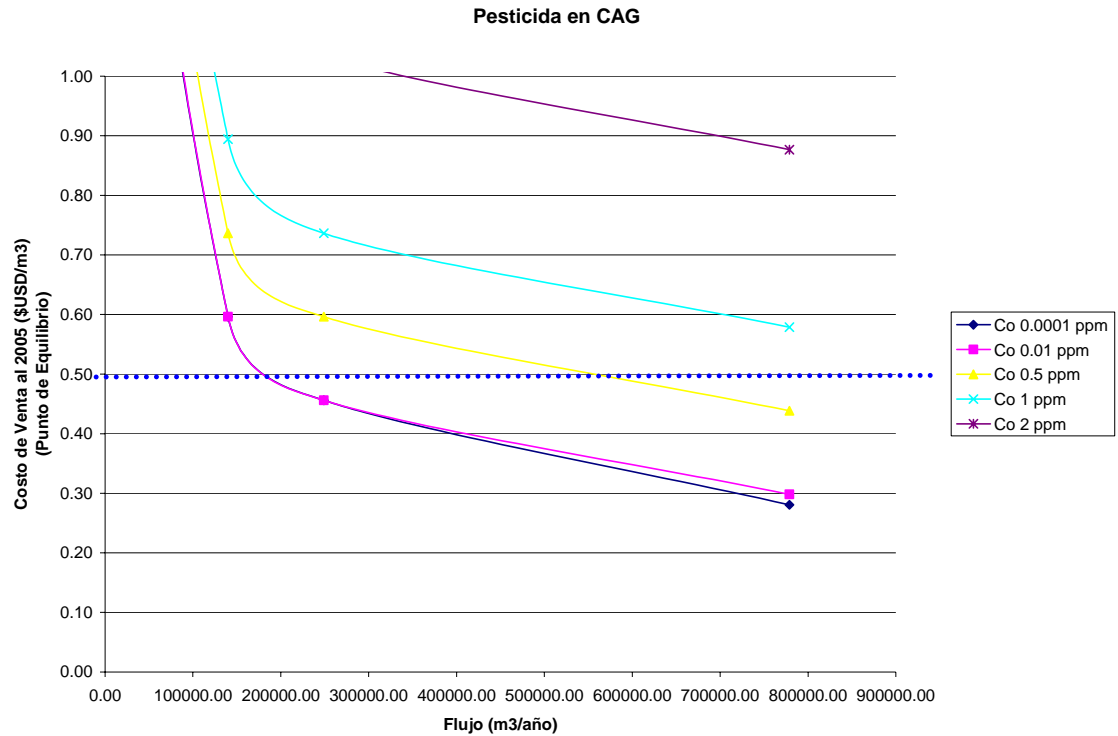


Figura 8. Comparación de costos de venta/m3 tratado a diferentes flujos y concentraciones del alimentación. Pesticidas.

situación que puede solucionarse con un cambio de adsorbente.

Al observar que la rentabilidad presenta una fuerte dependencia del flujo, se procedió entonces a encontrar los flujos óptimos. Para manejar flujos grandes se necesitan un mayor consumo de energía eléctrica y más personal; en contraparte, al manejar concentraciones iniciales mayores (y en consecuencia flujos menores), el tiempo de regeneración es más corto y por lo tanto los gastos por concepto de regeneración son mayores. Los flujos óptimos se determinaron al graficar la intersección de los costos marginales de la suma de los gastos por concepto de energía eléctrica y gastos administrativos con los gastos por regeneración. Resultando para todos los sistemas, gráficos como los siguientes:

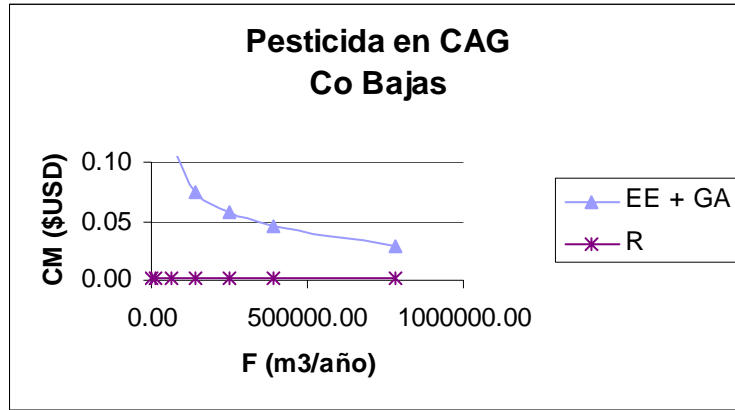


Figura 9. Costos marginales a concentraciones iniciales bajas. Pesticidas.

