

20
28

00361
19
2eje.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

OBTENCION DE LODOS GRANULARES EN UN
REACTOR UASB A PARTIR DE LODOS DE PURGA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE

MAESTRIA EN CIENCIAS (BIOLOGIA)

P R E S E N T A

GLORIA MORENO RODRIGUEZ

DIRECTOR DE TESIS: DR. ADALBERTO NOYOLA ROBLES

MEXICO, D.F.

1994

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICADA AFECTUOSAMENTE A:

Roberto, Paulina E. y Aldo R.

Fuentes de amor y puntales de mi vida

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Adalberto Noyola Robles, su acertada dirección de tesis y apoyo hicieron posible la realización de este trabajo.

Al Dr. Jean Pierre Guyot, sus valiosas sugerencias contribuyeron a enriquecer esta tesis.

A los integrantes del jurado por la revisión del manuscrito.

Al Instituto de Ingeniería que proporcionó equipo e instalaciones para este trabajo.

Un agradecimiento muy especial a mis compañeros de trabajo por su motivación e interés brindados durante todo el trabajo de tesis.

A la Srta. Yolanda Rivera Sánchez, por su eficiente labor de mecanografía.

LISTA DE TABLAS	I
LISTA DE FIGURAS	IV
NOMENCLATURA	VI
RESUMEN	VIII

CAPITULO 1

INTRODUCCION	1
--------------	---

CAPITULO 2

LA DIGESTION ANAEROBIA EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	3
--	---

2.1 TRATAMIENTO BIOLOGICO DE AGUAS RESIDUALES	4
2.2 ETAPAS DE LA DIGESTION ANAEROBIA	7
2.3 MICROBIOLOGIA Y BIOQUIMICA	10
2.3.1 BACTERIAS FORMADORAS DE ACIDOS GRASOS	10
2.3.2 BACTERIAS ACETOGENAS PRODUCTORAS OBLIGADAS DE HIDROGENO (OHPA)	11 12
2.3.3 BACTERIAS HOMOACETOGENAS	13
2.3.4 BACTERIAS METANOGENAS	14
2.3.5 BACTERIAS SULFATO-REDUCTORAS (SR)	16
2.4 FACTORES AMBIENTALES	17
2.4.1 TEMPERATURA	18
2.4.2 NUTRIMENTOS	18

CAPITULO 3

TIPOS DE REACTORES ANAEROBIOS 21

3.1 REACTOR ANAEROBIO DE LECHO DE LODOS Y DE FLUJO ASCENDENTE (UASB) 22

CAPITULO 4

GRANULACION 25

4.1 CONDICIONES AMBIENTALES 27

4.2 CONDICIONES DE OPERACION 27

4.2.1 ADHESION BACTERIANA 28

4.3 POLIMEROS EXTRACELULARES 29

4.4 EFECTO DEL CALCIO 30

4.5 COMPOSICION QUIMICA DE LOS GRANOS 31

4.6 MORFOLOGIA Y COMPOSICION MICROBIANA 32

4.7 ACTIVIDAD METANOGENA DEL LODO 33

4.8 HIPOTESIS DE GRANULACION 35

4.8.1 Hulshoff Pol *et al.* (1988) 36

4.8.2 De Zeeuw *et al.* (1988) 37

4.8.3 Weigant (1988); Teoría del Spaghetti 37

4.8.4 Sam-Soon *et al.* (1988) 37

4.9 MODELO EN MULTICAPAS DEL GRANO ANAEROBIO 39

Guiot *et al.* (1991)

CAPITULO 5

IMPORTANCIA DEL INOCULO 44

5.1 OBTENCION DEL INOCULO 44

5.2 ANTECEDENTES EXPERIMENTALES DEL ESTUDIO 45

CAPITULO 6

MATERIAL Y METODO	47
6.1 ARREGLO EXPERIMENTAL	47
6.1.1 ARRANQUE DE LOS REACTORES	49
6.1.2 CORRIDAS REALIZADAS	49
6.2 ADICION DE SUSTRATOS	51
6.2.1 VINAZA-MELAZA	51
6.2.2 GLUCOSA	52
6.2.3 GLUCOSA + NH_4^+	52
6.3 TECNICAS DE ANALISIS	53
6.3.1 ANALISIS FISICOQUIMICOS	53
6.3.2 ANALISIS MICROBIOLÓGICOS	56

CAPITULO 7

RESULTADOS	58
7.1 PARAMETROS FISICOQUIMICOS	58
7.1.1 CORRIDA 1	58
7.1.2 CORRIDA 2	63
7.1.3 CORRIDA 3	68
7.1.4 CORRIDA 4	73
7.1.5 CORRIDA 5A (SIN VINAZA-MELAZA)	79
7.1.6 CORRIDA 5B (CON VINAZA-MELAZA)	83
7.1.7 CORRIDA 6A (SIN GLUCOSA)	90
7.1.8 CORRIDA 6B (CON GLUCOSA)	95
7.1.9 CORRIDA 7A (CON GLUCOSA SIN NH_4^+)	101
7.1.10 CORRIDA 7B (CON GLUCOSA Y NH_4^+)	106
7.2 PARAMETROS MICROBIOLÓGICOS	111
7.2.1 LODO DE ALIMENTACION	111
7.2.2 CORRIDAS 1 y 2	112
7.2.3 CORRIDAS 3 y 4	113
7.2.4 CORRIDAS 5A y 5B	115
7.2.5 CORRIDA 6A	116
7.2.6 CORRIDA 6B	119
7.2.7 CORRIDA 7A	120
7.2.8 CORRIDA 7B	129

CAPITULO 8

DISCUSION	137
8.1 PARAMETROS FISICOQUIMICOS	137
8.1.1 EFECTO DE LA VELOCIDAD ASCENDENTE	137
8.1.2 EFECTO DE LA CARGA ORGANICA	141
8.1.3 EFECTO DE LA ADICION DE SUSTRATO	143
8.1.4 EFECTO DE LA ADICION DE NH_4^+	146
8.1.5 EFECTO DE LA ADICION DE SUSTRATOS SOBRE LA GRANULACION	148
8.1.6 EFECTO DE LA TEMPERATURA	150
8.1.7 EFECTO DEL pH	151
8.2 PARAMETROS MICROBIOLÓGICOS	152
8.2.1 ACTIVIDAD METANOGENA ESPECIFICA	152
8.2.2 NUMERO MAS PROBABLE (NMP)	159
8.3 OPERACION DEL REACTOR EN CONDICIONES CERCANAS DE ESTRATIFICACION PARA PROMOVER LA GRANULACION DE ACUERDO A Sam-Soon et al. (1987)	163

CAPITULO 9

CONCLUSIONES	170
--------------	-----

CAPITULO 10

BIBLIOGRAFIA	172
ANEXO 1. PARAMETROS FISICOQUIMICOS	182
ANEXO 2. PARAMETROS MICROBIOLÓGICOS	205
ANEXO 3. MEDIOS ANAEROBIOS	211

LISTA DE TABLAS

No. Tabla		
2.1	Principales ventajas y desventajas que presentan la digestión anaerobia	6
4.1	Sustratos sintéticos en los que se ha obtenido lodo granular en reactores UASB	26
4.2	Relación de algunos tipos de agua residual en que se ha observado granulación con sistemas UASB	26
4.3	Actividad metangena específica de lodos granulares cultivados en diferentes aguas residuales	34
4.4	Sustratos en que se ha reportado la estratificación del grano	40
6.1	Condiciones de operación para la obtención de lodo granular anaerobio en reactores UASB	50
6.2	Frecuencia de los análisis fisicoquímicos en los reactores UASB	53
6.3	Análisis adicionales en la cama de lodos (Corrida 7A y 7B)	54
6.4	Análisis microbiológicos en la cama de los reactores	56
7.1.1	Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos en la Corrida 1	59
7.1.2	Valores promedio de los análisis fisicoquímicos en la Corrida 2	64
7.1.3	Valores promedio de los análisis fisicoquímicos en la Corrida 3	69
7.1.4	Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos en la Corrida 4	74
7.1.5	Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos en la Corrida 5A (sin vinaza-melaza)	80
7.1.6	Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos en la Corrida 5B (sin vinaza-melaza)	85
7.1.7	Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos en la Corrida 6A (sin glucosa)	91
7.1.8	Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos en la Corrida 6B (con glucosa)	96

7.1.9	Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos en la operación de la Corrida 7A (con glucosa)	102
7.1.10	Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos en la Corrida 7B (con glucosa y NH_4^+)	107
7.2.1	Cuantificación del NMP de bacterias anaerobias en las Corridas 1 y 2	113
7.2.2	Cuantificación del NMP de bacterias anaerobias en las Corridas 3 y 4	114
7.2.3	Cuantificación del NMP de bacterias anaerobias en las Corridas 5A y 5B	116
7.2.4	Cuantificación del NMP de bacterias anaerobias en la Corrida 6A	117
7.2.5	Cuantificación del NMP de bacterias anaerobias en la Corrida 6B	119
7.2.6	Cuantificación del NMP de bacterias anaerobias en la Corrida 7A	122
7.2.7	Actividad metanógena específica obtenida del lodo de la Corrida 7A	122
7.2.8	Resultados de diversos parámetros a diferentes alturas de la cama de lodos. Corrida 7A	123
7.2.9	Cuantificación del NMP de bacterias anaerobias en la Corrida 7B	129
7.2.10	Actividad metanógena específica del lodo de la Corrida 7B	130
7.2.11	Resultados de diversos parámetros a diferentes alturas de la cama de lodos en la Corrida 7B	136
8.1.1	Efecto de la velocidad ascendente sobre la formación de lodo granular	138
8.1.2	Efecto de la carga orgánica sobre la formación de lodo granular	142
8.1.3	Efecto de la adición de sustrato sobre la formación de lodo granular	144
8.1.4	Efecto de la adición de amonio sobre la formación de lodo granular	147
8.1.5	Principales cationes y vitaminas presentes en la melaza de caña	149
8.2.1	Comparación de la actividad metanógena específica calculada vía producción de metano en reactor y en lote (prueba convencional)	153

8.2.2	Valores de la actividad metanógena específica producida en sustratos ricos en carbono	154
8.2.5	Variación del NMP de las bacterias fermentativas en las corridas sin sustrato	162
8.3.1	Valores promedio de la relación DQO/HN_3 , Prot/SSV y biomasa de las Corridas 7A y 7B	165

LISTA DE FIGURAS

No. Figura		
2.1	Esquema del flujo de energía en los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales	5
2.2	Esquema del flujo de energía en la digestión anaerobia de la materia orgánica particulada a metano	8
2.3	Principales bacterias involucradas en cada etapa de la digestión anaerobia	11
3.1	Representación esquemática del reactor de lecho de lodos con flujo ascendente	23
4.1	Modelo en multicapas del grano anaerobio y sus características más relevantes. Guiot <i>et al.</i> (1991)	43
6.1	Diagrama del equipo experimental para la obtención de lodo granular anaerobio en reactores UASB	48
7.1.1	Variación de los SST, DQOt y DQOs. Corrida 1	61
7.1.2	Variación del pH y alcalinidad. Corrida 1	62
7.1.3	Variación de los SST, DQOt y DQOs. Corrida 2	66
7.1.4	Variación del pH alcalinidad y producción de biogás. Corrida 2	67
7.1.5	Variación de los SST, DQOt y DQOs. Corrida 3	70
7.1.6	Variación del pH, alcalinidad y producción de biogás. Corrida 3	72
7.1.7	Variación de los SST, DQOt y DQOs. Corrida 4	76
7.1.8	Variación del pH, alcalinidad y producción de biogás. Corrida 4	78
7.1.9	Variación de los SST, DQOt y DQOs. Corrida 5A	82
7.1.10	Variación del pH, alcalinidad y producción de biogás. Corrida 5A	84
7.1.11	Variación de los SST, DQOt y DQOs. Corrida 5B	87
7.1.12	Variación del pH, alcalinidad y producción de biogás. Corrida 5B	89

