



CAPÍTULO X.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

10.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La revisión bibliográfica nos permite sentar las bases para evaluar el desempeño del digester así como obtener la cinética experimental y hacer un análisis económico de este proceso.

10.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL TRATAMIENTO DE AGUAS EN LA CIUDAD DE PUEBLA

En la ciudad de Puebla se generan 2,943.82 lps de aguas residuales, la infraestructura para el tratamiento de dicho volumen es de 5 plantas con distintas capacidades localizadas en las zonas más bajas de la ciudad para así captar por gravedad la conducción de aguas residuales de atarjeas, drenajes, colectores, subcolectores y emisores del sistema total de alcantarillado. Una descripción de cada planta de tratamiento, así como la especificación de diámetro y longitud de sus colectores marginales se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 10.1 Especificaciones y Capacidad de Saneamiento de las plantas

Sistema	Capacidad	Colectores	
	(lps)	Diametro (cm)	Km.
Atoyac	600	30 a 122	17.76
Alseseca	1,000	30 a 122	44.63
San Francisco	1,500	30 a 152	33.41
Parque Ecológico	80	38 a 61	15.18
Barranca El Conde	500	30 a 152	9.12
Total	3,680		120.09

Con dicha infraestructura se sobrepasa la capacidad de saneamiento que requiere la ciudad. A excepción de la planta del parque Ecológico, que trabaja con biodiscos, todas se basan en un tratamiento primario avanzado. La primera etapa consiste en un cribado grueso,



fino, y un desarenador. El agua residual separada se somete a la acción de polímeros para promover la coagulación y floculación. Finalmente el agua se bombea a un sedimentador con placas inclinadas para acelerar la velocidad de sedimentación del lodo químico.

En el presente trabajo se analizó la planta Atoyac Sur a la cual llegan los lodos provenientes de la Planta San Francisco y Barranca del conde. La planta Atoyac Sur está diseñada para tratar un caudal de 600 lps de aguas residuales industriales y domésticas que por gravedad convergen de la zona sur y poniente de la ciudad; la planta San Francisco tiene una capacidad máxima de 1500 lps y se captan las descargas del centro de la ciudad. Finalmente en la planta Barranca del Conde se tratan 500 lps provenientes de la zona norte de la ciudad. De acuerdo a las cifras citadas anteriormente dichos caudales representan un 20, 51 y 17 % del total de agua residual generada en la ciudad. El total de población beneficiada con esta tecnología asciende a más de 20000 agricultores de las zonas aledañas a la presa de Valsequillo, un número no cuantificado de industrias y más de un millón de habitantes dentro de la ciudad

10.3. CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA EN LA PLANTA

ATOYAC SUR

El primer paso para conocer y evaluar el proceso de digestión, consiste en caracterizar los flujos y las concentraciones a la entrada y a la salida del digestor, así, se realizaron las siguientes pruebas.

10.3.1. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO)

La *Demanda Bioquímica de Oxígeno* se define como la cantidad de oxígeno que las bacterias necesitan para estabilizar materia orgánica degradable. Este parámetro nos ayuda a determinar la carga contaminante que posee un determinado efluente en caso de que fuera descargado en un receptáculo natural como un río, lago, laguna, etc. En donde



predominan condiciones aerobias. Esta prueba es de vital importancia en aquellas actividades en donde están involucrados descargas contaminantes, tal es el caso de los lodos provenientes de un proceso de tratamiento de aguas residuales. Para la determinación de este parámetro se empleo el DBO Track, y fueron necesarias diluciones desde 1:12 a 1:20.

Los resultados obtenidos a lo largo de 50 días de monitoreo se reportan en las siguientes tablas:

Tabla 10.2 Demanda Bioquímica de Oxígeno

Día	Lodos		% Reducción
	Crudos mg/L	Digeridos mg/L	
25-sep	9750	7620	21.84615385
01-oct	9800	9150	6.632653061
05-oct	4000	9340	-133.5
08-oct	10992	8880	19.2139738
12-oct	10488	9420	10.18306636
13-oct	12270	13710	-11.73594132
20-oct	13290	14490	-9.029345372
22-oct	8620	7700	10.67285383
26-oct	9864	6168	37.46958637
28-oct	7880	4560	42.1319797
04-nov	12570	7080	43.67541766
06-nov	12960	3210	75.23148148
09-nov	12780	10050	21.36150235
12-nov	12210	7980	34.64373464
13-nov	12720	7320	42.45283019

Tabla 10.3 Valores Promedio DBO

Parámetro	Lodos		% Reducción
	Crudos	Digeridos	
Media	10679.6	8445.2	20.922132
Valor Máx	13290	14490	
Valor Mín	4000	3210	
Moda	-	-	
Desv. Stand.	2509.5327	2946.427357	
	Crudos		Digeridos
	$\mu \pm \sigma$		$\mu \pm \sigma$
	8170.067294	13189.133	5498.772643 11391.627
	$\mu \pm 2\sigma$		$\mu \pm 2\sigma$
	5660.534589	15698.665	2552.345286 14338.055

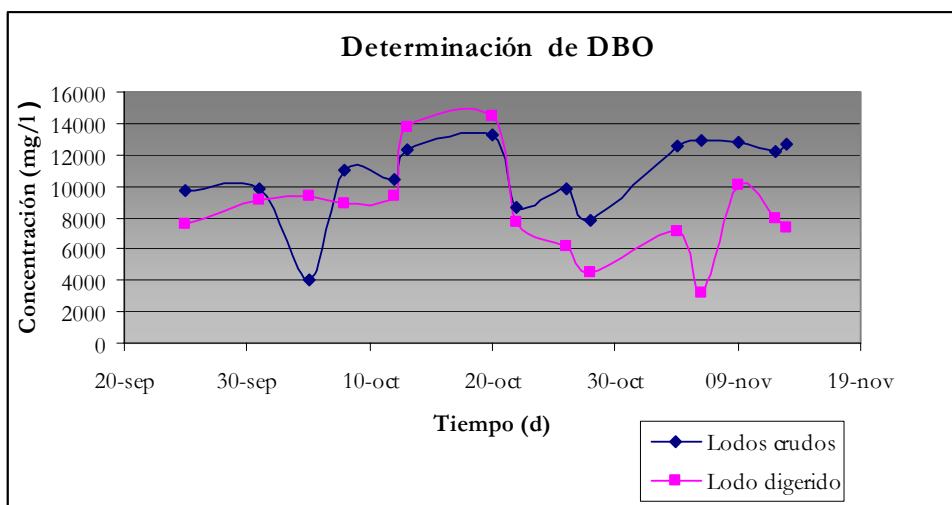


Fig.10.1 Valores de DBO para lodos crudos y digeridos



10.3.2. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

La *Demanda Química de Oxígeno* es otro parámetro por medio del cual podemos conocer la carga orgánica de un efluente ya sea doméstico o industrial. Esta prueba permite medir la cantidad total de oxígeno que es necesario para pasar de un residuo a dióxido de carbono y agua, y esta basada en el hecho de que todos los residuos orgánicos, con algunas excepciones, pueden oxidarse con fuertes agentes oxidantes bajo condiciones ácidas. La importancia de esta prueba radica en el hecho de que se obtienen datos con mucha más rapidez que con la prueba de DBO, y mediante el factor adecuado se puede pasar de un valor a otro. Para este análisis fueron necesarias diluciones de 1:100 y posteriormente de 1:5.

Los resultados obtenidos a lo largo de 50 días de monitoreo se reportan en la siguiente tabla:

Tabla 10.4 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Día	Lodos		% Reducción
	Crudos mg/L	Digeridos mg/L	
25-sep	13400	11800	11.94029851
01-oct	22000	12000	45.45454545
05-oct	23200	11800	49.13793103
08-oct	11800	9200	22.03389831
12-oct	10600	8800	16.98113208
13-oct	25200	21200	15.87301587
20-oct	23600	18400	22.03389831
22-oct	24800	18400	25.80645161
26-oct	23200.0	16400.0	29.31034483
28-oct	26000.0	18800.0	27.69230769
04-nov	26000.0	17920.0	31.07692308
06-nov	23200.0	16400.0	29.31034483
09-nov	30800.0	27600.0	10.38961039
12-nov	22400.0	21600.0	3.571428571
13-nov	27600.0	19200.0	30.43478261

Tabla 10.5 Valores Promedio DQO

Parámetro	LODOS		% Reducción
	Crudos	Digeridos	
Media	22253.33333	16634.66667	25.24865189
Valor Máx	30800	27600	
Valor Mín	10600	8800	
Moda	23200	11800	
Desv. Stand.	5812.040048	5140.069297	
	Crudos		Digeridos
	$\mu \pm \sigma$		$\mu \pm \sigma$
	16441.29328	28065.37338	11494.59737
	$\mu \pm 2\sigma$		$\mu \pm 2\sigma$
	10629.25324	33877.41343	6354.528072
			26914.80526

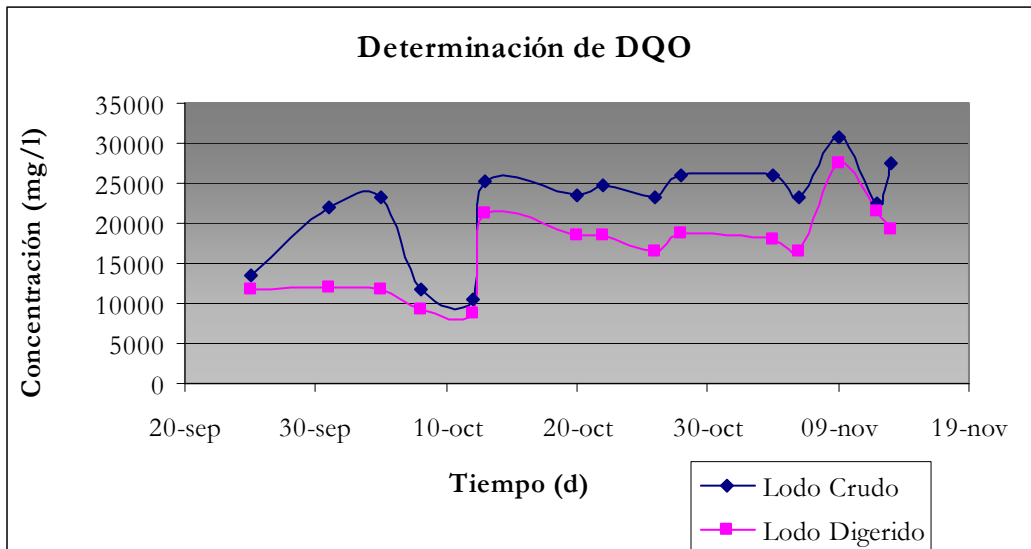


Fig. 10.2 Valores de DQO para lodos crudos y digeridos

10.3.3. PORCENTAJE DE HUMEDAD

En este análisis se midió la humedad total de las muestras de lodo así como el porcentaje de sólidos totales de cada muestra. A continuación se muestran los resultados en forma de valores promedio:

Tabla 10.6 Valores Promedio% de Humedad Total

Parámetro	L O D O S		
	Crudos	Digeridos	
Media	92.54	93.92	
Valor Máx	93.51	97.41	
Valor Mín	91.39	91.89	
Moda	-	-	
Desv. Stand.	0.70	1.90	
	Crudos	Digeridos	
	$\mu \pm \sigma$	$\mu \pm \sigma$	
	91.83	93.24	95.82
	$\mu \pm 2\sigma$	$\mu \pm 2\sigma$	
	91.13	93.95	97.72