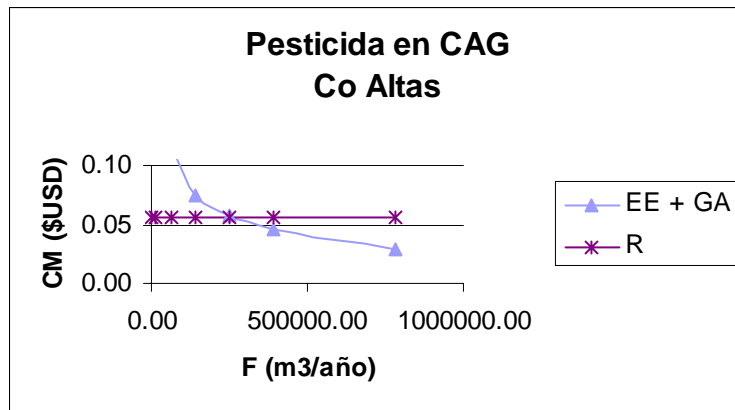


Figura 10. Costos marginales a concentraciones iniciales altas. Pesticidas.

concluyéndose que la concentración del alimentación y el flujo guardan una relación inversa.

En resumen, el flujo óptimo para cada caso es:

Determinación de Flujo Óptimo			
Sistema	x/m (g/g)	Co (ppm)	Flujo Óptimo (m <sup>3</sup> /año)
PFC en MG	0.058	0.0001	> 1000000
PFC en MG	0.058	0.0100	> 1000000
PFC en MG	0.058	0.5000	> 1000000
PFC en MG	0.058	1.0000	773810
PFC en MG	0.058	2.0000	245238
CBD en CC	0.025	0.0001	> 1000000
CBD en CC	0.025	0.0100	> 1000000
CBD en CC	0.025	0.5000	809524
CBD en CC	0.025	1.0000	304348
CBD en CC	0.025	2.0000	88889
CBD en CM	0.045	0.0001	> 1000000
CBD en CM	0.045	0.0100	> 1000000
CBD en CM	0.045	0.5000	782609
CBD en CM	0.045	1.0000	782609
CBD en CM	0.045	2.0000	182222
CBD en HB	0.063	0.0001	> 1000000
CBD en HB	0.063	0.0100	> 1000000
CBD en HB	0.063	0.5000	> 1000000
CBD en HB	0.063	1.0000	782609
CBD en HB	0.063	2.0000	319820
PQT en CC	0.024	0.0001	> 1000000
PQT en CC	0.024	0.0100	> 1000000
PQT en CC	0.024	0.5000	780172
PQT en CC	0.024	1.0000	239130
PQT en CC	0.024	2.0000	86957
PQT en CM	0.003	0.0001	> 1000000
PQT en CM	0.003	0.0100	> 1000000
PQT en CM	0.003	0.5000	44444
PQT en CM	0.003	1.0000	22727
PQT en CM	0.003	2.0000	19650
PQT en HB	0.009	0.0001	> 1000000
PQT en HB	0.009	0.0100	> 1000000
PQT en HB	0.009	0.5000	112069
PQT en HB	0.009	1.0000	43478
PQT en HB	0.009	2.0000	21740

Tabla 25. Flujo óptimo para remoción de pesticidas



Así pues, conocido el contaminante que quiere removerse y la concentración a la que se encuentra, se puede determinar el flujo óptimo y a partir de este recalculan los parámetros de rentabilidad y el costo de venta por m<sup>3</sup> tratado en el punto de equilibrio.