7.1.13	Variación de los SST, DQOt y DQOs. Corrida 6A	93
7.1.14	Variación del pH, alcalinidad y producción de biogás. Corrida 6A	94
7.1.15	Variación de los SST, DQOt y DQOs. Corrida 6B	97
7.1.16	Variación del pH, alcalinidad y producción de biogás. Corrida 6B	100
7.1.17	Variación de los SST, DQOt y DQOs. Corrida 7A	103
7.1.18	Variación del pH, alcalinidad y producción de biogás. Corrida 7A	105
7.1.19	Variación de los SST, DQOt y DQOs. Corrida 7B	108
7.1.20	Variación del pH, alcalinidad y producción de biogás. Corrida 7B	111
7.2.1	Cinética de consumo de ácido acético, propiónico y butírico. Lodo de la Corrida 6A	118
7.2.2	Cinética de consumo de ácido acético, propiónico y butírico. Lodo de la Corrida 6A	121
7.2.3	Cinética de consumo del ácido acético a distintos tiempos de operación. Lodo de la Corrida 7A	124
7.2.4	Cinética de consumo al ácido propiónico a distintos tiempos de operación. Lodo de la Corrida 7A	125
7.2.5	Cinética de consumo al ácido butírico a distintos tiempos de operación. Lodos de la Corrida 7A	126
7.2.6	Cinética de consumo al ácido acético a distintos tiempos de operación. Lodos de la Corrida 7B	132
7.2.7	Cinética de consumo al ácido propiónico a distintos tiempos de operación. Lodos de la Corrida 7B	133
7.2.8	Cinética del ácido butírico a distintos tiempos de operación. Lodo de la Corrida 7B	134
8.2.1	Comparación del NMP de bacterias anaerobias con y sin sustrato a distintos tiempos de operación	161
8.3.2	Perfil de SSV a diferentes niveles de la cama de lodos	167
8.3.3	Relación proteína/SSV a diferentes niveles de la cama de lodos	168

AGV's	Acidos grasos volátiles
Alcal.	Alcalinidad
CO _{org}	Carga orgánica del sustrato
CO	Carga orgánica
CV	Porciento del coeficiente de variabilidad
DQO _t	Demanda Química de Oxígeno total
DQO _s	Demanda Química de Oxígeno soluble
% E	Porciento de la eficiencia de remoción
F	Bacterias fermentativas
IVL	Indice volumétrico de lodos
MA	Bacterias metanógenas acetoclásticas
MH	Bacterias metanógenas hidrogenófilas
NMP	Número más probable de bacterias anaerobias
OHPA _b	Bacterias acetógenas productoras obligadas de hidrógeno consumidoras de butirato
OHPA _p	Bacterias acetógenas productoras obligadas de hidrógeno consumidoras de propionato
POR	Potencial de óxido reducción
pH _L	Potencial de Hidrógeno del lodo
Q _i	Flujo de alimentación
Q _{irecirc}	Gasto de recirculación
S	Gasto estándar
SR	Bacterias sulfato reductoras
SST	Sólidos suspendidos totales
SSF	Sólidos suspendidos fijos
SSV	Sólidos suspendidos volátiles
STT	Sólidos totales totales
STF	Sólidos totales fijos
STV	Sólidos totales volátiles
TPN	Temperatura y presión normales (273°C y 1 atm)
TRH	Tiempo de retención hidráulico
T	Temperatura
UASB	Reactor anaerobio de lecho de lodos y flujo ascendente
H _{bt}	Tasa de crecimiento máximo sobre butirato
μ _{Hglu}	Tasa de crecimiento máximo sobre glucosa
μ _{Hpr}	Tasa de crecimiento máximo sobre propionato

V_{asc}

Velocidad ascendente

V+M

Solución de vinaza-melaza

X

Promedio estadístico

RESUMEN

La aplicación de la tecnología UASB para la depuración de efluentes domésticos e industriales, actualmente se encuentra limitada por la carencia de lodo granular anaerobio para la inoculación de los reactores.

En este trabajo se estudió la transformación microbiológica del lodo aerobio de purga de un sistema de lodos activados en lodo anaerobio floculento-granular, con el propósito de obtener lodo de inóculo para estos reactores.

Se trabajó con dos reactores de laboratorio tipo UASB de 4.5 l a 35°C y una ligera agitación de 5 rpm en un total de 10 corridas. Las variables experimentales fueron: velocidad ascendente (V_{asc}), la carga orgánica (CO), la adición de sustratos (solución de vinaza-melaza y glucosa) y un exceso de nitrógeno en forma de NH_4Cl .

El efecto de las variables anteriores se determinó mediante parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y de actividad metanógena específica.

Se observó que altas V_{asc} (0.3 m/h) promueven la formación de lodo floculento con menores índices volumétricos (IVL) de 32 ml/g, a diferencia de bajas V_{asc} (0.013 y 0.024 m/h) en que se obtuvo un IVL de 74 ml/g. En cuanto a la variación de la carga orgánica (1.5 y 0.7 g SST/l·d) bajo la misma V_{asc} (0.3 m/h) sin adición de sustrato, no tuvieron efecto aparente sobre las propiedades de sedimentación de los lodos. La influencia que los sustratos tuvieron sobre los lodos fue notoria, principalmente con la solución de vinaza-melaza con la que se obtuvo un grano de 2 mm durante la primera mitad de la corrida. La adición de glucosa no provocó la granulación, aunque sí favoreció su transformación en un lodo floculento-granular. Adicionalmente, se incrementó la actividad metanogénica del lodo, principalmente de tipo acetoclástico; con la glucosa se obtuvo una actividad de 0.24 g de 0.09 g $DQO-CH_4/g$ SSV·d para el control: valores inferiores a los de un lodo típicamente granular (1 a 1.5 g $DQO-CH_4/g$ SSV·d). Sin embargo, la actividad de este lodo ha demostrado ser adecuada para la inoculación de otros reactores de laboratorio, además de que se genera en continuo y a partir de un lodo aerobio de purga.

Los resultados del NMP mostraron que la adición de sustratos promovieron incrementos significativos en el tamaño de las poblaciones al final de las corridas, comparado con las que no los tuvieron; un incremento substancial de las bacterias hidrogenófilas y fermentativas. Sin embargo no se observó una correlación evidente entre la actividad metanógena específica y el número de bacterias de los diferentes grupos tróficos en el transcurso del tiempo.

Bajo las condiciones de operación aplicadas en este estudio, la adición de NH_4^+ no propició la granulación del lodo, ni la estratificación del lecho de lodos.

Se concluye que es factible la producción de inóculo anaerobio de tipo floculento-granular para reactores UASB a partir de lodos de purga de un sistema de lodos activados, con adición de vinaza-melaza, glucosa y velocidades ascendentes del orden de 0.3 m/h.

CAPITULO 1

INTRODUCCION

Entre los problemas ambientales que enfrenta el país, se destaca por su importancia, así como por su magnitud, la contaminación del agua. Las opciones que tradicionalmente se han manejado son sistemas de tratamiento aerobio, con resultados poco satisfactorios, debido entre otras cosas al conocimiento empírico con las que han sido operadas y a los altos costos de construcción y mantenimiento, lo que restringe su construcción en número suficiente para la diversidad de aguas residuales, así como el volumen evacuado.

De lo anterior es claro que deben aplicarse opciones más adecuadas a nuestro contexto económico y social, que minimicen los problemas ya enunciados. Una alternativa es el tratamiento por vía anaerobia, en el que la tecnología UASB (Up-flow Anaerobic Sludglet Blanket por sus siglas en inglés) se perfila como la más idónea, debido a sus bajos costos de construcción, operación y mantenimiento, así como a la obtención de un subproducto útil como lo es el metano.

Sin embargo para que una tecnología sea aplicada con éxito, se debe proceder al estudio serio y metódico de todas las variables que ésta involucra, como son entre otros, la cinética y los parámetros de operación, así como aspectos fisicoquímicos y microbiológicos del sistema. Esto último es de suma importancia ya que la degradación de la materia orgánica es llevada a cabo por microorganismos, por lo que el conocimiento de los factores que favorecen o limitan su metabolismo permite optimizar las eficiencias de tratamiento en este tipo de

reactores. En este sentido una de las limitantes para la aplicación de la tecnología UASB es la carencia de lodo granular anaerobio, unidad fundamental de funcionamiento y característica distintiva de este tipo de reactores.

En la práctica, el mejor lodo para la inoculación y arranque de un reactor UASB, es aquel que proviene de un reactor que trata aguas residuales similares a las que serán tratadas. En México apenas se han arrancado los primeros reactores, por lo que es necesario desarrollar una metodología que asegure una fuente de abastecimiento, en cantidad y calidad adecuada, de lodo granular anaerobio.

Este estudio estuvo dirigido a la obtención de lodo granular anaerobio, a partir de lodo aerobio de purga de un sistema de lodos activados. Para ello se planteó el siguiente objetivo:

OBJETIVO GENERAL

Estudiar la transformación microbiológica del lodo aerobio de purga en lodo granular anaerobio en un reactor UASB.

Objetivos específicos

- Determinar el efecto de la velocidad ascendente
- Determinar el efecto de la adición de sustrato
- Operar cerca de las condiciones propuestas por Sam-Soon et al. (1988) para la obtención de lodo granular anaerobio.

CAPITULO 2

LA DIGESTION ANAEROBIA EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

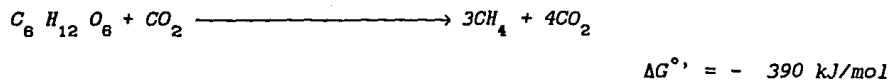
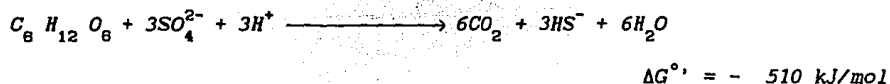
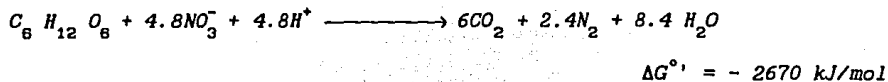
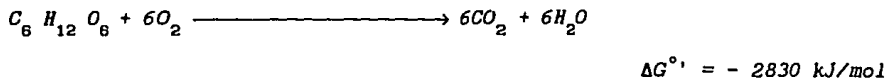
Hasta antes de la crisis energética de 1973, el proceso de digestión anaerobia sólo se aplicaba para digerir lodos purgados de procesos aerobios o estiércoles y residuos agrícolas para producir biogás y abonos, pero no se consideraba como una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Frente a los sistemas aerobios, se asumía que la digestión anaerobia era un proceso inherentemente inestable, con bajas tasas de crecimiento de bacterias e incapaz de soportar altas cargas orgánicas. Esta concepción de la digestión anaerobia se debía al escaso conocimiento que se tenía de los aspectos básicos de la microbiología y bioquímica del proceso; sin embargo, aún cuando quedan por resolver un gran número de interrogantes, en muchos de estos aspectos el avance ha sido importante.

En años recientes, el auge de la biotecnología en general y la necesidad de encontrar solución al tratamiento de aguas residuales han dado pie a numerosas investigaciones sobre la aplicación de la digestión anaerobia en la depuración de efluentes.

En este contexto se revalora el potencial de la digestión anaerobia, como un método efectivo para el tratamiento de muchos residuos, siendo particularmente útil cuando se tratan efluentes a temperaturas superiores a la ambiente o con altas concentraciones, tanto de sólidos orgánicos solubles como en suspensión.