Tabla 10.7 Valores Promedio % sólidos

Parámetro	L O D O S		
	Crudos	Digeridos	
Media	10.08	12.44	
Valor Máx	30.69	27.12	
Valor Mín	9.86	9.96	
Moda	-	-	
Desv. Stand.	8.96	6.70	
	Crudos	Digeridos	
	$\mu \pm \sigma$	$\mu \pm \sigma$	
	1.12	19.04	19.14
	$\mu \pm 2\sigma$	$\mu \pm 2\sigma$	
	-7.84	28.01	25.85



10.3.4. SÓLIDOS SEDIMENTABLES

Los sólidos sedimentables son toda la materia contenida en una muestra de agua que por efecto de la gravedad se precipita y se acumula. Los resultados de este análisis se reportan como ml/l y se muestran en la siguiente tabla en forma de promedios, debido a la operación del digestor, en algunos muestreos no fue posible extraer un litro requerido para este análisis:

Tabla 10.8 Valores Promedio Sólidos Sedimentables

Parámetro	L O D O S		%
	Crudos	Digeridos	Reducción
Media	811.061	637.236	21.43173101
Valor Máx	955.600	797.500	
Valor Mín	718.000	504.000	
Desv. Stand.	74.87150577	101.0048739	

10.3.5. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES, VOLÁTILES Y FIJOS

La determinación de sólidos suspendidos presentes en muestras líquidas nos dan valiosa información acerca de la carga contaminante de un flujo residual, y de la eficiencia de los procesos de depuración. Los Sólidos suspendidos se dividen en volátiles y fijos sin embargo la determinación de sólidos volátiles es la más importante en el proceso de digestión esto se debe a que nos indica la cantidad de materia orgánica presente. Para obtener la cantidad de sólidos suspendidos totales se filtro un volumen conocido (usualmente 3 ml) de lodos tanto crudos como digeridos en un crisol Gooch y se sometió a 150°C hasta que presentara peso constante. Los sólidos suspendidos volátiles se determinaron sometiendo la misma muestra a 550°C, los valores reportados para cada una de las mediciones fueron tomados de la balanza, hasta que se presento un error de 0.001 entre una pesada y otra. Para determinar los sólidos suspendidos fijos, se hizo una resta de los sólidos totales menos los volátiles.



Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Sólidos Suspendidos Totales

Tabla 10.9 Sólidos Suspendidos Totales

Día	Lodos		% Reducción
	Crudos mg/L	Digeridos mg/L	
25-sep	80550.00	65450.00	18.75
01-oct	92850.00	41166.67	55.66
05-oct	122950.00	63133.33	48.65
08-oct	65750.00	51433.33	21.77
12-oct	95681.82	83700.00	12.52
13-oct	74800.00	84833.33	-13.41
20-oct	69250.00	73666.67	-6.38
22-oct	79833.33	85700.00	-7.35
26-oct	71600.00	46366.67	35.24
28-oct	89800.00	73133.33	18.56
04-nov	67900.00	68700.00	-1.18
06-nov	73826.09	35320.00	52.16
09-nov	71480.00	68866.67	3.66
12-nov	64720.00	76633.33	-18.41
13-nov	79360.00	84320.00	-6.25

Tabla 10.10 Valores Promedio SST

Parámetro	L O D O S		% Reducción
	Crudos	Digeridos	
Media	80023.416	66828.222	16.48916574
Valor Máx	122950.000	85700.000	
Valor Mín	64720.000	35320.000	
Moda	-	-	
Desv. Stand.	15258.10575	13.36775859	

Crudos		Digeridos	
$\mu \pm \sigma$	$\mu \pm \sigma$	$\mu \pm \sigma$	$\mu \pm \sigma$
64765.310	95281.522	66814.85446	66841.58998
$\mu \pm 2\sigma$		$\mu \pm 2\sigma$	
49507.20439	110539.6274	66801.48671	66854.95774

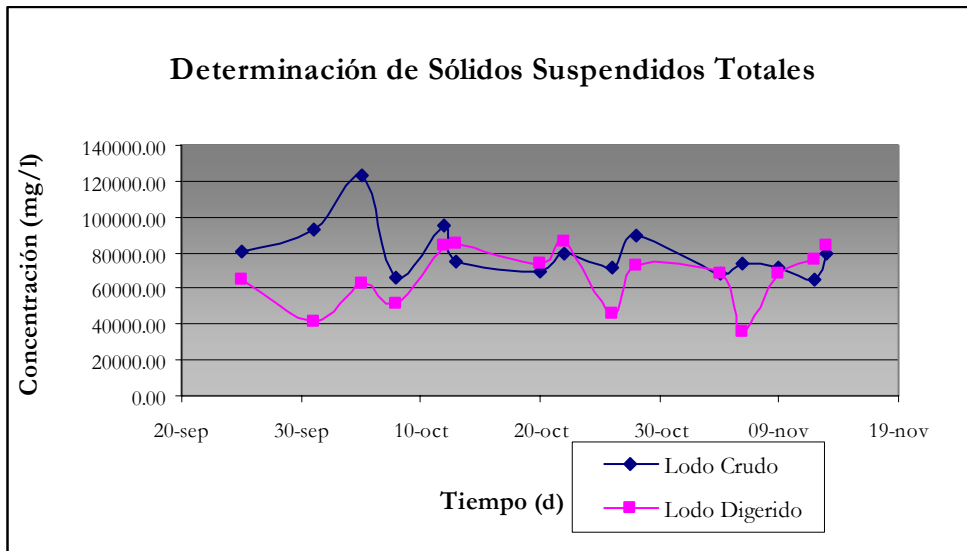


Fig. 10.3 Valores de SST para lodos crudos y digeridos



Sólidos Suspendedos Volátiles

Tabla 10.11 Sólidos Suspendedos Volátiles

Día	Lodos		% Reducción
	Crudos mg/L	Digeridos mg/L	
25-sep	28500.000	14450.000	49.30
01-oct	36000.000	15766.667	56.20
05-oct	33900.000	16733.333	50.64
08-oct	23250.000	21633.333	6.95
12-oct	23590.909	19533.333	17.20
13-oct	27366.667	20200.000	26.19
20-oct	29850.000	17900.000	40.03
22-oct	35066.667	22866.667	34.79
26-oct	35533.333	12833.333	63.88
28-oct	42400.000	21133.333	50.16
04-nov	36500.000	21133.333	42.10
06-nov	35565.217	11840.000	66.71
09-nov	36200.000	21833.333	39.69
12-nov	35960.000	25066.667	30.29
13-nov	42440.000	22480.000	47.03

Tabla 10.12 Valores Promedio SSV

Parámetro	L O D O S		% Reducción
	Crudos	Digeridos	
Media	33474.853	19026.889	43.1606497
Valor Máx	42440.000	25066.667	
Valor Mín	23250.000	11840.000	
Moda	-	21133.333	
Desv. Stand.	5842.715773	13.36775859	

Crudos		Digeridos	
$\mu \pm \sigma$		$\mu \pm \sigma$	
27632.137	39317.569	19013.52113	19040.25665
$\mu \pm 2\sigma$		$\mu \pm 2\sigma$	
21789.42133	45160.28442	19000.15337	19053.62441

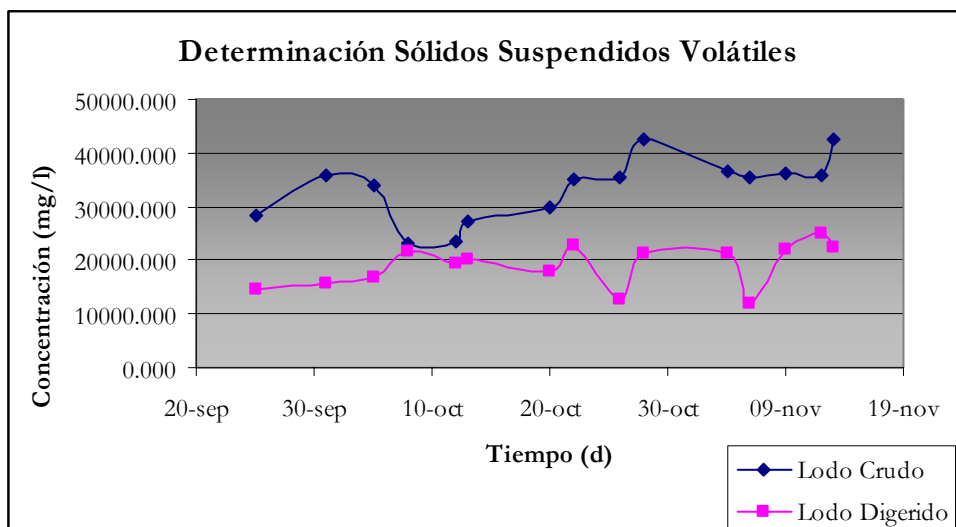


Fig. 10.4 Valores de SSV para lodos crudos y digeridos



Sólidos Suspendedos Fijos

Tabla 10.13 Sólidos Suspendedos Fijos

Día	Lodos		% Reducción
	Crudos mg/L	Digeridos mg/L	
25-sep	52050.000	51000.000	2.017
01-oct	56850.000	25400.000	55.321
05-oct	89050.000	46400.000	47.894
08-oct	42500.000	29800.000	29.882
12-oct	72090.909	64166.667	10.992
13-oct	47433.333	64633.333	-36.261
20-oct	39400.000	55766.667	-41.540
22-oct	44766.667	62833.333	-40.357
26-oct	36066.667	33533.333	7.024
28-oct	47400.000	52000.000	-9.705
04-nov	31400.000	47566.667	-51.486
06-nov	38260.870	23480.000	38.632
09-nov	35280.000	47033.333	-33.314
12-nov	28760.000	51566.667	-79.300
13-nov	36920.000	61840.000	-67.497

Tabla 10.14 Valores Promedio SSF

Parámetro	L O D O S		% Reducción
	Crudos	Digeridos	
Media	46548.563	47801.333	-2.691318981
Valor Máx	89050.000	64633.333	
Valor Mín	28760.000	23480.000	
Moda	-	-	
Desv. Stand.	16061.27202	13.36775859	

Crudos		Digeridos	
$\mu \pm \sigma$	$\mu \pm \sigma$	$\mu \pm \sigma$	$\mu \pm \sigma$
30487.291	62609.835	47787.966	47814.701
$\mu \pm 2\sigma$	$\mu \pm 2\sigma$	$\mu \pm 2\sigma$	$\mu \pm 2\sigma$
14426.01899	78671.10705	47774.59782	47828.06885

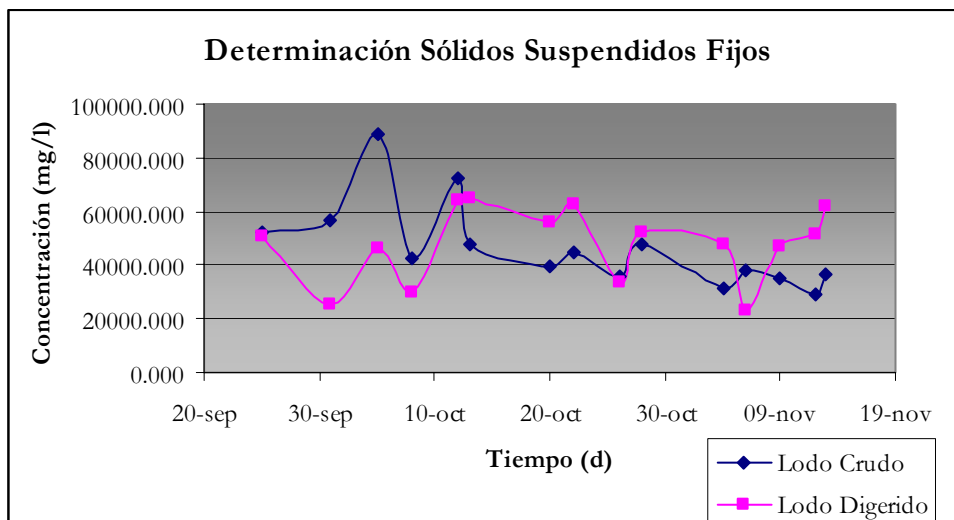


Fig. 10.5 Valores de SSF para lodos crudos y digeridos



10.3.6. BIOGÁS

La descomposición anaerobia de lodos y algunos residuos líquidos, particularmente aquellos con valores de DBO altos, genera un flujo de biogás que usualmente contiene del 33 al 38 % de CO₂, 55 a 65% de metano, pequeñas cantidades de hidrógeno nitrógeno y trazas de ácido sulfhídrico (Perry L. McCarty (994). A continuación se presenta el flujo de biogás producido al día, así como el porcentaje de metano y dióxido de carbono (porcentaje volumen) contenido en la muestra. Los datos fueron proporcionados por personal del SOAPAP.