## **9.2 Remoción de Arsénico**

Se debe considerar que a pesar de que el hierro metálico demostró la mayor efectividad para remover arsénico del agua, este comportamiento no podría mantenerse durante la operación de un adsorbedor continuo, ya que el fluido de trabajo es agua que finalmente causara oxidación en el material adsorbente. Por este motivo, en la evaluación económica del sistema de hierro metálico debe considerarse que la eficiencia podría variar.

Las torres empacadas con adsorbentes de hierro, lixivian grandes cantidades de este elemento, por lo cual, si el agua tratada se destinará al consumo humano, debe realizarse un monitoreo de Fe en el efluente. Cuando el medio adsorbente se agota, puede llevarse directamente a relleno, ya que no alcanza la categoría de residuo peligroso<sup>(32)</sup>.

La siguiente tabla muestra el cálculo de los tiempos de agotamiento si se utiliza hierro metálico y óxido de hierro como adsorbente, las cantidades necesarias, así como los volúmenes que podrían tratarse para reducir la concentración original de 1.28 ppm a 0.01 ppm As para cumplir con la norma de mayor exigencia.

Alimentación	1.28000	g/m <sup>3</sup>	
Efluente	0.01000	g/m <sup>3</sup>	EPA 2004 (As)

Proceso	$\rho$ (g/m <sup>3</sup> )	(x/m)	$m_{Fe}$ (g)	Q (m <sup>3</sup> /día)	$t_{agotamiento}$ (días)	$t_{agotamiento}$ (años)
As en Fe <sup>o</sup>	7860000	0.00110	393000.00	4.77	71.08	0.19
			3497700.00	42.78	70.54	0.19
			14022240.00	171.10	70.70	0.19
			31384980.00	383.08	70.68	0.19
			55868880.00	682.13	70.66	0.19
			87450360.00	1068.24	70.63	0.19
			174719940.00	2133.84	70.64	0.19
Proceso	$\rho$ (g/m <sup>3</sup> )	(x/m)	$m_{Fe_2O_3}$ (g)	Q (m <sup>3</sup> /día)	$t_{agotamiento}$ (días)	$t_{agotamiento}$ (años)
As en Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5240000	0.00037	262000.00	4.77	15.80	0.04
			2331800.00	42.78	15.68	0.04
			9348160.00	171.10	15.71	0.04
			20923320.00	383.08	15.71	0.04
			37245920.00	682.13	15.70	0.04
			58300240.00	1068.24	15.70	0.04
			116479960.00	2133.84	15.70	0.04

Tabla 26. Cálculo del tiempo de agotamiento para Co = 1.28 ppm

Conociendo los parámetros técnicos se realizó la evaluación económica mediante un programa alimentado con los resultados de la evaluación técnica y con los costos reportados por Gumerman<sup>(20)</sup> para 1986.

Posteriormente, se realizó un análisis de sensibilidad para conocer los costos de venta resultantes por m<sup>3</sup> tratado utilizando diferentes flujos:

Flujo (m <sup>3</sup> /año)	Co (g/m <sup>3</sup> )	As en Fe <sup>o</sup>				
		VPN (\$USD) 1986	TIR (%) 1986	PRI (años) 1986	\$VtaEquilibrio (\$USD) 1986	\$VtaEquilibrio (\$USD) 2005
1741.05	1.2800	48.63	10	6.31	8.59	15.06
15614.70	1.2800	384.44	10	6.28	4.74	8.31
62451.50	1.2800	11.84	10	6.32	1.93	3.38
139824.20	1.2800	3174.00	10	6.19	1.63	2.86
248977.45	1.2800	5254.14	11	6.17	1.52	2.67
389907.60	1.2800	4637.10	10	6.21	1.45	2.54
778851.60	1.2800	13839.32	11	6.14	1.40	2.45

Tabla 27. Costo de venta por m<sup>3</sup> tratado. As en Fe<sup>o</sup>.