2.1 TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE AGUAS RESIDUALES

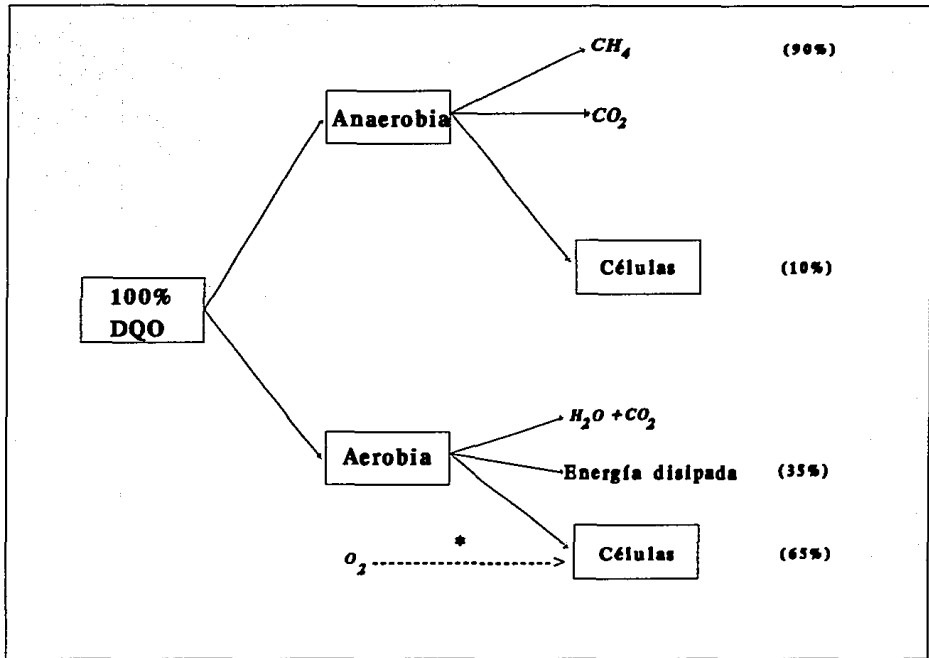
La principal división de los procesos biológicos para el tratamiento de aguas residuales se hace con base en la vía metabólica seguida por los microorganismos y en el tipo de aceptor final de electrones. Así, se tienen procesos aerobios que requieren oxígeno y procesos anaerobios que operan en ausencia de oxígeno. El papel del oxígeno como aceptor de electrones en las reacciones de oxidación aerobia, es sustituido en la vía anaerobia por otros compuestos oxidados como nitratos, sulfatos o dióxido de carbono de la manera siguiente:



Las diferencias en los cambios de energía libre y afinidad por los sustratos, parecen determinar la secuencia en la cual la materia orgánica es transformada en ausencia de oxígeno.

Por otra parte, la presencia o ausencia de oxígeno molecular genera sistemas muy diferentes entre sí en lo referente al tipo de microorganismos presentes y a su control y operación. La aplicación del proceso anaerobio al tratamiento de desechos orgánicos tiene puntos a favor y en contra, como se resume en la **TABLA 2.1**.

La descomposición anaerobia de la materia orgánica involucra procesos metabólicos que son, desde el punto de vista bacteriano, menos eficientes con respecto a la producción de biomasa que el metabolismo aerobio. La **Figura 2.1** da una representación esquemática del flujo de



* En caso de contar con digestión aerobia de lodos de purga

FIG 2.1. Esquema del flujo de energía en los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales (Noyola, 1989).

conversión en los procesos aerobios y anaerobios. En el caso del tratamiento anaerobio, se produce menos material celular por unidad de sustrato consumido; esto se debe a que los organismos anaerobios liberan productos ricos en energía, la cual se encuentra contenida en los enlaces químicos, por lo que hay menos energía disponible para el crecimiento de bacterias anaerobias. Es decir, los microorganismos anaerobios solo aprovechan para síntesis celular y funciones vitales una pequeña fracción (alrededor del 10%) de la energía contenida en el sustrato. Estos mismos sustratos se transformarán bajo condiciones aerobias en células (65%), H_2O , CO_2 y energía disipada.

En el caso del tratamiento anaerobio la energía se encuentra en el metano, que es un energético que puede ser aprovechado, lo que hace a la digestión anaerobia muy eficiente en la conservación de la energía.

TABLA 2.1. PRINCIPALES VENTAJAS Y DESVENTAJAS QUE PRESENTA LA DIGESTION ANAEROBIA. (Adaptado de Lettinga, et al., 1982).

VENTAJAS	DESVENTAJAS
- Baja producción de sólidos biológicos de desecho	- Las bacterias anaerobias (particularmente las metanógenas) son muy sensibles a la inhibición por varios compuestos ($CHCl_3$, CCl_4 y metales pesados).
- Producción de energía en forma de metano	
- Bajo requerimiento de nutrimentos	- El arranque del proceso es lento si no se dispone de un inóculo.
- No requiere de aeración (ahorro energético)	
- Altas cargas orgánicas pueden ser aplicadas	- El tratamiento anaerobio demanda frecuentemente un postratamiento
- La actividad de los lodos anaerobios puede preservarse después de varios meses sin alimentación	- En México existe poca experiencia sobre el proceso, tanto en sus fundamentos como en su aplicación

2.2 ETAPAS DE LA DIGESTION ANAEROBIA

Se denomina digestión anaerobia a la secuencia de procesos metabólicos que originan la degradación de sustancias orgánicas en ausencia de oxígeno molecular para dar como productos una serie de compuestos cuyo grado de reducción impide su uso posterior por microorganismos anaerobios (Toerien et al., 1969; Benefield et al., 1980).

El esquema más ampliamente aceptado de la digestión anaerobia de un sustrato complejo, en el que se encuentra materia orgánica en suspensión, es propuesto por Mc Inerney et al. (1981) e involucra tres etapas: Hidrólisis y Acidogénesis, Acetogénesis y Metanogénesis. El conocimiento actual de la microbiología de estos ecosistemas, ha mostrado que la degradación anaerobia involucra básicamente los siguientes grupos de bacterias: Hidrolíticas y Fermentativas, Acetógenas (OHPA), Metanógenas Acetoclásticas y Metanógenas Hidrogenófilas. Posteriormente, se propuso que el flujo de sustratos pasa por seis distintos procesos de conversión, incluidos en las tres etapas, como se ilustra en la Figura 2.2 (Gujer y Zehnder, 1983):

Hidrólisis y Fermentación

- 1) Hidrólisis de polímeros (proteínas, carbohidratos y lípidos)
- 2) Fermentación de aminoácidos y azúcares.

Acetogénesis

- 3) Oxidación anaerobia de ácidos grasos de cadena larga y alcoholes
- 4) Oxidación anaerobia de productos intermedios, como ácidos volátiles (excepto acetato).

Metanogénesis

- 5) Conversión de acetato a metano
- 6) Conversión de hidrógeno a metano.

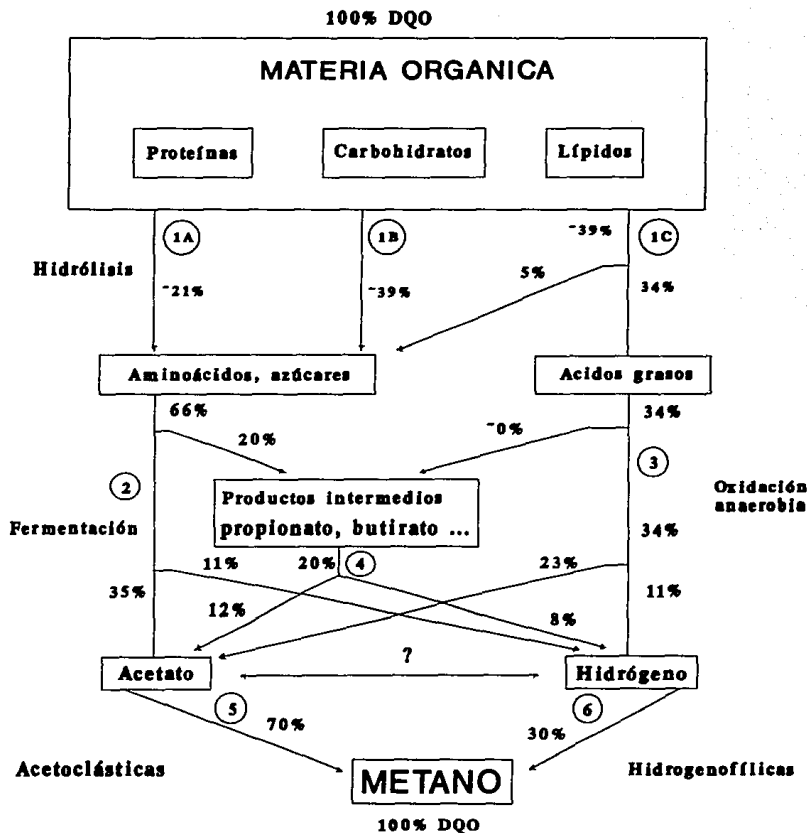


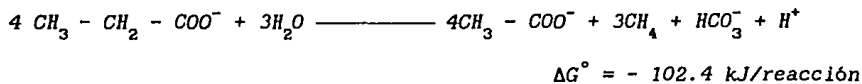
FIG 2.2 Diagrama del flujo de energía en la digestión anaerobia de la materia orgánica particulada a metano (Gujer & Zehnder, 1983).

Los ácidos grasos volátiles (AGV's) acetato, propionato, butirato, iso-butirato, valerato e iso-valerato, representan los principales intermediarios de la digestión anaerobia producidos en la primera etapa.

El propionato y butirato son degradados posteriormente, hasta acetato e hidrógeno por un grupo de bacterias conocido como OHPA (bacterias acetógenas productoras obligadas de hidrógeno, por sus siglas en inglés), las cuales deben existir en relación sintrófica con las metanógenas que utilizan hidrógeno. El acetato y el H_2 son los principales sustratos de las bacterias metanógenas.

Un fenómeno dentro del proceso que merece especial atención es la dependencia de las bacterias OHPA sobre las bacterias hidrogenófilas. El hidrógeno en esta etapa proviene de la oxidación del piridín dinucleótido reducido (NADPH); esta reacción tiene un potencial redox de -0.32 V a $pH = 7$ que con base en consideraciones termodinámicas se verá inhibida por presiones parciales elevadas de H_2 . Tales condiciones son las que definen la interrelación entre las bacterias OHPA y las bacterias metanógenas hidrogenófilas. Estas últimas se encargan de consumir el H_2 producido por las OHPA, manteniendo la presión parcial de dicho gas a los niveles requeridos y así propiciar las condiciones termodinámicas necesarias para que la conversión de los ácidos grasos en acetato e hidrógeno se lleve a cabo. Esta relación de simbiosis basada sobre el hidrógeno se le conoce como transferencia interespecie de hidrógeno.

La siguiente reacción ilustra, con el propionato, el principio de la transferencia interespecie de hidrógeno en el que participan una bacteria OHPA en simbiosis con una bacteria metanogénica.



El equilibrio entre la oxidación del propionato, descarboxilación del acetato y oxidación del hidrógeno es crucial para un proceso de digestión anaerobia estable. Las condiciones óptimas para las tres reacciones son muy limitadas y principalmente controladas por la concentración de propionato, acetato e hidrógeno libres. En un

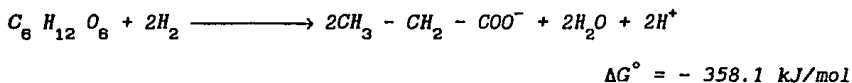
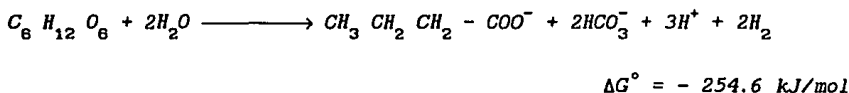
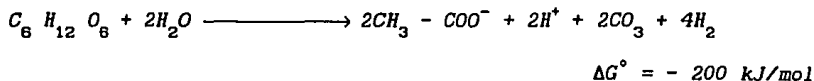
digestor estabilizado las concentraciones típicas de acetato y propionato oscilan entre 10^{-4} y 10^{-5} mol con presiones parciales de hidrógeno inferiores a 10^{-4} bar; sólo entonces las condiciones termodinámicas para la degradación del propionato son satisfechas.