Tabla 10.15 Producción de Biogás

Día	Biogas m ³ /día	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)
01-oct	1736	58.3	32.3
02-oct	1822	58.4	33.3
03-oct	1418	56.7	32.8
04-oct	958	56.9	32.3
05-oct	1334	54.4	32
06-oct		56.6	31.1
07-oct		56.2	30.7
08-oct	1064	57.6	30
09-oct	1388	56.9	30.7
10-oct	1498	56.6	31.5
11-oct	1260	56.4	31.6
12-oct	1164	56.6	31.4
13-oct	990	56.8	30.8
14-oct	1090	59.5	32.4
15-oct	1152	56.6	31.4
16-oct	1422	55.8	31.8
17-oct	1372	55.9	32.9
18-oct	1290	55.8	31.8
19-oct	1644	58.1	30.4
20-oct	1774	59.5	32
21-oct	1946	57.8	32.8
22-oct	2060	57.3	32.9
23-oct	2154	57.7	32
24-oct	2322	56.2	32.6
25-oct	2034	59.6	32.3
26-oct	1690	59.5	32
27-oct	1462	60	30.6
28-oct	1338	58.9	29.6
29-oct	1128	60	29.6
30-oct	1874	58.8	30.9
31-oct	1730	59.7	31.5

Tabla 10.16 Valores promedio composición biogás

BIOGAS Parámetro	Flujo (m ³ /día)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)
Media	1521.172	57.552	31.607
Valor Máx	2322.000	60.000	33.300
Valor Mín	958.000	54.400	29.600
Desv. Stand.	371.063536	1.489635787	1.015568467

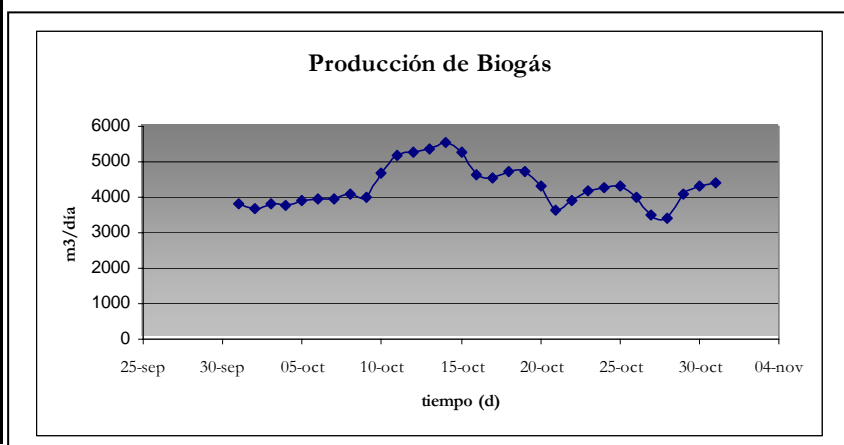


Fig. 10.6 Flujo de biogás



10.3.7. NITRÓGENO TOTAL

Como se menciona en el capítulo IV de la revisión bibliográfica, los lodos contienen cantidades apreciables de nitrógeno (por la presencia de orina y materia orgánica proveniente de el uso domestico del agua). Su presencia, es de gran interés para este estudio dada la importancia que tienen sus distintas formas de oxidación dentro del metabolismo vegetal. A fin de conocer su valor como fertilizante se analizaron 15 muestras de lodos digeridos, los resultados obtenidos se presentan a continuación:

Tabla 10.17 Nitrógeno Total

Día	Lodos		% Reducción
	Crudos mg/L	Digeridos mg/L	
25-sep	4400.000	2800.000	36.364
01-oct	3200.000	5200.000	-62.500
05-oct	10000.000	6000.000	40.000
08-oct	9200.000	5600.000	39.130
12-oct	6000.000	7200.000	-20.000
13-oct	3600.000	2600.000	27.778
20-oct	10000.000	4400.000	56.000
22-oct	2444.420	800.000	67.272
26-oct	2000.000	1351.351	32.432
28-oct	2800.000	1714.286	38.776
04-nov	1600.000	400.000	75.000
06-nov	4800.000	1999.998	58.333
09-nov	4995.000	3330.000	33.333
12-nov	3666.652	3333.320	9.091
13-nov	4400.000	3200.000	27.273

Tabla 10.18 Valores Promedio Nitrógeno total

Parámetro	L O D O S		% Reducción
	Crudos	Digeridos	
Media	4873.738	3328.597	31.7034089
Valor Máx	10000.000	7200.000	
Valor Mín	1600.000	400.000	
Moda	4400	-	
Desv. Stand.	2778.3564	13.36775859	

Crudos		Digeridos	
$\mu \pm \sigma$	$\mu \pm \sigma$	$\mu \pm \sigma$	$\mu \pm \sigma$
2095.382	7652.095	3315.229246	3341.964763
$\mu \pm 2\sigma$	$\mu \pm 2\sigma$	$\mu \pm 2\sigma$	$\mu \pm 2\sigma$
-682.9746704	10430.4509	3301.861487	3355.332521

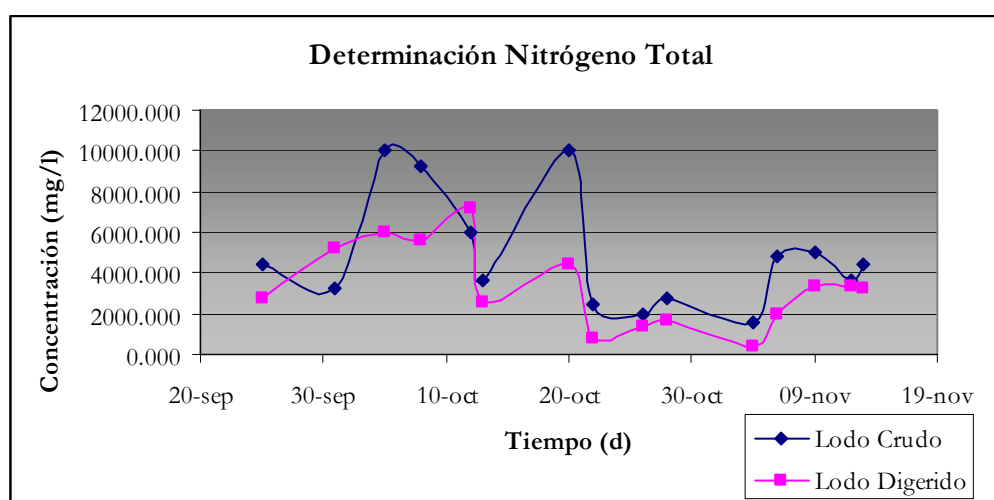


Fig. 10.7 Valores de nitrógeno total



10.3.8. FOSFATOS

El fósforo al igual que el nitrógeno es un nutriente esencial para la generación de energía y nuevas células de los microorganismos involucrados en la estabilización de los lodos residuales, su concentración excede la demanda de fósforo necesaria para estabilizar la cantidad de materia orgánica presente, por lo que el contenido total de fósforo en lodos digeridos se encuentra cerca del 1%. Para este estudio se considero el análisis de los ortofosfatos contenidos en los lodos debido a su importancia como fertilizante, a continuación se muestran los valores obtenidos:

Tabla 10.19 Fosfatos

Día	Lodos	
	Crudos mg/L	Digeridos mg/L
25-sep	2820.000	5912.500
01-oct	3160.000	2870.400
05-oct	3780.000	3440.000
08-oct	3130.000	2990.000
12-oct	3310.000	3380.000
13-oct	3700.000	4850.000
20-oct	2860.000	3070.000
22-oct	3590.000	3190.000
26-oct	4330.000	2670.000
28-oct	4020.000	3610.000
04-nov	4650.000	3850.000
06-nov	3900.000	2320.000
09-nov	9980.000	9860.000
12-nov	4970.000	1970.000
13-nov	6525.000	4380.000

Tabla 10.20 Valores Promedio Fosfatos

Parámetro	LODOS		%
	Crudos	Digeridos	
Media	4315.000	3890.860	9.829432213
Valor Máx	9980.000	9860.000	
Valor Mín	2820.000	1970.000	
Moda	-	-	
Desv. Stand.	1833.565029	13.36775859	

Crudos		Digeridos	
$\mu \pm \sigma$	$\mu \pm \sigma$	$\mu \pm \sigma$	$\mu \pm \sigma$
2481.435	6148.565	3877.492241	3904.227759
$\mu \pm 2\sigma$		$\mu \pm 2\sigma$	
647.8699427	7982.130057	3864.124483	3917.595517

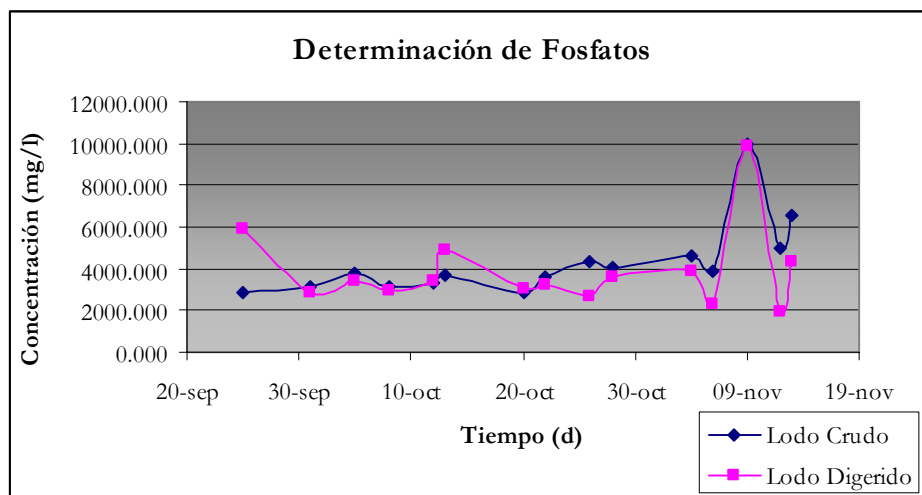


Fig.10.8 Valores de fosfatos en lodos crudos y digeridos



10.3.9. TEMPERATURA

Como se detallo en capítulos anteriores, la temperatura es uno de los factores ambientales más importantes para llevar a cabo la estabilización de los lodos con tiempos de retención más cortos. A continuación se muestra una tabla con las mediciones de dicho parámetro, la información fue proporcionada por personal de SOAPAP:

Tabla 10.21. Temperatura

Temperatura	
Parámetro	Digestor
Media	30.82758621
Valor Máx	34
Valor Mín	28
Moda	31
Desv. Stand.	1.071346466
$\mu \pm \sigma$	
29.75623974	31.89893267
$\mu \pm 2\sigma$	
28.68489327	32.97027914

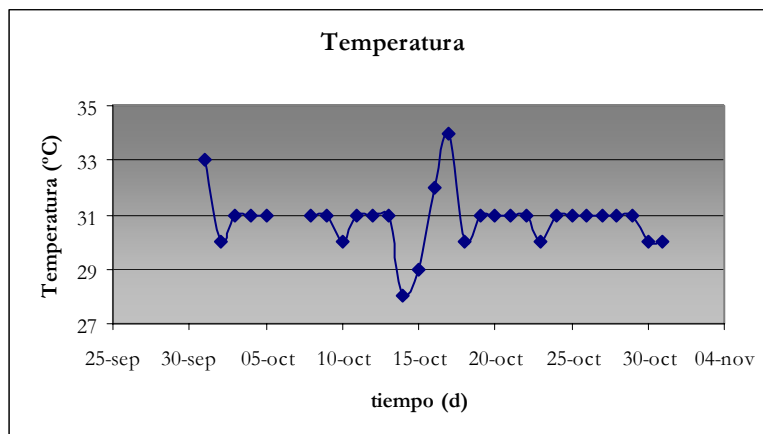


Fig. 10.9 Temperatura del digestor

10.3.10. PH

Otro factor ambiental que tiene gran impacto en el desempeño del digestor es el pH, como hemos visto las bacterias más importantes del proceso (metanogénicas) solo son capaces de desarrollarse a valores de pH cercanos al neutro, por lo que el monitoreo de este parámetro es muy importante, a continuación se muestran los valores proporcionados por personal de SOAPAP:

Tabla 10.22 Valores Promedio pH

pH	
Parámetro	Digestor
Media	7.291034483
Valor Máx	7.44
Valor Mín	7.12
Moda	7.3
Desv. Stand.	0.098392248
$\mu \pm \sigma$	
7.192642235	7.389426731
$\mu \pm 2\sigma$	
7.094249987	7.487818979

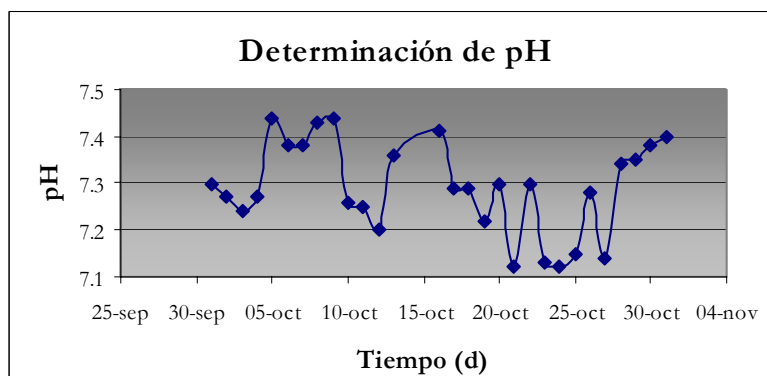


Fig. 10.10 pH del digestor



10.3.11. REDUCCIÓN DE VOLUMEN

Los flujos de entrada y salida de lodos se muestran a continuación en forma de valores promedio, esta información fue proporcionada por personal de SOAPAP y las unidades son m^3/d :

Tabla 10.23 Valores Promedio Flujos del digestor (m^3/d)

Parámetro	L O D O S		%
	Crudos	Digeridos	Reducción
Media	247.968	54.444	78.04373907
Valor Máx	382.000	70.000	
Valor Mín	113.000	42.000	
Moda	182	56	
Desv. Stand.	74.50972369	8.967176613	
Crudos		Digeridos	
$\mu \pm \sigma$		$\mu \pm \sigma$	
173.458	322.477	45.47726783	63.41162106
$\mu \pm 2\sigma$		$\mu \pm 2\sigma$	
98.94829455	396.9871893	36.51009122	72.37879767



10.4. CONSTANTES CINÉTICAS

Para la determinación de las constantes cinéticas q , K , μ_m , Y y b que rigen la digestión anaerobia, se monto un reactor a escala laboratorio y se determinaron los valores de S_0 , S y X_a para distintos tiempos de retención, de acuerdo a la metodología descrita por Metcalf & Eddy.

De acuerdo a la tasa de utilización de sustrato:

$$r_{ut} = -\frac{q_m S}{K + S} X_a = -\frac{S_0 - S}{\theta}$$

Dividiendo por X_a y linealizando tenemos:

$$\frac{X_a \theta}{S_0 - S} = \frac{K}{q} \cdot \frac{1}{S} + \frac{1}{q}$$

El digester de laboratorio se monitoreo por espacio de 15 días y se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 10.24 Determinación de Constantes Cinéticas

Sustrato inicial mg/L DQO	Sustrato mg/L DQO	Tiempo $\theta = \theta_c$	Biomasa X mg SSV/l
23200	16400	5	6000
23200	16000	6	5650
23200	14400	7	6050
23200	10400	8	9900
23200	10400	9	9950
23200	10000	10	8550
23200	8400	11	11150
23200	8000	12	9400
23200	7600	13	11000
23200	6800	14	12550



De acuerdo a la ecuación linealizada los valores de K y q se pueden obtener representando gráficamente el término $[X\theta / S_0 - S]$ respecto al valor de $1/S$.

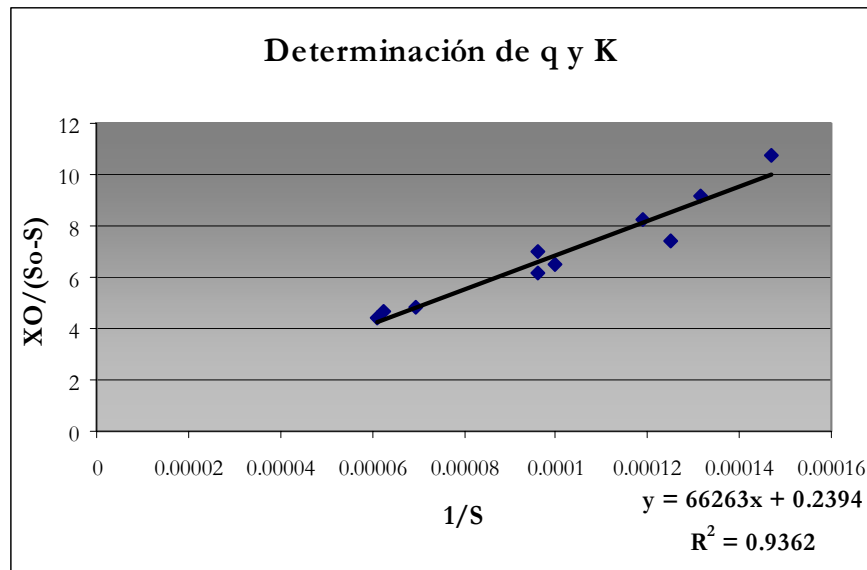


Fig. 10.11 Determinación de parámetros cinéticos K y q

El valor de q se obtiene del punto de intersección con el eje de ordenadas, que en este caso corresponde al valor de 0.343 y es igual a $(1/q)$. La pendiente de la recta corresponde al valor de (K/q) de esta manera:

$$\blacksquare \quad \frac{1}{q} = 0.343, \quad q = 2.92 \text{ d}^{-1}$$

$$\blacksquare \quad \frac{K}{q} = (64727 \text{ mg/l} \cdot \text{d})(2.92 \text{ d}^{-1})$$
$$K = 188708.45 \text{ mg/l}$$



Los valores de Y y b se pueden determinar empleando la ecuación:

$$\frac{1}{\theta_c} = -Y \frac{S_0 - S}{X\theta} - b$$

La pendiente de la recta que se ajusta a los datos experimentales corresponde al valor de Y, y el punto de corte con el eje de ordenadas es b.

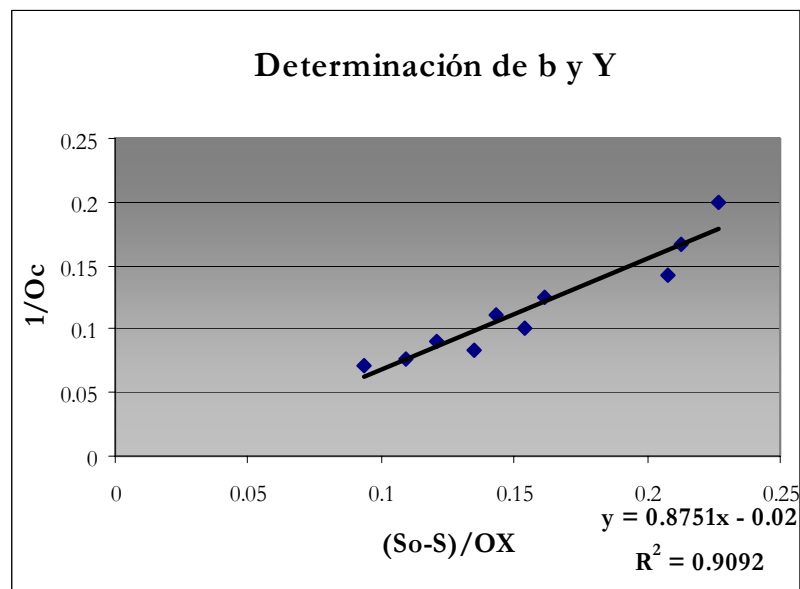


Fig 10.12 Determinación de parámetros cinéticos Y y b

Por lo tanto los valores obtenidos son:

Tabla 10.25 Constantes cinéticas

Constantes Cinéticas		
Parámetro	Valor	Unidades
q	4.18	mg DQO/mgSSV
K	276787.80	mgDQO/l
b	0.02	d^{-1}
Y	0.88	mgSSV/mgDQO
μ	3.66	d^{-1}



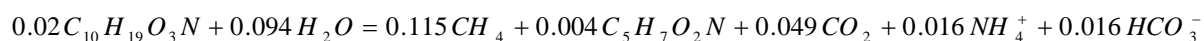
reducción equivale al 21 %. Sin embargo no se mide la eficiencia de un digestor anaerobio por la reducción de materia orgánica expresada como DBO, sino por la reducción de SSV. De acuerdo a Metcalf & Eddy (1991) se establece que, de forma general, un lodo se encuentra estabilizado cuando ha alcanzado un porcentaje de reducción de SSV en un intervalo de 40 a 50 %, en condiciones mesofílicas. De acuerdo con los resultados obtenidos durante la operación, el %RSSV promedio equivale al 43% de esta forma podemos afirmar que el proceso cumple con el objetivo de estabilizar el contenido de materia orgánica. Cabe mencionar, que la cantidad de SSF en los lodos digeridos aumenta en un 2% debido a la muerte de biomasa una vez consumida la materia orgánica disponible.

Otro beneficio significativo de este proceso es la reducción de volumen. Debido a que la mayor parte de la materia orgánica se transforma en metano, la producción de lodos digeridos es baja, para este análisis se obtuvo una reducción de volumen igual al 78%, el impacto de esta reducción incide directamente en la economía del proceso ya que supone un ahorro por lodos no dispuestos, esta cifra se discutirá más adelante en la sección del análisis económico.