As en Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>						
Flujo (m <sup>3</sup> /año)	Co (g/m <sup>3</sup> )	VPN (\$USD) 1986	TIR (%) 1986	PRI (años) 1986	\$VtaEquilibrio (\$USD) 1986	\$VtaEquilibrio (\$USD) 2005
1741.05	1.2800	1416.00	10	6.32	10.88	19.08
15614.70	1.2800	495.38	10	6.27	4.72	8.28
62451.50	1.2800	1324.67	10	6.24	4.22	7.40
139824.20	1.2800	1728.55	10	6.24	3.91	6.86
248977.45	1.2800	3283.11	10	6.22	3.80	6.66
389907.60	1.2800	2895.03	10	6.24	3.73	6.54
778851.60	1.2800	9402.20	11	6.18	3.68	6.45

Tabla 28. Costo de venta por m3 tratado. As en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Como puede observarse, los costos para remoción de arsénico son muy elevados y ningún caso resulta competitivo contra las actuales cuotas de saneamiento de aproximadamente \$0.50 USD/m<sup>3</sup>. Se logra una reducción de costos al aumentar el flujo, pero aún los flujos más altos no alcanzan una disminución de costos significativa.

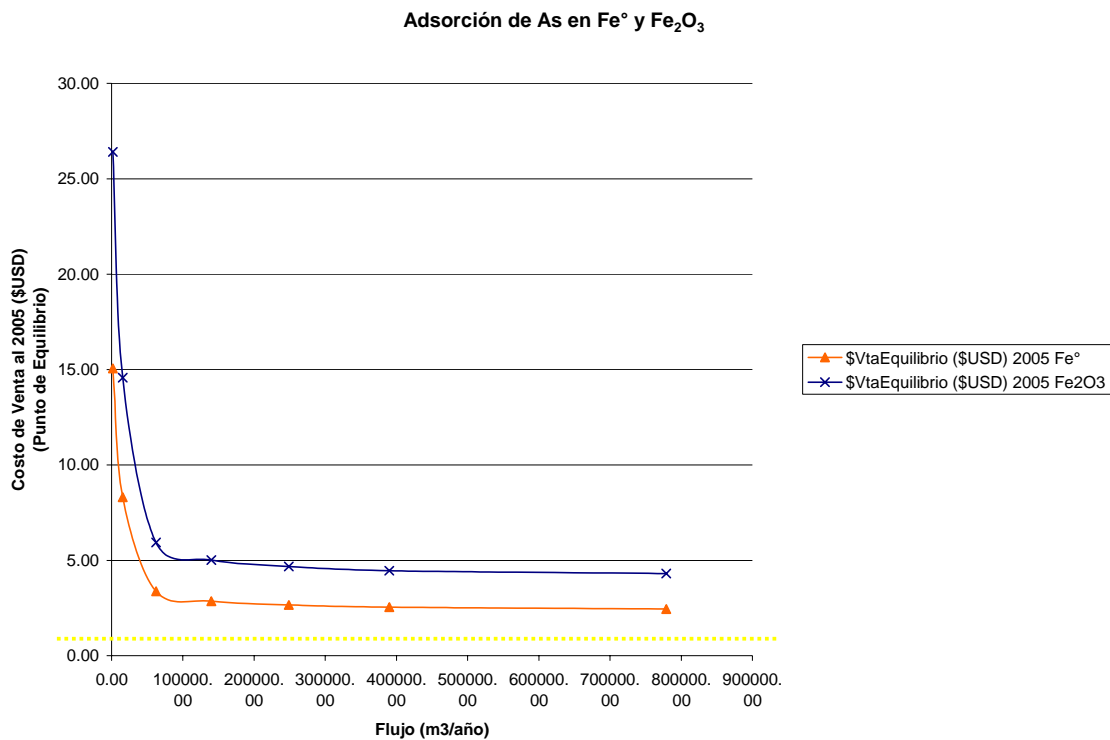


Figura 11. Comparación de costos de venta/m3 tratado a diferentes flujos. Arsénico.

Los costos marginales cambian muy poco con respecto al flujo, de tal forma, que la rentabilidad no depende de éste, sino de las características del sistema en si. Uno de los factores más importantes es la necesidad de material nuevo para empacar la torre cada vez que se agota, dado que el material agotado no se clasifica como residuo peligroso puede llevarse a relleno regular y se evita la regeneración térmica que podría llegar a desprender vapores de arsénico sumamente tóxicos y que deberían ser tratados.