2.3 MICROBIOLOGIA Y BIQUIMICA

En la Fig. 2.3 se presentan algunas de las especies bacterianas involucradas en el tratamiento anaerobio y su ubicación en las diferentes etapas el proceso de degradación, así como sus principales sustratos.

2.3.1 BACTERIAS FORMADORAS DE ACIDOS GRASOS

Estas bacterias pueden ser anaerobias facultativas o estrictas, de crecimiento rápido (tiempo mínimo de duplicación 30 min). Fermentan la glucosa para producir CO_2 , H_2 y una mezcla de ácidos acético, propiónico y butírico en función de la concentración de hidrógeno en el medio de acuerdo con las reacciones:



Durante la acidogénesis, la velocidad específica de crecimiento obtenida con glucosa, μ glucosa, se encuentra entre 0.05 a 0.3 h^{-1} .

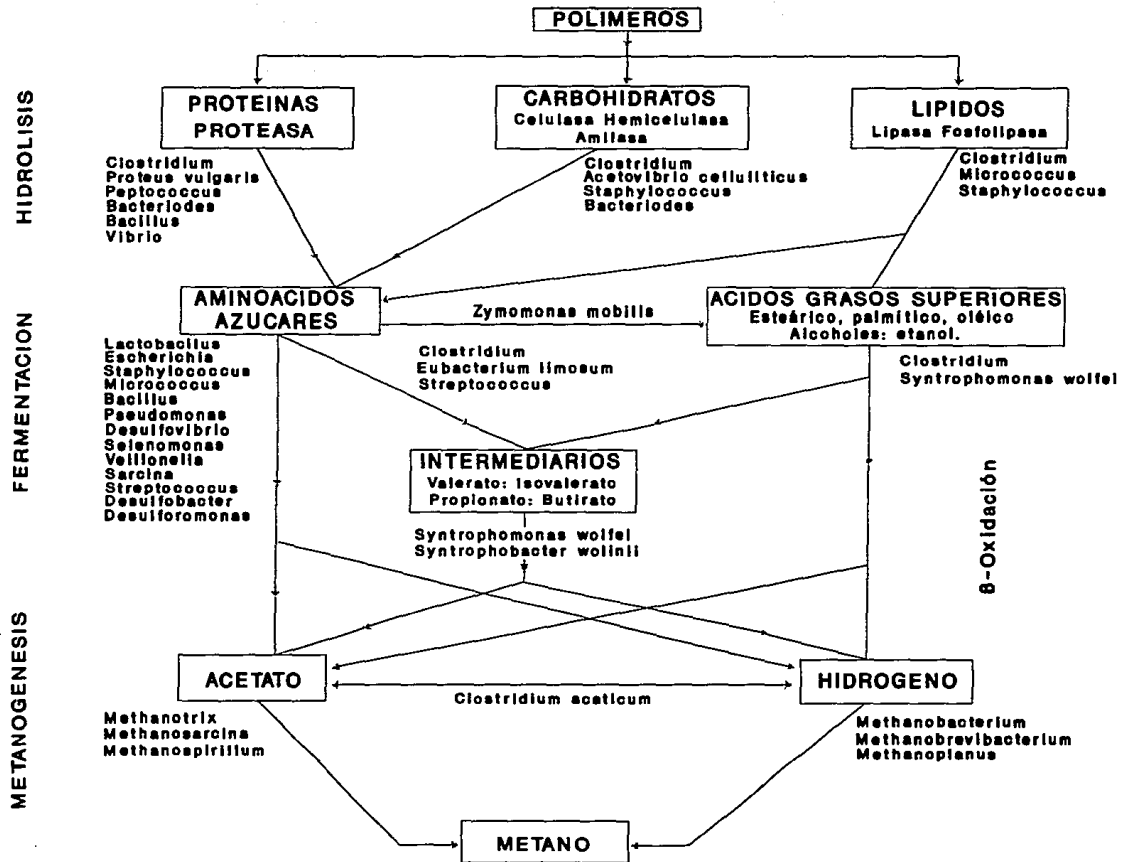


Fig. 2.3. Principales bacterias involucradas, en cada etapa de la digestión anaerobia (Stronach et al. 1986).

Cuando la concentración de H_2 en el gas producido durante la digestión es muy baja (5 a 50 ppm) existe una preferencia para la formación de ácido acético (Mosey, 1983). En cambio, cuando aumenta la concentración de H_2 , disminuye la proporción de ácido acético formado y aumentan las proporciones de ácidos de cadena mayor a dos carbonos. Además de ácidos grasos volátiles se forman alcoholes y ácidos dicarboxílicos.

Las bacterias anaerobias estrictas del género *Clostridium* constituyen una fracción importante de la población anaerobia responsable de la primera etapa, pero se ha reportado también la presencia de otros grupos bacterianos tales como *Bacteroides*, *Bacillus*, *Enterobacteriaceae*, *Pelobacter*, *Acetobacterium*, *Ilyobacter*, etc.

Si no se controla bien el reactor en esta etapa, puede ocurrir una desestabilización del proceso; en caso de una sobrecarga, la hidrólisis de la materia orgánica provoca una sobreproducción de AGV's que acidifican el sistema llevando el pH hasta valores inhibitorios.

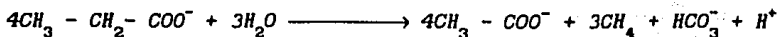
2.3.2 BACTERIAS ACETOGENAS PRODUCTORAS OBLIGADAS DE HIDROGENO (OHPA)

Durante la acetogénesis los productos de fermentación producidos anteriormente son convertidos en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono por un grupo de bacterias denominadas "bacterias acetógenas productoras obligadas de hidrógeno" (OHPA por sus siglas en inglés: (obligated hydrogen producing acetogen).

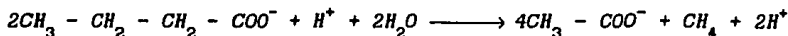
Estas bacterias son inhibidas por el hidrógeno que producen, y por tal razón viven en una relación sintrófica con las bacterias metanógenas hidrogenófilas (MH) quienes se encargan de consumir el H_2 .

Su existencia fue deducida por Mc Inerney et al. (1981), a partir de las limitaciones metabólicas que se conocían de los otros grupos de bacterias.

Las bacterias OHPA convierten, en asociación con metanógenas hidrogenófilas, los ácidos propiónico y butírico en ácido acético de acuerdo con las ecuaciones:



$$\Delta G^\circ = - 102.4 \text{ kJ/reacción}$$



$$\Delta G^\circ = - 34 \text{ kJ/reacción}$$

Durante la Acetogénesis la velocidad de crecimiento obtenido, con butirato (μ_{HBt}) es de 0.015 h^{-1} y de 0.013 h^{-1} , μ_{HPr} , con propionato.

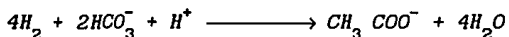
Su tiempo de duplicación es de 1.5 a 7 días. La degradación del propionato a acetato se paraliza cuando existen concentraciones de H_2 en el biogás de 500-50,000 ppm (Mosey, 1983).

El aislamiento de este tipo de bacterias es complicado debido a que su tiempo de duplicación es extremadamente largo y a la obligatoriedad de crecer en cocultivo con microorganismos que remueven el hidrógeno, lo cual dificulta la obtención de cultivos puros. Entre las especies conocidas se encuentran:

Bacteria OHPA	Sustrato de alimentación
<i>Syntrophobacter wolinii</i>	Propionato
<i>Syntrophobacter wolfeii</i>	Butirato
<i>Syntrophus buswellii</i>	Benzoato

2.3.3 BACTERIAS HOMOACETOGENAS

Este grupo es capaz de transformar una mezcla de hidrógeno, dióxido de carbono y algunos sacáridos tal como la glucosa y fructosa, en acetato únicamente, de acuerdo con la siguiente reacción:



$$\Delta G^\circ = - 104.6 \text{ kJ/reacción}$$

El crecimiento reportado para las especies acetógenas mesófilas que crecen en una mezcla de $\text{H}_2 - \text{CO}_2$ es de 0.4 a 1.9 d^{-1} . Entre las especies más estudiadas se encuentran:

Clostridium formicoaceticum

Acetobacterium woodii

Acetobacterium wieringae

Clostridium aceticum

2.3.4 BACTERIAS METANOGENAS

Las bacterias metanógenas son esenciales para la digestión anaerobia, porque son las únicas que pueden catabolizar la reacción a partir de acetato e hidrógeno para dar productos gaseosos que son CH_4 y CO_2 , en ausencia de energía luminosa o aceptores de electrones exógenos (O_2 , NO_2^- , SO_4^{2-}). Con base en estudios genéticos y bioquímicos este grupo tiene una posición filogenética especial (Archeobacterias). Su pared celular no contiene mureína y su membrana citoplásmica está constituida fundamentalmente por hidrocarburos isoprenoides, en lugar de ésteres de glicerina y ácidos grasos, como el resto de las bacterias (Thauer, 1977). Se encuentran en la naturaleza en ambientes donde priva ausencia total de oxígeno.

Contienen coenzimas específicas como la coenzima *M* (*CoM*), el *F-420*, *F-432* y *F-430* que no han sido encontrados en otros organismos, a excepción del *F-420*. Su diferente constitución química se hace ostensible gracias al *F-420*, que da una fluorescencia verde al observar bajo un microscopio de epifluorescencia a una longitud de luz ultravioleta de 420 nm.

La *CoM* químicamente es un ácido, toma parte en la síntesis del metano como portadora de grupos metilo, a través de una metil *CoM* intermediaria.

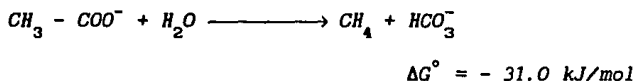
La composición inorgánica de las bacterias metanógenas muestra que contienen los nutrientes esenciales en concentraciones normales, tales como *N*, *P* y *S*, mientras que algunos micronutrientes como *Ni*, *Fe* y *Co*, están presentes en concentraciones más altas que en otros microorganismos. Esto indica un requerimiento particular de estos micronutrientes por las bacterias metanógenas.

2.3.4.1 Bacterias Metanógenas Acetoclásticas

Son las bacterias que producen metano a partir del ácido acético; su

crecimiento es demasiado lento con un tiempo mínimo de duplicación de 2 a 3 días.

Normalmente alteran el pH del medio debido a la eliminación del ácido acético y la producción de CO_2 que al disolverse forma una solución amortiguadora de bicarbonato, de acuerdo con la ecuación:



Durante la metanogénesis, la velocidad de crecimiento obtenida con acetato, (μ_{HAc}), es de 0.014 h^{-1} .

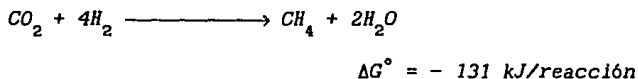
Esta reacción es de una importancia para la digestión anaerobia dado que produce el 73% del metano (Smith y Mah, 1966).