El proceso mostró tener un buen balance de las poblaciones microbianas, ya que a pesar de la fluctuación en la alimentación al digestor, tanto en flujo como en concentración, no se presentaron variaciones considerables de pH.

De acuerdo a la reacción estequiométrica planteada en la sección 6.4.5, podemos estimar el flujo de metano en m^3/d , la tasa de producción de células en Kg./d y los porcentajes de metano y dióxido de carbono en la mezcla de gas como sigue:

-Reacción estequiométrica





-Velocidad de Remoción de sustrato (DQO)=(S₀-S)Q

$$= [22253.3 - 16634.6] \frac{mg}{l} \cdot 247.96 \frac{m^3}{d} \cdot \frac{10^3 l}{m^3} \cdot \frac{g}{10^3 mg} = 1,393,212.85 \frac{g}{d}$$

Un mol de CH₄ a 31°C ocupa $0.0224 \frac{m^3 gas}{mol} \cdot \frac{273+31}{273} = 0.0249 m^3$; por lo tanto de la ecuación estequiométrica:

$$\text{-Producción de CH}_4 = 0.0249 \frac{m^3}{mol} \cdot 1,393,212.85 \frac{g}{d} \cdot 0.115 \frac{mol}{4.02g} = 992.40 m^3/d$$

Como en la reacción solo se consideran el metano y el dióxido de carbono en la fase gaseosa, se asume que representan el 100%. Los volúmenes son proporcionales a las fracciones molares de cada gas, de esta manera:

$$CH_4 = \frac{0.115}{0.115 + 0.049} (100) = 57\%$$

$$CO_2 = \frac{0.049}{0.115 + 0.049} (100) = 43\%$$

Un mol de células tiene un peso molecular de 113g, de esta manera:

$$\text{Prod. de células} = \frac{0.004 mol cel}{4.02g sust} \cdot 113 \frac{g cel}{mol cel} \cdot 1,393,212.85 \frac{g sust}{d} = 156,649 grs/d$$

Es así que para la fórmula empírica C₁₀H₁₉O₃N de lodos crudos residuales tendríamos un flujo de metano igual a 992.4m³/d, con un porcentaje de metano igual al 57% y de dióxido de carbono igual al 43%. Por día la producción de células (C₅H₇O₂N) ascendería a 156.6 Kg.

En comparación con los datos teóricos obtenidos, la producción de biogás real es de 1521.17m³/d, de este flujo aproximadamente el 57% es metano y el 32% es dióxido de carbono. Los valores teóricos deberían ser mayores a los reales, sin embargo esta tendencia no



se presenta en los resultados, esta discrepancia puede atribuirse a que las fórmulas empíricas empleadas para los lodos y las células no son adecuadas. Otra observación interesante es que la producción de biogás aumenta cuando se cargan al digestor concentraciones altas de materia orgánica., mayor contenido de SSV también se traduce en un mayor porcentaje de metano contenido en la mezcla.

Tabla 10.27 Efectos de las condiciones ambientales y de carga en la producción de biogás

Flujo de lodos m ³ /día	Carga DQO (kg/m ³)	ContenidoSSV (kg/m ³)	pH	Temp. °C	Flujo Biogás m ³ /día	CH4 (%)	CO2 (%)
162.5	22	36	7.3	33	1736	58.3	32.3
142	23.2	33.9	7.44	31	1334	54.4	32
64	11.8	23.25	7.43	31	1064	57.6	30
117.5	10.6	23.59	7.25	31	1164	56.6	31.4
126	25.2	27.37	7.2	31	990	56.8	30.8
81.5	24.8	35.07	7.3	31	2060	57.3	32.9
56.5	23.2	35.53	7.28	31	1690	59.5	32
170	26	42.4	7.34	31	1338	58.9	29.6

El siguiente paso a evaluar es la calidad agronómica de los lodos, los criterios fundamentales para su aplicación se basan en conocer tanto las características físicas y químicas del suelo sobre el cual se pretende aplicar, como las de los lodos. Considerando la densidad de los lodos digeridos igual a 3.2kg/l y los resultados obtenidos para nitrógeno y fósforo, hay 1.04 g de N total y 1.21 g de fósforo como PO₄ por cada Kg. de lodo digerido.

Usualmente los valores de nitrógeno son más altos que los de fósforo, sin embargo en este estudio la cantidad de fosfatos presentes es mayor, esto puede deberse a la gran cantidad de detergentes que vienen contenidos en el agua residual y finalmente llegan a los lodos, además, el porcentaje de reducción de fosfatos es sólo del 9.8%, mientras que para nitrógeno se alcanzan porcentajes de estabilización del 31.7%.

Una caracterización más completa de los lodos se presenta a continuación, esta incluye un análisis CRETIB y de nutrientes para los lodos (esta información fue brindada por el SOAPAP):



CRETIB:

Tabla 10.28 Resultados de la evaluación de NO PELIGROSIDAD

PARÁMETRO mg/kg	LODO VALOR	NOM-004-SEMARNAT-2002 VALOR
Arsénico	0.037	41
Mercurio	0.0004	17
Cadmio	1	39
Cobre	136	1200
Niquel	0.048	420
Plomo	5	300
Zinc	274	2800
Cromo	0.02	1200
Coliformes fecales (NMP/g)	24000	Menor a 1,000
Salmonella S P (NMP/g)	0	Menor a 3
Huevos de Helminto	5	Menor a 10

Análisis de nutrientes:

Tabla 10.29 Aporte de Nutrientes por kg de lodo

Nutrientes	Aporte del lodo mg/kg	Aporte del lodo Kg/Ha	Requerimiento de la cosecha* Kg/Ha
Nitrógeno	1568.627451	2720	120
Fósforo	512.1107266	888	80
Potasio	393.8869666	683	150
Calcio	5118.22376	8875	50
Magnesio	112.4567474	195	25
Azufre	-	-	30
Boro	65.74394464	114	6
Zinc	4.475201845	7.76	2
Fierro	42.67589389	74	20
Manganeso	4.61361015	8	11
Cobre	5.767012687	10	5

*Requerimientos para cultivo de maíz

De acuerdo a los datos proporcionados por SOAPAP los lodos obtienen una categoría B (excelente o bueno) de acuerdo a la NOM-004-SEMARNAT-2002, por lo que pueden tener usos urbanos sin contacto directo público, usos forestales, mejoramiento de suelos y usos agrícolas.



A pesar de haber acreditado los análisis CRETIB para metales pesados, los lodos son biológicamente infecciosos, por lo que es de esperarse un mayor número de casos de enfermedades parasitarias en la región. De la tabla 10.29 podemos deducir que las concentraciones de nutrientes en los lodos exceden por mucho los requerimientos de las cosechas por lo que su aplicación debe hacerse de manera muy controlada y las características del suelo monitoreadas, ya que el contenido de nitrógeno, fósforo y calcio va a permanecer a través de varios ciclos agrícolas después de la aplicación.

10.5.1. ANÁLISIS DE LA CINÉTICA DEL PROCESO

En el capítulo VI se presentaron las ecuaciones que describen la fase de crecimiento y descomposición endógena de las bacterias, así mismo, se presento el balance de materia para un quimiostato, en base a esas ecuaciones, se espera que la concentración de biomasa con respecto al tiempo aumente mientras que la de sustrato presente en el medio disminuya, dichos comportamientos se presentan en las siguiente gráfica.

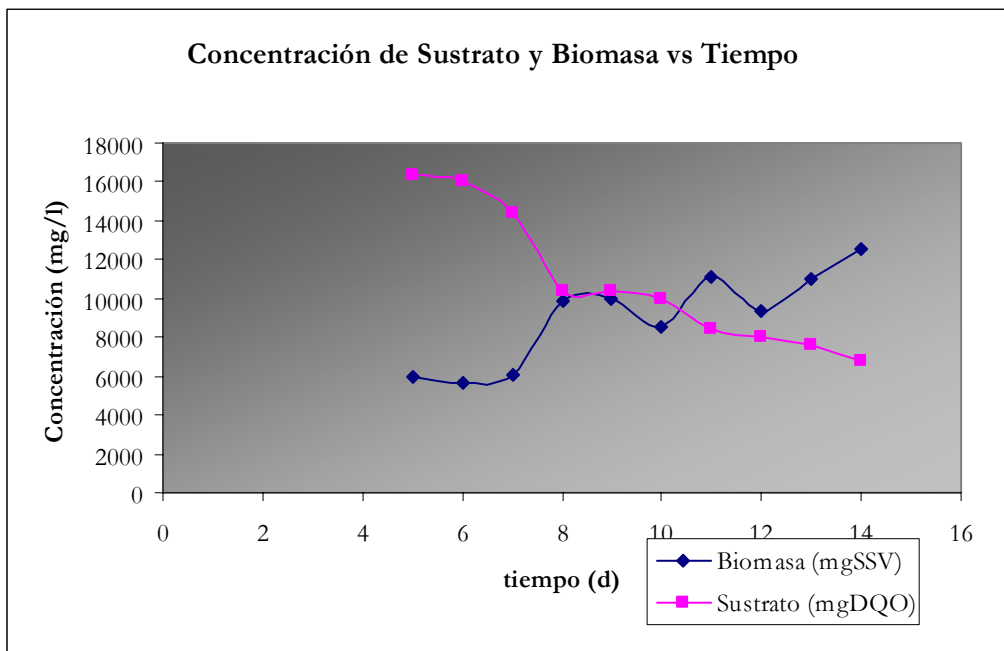


Fig. 10.13 Comportamiento de Sustrato y biomasa vs tiempo



Los valores obtenidos para cada uno de los parámetros cinéticos pueden ser comparados con la siguiente tabla:

Tabla 10.30 Resumen de constantes cinéticas propuestas para los diferentes procesos

Substrato	Proceso	k $\frac{gDQO}{gSSV \cdot d}$	K_s $\frac{mgDQO}{L}$	μ_{max} d^{-1}	Y $\frac{gSSV}{gDQO}$	b d^{-1}
Carbohidratos	Acidogénesis	1.33-0.76	22.5-630	7.2-30	0.14-0.17	6.1
AGCL	Oxidación anaerobia	0.77-6.76	105-3180	0.085-0.55	0.04-0.11	0.01-0.015
AGV	Acetogénesis	6.2-17.1	12-500	0.13-1.20	0.025-0.047	0.01-0.027
Acetato	Metanogénesis acetoclástica	2.6-11.6	11-421	0.08-0.7	0.01-0.054	0.004-0.037
H ₂ /CO ₂	Metanogénesis hidrogenotrófica	1.92-90	4.8*10 ³ -0.60	0.05-4.07	0.017-0.045	0.088

q	4.18	mg DQO/mgSSV
K	276787.80	mgDQO/l
b	0.02	d ⁻¹
Y	0.88	mgSSV/mgDQO
μ	3.66	d ⁻¹

Resumiendo, q es la máxima tasa de utilización de sustrato; K es la concentración de sustrato en el medio cuando $\mu=q/2$; b es la tasa de respiración endógena; Y es la masa de células producidas por masa de sustrato removido y μ es la tasa de utilización de sustrato. Como podemos apreciar los valores obtenidos para la tasa de crecimiento y respiración endógena concuerdan con los reportados en la bibliografía. Empleando las constantes cinéticas obtenidas, podemos analizar el funcionamiento del reactor en estado estable teniendo en cuenta las características del flujo de alimentación.