Para el caso específico de remoción de arsénico, los costos adicionales tendrían que absorberse directamente por el usuario o incluir parte del presupuesto asignado a salud pública. Si tomamos como ejemplo la situación de Zimapán, Hidalgo encontramos que: el costo de venta por m<sup>3</sup> tratado es de \$2.45 USD, es decir, \$28.18 pesos, si consideramos que el consumo promedio de agua por habitante es de 78.48 m<sup>3</sup>/año, el usuario estaría pagando un costo adicional de 2211.18 pesos al año. Este costo adicional podría repartirse entre el usuario y el presupuesto de salud pública que pudiera canalizarse a depuración de agua, según el estudio de casos atendidos relacionados con el uso y consumo de agua contaminada con arsénico. Finalmente, se debería valorar el hecho de que actualmente algunos pozos de esta zona, afectada por las sequías, se encuentran cerrados por la presencia de este contaminante y en caso de ser tratados podrían combatir en parte, el problema de escasez de agua que presenta el estado de Hidalgo.

### **9.3 Ablandamiento de agua**

Con los resultados arrojados por el programa desarrollado por Valenzuela <sup>(30)</sup> se alimentó la base de datos de otro programa que permite el cálculo de tres parámetros económicos de rentabilidad, obteniéndose lo siguiente para el punto de equilibrio y con valores calculados para el año 2005:

<b>Adición de Cal</b>				
Flujo (m <sup>3</sup> /año)	VPN (\$USD) 2005	TIR (%) 2005	PRI (años) 2005	\$Vta <sub>Equilibrio</sub> (\$USD) 2005
1741.05	17.54	10	6.32	42.31
15614.70	379.28	10	6.31	4.88
62451.50	2073.63	10	6.24	1.36
139824.20	4290.33	11	6.17	0.71
248977.45	6643.62	11	6.12	0.48
389907.60	3812.85	10	6.22	0.37
778851.60	7295.99	11	6.18	0.28

Tabla 29. Costo de venta / m<sup>3</sup> tratado. Adición de cal.

<b>Adición de Cal + Filtración</b>				
Flujo (m <sup>3</sup> /año)	VPN (\$USD) 2005	TIR (%) 2005	PRI (años) 2005	\$Vta <sub>Equilibrio</sub> (\$USD) 2005
1741.05	42.66	10	6.32	56.35
15614.70	60.05	10	6.32	6.83
62451.50	192.96	10	6.32	2.01
139824.20	4461.15	10	6.23	1.11
248977.45	5893.81	10	6.23	0.78
389907.60	3264.04	10	6.28	0.62
778851.60	22150.31	11	6.13	0.48

Tabla 30. Costo de venta / m<sup>3</sup> tratado. Adición de cal + filtración.

<b>Ósmosis Inversa</b>				
Flujo (m <sup>3</sup> /año)	VPN (\$USD) 2005	TIR (%) 2005	PRI (años) 2005	\$Vta <sub>Equilibrio</sub> (\$USD) 2005
1741.05	30.17	10	6.32	21.43
15614.70	326.28	10	6.30	3.16
62451.50	1270.08	10	6.27	1.44
139824.20	2977.00	10	6.25	1.12
248977.45	1962.00	10	6.29	1.00
389907.60	11090.00	10	6.20	0.95
778851.60	13138.37	10	6.24	0.89

Tabla 31. Costo de venta / m<sup>3</sup> tratado. Ósmosis Inversa.

<b>Resinas de Intercambio Iónico</b>				
Flujo (m <sup>3</sup> /año)	VPN (\$USD)	TIR (%)	PRI (años)	\$Vta <sub>Equilibrio</sub>
	2005	2005	2005	(\$USD) 2005
1741.05	21.13	10	6.32	9.46
15614.70	149.69	10	6.30	1.22
62451.50	2049.26	11	6.03	0.43
139824.20	980.10	10	6.20	0.28
248977.45	6691.57	12	5.72	0.22
389907.60	1833.91	11	6.18	0.19
778851.60	5423.23	11	6.06	0.17

Tabla 32. Costo de venta / m<sup>3</sup> tratado. Intercambio Iónico.