Las bacterias acetoclásticas frecuentemente encontrados en los digestores anaerobios pertenecen a dos géneros y son los siguientes:

<i>Methanosarcina thermofila</i>	<i>Methanotherix soehngenii</i>
<i>Methanosarcina mazel</i>	<i>Methanotherix concillii</i>
<i>Methanosarcina barkeri</i>	

2.3.4.2 Bacterias Metanógenas Hidrogenófilas

Utilizan el hidrógeno producido en la oxidación anaerobia para reducir el CO_2 a CH_4 según la siguiente ecuación:



Durante la metanogénesis, la velocidad de crecimiento obtenida con hidrógeno, μ_{H_2} fue de 0.06 h^{-1} .

Esta reacción tiene una doble función en el proceso de digestión anaerobia, por un lado producir metano y por el otro eliminar el H_2 gaseoso. Esta eliminación actúa sobre el potencial Redox de la

fermentación y permite a las bacterias acetógenas regenerar su $NADH^+$ lo que les permite continuar la síntesis de acético.

Con el hidrógeno que consumen regulan la producción de ácidos y la mezcla de éstos que producen las bacterias acidogénas. El hidrógeno también controla las velocidades a las que el ácido propiónico y el butírico son convertidos en ácido acético de acuerdo con la relación sintrófica antes mencionada. Por consiguiente, se puede considerar que las metanobacterias utilizadoras de H_2 regulan la digestión anaerobia (Mosey, 1983).

Estas bacterias son de crecimiento relativamente rápido, ya que su tiempo de duplicación es del orden de 6 horas; los géneros más representativos son:

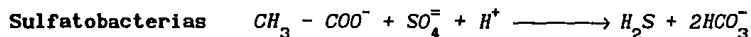
Methanobrevibacter arboriphilicus
Methanospirillum hungate

Methanobacterium formicicum

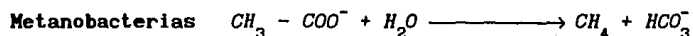
2.3.5 BACTERIAS SULFATO-REDUCTORAS (SR)

Además de las bacterias señaladas anteriormente, también existe en los digestores anaerobios, especialmente cuando hay presencia de sulfatos, un grupo de bacterias denominadas sulfato-reductoras que son organismos capaces de reducir los sulfatos a sulfuros. Estas bacterias utilizan en medio anaerobio el sulfato como aceptor final de electrones y la materia orgánica como donador de electrones.

Su importancia es grande ya que pueden competir con las metanobacterias impidiendo la formación de metano. Aunque en general las sulfato-reductoras utilizan ácidos pirúvico y láctico, algunas pueden utilizar también el acético en competencia con las metanobacterias.

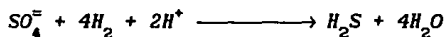


$$\Delta G^\circ = - 113 \text{ kJ/mol}$$

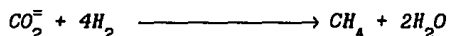


$$\Delta G^\circ = - 31 \text{ kJ/mol}$$

De estas dos reacciones, la más favorecida termodinámicamente es la producida por las sulfato-reductoras. Sin embargo, en un digestor anaerobio no se lleva a cabo en forma significativa. Por otra parte, las sulfatoreductoras pueden reducir los sulfatos, utilizando como donador de electrones el hidrógeno producido por las bacterias acidogénicas; con ello éste no puede ser utilizado por las metanobacterias.



$$\Delta G^\circ = - 150.7 \text{ kJ/reacción}$$



$$\Delta G^\circ = - 135.23 \text{ kJ/reacción}$$

2.4 FACTORES AMBIENTALES

Los microorganismos involucrados en la digestión anaerobia requieren de condiciones ambientales específicas, que permitan su crecimiento y actividad óptima, la cual se manifestará en el incremento de la biomasa, así como en altos porcentajes de remoción de la materia orgánica. Algunos parámetros están claramente tipificados, no así algunos otros en que el intervalo no ha sido bien delimitado.

2.4.1 pH

El pH óptimo para la actividad de los diferentes grupos involucrados en la digestión anaerobia depende del grupo a que pertenecen; sin embargo, se sabe que el intervalo en el que todas las bacterias pueden interactuar es alrededor de la neutralidad (6.2 - 7.8), con el óptimo de 7.0 a 7.2 (McCarty, 1964).

La regulación del pH en un reactor anaerobio, se lleva a cabo mediante el sistema ácido-base, que es el resultado de las reacciones que ocurren durante los procesos de degradación con la consecuente generación de alcalinidad. Esta alcalinidad es la que amortigua cambios bruscos en el pH mediante los sistemas ácido-base carbónico, sulfhídrico y ortofosfórico así como el amonio (NH_4^+) (Stronach et al.,

El pH ejerce una gran influencia sobre la forma y proporción en que se presenten algunos compuestos que son tóxicos para el proceso de la digestión anaerobia, como el amoníaco, el H_2S y los ácidos grasos volátiles (AGV's). En el caso de los AGV's, la forma tóxica es la no ionizada, que provoca una fuerte inhibición de las bacterias metanógenas, ya que estas moléculas pueden atravesar fácilmente la pared celular, y una vez dentro se disocian produciendo un cambio en el pH interno (Rojas, 1988).

2.4.2 TEMPERATURA

Este es un parámetro de suma importancia, dado que las reacciones bioquímicas están directamente afectadas por la temperatura. Los microorganismos pueden dividirse en tres categorías: psicrófilos (0-20°C), mesófilos (20-40°C) y termófilos (40-65°C). Las bacterias que crecen en cada uno de estos intervalos de temperatura son organismos diferentes. En los procesos anaerobios generalmente se opera en el intervalo mesófilo de 25 a 45°C, en el cual, la actividad y el crecimiento de las bacterias disminuye en un 50% por cada 10°C de descenso por debajo de 35°C.

Los cambios de temperatura en el intervalo mesófilo pueden ser tolerados, pero cuando la temperatura desciende, la carga de alimentación de un digestor anaerobio también debe ser disminuida de acuerdo con el descenso de la actividad esperada. No es aconsejable incrementar la temperatura de reactores mesófilos por encima de 40°C, ya que a temperaturas más altas ocurre un rápido deterioro de las bacterias.

En el intervalo termófilo, se logran las más altas velocidades de reacción, pero es menos practicada por la dificultad de mantener altas temperaturas y por la fragilidad del consorcio anaerobio que se desarrolla en estas condiciones. La temperatura óptima de procesos anaerobios termofilicos es de 55°C.

2.4.3 NUTRIMENTOS

Los requerimientos de nitrógeno y fósforo para el proceso anaerobio es

menor que en los procesos aerobios ($DQO_t:N:P$ de 400:5:1). Esto se debe a la baja tasa de crecimiento (síntesis celular) de las bacterias anaerobias.

Otro elemento esencial para el óptimo desarrollo microbiano, es el azufre. Los sulfuros son la mayor fuente de ese elemento, el cual juega un doble papel: a bajas concentraciones estimula la actividad metanógena y a elevadas concentraciones la inhibe. La concentración óptima de sulfuro de hidrógeno desionizado reportado en la literatura para el crecimiento metanógeno varía de 1 a 25 mg/l. La digestión anaerobia comienza a ser inhibida a partir de concentraciones del orden de 100 - 150 mg/l como H_2S , la cual es la forma más tóxica, además el sulfuro puede causar la precipitación del hierro, cobalto y níquel.

Otros nutrientes metálicos que han sido identificados como obligatorios son el hierro, níquel y cobalto; se menciona que niveles de 0.5-1.0, 0.1-0.2 y 0.2-0.4 mg/l respectivamente, son necesarios para la actividad de varios sistemas enzimáticos. Se sabe que el Ni^{+2} es un elemento esencial para las bacterias metanógenas debido a su asociación con el cofactor F_{430} . El molibdeno, tungsteno (wolframio) y selenio también se reportan como metales traza requeridos.

Por otro lado se ha reportado que la presencia de cationes divalentes como Ca^{2+} , Mg^{2+} y Ba^{2+} favorecen la granulación al crear en la superficie celular puentes entre los grupos de carga negativa.

El efecto de algunos cationes sobre los microorganismos dependen en gran medida de la concentración y forma en que éstos se encuentren en el reactor. En forma combinada estos cationes pueden tener efectos más complejos, dado que pueden interactuar de forma antagónica bajando la toxicidad, o bien sinérgica, aumentandola. A ciertas concentraciones se consideran sales tóxicas las de cobre, cinc, níquel, plomo, aluminio, cromo hexavalente y hierro, debido al efecto que producen, incrementando la cantidad de ácidos volátiles y por consiguiente la disminución en la producción de gas.

Se ha reportado que el ion amonio causa inhibición si se encuentra a concentraciones de 1500 a 3000 mg/l (Heinrichs et al. 1990). El amoníaco no disociado causa toxicidad a concentraciones del orden de 150 mg/l; la forma ionizada es menos tóxica y dado el pH cercano a la

neutralidad en un digester anaerobio, esta última es la forma predominante del nitrógeno amoniacal.

El suplemento de rivo flavina y Vitamina B12, activan en alto grado la producción de metano; sin embargo, en reactores a nivel industrial no se emplean por su alto costo. El extracto de levadura es frecuentemente usado como proveedor de nutrientes (Speece, 1983).

TIPOS DE REACTORES ANAEROBIOS

En la última década, el tratamiento anaerobio de aguas residuales ha pasado a ser una tecnología aceptada para purificar aguas residuales, tanto domésticas como de una amplia variedad de industrias. Esto ha sido posible debido al constante desarrollo de la tecnología anaerobia, lo que ha dado lugar a una serie de procesos con configuraciones diferentes que buscan optimizar el sistema, lo cual ha dado lugar a tres generaciones de reactores.

Reactores anaerobios de 1a. Generación

Comprende aquellos procesos en donde la biomasa se encuentra en suspensión o sedimentada en zonas muertas. Los más eficientes son de tipo completamente mezclado, sin recirculación de sólidos, por lo que la relación tiempo de retención celular y tiempo de retención hidráulica es igual a 1. Sus tiempos de retención son largos (desde 4 hasta más de 30 días) lo que repercute directamente en el tamaño de los reactores. A este tipo pertenecen la fosa séptica, el tanque imhoff, lagunas anaerobias, el digestor convencional y el digestor anaerobio completamente mezclado. La variante de adicionar el reciclado de lodos para incrementar la relación tiempo de retención celular/tiempo de retención hidráulica, da origen al reactor de contacto anaerobio.

Reactores anaerobios de 2a. Generación

En estos reactores los microorganismos son retenidos en el reactor, por

medio de soportes inertes que pueden ser plástico, piedra o cerámica para formar biopelículas, o bien por su capacidad sedimentación, lo que permite mantener altos tiempos de retención celular independientes del tiempo de residencia hidráulica. Esto implica una importante reducción de los volúmenes del reactor y una mayor estabilidad ante cambios en la carga orgánica de alimentación, así como una mayor facilidad en su operación.

El tiempo de retención hidráulica en estos reactores se reduce en un intervalo de 0.3 a 3 días. Los reactores pertenecientes a esa generación son el filtro anaerobio, reactor tubular de película fija y reactor anaerobio de lecho de lodos con flujo ascendente.

Reactores anaerobios de 3a. Generación

En este tipo de reactores también se retiene a los microorganismos en forma de biopelícula, adherida a pequeños núcleos de soporte como son arena o partículas plásticas, pero el soporte se expande o fluidifica con altas velocidades de flujo y tiempos de retención menores a 12 horas. La desventaja que presentan es la energía requerida para fluidificar el medio y su operación delicada. Los reactores de este tipo son el lecho fluidizado y el lecho expandido.

Actualmente los reactores anaerobios de segunda generación ofrecen la alternativa más atractiva de tratamiento, en comparación con los de primera generación, ya que estos ocupan una cantidad de espacio considerable y no todos tienen una eficiencia aceptable. Los reactores de tercera generación se encuentran aún en etapa de desarrollo.