El reactor tiene un volumen efectivo de 6400m³ y recibe un flujo de 123m³/d de lodos residuales que contienen una carga de materia orgánica igual a 22253.33 mg DQO/l. Primero calcularemos los valores límites de S_{min} , $[\theta_x^{min}]_{lim}$, y θ_x^{min} .



$$S_{\min} = K \frac{b}{Yq - b} = \frac{22253 \text{ mgDQO}}{l} \cdot \frac{0.02/d}{\frac{0.88 \text{ gVSS}}{\text{gDQO}} \cdot \frac{4.18 \text{ gDQO}}{\text{gSSV}} - 0.02/d} = 121.6 \text{ mgDQO}/l$$

$$[\theta_x^{\min}]_{\lim} = \frac{1}{Yq - b} = \frac{1}{\frac{0.88 \text{ gVSS}}{\text{gDQO}} \cdot \frac{4.18 \text{ gDQO}}{\text{gSSV}} - 0.02/d} = 0.27 d$$

$$\theta_x^{\min} = \frac{K + S^0}{S^0(Yq - b) - bK} = \frac{(276787 + 22253) \text{ mgDQO}/l}{22253 \frac{\text{mgDQO}}{l} (0.88 \cdot 4.18/d - 0.02/d) - 276787 \frac{\text{mgDQO}}{l} \cdot \frac{0.02}{d}} = 3.94 d$$

Recapitulando el valor de S_{\min} nos indica la concentración mínima a la cual puede trabajar el reactor para mantener la biomasa activa en estado estable. Así mismo θ_x^{\min} es el tiempo mínimo que debe permanecer la biomasa para poder acumularse.

$[\theta_x^{\min}]_{\lim}$ es el tiempo límite en el cual la biomasa no se acumula y no hay remoción de sustrato. De acuerdo a lo descrito anteriormente, y a los resultados obtenidos, la concentración del sustrato a la entrada puede ser menor de 22253 mgDQO/l mientras que el tiempo de retención celular sea mayor a 3.94d.

Ahora calcularemos θ_x y un factor de seguridad

$$\theta_x = \theta = V / Q = \frac{6400}{123} = 52 d$$

$$SF = \theta_x / \theta_x^{\min} = \frac{52 d}{3.94 d} = 13.2$$

La concentración de sustrato a la salida del digester viene dada por la siguiente ecuación:

$$S = K \frac{1 + b\theta_x}{Yq\theta_x - (1 + b\theta_x)} = 276787 \frac{\text{mgDBO}}{l} \cdot \frac{1 + 0.02/d \cdot 52 d}{3.66/d \cdot 52 d - (1 + 0.02/d \cdot 52 d)} = 2998.96 \text{ mg}/l$$

Finalmente se determinará la concentración de los sólidos volátiles.

$$X_a = Y(S^0 - S) \frac{1}{1 + b\theta_x} = \frac{0.88 \text{ gSSV}}{\text{gDQO}} \left((22253 - 2998.96) \frac{\text{mgDQO}}{l} \right) \frac{1}{2.04} = 8305.66 \text{ mgSSV}/l$$



Conocer este flujo es importante ya que la reducción de los volátiles implica la estabilización de la fracción biodegradable que entra al proceso así como la generación de metano. Esta relación ya había sido discutida previamente en el análisis de los datos experimentales.

En este estudio no estamos considerando efectos de inhibición por lo que los valores reales para las concentraciones de salida son mayores.

Durante la elaboración de este estudio, la temperatura dentro del digestor fue de 31° C, usualmente el digestor trabaja a temperaturas que fluctúan entre los 35-37° C, sin embargo durante los meses de octubre-noviembre una de las calderas recibió mantenimiento por efectos de corrosión ocasionados por la presencia de H₂S en la mezcla, como se discutió en la sección 6.5.1, la temperatura afecta directamente la actividad metabólica, esto se vio reflejado en la producción de biogás, para el mes de octubre, la producción promedio de biogás fue igual a 1521.17 m³/d , mientras que para el mes de marzo del año en curso cuando la caldera fue reparada totalmente el flujo ascendió a 4297.5 m³/d.



10.6. ANÁLISIS ECONÓMICO

Los proyectos de carácter público se caracterizan por tener costos de inversión altos y tiempos de vida muy largos en comparación con aquellos pertenecientes al sector privado. En la mayoría de los casos, presentan gastos pero no utilidades y se mantienen gracias a las aportaciones que realizan los ciudadanos año con año. A fin de realizar un análisis económico es necesario conocer los costos de inversión, los costos de operación y mantenimiento y el impacto benéfico que tiene el proyecto en la economía de la ciudadanía.

10.6.1. INVERSIÓN

En Octubre de 1998, el Gobierno del Estado de Puebla aprobó la construcción y operación de 4 plantas depuradoras de aguas residuales, basadas en un tratamiento primario avanzado: Alseseca, Atoyac Sur, San Francisco y Barranca del Conde., junto con la construcción de 130 kilómetros de colectores marginales. La licitación se celebró bajo la figura jurídica de contrato por concesión de servicios con vigencia a 20 años, su estructura financiera quedó integrada de la siguiente manera: 40% de recursos a fondo perdido aportados por el FINFRA; 30% de la empresa ganadora TAPSA (integrada por una firma mexicana TRIBASA y otra extranjera DEGREMONT); y 30% con crédito de BANOBRAS, a favor de la empresa ganadora.

Este proyecto tuvo un costo total de 270 millones de pesos e incluía la construcción de 3 digestores anaerobios de alta carga para la estabilización de los lodos provenientes de los procesos de depuración, 2 en la Planta Atoyac Sur y uno más en la planta Alseseca, ambas plantas entraron en operación el 14 de noviembre del 2001.



Fig 10.14 Vista aérea de la Planta Atoyac Sur

A fin de estimar la inversión necesaria para la puesta en marcha del proceso de digestión se consulto el precio de un digestor anaerobio de alta carga en el software “SuperPro Designer Versión 4.9”, “CapdetWorks 2.0 2002” y en el “Perry’s Chemical Engineer’s Handbook, 1999” en donde se emplea el siguiente modelo:

$$C_2 = C_1 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^x$$

Donde:

C_1 = costo del equipo a la capacidad Q_1

C_2 = costo del equipo a la capacidad Q_2

x = exponente de correlación

Esta fórmula se emplea generalmente para estimar los costos de los equipos principales o más grandes dentro de un proceso, en la siguiente tabla se muestran algunos valores para el exponente de correlación:



Tabla 10.31 Exponentes para la ecuación de escalamiento (costo-capacidad)

COMPONENTE/SISTEMA/PLANTA	RANGO	EXPONENTE
Planta de lodos activados	1-100 MGD	0.84
Digestor Anaerobio	0.2-40 MGD	0.14
Soplador	1000-7000 ft/min	0.46
Centrífuga	40-60 in	0.71
Planta de cloración	3000-350,000 tons/año	0.44
Clarificador	0.1-100 MGD	0.98
Compresor recíprocante	5-300 hp	0.9
Compresor	200-2100 hp	0.32
Separador ciclónico	20-8000 ft ³ /min	0.64
Secador	15-400 ft ²	0.71
Filtro de arena	0.05-200MGD	0.82
Intercambiador de calor	500-3000 ft ²	0.55
Planta de hidrógeno	500-20,000 scfd	0.56
laboratorio	0.05-50 MGD	1.02
Laguna aireada	0.05-20 MGD	1.13
Bomba centrífuga	10-200 hp	0.69
Reactor	50-4000 gal	0.74
Cama de secado de lodos	0.04-5 MGD	1.35
Laguna de estabilización	0.01-0.2 MGD	0.14
Tanque de acero inoxidable	100-2000 gal	0.67

*Donde MGD= millones de galones por día;hp=caballos de fuerza;scfd=pies cúbicos estandar por día

Los costos de inversión no sólo incluyen la compra del equipo.

El acondicionamiento del terreno, la construcción de instalaciones auxiliares y de red eléctrica son algunos ejemplos de los costos asociados a la construcción de un proceso, que sumados con los costos del equipo constituyen el costo total de inversión. Para estimar estos valores se siguió la metodología descrita en la sección 9 del “Perry’s Chemical Engineer’s Handbook, 1999”, del capítulo 15 de “Engineering Economy, Leland Blank, 2002”, del software “SuperPro Designer Versión 4.9” y del capítulo 14 de “Jelen’s Cost and Optimization Engineering”.

El método sugerido relaciona el costo de compra del equipo de interés, en este caso el costo del digestor, con factores asociados a cada parte del proceso. A continuación se muestran los rangos para cada concepto y los valores empleados para este estudio:



Tabla 10.32 Factores para la Estimación de costos de inversión

Factores estimación	Utilizado*	Rango**
Instalación	0.39	0.39 - 0.43
Tubería	0.31	0.3 - 0.39
Instrumentación	0.13	0.13
Aislamiento	0.05	0.05 - 0.20
Conexión eléctrica	0.1	0.08 - 0.17
Acondicionamiento terreno	0.16	0.08 - 0.22
Instalaciones auxiliares	0.55	0.48 - 0.55
Ingeniería	0.32	0.35 - 0.43
Construcción	0.34	0.30 - 0.45
Honorario Contratista	0.05	0.09 - 0.17
Contingencias	0.1	0.10 - 0.39

*Jelen's Cost and Optimization Engineering; **Perry's Chemical Engineer's Handbook

De acuerdo a lo descrito previamente el costo de inversión se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 10.33 Estimación del Costo Total del proceso de digestión

Inversión	
	Precio
Digestor anaerobio	1,584,000.00
Filtro prensa	198,381.00
Instalación	617,760.00
Tubería	491,040.00
Instrumentación	205,920.00
Aislamiento	79,200.00
Conexión eléctrica	158,400.00
Acondicionamiento terreno	253,440.00
Instalaciones auxiliares	871,200.00
Ingeniería	506,880.00
Construcción	538,560.00
Honorario Contratista	79,200.00
Contingencias	158,400.00
INVERSIÓN TOTAL EN DÓLARES	5,742,381.00
INVERSIÓN TOTAL EN PESOS	66,037,381.50

*tipo de cambio dic 2004 dólar = \$11.5



10.6.2. COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Los costos de operación y mantenimiento fueron proporcionados por personal de Degremont empresa encargada del desempeño de las plantas de depuración y se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 10.34 Lista de Gastos de Operación y Mantenimiento en Digestión