De estos resultados, se puede observar que al igual que en el análisis para pesticidas, la rentabilidad es función del flujo. Se tienen costos de venta para el flujo más bajo de hasta \$56.35 USD, sin embargo, con el incremento de flujo se llega a costos de venta de hasta \$0.17 USD, los cuales ya son competitivos si se compara con la cuota de saneamiento cobrada por SOAPAP de aproximadamente \$0.50 USD. El análisis de sensibilidad arrojó los siguientes resultados: el mejor tratamiento para remoción de dureza es el de intercambio iónico que empieza a ser rentable desde un flujo de 62451.50 m<sup>3</sup>/año. La ósmosis inversa no resulta rentable en el intervalo de flujos analizado. Los tratamiento de adición de cal con y sin filtrado, empiezan a ser rentables a los 778851.60 m<sup>3</sup>/año y a los 248977.45 m<sup>3</sup>/año, respectivamente.

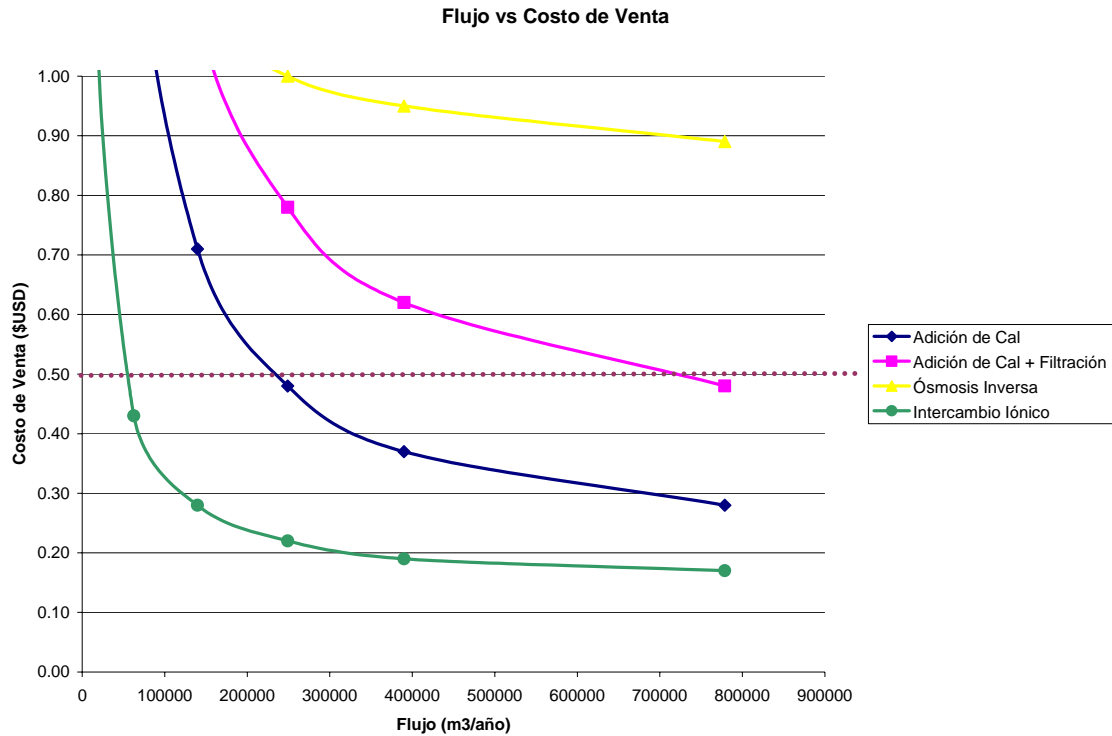


Figura 12. Comparación de costos de venta/m<sup>3</sup> tratado a diferentes flujos. Dureza.