3.1 REACTOR ANAEROBIO DE LECHO DE LODOS Y FLUJO ASCENDENTE (UASB)

El sistema más aplicado y reconocido actualmente dentro de los reactores de segunda generación, es el reactor anaerobio de lecho de lodos con flujo ascendente (UASB por sus siglas en inglés), desarrollado en Holanda por Lettinga *et al.* (1980).

La **Figura 3.1** muestra el diagrama del reactor que consiste básicamente de un tanque que contiene en la parte inferior una cama o lecho de lodos donde se lleva a cabo la digestión y en la parte superior un separador de gas-líquido-sólido, el cual evita la salida de sólidos

suspendidos en el efluente, favorece la evacuación del gas y la decantación de los flóculos que, eventualmente, llegan a la parte superior del reactor.

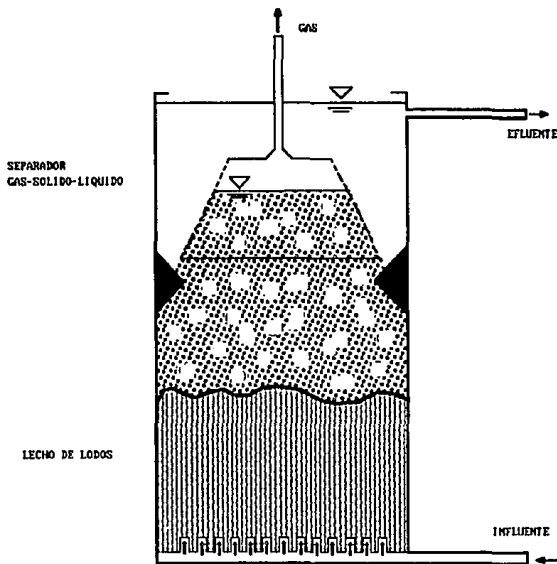


Figura 3.1 Representación esquemática del reactor de lecho de lodos con flujo ascendente (UASB)

El agua residual a tratar es uniformemente distribuida en la base del reactor y pasa a través de la cama de lodos biológicos, la cual transforma la materia orgánica en biogás (mezcla de CH_4 y CO_2), que se retiene por medio de colectores en la parte superior del reactor.

Un punto importante en su diseño es la distribución de las entradas del agua residual, ya que una mala repartición puede provocar que ciertas zonas de la cama de lodos no sean alimentadas, desperdiciando la actividad de una fracción de los microorganismos.

Su principio de funcionamiento se basa en la buena sedimentabilidad de la biomasa producida dentro del reactor, la cual se aglomera en forma de granos o "pellets" de hasta 5 mm de diámetro sin la adición de material de soporte inerte (Lettinga, et al. 1982). Este tipo de lodo se genera al operar con flujo ascendente adecuado ya que se ejerce

cierta selectividad sobre los organismos presentes, favoreciendo la formación de lodo con buenas propiedades de floculación, obteniéndose así la cama de lodos de textura granular.

Las características de los granos es contar con una actividad metanógena elevada (debido a que es un concentrado de bacterias anaerobias y material orgánico compacto), forma casi esférica y alta capacidad de decantación; esto favorece su retención dentro del reactor, con lo que se logran bajos tiempos de retención hidráulica con altos tiempos de retención de los microorganismos (Lettinga et al. 1982). Lo anterior permite el tratamiento de aguas residuales con altas cargas orgánicas (reactores más pequeños) hasta de 20 kg DQO/m³·d. Además, al no requerir material de soporte se reducen los costos de construcción y se simplifica en buen número de casos su operación y mantenimiento.

CAPITULO 4

GRANULACION

El fenómeno de la granulación se observó por primera vez en 1973-1974 en un reactor piloto de 6 m^3 inoculado con lodo de desecho digerido en una fábrica de azúcar en Breda, Holanda. Posteriormente, este mismo fenómeno se observó en un reactor piloto de 6 m^3 de una industria procesadora de papa. En ambos casos las eficiencias de remoción obtenidas con este lodo granular fueron del orden de 80-90% aplicando cargas orgánicas de $3.2-4.5 \text{ kgDQO} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ (Kulshoff Pol. 1989).

La aplicación de la tecnología UASB está en expansión y quizá la limitación más fuerte para ello sea la disponibilidad de lodos granulares, además de que existen aguas residuales que no favorecen su formación o bien que alteran las características de los lodos granulares, que son transferidos de otro reactor aún conteniendo aguas residuales similares (Archer et al., 1988). Se ha reportado granulación en presencia de varios sustratos sintéticos, así como con diversas aguas residuales (TABLAS 4.1 y 4.2).

Aunque el fenómeno de la granulación es un hecho, aún no ha sido posible unificar criterios en torno al mecanismo y condiciones que favorecen este tipo de agregación, debido en gran parte, a la diversidad de sustratos y condiciones de operación bajo las cuales se ha logrado generar.

Los trabajos dirigidos al esclarecimiento de este fenómeno cubren

TABLA 4.1. SUSTRATOS SINTETICOS EN LOS QUE SE HA OBTENIDO LODO GRANULAR EN REACTORES UASB (Modificado de Hulshoff, 1987).

S U S T R A T O	R E F E R E N C I A
Etanol y propionato	De Zeeuw, 1984; Dolfing, 1987
Acetato	De Zeeuw, 1984; Harada <i>et al.</i> 1988
Mezcla de AGV's	De Zeeuw, 1984; Harada <i>et al.</i> 1988
Sacarosa/Glucosa	Ross y Smollen, 1981; Wu <i>et al.</i> 1987 Wiegant y de Man, 1986; Wu <i>et al.</i> 1988
Gelatina	Schulze <i>et al.</i> 1988; Grotenhuis, 1988

TABLA 4.2. RELACION DE ALGUNOS TIPOS DE AGUA RESIDUAL EN QUE SE HA HA OBSERVADO GRANULACION CON SISTEMAS UASB. (Hulshoff, 1989).

TIPO DE AGUA RESIDUAL	R E F E R E N C I A
De azúcar de remolacha	Lettinga <i>et al.</i> 1980; 1984; 1985
De almidón de maíz	Ross y Smollen, 1981; Zeevalkink y Maaskant, 1983; Ross 1984; Wijbenga, 1988
Domésticas	Vieira, 1984; Vieira y Souza, 1986; Novaes, 1988; Orozco, 1988; Van der Last, 1988
Almidón	Wu <i>et al.</i> 1985
Pulpa y papel	Vuorinanta <i>et al.</i> 1985; Habets y Knelissen, 1985; Aren <i>et al.</i> 1988; Novaes, 1986; Wu <i>et al.</i> 1987
Destilería o melazas	Wu <i>et al.</i> 1987; Adeowale y Kiff 1988; Harada <i>et al.</i> 1988; Kiushan 1988
Lácteos	Clark, 1988; Killilja y Colleran, 1988
Jugo de Manzana	Dold <i>et al.</i> 1987

básicamente dos aspectos: factores abióticos como son el pH, temperatura, fuerza iónica, composición y concentración de compuestos orgánicos e inorgánicos en la solución y régimen de flujo. Por otra parte factores bióticos o inherentes a los microorganismos que incluyen hidrofobicidad y movilidad electroforética (Van Loosdrecht et al. 1987), la fisiología de las bacterias (producción de polímeros extracelulares) y la morfología de la bacteria.

Para entender el proceso de granulación en lodos anaerobios es importante conocer los factores que la afectan. Considerando que primeramente es gobernada por el crecimiento bacteriano, se verá influenciada por:

4.1 CONDICIONES AMBIENTALES

Entre las condiciones ambientales están la disponibilidad de nutrimentos esenciales para el óptimo crecimiento; la temperatura que determina la actividad metanogénica; el pH que debe ubicarse en el intervalo óptimo de 6.5 a 7.8 y por último, el tipo de agua residual que incluye la biodegradabilidad de la materia orgánica contenida, la presencia de materia en suspensión orgánica e inorgánica no biodegradable, la composición iónica, la concentración de cationes mono y divalentes y la presencia de compuestos inhibitorios.

4.2 CONDICIONES DE OPERACION

Entre las variables de operación que afectan el proceso de granulación se encuentran las condiciones aplicadas en el arranque de los reactores. Por ejemplo, la velocidad ascendente del agua residual no debe ser muy elevada, ya que las bacterias pueden ser arrastradas fuera del reactor, lo que impide el incremento de la biomasa metanogénica; por lo que el tiempo de retención hidráulico (TRH) que se recomienda es de un día; la carga orgánica inicial, que no debe sobrepasar la capacidad del lodo, se sugiere $0.2 \text{ kg DQO/m}^3 \cdot \text{d}$ al inicio de la operación, la cual se incrementará de forma consecutiva hasta la carga máxima calculada (Hulshoff, 1987).

En relación a la cantidad de inóculo utilizado, se recomienda un 30% del volumen del reactor (Stronach et al., 1986), mientras que Wu et al. (1987) recomiendan inocular con una concentración de 30 a 40 g SSV/l.

4.2.1 ADHESION BACTERIANA

Se afirma que la granulación es, en gran parte, un fenómeno metabólico y depende de la disponibilidad de sustrato. La agregación la realizan los propios microorganismos y favorece el intercambio de alimentos, presentando sinergias entre especies con transferencia de hidrógeno, lo que estimula el crecimiento microbiano (Mahoney et al., 1987).

La bioinmovilización de los microorganismos no es una característica exclusiva de los reactores UASB, ya que se ha observado en otros sistemas de tratamiento anaerobio de alta tasa como son el lecho fluidificado y los filtros anaerobios. En estos sistemas se ha aprovechado la capacidad del lodo de fijarse a una gran variedad de material de soporte como son arena, piedra y PVC entre otros.

En los procesos de tratamiento anaerobio de alta tasa, la adhesión bacteriana es el mecanismo para llevar a cabo la retención del lodo por medio de la fijación de las bacterias a medios de soporte inertes. En el caso del reactor UASB, que a diferencia de otros tipos de reactores no requiere la adición de materiales de soporte, la adhesión bacteriana juega un papel importante para colonizar las partículas inorgánicas inertes y soportes orgánicos presentes en los lodos del inóculo.

De acuerdo a Dubourgier et al. (1988) las ventajas de la agregación bacteriana son las siguientes:

- La tasa de reacción es más rápida cuando los microorganismos se encuentran a menor distancia uno de otro.
- La agregación de bacterias permite un orden heterogéneo de poblaciones de microorganismos sintróficos, en forma de asociaciones multicelulares bajo condiciones fisiológicas favorables.
- La simbiosis, en donde la interacción e intercambio genético entre organismos adyacentes es facilitada.
- El crecimiento dentro de un grano a diferencia del crecimiento en forma dispersa puede incrementar la toma de nutrimentos.

- La granulaci3n protege a las bacterias de los depredadores, como ciliados anaerobios.
- La distancia de difusi3n para la fermentaci3n de productos intermedios es m3nima en los granos; es 3sta una forma eficiente de conservar cada fracci3n de la energ3a disponible en un sistema de degradaci3n complejo.
- En condiciones donde la composici3n del medio es desfavorable para el crecimiento (valores extremos de pH), se puede crear un microambiente m3s favorable dentro del agregado para la continuaci3n del metabolismo.

4.3 POLIMEROS EXTRACELULARES

El papel de los pol3meros extracelulares (PEC) en el proceso de la granulaci3n no est3 suficientemente comprendido. Se conoce relativamente poco acerca de su naturaleza y estructura qu3mica, as3 como de las condiciones de operaci3n que podr3an favorecer su formaci3n. Sin embargo, generalmente es aceptado que los PEC juegan un importante papel en la formaci3n de matrices de soporte (o glicoc3liz) para los microorganismos. Los pol3meros pueden estar presentes en el sustrato o ser producidos por la polimerizaci3n de mol3culas precursoras simples como resultado del metabolismo.