Gastos de Operación y Mantenimiento								
	cant	kW	Hrs/d	kWh	Tarifa kWh	\$/d	días	\$/año
motor de agitador	1	3	24	72	1.64	118.08	365	43,099.20
bombas de alimentación	1	18	15	270	1.64	442.8	365	161,622.00
compresores para agitación	2	90	24	4320	1.64	7084.8	365	2,585,952.00
bomba de recirculación de lodos	2	4	24	192	1.64	314.88	365	114,931.20
Agitador sumergible en tanque de lodo digerido	2	6.8	24	326.4	1.64	535.296	365	195,383.04
bomba de alimentación al deshidratador	2	11	10	220	1.64	360.8	365	131,692.00
motor para floculador	2	0.8	10	15	1.64	24.6	365	8,979.00
motor para operación de telas	2	0.8	10	15	1.64	24.6	365	8,979.00
motor banda transportadora	1	1.9	10	18.5	1.64	30.34	365	11,074.10
motor mezclador de lodos	1	18	10	180	1.64	295.2	365	107,748.00
motor alimentación a tornillo vertical	1	4	10	40	1.64	65.6	365	23,944.00
motor tornillo vertical	1	10	10	104	1.64	170.56	365	62,254.40
tornillo horizontal	1	6.2	10	62	1.64	101.68	365	37,113.20
motor dosificador	1	0.1	10	1.2	1.64	1.968	365	718.32
motor agitador en tanque de preparación	1	1.5	10	15	1.64	24.6	365	8,979.00
motor agitador en tanque de maduración	1	0.6	10	5.5	1.64	9.02	365	3,292.30
bomba dosificadora polímero	2	0.8	10	15	1.64	24.6	365	8,979.00
soplador biogas a calderas	1	3.5	24	84	1.64	137.76	365	50,282.40
bomba de alimentación a calderas	2	2	24	96	1.64	157.44	365	57,465.60
bomba de recirculación de agua caliente	2	5	24	240	1.64	393.6	365	143,664.00
soplador para membrana exterior gasómetro	1	1.2	24	28.8	1.64	47.232	365	17,239.68
extractor de olores	1	0.4	24	8.88	1.64	14.5632	365	5,315.57
ventilador para el área de deshidratación	1	4	10	40	1.64	65.6	365	23,944.00
bomba de agua de enfriamiento compresor	2	0.4	24	19.68	1.64	32.2752	365	11,780.45
bomba de agua de lavado de telas	2	12	10	240	1.64	393.6	365	143,664.00
compresor para aire de instrumentos	1	5.5	24	132	1.64	216.48	365	79,015.20
ventilador de área de compresores	1	2.6	24	62.4	1.64	102.336	365	37,352.64
ventilador para área de tanques de purga	1	0.3	24	7.2	1.64	11.808	365	4,309.92
bombas de achique	2	1.3	15	39	1.64	63.96	365	23,345.40
		km	km/lts	diesel	\$/l	\$/VIAJE	# VIAJES	\$/d
diesel		50	2	25	5	125	5	625
		\$/d mes						
mtto. personal		41700						
GASTO TOTAL EN DÓLARES		420,925.53						
GASTO TOTAL EN PESOS		4,840,643.62						

*tipo de cambio dic 2004 dólar = \$11.5



10.6.3. BENEFICIOS ANUALES

10.6.3.1. USO DE LODOS COMO ACONDICIONADOR DE SUELOS

El 7 de Febrero del 2003 la SEMARNAT otorgo el certificado de “NO PELIGROSIDAD” a los lodos para su aplicación como fertilizantes de cultivos. Para esto se realizaron varias pruebas a fin de comprobar que los valores de nutrientes y metales pesados no sobrepasaran los límites establecidos en la NOM-004-SEMARNAT-2002 (antes PROY-NOM-004-ECOL-2001) en donde se establecen las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para el aprovechamiento y disposición final de lodos residuales y bio-sólidos (tabla 10.28).

A partir de Febrero del 2003 se puso en marcha el proyecto de aplicación de biosólidos (lodos digeridos y estabilizados) en tierras de actividad agrícola del estado de Puebla.

Los terrenos fueron seleccionados en base a su bajo rendimiento y sus características (arcillosos, arenosos, erosionados). Estos se encuentran en las juntas Auxiliares de San Baltazar Tetela, Santo Tomás Chautla, San Pedro Zacachimalpa y San Francisco Totimehuacán, Durante el primer trimestre del 2003 un total de 93 mil toneladas de lodos fueron aplicadas en un área de 20 hectáreas destinadas a la producción de maíz a fin de probar la efectividad del programa.



Fig. 10.15 Vista del proceso de aplicación de lodos a terrenos agrícolas



Para noviembre del 2004 la aplicación de lodos a cultivos aumento abarcándose un área de 45 hectáreas y obteniéndose un aumento en la productividad del 156-833%. En la siguiente tabla se muestra la relación costo/beneficio por hectárea:

Tabla 10.35 Relación Costo/Beneficio por Hectárea

CONCEPTO	TESTIGO	MUESTRA CON LODOS
Labores culturales	0	2600
Insumos (Fertilizante/Lodos estabilizados)	850	950
Costo de Cosecha	130	650
TOTAL	980	4200
Precio/Kg	2.5	2.5
Volumen Cosechado (Kg)	426	2618
	1065	6545
UTILIDAD	85	2345

Como se aprecia en la tabla, debido a las condiciones del suelo en la parcela testigo los beneficios son mínimos y la poca cosecha sirve como forraje para los animales de carga, en la parcela con lodos, los gastos son mayores pero el volumen de cosecha aumenta en un 614% lo cual genera utilidades.

10.6.3.2. BENEFICIOS INDIRECTOS

En la digestión anaerobia se obtienen beneficios indirectos debido a la naturaleza del proceso, tal es el caso del ahorro en el consumo de energía, gracias al empleo del biogás en las calderas. Para la calefacción del digestor se cuenta con una caldera de 1120 kW de potencia lo cual equivale a 112.89 cc (caballos de caldera), de esta manera:

$$1 \text{ cc} = 35.71 \text{ MJ/h} = 1.13 \text{ m}^3 \text{ biogás /h}$$

$$112.89 \text{ cc} = 4032 \text{ MJ/h} = \mathbf{127 \text{ m}^3 \text{ biogás /h}}$$

Si en lugar del biogás se estuviera empleando diesel para alimentar la caldera el costo de operación anual se incrementaría considerablemente, ya que 119.35 lt/h de diesel son equivalentes a 112.89 caballos de caldera.



Por otro lado el costo derivado de la disposición final de los lodos en rellenos sanitarios asciende a \$406 por metro cúbico. La tarifa en pesos/m³ de desecho fue obtenida de SUP (Servicios Urbanos de Puebla) empresa autorizada para el manejo de lodos residuales. La empresa PASA brinda el mismo servicio a un costo semejante.

En la siguiente tabla se muestran beneficios obtenidos del proceso de digestión, la información fue brindada por personal del SOAPAP y SUP.

Tabla 10.36 Lista de Beneficios Anuales

Beneficios			
	ha cultivo/año	\$/ha	\$/año
Utilización lodos como acondicionador	32.55	6,545.00	213,063.53
	m3 lodos/año	\$/m3 residuo	\$/año
Ahorro cobro x disposición	125831	406	51,087,386.00
	MJ/año	\$/MJ	\$/año
Ahorro Energía x uso de biogás en calderas	70640640	0.13	9,183,283.20
BENEFICIO TOTAL EN DÓLARES			5,259,455.02
BENEFICIO TOTAL EN PESOS			60,483,732.73

*tipo de cambio dic 2004=\$11.5

10.6.4. RELACIÓN COSTO BENEFICIO Y PAYBACK

Con esta información podemos hacer una relación de beneficio / costo por medio de la siguiente fórmula:

$$B/C = \frac{\text{Beneficios} - \text{Costos de Operación y Mantenimiento}}{\text{Inversión inicial}}$$

Teniendo en cuenta que:

Si $B/C \geq 1.0$, el proyecto esta económicamente justificado para los gastos y la tasa de interés aplicada.

Si $B/C <$, el proyecto no es económicamente aceptado.



Debido a que el dólar presenta menos variaciones en los valores de inflación, se hará el análisis en dólares con una tasa de inflación igual al 4%. El tiempo de vida del proyecto se estima en 20 años.

- Inversión inicial en valor presente: 5,583,981.00
- Gastos anuales: 446,510.34
- Beneficios anuales a los ciudadanos: 5,259,455.02
- Tiempo de vida del proyecto: 20 años

Valor anual del costo de inversión = 5, 583,981.00 (A/P, 4%,20)= **422,534.45** por año.

$$B/C = \frac{5,259,455.02 - 452,651.78}{446,510.34} = 11.39$$

De acuerdo al factor de 11.39 obtenido, el proyecto de digestión anaerobia esta económicamente justificado. Y se cuenta con un *payback* de: **1.3** años de acuerdo a los siguientes datos:

Tabla 10.37 Análisis Económico Digestión Anaerobia

DIGESTIÓN ANAEROBIA		
Años de vida del Proyecto		20
Tasa de Interés		4%
INVERSIÓN	PESOS	DÓLARES
Costo de inversión	66,037,381.50	5,742,381.00
COSTOS DEL PROCESO		
Costos de Operación y Mantenimiento (\$/año)	4,840,643.62	420,925.53
Costo de Amortización de Capital	4,859,146.12	422,534.45
Costo de transporte (\$/año)	157,500.00	13,695.65
Labores culturales (\$/año)	84,639.45	7,359.95
Insumos (Lodos estabilizados) (\$/año)	30,925.95	2,689.21
Costo de Cosecha (\$/año)	21,159.86	1,839.99
TOTAL	9,994,014.99	869,044.78
BENEFICIOS DEL PROCESO		
Utilización lodos como acondicionador (\$/año)	213,063.53	18,527.26
Ahorro cobro x disposición (\$/año)	51,087,386.00	4,442,381.39
Ahorro Energía x uso de biogás en calderas (\$/año)	9,183,283.20	798,546.37
TOTAL	60,483,732.73	5,259,455.02
Beneficios-Gastos	50,489,717.74	4,390,410.24



10.6.5. DISCUSIÓN DEL ANÁLISIS ECONÓMICO

Acorde a los resultados obtenidos en la sección anterior podemos aseverar que la digestión anaerobia es un proceso económicamente exitoso, ya que en alrededor de 15 meses y algunos días se logra recuperar la inversión total del proceso. El costo de tratamiento por m^3 de lodo crudo es igual a $\$38.47/m^3$. La buena operación del digestor contribuye significativamente a este éxito, ya que aspectos como la reducción de volumen y producción de biogás significan ahorros anuales de $\$43,925,546.00$ por lodos no dispuestos y $\$9,183,283.20$ por uso de biogás en calderas.

Cabe mencionar que del volumen total de producción de biogás al año solo se emplea un 70% para la calefacción del digestor, el 30% restante se quema, perdiéndose así cerca de $29,958,464.44$ MJ/año, lo cual equivale a $886,791.35$ lts/año de diesel.

Los resultados obtenidos del análisis económico son satisfactorios, sin embargo surgen dudas interesantes con respecto a:

- Los beneficios por hectárea de esta tecnología
- Los gastos en los que tendría que incurrir el gobierno en caso de no existir dicha tecnología.
- Que pasaría si no se le asignara valor a las descargas contaminantes, ¿el proceso sería económicamente viable?
- En caso de no tener que pagar por disposición, cuanto se gastaría solo por transporte al lugar de confinamiento.
- Que población esta siendo beneficiada
- A mayor o menor población, como se alteran los costos por m^3 tratado
- Cual debería ser el costo por m^3 de residuo si el beneficio ambiental fuera igual a cero

A continuación se aborda cada una de estas interrogantes



Para conocer los beneficios que aporta esta tecnología por hectárea tenemos los siguientes datos:

Tabla 10.38 Valores para la aplicación de lodos a terrenos agrícolas

APLICACIÓN DE LODOS A TERRENOS AGRÍCOLAS	
Volumen de lodos digeridos (m ³ /año)	17640
Aplicación de lodos por Hectárea (Ton/Ha)	1734
Area susceptible de tratamiento (Ha/año)	32.55
Densidad aparente (Ton/m ³)	3.2

En base a las hectáreas susceptibles de tratamiento al año, se pueden estimar los costos y beneficios. A continuación se presenta el análisis económico por hectárea para el proceso de digestión:

Tabla 10.39 Análisis Económico por Hectárea

DIGESTIÓN ANAEROBIA		
Años de vida del Proyecto		20
Tasa de Interés		4%
INVERSIÓN	PESOS	DÓLARES
Costo de inversión	66,037,381.50	5,742,381.00
COSTOS DEL PROCESO		
Costos de Operación y Mantenimiento (\$/Ha)	148,697.49	12,930.22
Costo de Amortización de Capital	149,265.86	12,979.64
Costo de transporte (\$/Ha)	4,838.17	420.71
Labores culturales (\$/Ha)	2,600.00	226.09
Insumos (Lodos estabilizados) (\$/Ha)	950.00	82.61
Costo de Cosecha (\$/Ha)	650.00	56.52
TOTAL	307,001.52	26,695.78
BENEFICIOS DEL PROCESO		
Utilización lodos como acondicionador (\$/Ha)	6,545.00	569.13
Ahorro cobro x disposición (\$/Ha)	1,569,329.78	136,463.46
Ahorro Energía x uso de biogás en calderas (\$/Ha)	400,655.08	34,839.57
TOTAL	1,976,529.86	171,872.16
32.55 HECTÁREAS COSECHADAS AL AÑO		
Beneficios-Gastos	1,669,528.34	145,176.38



Ahora, cual es el beneficio real obtenido con la implementación de este proceso, para conocer las cifras se confrontan las opciones de confinamiento vs digestión anaerobia.