#### 9.4 Evaluación global en medio del entorno socioeconómico actual

Considerando todos estos resultados optimizados técnica y económicamente, se puede realizar la comparación contra el presupuesto asignado a salud pública. La Ley de Egresos del año 2004 reportó para el Estado de Puebla una asignación de 156'105,526.41 y de 20'000,000.00 de pesos para salud pública y para agua y saneamiento, respectivamente. Para el año 2005, la Ley de Egresos reporta una asignación de 265'945,489.70 y de 25'381,569.00 de pesos para salud pública y para agua y saneamiento, respectivamente. Como puede observarse la relación entre depuración de agua : salud pública es de 1:7.81 (año 2004) y de 1:10.48 (año 2005). Si tomamos en cuenta que se estima que cerca del 80% de las enfermedades del tercer mundo están relacionadas al agua y que en algunos lugares se ha logrado reducir significativamente los casos de morbilidad y mortalidad aplicando acciones correctivas

de ingeniería más que de salud, parece viable el compartir presupuestos para beneficio de la población. Se solicitó información al Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) para poder saber el número de casos que atienden al año y poder relacionar algunos de ellos con la calidad de agua del estado, los datos proporcionados corresponden al año 2003 porque la base de datos de 2004 aún no estaba terminada al momento de la solicitud.

Para este análisis se hicieron las siguientes suposiciones:

- El número de casos atendidos durante 2003 es representativo de lo que sucede anualmente.
- Se tomaron como “Casos que pueden tener relación con el agua” todos aquellos casos que podrían estar relacionados según la literatura, no sólo con los problemas de contaminación descritos en este trabajo, por ejemplo: parasitosis, infecciones gastrointestinales, micosis, algunos problemas de funciones endócrinas, etc.
- Se tomó el 100% de casos de cada enfermedad asociable al agua como producto de contaminación de este recurso, es decir, si se reportaban 28 casos de tifoidea, se tomaban 28 casos de enfermedad asociados al agua, ya que no hay manera de conocer la causa de cada caso.
- Se asociaron al agua las enfermedades reportadas en la literatura, pero esto no quiere decir que se hayan asociado todas y cada una de las que puedan estar relacionadas, ya que muchas de ellas pueden tener una relación indirecta y se necesitaría tener formación en Ciencias de la Salud para poder discriminar con mayor precisión cada una de ellas.
- Se supuso también que cada caso atendido de cirugía merece 10 veces el presupuesto asignado a cada caso atendido de enfermedad.
- Se consideró que el presupuesto asignado a enfermedades se distribuye equitativamente entre cada una de ellas, de igual modo, se consideró que



el presupuesto asignado a cirugías se distribuye equitativamente entre cada una de ellas.

- Por último se consideró que el consumo promedio de agua por habitante es de 78.48 m<sup>3</sup>/año <sup>(1)</sup>, que actualmente el Estado de Puebla cuenta con 5,536,997 habitantes <sup>(31)</sup> y que el “costo adicional” de saneamiento para evitar estas enfermedades asignables al agua es de \$2.50 pesos, ya que en análisis de diferentes contaminantes es un valor promedio que se repite.

Los archivos generales que contienen toda la información de salud pública pueden accederse aquí, pero los resultados resumidos siguiendo las consideraciones anteriores son:

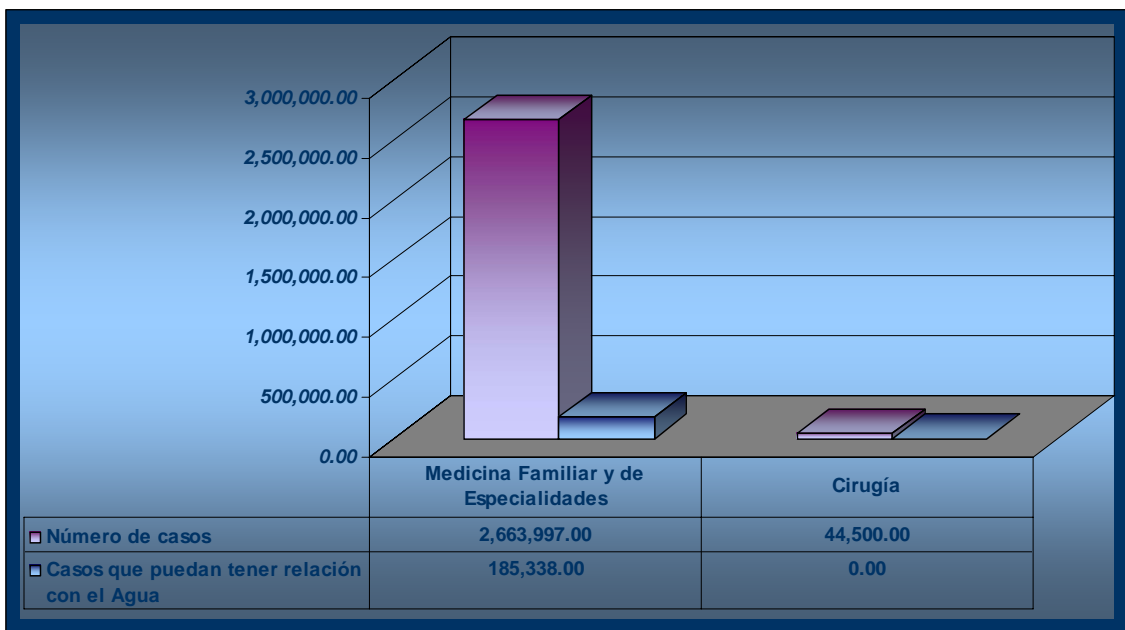


Figura 13. Salud Pública. Casos que pueden tener relación con el agua.

Casos totales:	# Casos	\$ (PS MX)
Medicina Familiar y de Especialidades	2,663,997.00	227,879,919.63
Cirugía	44,500.00	38,065,569.98
<b>Presupuesto asignado a Salud Pública</b>		<b>265,945,489.61</b>

Tabla 33. Casos totales de tratamiento y cirugía y presupuesto asignado a cada uno.

Casos relacionados al agua:	# Casos	\$ (PS MX)
Medicina Familiar y de Especialidades	185,338.00	<b>15,853,924.96</b>
Cirugía	0.00	
	<u>185,338.00</u>	

Tabla 34. Casos relacionados al agua y presupuesto consumido.

**En un año:**

Dinero disponible	15,853,924.96 pesos
Costo de tratamiento pesos/m <sup>3</sup>	2.50 pesos/m <sup>3</sup>
Se pueden tratar	6,341,569.99 m <sup>3</sup>
Beneficio para	<b>80,810.07</b> habitantes

Tabla 35. Utilización del presupuesto consumido por enfermedades relacionadas al agua en depuración de del recurso hídrico.

**EJEMPLO (Caso puntual para el Estado de Puebla):**

CALCULO DEL RIÑÓN Y DE URETER	6872 casos
Dinero disponible	587,835.05 pesos
Costo de tratamiento pesos/m <sup>3</sup>	2.50 pesos/m <sup>3</sup>
Se pueden tratar	235,134.02 m <sup>3</sup>
Beneficio para	<b>2,996.29</b> habitantes

CALCULO DEL RIÑÓN Y DE URETER	6872 casos
Dinero disponible	587,835.05 pesos
Costo de tratamiento pesos/m <sup>3</sup>	<b>1.09</b> pesos/m <sup>3</sup>
Se pueden tratar	539,298.21 m <sup>3</sup>
Beneficio para	<b>6,872.23</b> habitantes

Tabla 36. Ejemplo de un caso para el Estado de Puebla.

Así, de las tablas anteriores, se observa que si el “costo adicional” de saneamiento se fija en otros \$2.50 pesos, el presupuesto invertido en curar los casos que pueden tener relación con el agua, sería suficiente para tratar más de seis millones de m<sup>3</sup> de agua, lo cual beneficiaría a más de ochenta mil habitantes. Si se toma un ejemplo específico para el Estado de Puebla donde la dureza del agua es muy elevada, se encuentran muchos casos de cálculos renales y de uréteres, que manteniendo proporcionalidad de gastos entre todas las enfermedades atendidas, consume 587,835.05 pesos/año, lo cual al ser invertido en depuración sólo beneficiaría a 2,996 habitantes, por

lo que todavía habría casos asociados al agua (independientes de los que sufren cierta propensión a la enfermedad), sin embargo, si el costo adicional de depuración de \$2.50 se divide en \$1.09 reasignando el presupuesto de salud pública y \$1.41 absorbido por el usuario, se podría beneficiar al mismo número de personas que se hayan enfermado a consecuencia de consumir agua con excesiva dureza y esto representaría un costo adicional para el usuario de sólo \$110.65 pesos/año sobre la cuota actual de saneamiento que cobra SOAPAP.