Los principales constituyentes de los expol3meros en orden de importancia son: glucosa, ramnosa, galactosa, manosa y ribosa. El 3cido galactur3nico es responsable de la naturaleza poliani3nica de los expol3meros, seg3n lo indican los an3lisis por cromatograf3a de intercambio ani3nico.

Harada *et al.* (1988) concluyeron con base en sus observaciones por microscop3a electr3nica de barrido y de transmisi3n, que los expol3meros excretados por las bacterias acidog3nicas parecen ayudar a la fijaci3n entre c3lula y c3lula y al mejoramiento de la fuerza mec3nica y estabilidad estructural. La producci3n de PEC est3 afectada por el balance nutricional y/o por la diversidad de la microflora del gr3nulo.

De acuerdo a Alibhai y Forster (1986b) la producci3n de expol3meros

mejora a largo plazo la estabilidad del gránulo. **Dolfing (1985)** determinó experimentalmente que los polisacáridos extracelulares contribuyen en el grano con el 1-2% sobre la base de peso seco. Aún cuando las estructuras de polímeros extracelulares se observan con microscopio electrónico de barrido, la microscopía de transmisión electrónica parece indicar que éstos no tienen un papel importante en la matriz del gránulo (**Dolfing 1986**). Sin embargo, **Sam-Soon et al. (1987; 1988)** basados en el hecho de que *Methanobacterium* Cepa AZ produce exopolipéptidos bajo condiciones limitantes de cisteína, afirman que estos exopolímeros juegan un papel importante en la granulación.

4.4 EFECTO DEL CALCIO

Una atención considerable ha sido puesta en el efecto del calcio sobre el proceso de la granulación. Es bien conocido que los cationes divalentes tienen un efecto positivo sobre la floculación del lodo disperso. Se dice que los cationes divalentes condensan las capas dobles difusas lo que resulta en un mayor efecto de las fuerzas de atracción de Van der Waals. El calcio puede llevar a la formación de "puentes de calcio" como resultado de la formación de interacciones fuertes con grupos aniónicos presentes en la matriz orgánica (**Guiot et al., 1988b**). Por otro lado, los iones Ca^{2+} estimulan la actividad metanogénica a concentraciones de 100 a 200 mg/l y llegan a ser inhibitorios a concentraciones que exceden los 250 mg/l. Un factor de complicación aquí serían las relaciones de sinergismo y antagonismo entre el calcio y otros cationes.

Verrier y Albagnac (1985 en Hulshoff, 1989) encontraron que el Ca^{2+} y el sodio tienen un efecto positivo en la fijación microbiana a concentraciones superiores a 4 meq. Además de los factores ya citados sugieren la posibilidad de que otros cationes divalentes promuevan indirectamente la adhesión bacteriana por el incremento de la hidrofobicidad.

Existe en el presente el consenso general de que altas concentraciones de Ca^{2+} ejercen un efecto desfavorable sobre el desarrollo y buena calidad del lodo granular. **Wu et al. (1987)** encontraron que a 800 mg Ca^{2+} /l la granulación no evoluciona satisfactoriamente. Los granos mostraron un alto contenido de cenizas (36%) y mantenían una baja

actividad metanogénica. Guiot et al. (1988b) no encontraron un efecto positivo significativo sobre la granulación a concentraciones de Ca^{2+} de 640 mg/l. De acuerdo con sus investigaciones, el esperado efecto positivo del Ca^{2+} no se presentó debido a dos razones: 1) La formación de precipitados de $CaCO_3$, asumiendo que los precipitados no son efectivos en la formación del núcleo del grano y 2) la competencia con el sodio por los sitios de unión.

En el lodo granular, los problemas con $CaCO_3$ alrededor del grano pueden ocurrir a concentraciones por arriba de 1000 mg/l o surgir problemas a partir de la acumulación gradual de $CaCO_3$. Estos precipitados reemplazan a la biomasa activa granular y forman una cama de lodos gruesa y en su mayoría inorgánica.

Al poner en contacto lodo granular con un agente quelante del Ca^{2+} se mostró que los granos se desintegraban y llegaban a mostrarse débiles. Grotenhuis et al. (1988) concluyen que el calcio podría jugar un papel importante en la estabilidad del grano en dos formas:

1. Los precipitados de calcio inorgánico podrían servir como superficies de adhesión entre bacterias anaerobias.
2. El Ca^{2+} podría ser un constituyente de los polisacáridos extracelulares y/o proteínas las cuales están presentes como material de adhesión.

4.5 COMPOSICION QUIMICA DE LOS GRANOS

Se ha intentado caracterizar al lodo granular anaerobio con base en su composición mineral; sin embargo, la composición del mismo está determinada en gran medida por factores como:

- La precipitación de $CaCO_3$, $MgNH_4PO_4$, sulfuros y en consecuencia la composición del agua de desecho.
- La presencia de materia inorgánica presente en el agua residual y la incorporación de este material suspendido en el lodo granular así como la edad del lodo.

El contenido de cenizas (mineral) varía en un amplio intervalo

encontrando valores del 8 al 65% (Hulshoff *et al.*, 1989). Dolfing *et al.* (1985) encontraron que cerca del 30% de la fracción de cenizas del lodo granular cultivado en aguas de desecho de azúcar de remolacha consistió en FeS. Presumiblemente el FeS precipita en la superficie de la bacteria ligeramente lipofílica. Se cree que la combinación de la alta tensión superficial del FeS y la superficie lipofílica podrían estabilizar los agregados bacterianos en los sistemas acuáticos (Grothenuis, 1986).

En general, el lodo granular metanogénico cultivado en aguas residuales reales es negro, mientras que el lodo anaerobio generado en mezclas sintéticas de AGV's es amarillo pálido. Se presume que el color negro es causado por la presencia de precipitados de sulfuros de Fe, Ni y Co.

4.6 MORFOLOGIA Y COMPOSICION MICROBIANA

Existe una gran variedad en cuanto a la calidad, morfología y características microbiológicas del lodo granular anaerobio debido a que son el resultado del desecho con el que se originan.

La morfología de granos es variada; algunos se observan como pequeños agregados, que vistos al microscopio electrónico de barrido pueden exhibir poros, probablemente para transporte de sustrato, de intermediarios y de productos finales como gas. Otros tienen apariencia esférica con cavidades para funciones similares a los poros.

Algunos investigadores (Dolfing *et al.*, 1985; Dubourguier *et al.*, 1988b y Prensier *et al.*, 1988) han intentado evaluar la composición microbiana del lodo granular por medio de microscopía electrónica de transmisión. De acuerdo con sus observaciones, un porcentaje significativo del material bacteriano consiste en organismos semejantes a *Methanotrix*, además de presentarse una amplia variedad de morfotipos en el grano, como microcolonias, distribuidas al azar.

Con base en observaciones al microscopio, Thiele *et al.* (1988) establecen que los organismos acetogénicos y metanogénicos no están localizados como microcolonias separadas sino que están colocadas en un arreglo tipo matriz.

En los granos cultivados en desechos carbonáceos, Harada *et al.* (1988)

encontraron una localización muy distintiva de varios grupos específicos de organismos (hidrolíticos y acidogénicos) en la porción exterior del gránulo y organismos parecidos a *Methanotrix* dominantes en la parte interna. En lodo granular crecido en mezclas de AGV's se observaron agrupaciones esféricas de 100 a 300 μm de diámetro, entretejidas a los filamentos de *Methanotrix* adheridas al exterior del gránulo.

Por su parte Sam-Soon et al. (1988) consideran a *Methanobacterium* Cepa AZ como la bacteria clave en la formación de los granos, como se explica más adelante.

4.7 ACTIVIDAD METANOGENICA DEL LODO

La actividad metanogénica específica del lodo granular depende fuertemente de las condiciones experimentales y de la composición del sustrato (TABLA 4.3). Entre más compleja es un agua de desecho, es mayor la fracción de organismos acidificantes, lo que resulta en una menor actividad metanogénica específica del lodo. Bajo condiciones mesofílicas, Hulshoff Pol et al. (1989) a 30°C encontraron actividades de hasta 1.0 kg DQO/kg SSV·d para sustratos no acidificados y hasta 2.5 kg DQO/kg SSV·d para sustratos acidificados. Guiot et al. (1988a) encontró que a 27-29°C para granos creciendo en sacarosa como sustrato, la actividad alcanzada va de 1.3 a 2.6 kg DQO/kg SSV·d dependiendo de la presencia y biodisponibilidad de los elementos traza, mientras que Wi egant (1986) reportó actividades de hasta 7.3 kg DQO/kg SSV·d para gránulos termofílicos de *Methanotrix* cultivados en una mezcla de butirato y acetato a 55°C.

La actividad de granos alimentados en un agua real, será siempre menor que la encontrada en cultivos puros ya que una considerable parte del lodo granular consiste generalmente de biomasa no metanogénica, polímeros extracelulares, sólidos suspendidos biológicamente inertes y organismos muertos.

La actividad específica encontrada para los lodos cultivados en desechos domésticos sugiere la presencia de una gran fracción de organismos no metanogénicos y biomasa no viable, así como la materia orgánica inerte dentro de los gránulos.

TABLA 4.3. ACTIVIDAD METANOGENICA ESPECIFICA DE LOS LODOS GRANULARES CULTIVADOS EN DIFERENTES AGUAS RESIDUALES (Hulshoff, 1989)

TIPO DE AGUA RESIDUAL	TEMPERATURA °C	ACTIVIDAD METANOGENICA Especifica*	REFERENCIA
Jugo de malta diluido	25	0.85	Lui y Hu, 1988
Solución de glucosa	35	1.20	Wu et al. 1985
Bebidas	35	1.90	Novaes, 1988
Domésticas	--	0.15	Novaes, 1988
Domésticas	30	0.02-0.04	De Mann et al.1988
Almidón de Trigo	35	0.55	Rijs, 1986
Destilería	32	0.60	Rijs, 1986
Bebidas	20	0.40	Rijs, 1986
Papel	27-30	0.45	Rijs, 1986
Rastros	30	0.34	Sayed, 1987
Proces. de papas	30	1.20	Hulshoff, 1989
Azúcar de remolacha	30	1.20	Hulshoff, 1989
Papel	30	0.90-0.62	Hulshoff, 1989
Almidón de trigo	30	0.70	Hulshoff, 1989
Destilería	30	0.99	Hulshoff, 1989
Bebidas	30	0.45	Hulshoff, 1989
Matadero de animales	30	0.75	De Zeeuw, 1982

* Expresada en g DQO/g SSV·d

El tamaño de los diferentes lodos granulados cultivados a gran escala y planta piloto varían grandemente. Debido a que la resistencia de cualquier aglomerado, independientemente de su origen o naturaleza, será menor conforme aumenta su tamaño, es claro que hay un tamaño máximo por arriba del cual éste se disgregará.

4.8 HIPOTESIS DE GRANULACION

Actualmente existen diversas hipótesis que tratan de explicar el proceso de la formación del grano anaerobio, con base en los factores que lo promueven, así como en las variables de operación que gobiernan el proceso. A continuación se presentan algunas de ellas.

4.8.1 Hulshoff Pol et al. (1988)

Este autor señala como factor determinante para el fenómeno de la granulación la "presión de selección" impuesta al sistema sobre las diferentes propiedades de sedimentación o densidad de los organismos libres y de aglomerados bacterianos.