Tabla 10.40 Confinamiento vs Digestión Anaerobia

CONCEPTO	CONFINAMIENTO	DIGESTIÓN ANAEROBIA
Costo total de disposición sin digestión	51,087,386.00	-
Costo de transporte	-	157,500.00
Costo de operación y mantenimiento	-	4,840,643.62
Costo de amortización de Capital	-	4,859,146.12
Labores culturales	2,600.00	84,639.45
Insumos (Fertilizante/Lodos estabilizados)	850.00	30,925.95
Costo de Cosecha	130.00	21,159.86
costo total cosecha \$/año	116,542.01	-
TOTAL	51,203,928.01	9,994,014.99
beneficios a los agricultores \$/año	34,669.62	213,063.53
ahorro por uso de biogas \$/año	-	9,183,283.20
		9,396,346.73
UTILIDAD	- 51,169,258.39	- 597,668.26
Beneficio ambiental	50,489,717.74	

De la tabla podemos observar que el costo por llevar a confinamiento los lodos ascendería a \$51, 169,258.39; con la implementación del proceso de digestión esa cifra se reduce a \$597,668.26 pesos al año. El beneficio real, es el ahorro de \$50, 489,717.74 pesos al año.

El análisis previo nos sirve de base para responder la siguiente pregunta, ¿se justifica el proceso de digestión anaerobia si no se le asigna un valor a la disposición de descargas contaminantes?

Tabla 10.41 Confinamiento vs Digestión Anaerobia.2do análisis

CONCEPTO	CONFINAMIENTO	DIGESTIÓN ANAEROBIA
Costo total de disposición sin digestión	-	-
Costo de transporte	-	157,500.00
Costo de operación y mantenimiento	-	4,840,643.62
Costo de amortización de Capital	-	4,859,146.12
Labores culturales	2,600.00	84,639.45
Insumos (Fertilizante/Lodos estabilizados)	850.00	30,925.95
Costo de Cosecha	130.00	21,159.86
costo total cosecha \$/año	116,542.01	-
TOTAL	116,542.01	9,994,014.99
beneficios a los agricultores \$/año	34,669.62	213,063.53
ahorro por uso de biogas \$/año	-	9,183,283.20
		9,396,346.73
UTILIDAD	- 81,872.39	- 597,668.26



La respuesta es no, como en la mayoría de los procesos destinados a reducir la contaminación, el proyecto no es económicamente viable si no se tiene la legislación adecuada que dé un valor a los efectos causados por descargas de residuos contaminantes a la naturaleza, si no se le da un valor a los pasivos ambientales.

Aun cuando no se cobrara ninguna tarifa por recibir lodos residuales en el relleno sanitario, el costo anual por transportarlos a disposición final equivaldría a \$1, 123,670.83.

En México por habitante se generan 180 litros de agua residual al día, de acuerdo a los resultados obtenidos se generan 0.54 l de lodos crudos por habitante al día. De esta manera, el volumen tratado por digestión anaerobia cubre las descargas de 633,334 habitantes de la ciudad de Puebla.

Con toda la información obtenida para el proceso de digestión anaerobia, se hizo un análisis de los beneficios para distintas poblaciones.

Tabla 10.42 Escalamiento de los beneficios obtenidos de la D.A. por población

Número de habitantes (hab)	100,000.00	300,000.00	633,334.00	650,000.00	750,000.00
litros de agua por habitante (l/hab ·d)	180.00	180.00	180.00	180.00	180.00
m ³ agua residual	18,000.00	54,000.00	114,000.12	117,000.00	135,000.00
Producción lodos crudos (m ³ L.C./d)	54.43	163.30	344.74	353.81	408.25
Producción lodos digeridos (m ³ L.D. /d)	7.63	22.89	48.33	49.60	57.23
Producción de biogás (m ³ /d)	1,372.67	4,118.02	8,693.61	8,922.38	10,295.05
Hectáreas beneficiadas (Ha/día)	0.01408	0.04225	0.08919	0.09154	0.10562
Energía obtenida (MJ/d)	43,513.75	130,541.24	275,587.34	282,839.34	326,353.09
Años de vida del Proyecto	20.00				
Tasa de Interés	0.04				
INVERSIÓN					
Costo de inversión	41,362,534.25	54,155,807.33	66,037,381.50	66,509,775.81	69,193,482.85
COSTOS DEL PROCESO					
Costos de Operación y Mantenimiento (\$/año)	764,311.35	2,292,934.04	4,840,643.62	4,968,023.74	5,732,335.09
Costo de Amortización de Capital	3,043,527.67	3,984,879.09	4,859,146.12	4,893,905.72	5,091,377.58
Costo de transporte (\$/año)	24,868.42	74,605.26	157,500.17	161,644.74	186,513.16
Labores culturales (\$/año)	13,364.12	40,092.37	84,639.54	86,866.80	100,230.92
Insumos (Lodos estabilizados) (\$/año)	4,883.04	14,649.13	30,925.98	31,739.79	36,622.84
Costo de Cosecha (\$/año)	3,341.03	10,023.09	21,159.88	21,716.70	25,057.73
TOTAL	3,854,295.63	6,417,182.99	9,994,015.30	10,163,897.49	11,172,137.32
BENEFICIOS DEL PROCESO					
Utilización lodos como acondicionador (\$/año)	33,641.61	100,924.83	213,063.75	218,670.46	252,312.07
Ahorro cobro x disposición (\$/año)	8,066,429.37	24,199,288.11	51,087,439.78	52,431,790.89	60,498,220.26
Ahorro Energía x uso de biogás en calderas (\$/año)	1,449,830.80	4,349,492.39	9,182,271.37	9,423,900.17	10,873,730.97
TOTAL	9,549,901.77	28,649,705.32	60,482,774.90	62,074,361.53	71,624,263.31
Beneficio ambiental	5,695,606.14	22,232,522.33	50,488,759.60	51,910,464.04	60,452,125.99

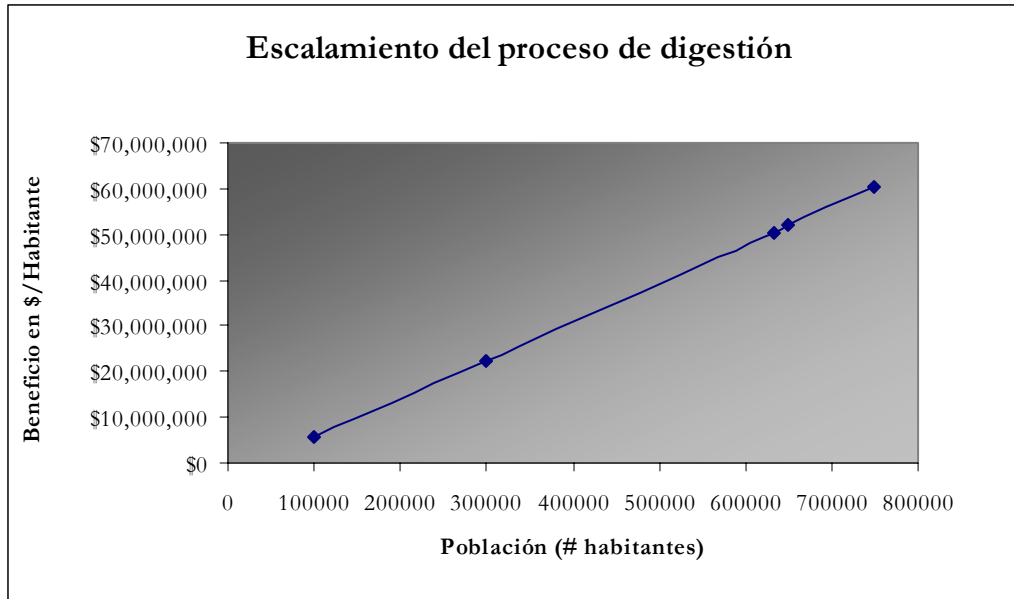


Fig. 10.16 Escalamiento del proceso de digestión

En la gráfica apreciamos que la relación de \$/habitante tiene un comportamiento lineal.

Los datos anteriores nos ayudan también a estimar la tarifa de disposición de lodos de forma que los beneficios sean igual a cero, el costo por disposición disminuye conforme aumenta la población. Para 633,334 habitantes la tarifa sería de \$4.76 por m^3 , para una población menor el costo se incrementa. La tarifa que se paga actualmente es de \$406/ m^3 .

A lo largo de todo el monitoreo se observó la presencia de material de gran tamaño de tipo plástico que tenía que ser removido de la entrada y la salida del digestor, de la misma forma al realizar las distintas pruebas para la caracterización de los flujos de entrada y salida se encontraron trozos de plástico de distintos grosores desde bolsas hasta pedazos de pelotas, si bien esto no altera el desempeño de las bacterias, antes les proporciona un medio de soporte, si constituye un riesgo para la operación del proceso, ya que si no se realizan las labores de limpieza adecuadas podría obstruir completamente las tuberías y causar daños considerables.



En México la aplicación de la digestión anaerobia esta subestimada, las condiciones climáticas que brinda nuestro país son sin duda inmejorables y se podrían obtener grandes beneficios con la implementación de esta tecnología. El impacto directo benéfico para la población, podría llegar con la distribución del biogás hasta sus casas, previa remoción del contenido de ácido sulfhídrico. La aplicación de los lodos a terrenos agrícolas ya esta dando resultados, no sólo en la economía de los pobladores de la región, si no que indirectamente los nutrientes que son retirados por las plantas cada cosecha están regresando, contribuyendo así al equilibrio ecológico evitando la erosión y desertificación de las tierras de cultivo.

Así mismo el uso de biogás como combustible alternativo ayuda a minimizar la emisión de gases invernadero, en México esta tecnología no ha tenido mucho éxito debido a la demanda de combustibles fósiles, sin embargo, tarde o temprano se tendrá que voltear hacia nuevas alternativas para cubrir la demanda energética, de ahí la importancia que tiene conocer sus alcances y limitaciones, que sólo se encuentran en los elevados costos de inversión, ya que la digestión puede aplicarse a distintos sustratos y cargas orgánicas, desde aguas residuales, lodos provenientes del tratamiento, descargas industriales, residuos ganaderos, etc., y los resultados siempre serán los mismos, un residuo estabilizado y un flujo de metano.