Esta presión de selección se origina a partir de la carga hidráulica impuesta al sistema y de la tasa de producción de gas. Este autor recomienda una velocidad ascendente de 0.1 a 1.0 m/d, la primera semana; una vez que se incrementa la carga, la velocidad de flujo será mayor de 30-50 m/d, como se aplica a reactores UASB a gran escala. Para el establecimiento de una presión efectiva de selección, la relación h/d (altura/diámetro) del reactor es sumamente importante.

El efecto combinado de la velocidad ascendente y de la carga orgánica aplicada conlleva a un proceso de selección de los organismos que crecen individualmente y que serán lavados, mientras que los agregados de biomasa que pueden estar fijados unos a otros o a partículas orgánicas e inorgánicas como soporte, serán retenidos dentro del reactor. Como resultado, los lodos tienden a concentrarse en la parte baja del reactor debido a que la carga de sustrato es mayor allí. Del lavado de bacterias dispersas y material voluminoso y de la estimulación del crecimiento de agregados de la biopelícula, un tipo de lodo granular se desarrollará en el reactor.

4.8.2 De Zeeuw et al. (1988)

Propone que la formación del grano a nivel laboratorio con AGV's como sustrato es resultado de la combinación de diversos factores, tales como el tipo de lodo de inóculo, tiempo de retención de la biomasa y de la presión de selección (expansión y erosión de la cama de lodos), que es resultado del patrón de arranque. Lo anterior origina la formación de tres diferentes tipos de lodo granular.

TIPO A

Este tipo de lodo es el más frecuente a escala piloto, se genera manteniendo bajos niveles de acetato inmediatamente después del arranque, altos tiempos de retención de lodos y lavado de los mismos de tipo erosivo. El crecimiento se da a partir de la colonización por *Methanotrix* de las cavidades centrales de agregados de *Methanosarcina* que es seleccionada en las etapas iniciales debido a la alta concentración de acetato. El desarrollo subsecuente bajo las condiciones aplicadas, favorecen el desarrollo de *Methanotrix* y la pérdida de la capa externa de sarcinas.

TIPO B

Se forma a partir de cortos tiempos de retención de biomasa, un lavado de lodos "tipo extensivo" independientemente de los niveles de acetato durante la etapa de arranque. Este tipo de grano presupone la presencia de partículas inertes de fijación de la bacteria en el lodo de inóculo o en el sustrato, lo que asegura su retención durante la fase de lavado extensivo. El crecimiento subsecuente de las bacterias, dentro y alrededor de los filamentos entretejidos débilmente resulta en el desarrollo de granos tipo B estables y compactos.

TIPO C

Las condiciones de operación que favorecen su crecimiento son: altos tiempos de retención de lodos, lavado de lodos de tipo erosivo y altas concentraciones de acetato, lo que promueve el crecimiento de grano de gran tamaño. Sin embargo, este tipo de lodo es muy inestable y está formado exclusivamente de *Methanosarcina*, ya que bajo estas condiciones no se tiene prácticamente competencia con *Methanotrix*.

4.8.3 Weigant (1988); Teoría del Spaghetti

Su hipótesis se basa en estudios principalmente termofilicos y presupone la presencia de *Methanotrix* como organismo predominante. Cuando la concentración de *Methanotrix* es baja, se debe ejercer una presión de selección que estará gobernada por su alta afinidad al sustrato (acetato) en oposición a *Methanosarcina*, lo que significa que la concentración de acetato no deberá sobrepasar los 200 mg/l·d durante la etapa de arranque. Cuando una cantidad suficiente de este tipo de bacteria se haya desarrollado, inevitablemente tenderá a agregarse. Este proceso de "selección" proveerá los precursores iniciales del grano que será de tipo filamentosos y a una carga orgánica constante crecerá hacia afuera hasta formar granos debido a la fijación de bacterias individuales, así como por la adhesión de material no bacteriano.

La concentración de material inerte no debe ser muy alta, de tal manera que las bacterias individuales de *Methanotrix* puedan llegar a agruparse en pequeños nódulos microscópicos o fijarse a material finamente disperso. En la fase inicial la velocidad del flujo ascendente es cero o muy baja por lo que no habrá selección hacia el crecimiento en agregados. La selección de agregados se ejercerá al incrementar la velocidad del flujo ascendente, ya que el crecimiento en forma esférica se debe al movimiento moderado y constante del biogás y el agua.

El desarrollo posterior de granos más compactos tipo bastón es cuestión de tiempo, después de que los granos filamentosos hayan sido observados.

4.8.4 Sam-Soon et al. (1988)

Esta hipótesis propone como condiciones básicas para la granulación:

- Presión parcial de hidrógeno superior a 10^{-4} atm
- Exceso de NH_3
- Limitación de cisteína

Por consiguiente, no sólo el sustrato debe producir H_2 en la fermentación, sino también la presión parcial de H_2 debe ser alta. En

influentes donde los sustratos no producen hidrógeno, la granulación es pobre o puede llegar a detenerse si la presión parcial de hidrógeno es baja (por ejemplo con propionato y lípidos), o cuando los sistemas de simbiosis por sí mismos promueven presiones parciales bajas de H_2 .

Estos autores proponen que la formación de grano es causada por *Methanobacterium* Cepa AZ, un organismo que utiliza hidrógeno como única fuente de energía y genera todos sus aminoácidos esenciales excepto cisteína. El mecanismo de formación se da bajo altas presiones parciales de hidrógeno, que con un adecuado suministro de amonio, genera una alta relación ATP/ADP intracelular. Esto induce a una sobreproducción de aminoácidos que son secretados como polipéptidos extracelulares, al que se adhieren otras especies promoviendo la formación del grano. La adición de cisteína en la alimentación reduce la producción de polímeros y la formación del grano.

El desarrollo de la hipótesis anterior se fundamenta en la estratificación de la cama de lodos en tres zonas, observada en un reactor tipo UASB alimentado con agua residual proveniente del procesamiento del jugo de manzana y con glucosa, a partir del análisis de los productos de fermentación a lo largo del reactor. Las zonas presentan las siguientes características:

ZONA ACTIVA BAJA

- Presión parcial de H_2 alta
- Máxima concentración de ácidos grasos volátiles (acético y propiónico)
- Concentración mínima de $N-NH_4^+$ y máxima de N -orgánico
- Crecimiento del grano (rendimiento $Y = 0.36$ mg SSV/mg DQO utilizado)
- Reducción de la DQO en un 50%.

ZONA ACTIVA SUPERIOR

- Reducción de la DQO cercana a los valores límites
- Concentración de ácido acético y propiónico cercana a cero
- $N-NH_4^+$ constante
- N -org decrece al mínimo
- Se inicia la ruptura del grano.

ZONA INACTIVA SUPERIOR

- No se observan reacciones biocinéticas
- Rompimiento del grano.

La zona activa baja, está caracterizada por una alta presión parcial de hidrógeno debida a los intensos procesos de hidrólisis y fermentación, lo cual no favorece la degradación del ácido propiónico por lo que éste registra los valores más altos. Esta zona termina en donde la presión parcial de hidrógeno cae, lo que hace posible la transformación bacteriana del ácido propiónico en ácido acético, hidrógeno y CO_2 .

4.9 MODELO EN MULTICAPAS DEL GRANO ANAEROBIO, Guiot *et al.* (1991)

La idea generalizada de algunos autores acerca de la configuración del grano (Dolfing *et al.* 1988; Dubourgier *et al.* 1988), es en el sentido de que los diversos grupos tróficos, que constituyen el grano y que están implicados en la degradación de la materia orgánica, se encuentran distribuidos al azar, y por lo tanto, no es posible observar una organización interna.

En oposición a esta idea, Guiot *et al.* (1991) han propuesto que los agregados anaerobios son consorcios concéntricos, altamente estructurados y proponen un modelo de agregación compuesto de tres capas como sigue:

NUCLEO

Compuesto por una capa central en la que las cavidades están ocupadas por bacterias en forma de bacilos parecidos a *Methanothrix*.

CAPA INTERMEDIA

En donde se presentan un gran número de bacterias en forma de cocos y bacilos parecidos a *Methanobrevibacter*, descrita por Dubourgier *et al.* (1988) yuxtapuesta a *Syntrophobacter*; la yuxtaposición de bacterias fue característica de esta capa.

Los organismos predominantes son de tipo acidogénico, *Methanococcales* y filamentos parecidos a *Methanospirillum*.

El modelo está sustentado además, en trabajos anteriores con granos anaerobios observados mediante microscopía electrónica de barrido así como en el tamaño del grano y en los gradientes intragranulares de hidrógeno. La apariencia estratificada del grano ha sido reportada con anterioridad, tanto para granos alimentados con efluentes industriales como sintéticos (TABLA 4.4).

TABLA 4.4. SUSTRATOS EN LOS QUE SE HA REPORTADO LA ESTRATIFICACION EN EL GRANO (Guiot et al., 1991).

TIPO DE ALIMENTACION	A U T O R
Efluente de la refinación de azúcar y almidón de maíz	Alibhai y Forster, 1986
Mezcla de AGV's en condiciones mesofílicas	Kosaric y Blaszczyk, 1990
Acetato en condiciones termofílicas	Bochem et al. 1982

El autor propone que la estratificación del grano es resultado de diversos factores, entre los que se encuentra la limitada difusión del sustrato.

Beefink y Staugaard (1986) observaron en reactores acidogénicos con glucosa, que los granos presentaron cavidades, como resultado de la inactivación y lisis de las células internas debido a la deficiencia de glucosa por limitación en la difusión del sustrato.

Esto demostraría morfológicamente que la zona activa para la acidogénesis estaría limitada en profundidad, y que la zona central del grano es una zona activa únicamente para los microorganismos metanógenos acetoclásticos como *Methanothrix* que poseen bajos valores de K_s (alta afinidad al sustrato) y es por lo tanto menos sensibles a la limitación de sustrato.

Por otra parte se ha visto que la actividad acidotrófica (acetato, propionato, formato) muestra generalmente una tendencia a incrementarse en paralelo con el diámetro del grano así como con la edad del grano, mientras que la actividad glucotrófica disminuye (MacLeod et al., 1990 en Guiot et al., 1991), por lo que una distribución al azar de las poblaciones no podría explicar el cambio en la actividad acoplado al cambio en el tamaño de grano.

La actividad particular de las diferentes capas del grano, fueron estudiadas por Guiot et al. (1989) por medio de la abrasión a diferentes profundidades del grano y mostraron que la actividad acetoclástica está uniforme y preferentemente distribuida a todo el interior del grano, a pesar del evidente predominio de bacterias como *Methanothrix* en el núcleo, en contraste con la actividad acidogénica que tiene un gradiente de distribución. Por lo anterior, se infiere que las bacterias fermentativas ocupan la capa externa del grano, inversamente las bacterias degradadoras de propionato predominan en la parte intermedia del grano.

En cuanto a la transferencia de gases, Pauss et al. (1990) proponen un mecanismo en dos etapas para la transferencia de las especies gaseosas al biogás. En la primera etapa se forma la burbuja y su volumen depende del contenido de CO_2 y CH_4 , posteriormente conforme la burbuja asciende se incrementa su contenido de H_2 . Esto es compatible con la distribución diferencial de los microorganismos en el grano, ya que en el centro del grano es donde se han observado abundantes vacuolas rodeadas esencialmente por microorganismos metanógenos activos, y donde la formación de la burbuja está íntimamente relacionada con la actividad biológica de la biomasa dada su proximidad; así, la barrera entre la burbuja y la fase líquida es menos importante, mientras que las bacterias acidogénicas productoras de hidrógeno se encuentran en la periferia del grano y en la fase líquida.

Las oxidaciones acetogénicas del propionato y butirato son exergónicas solamente si la presión parcial de H_2 es menor a 10 y 100 Pa, respectivamente (McInerney y Bryant, 1981). Se propone que la estructura del grano provee sitios internos (micronichos) con una concentración de H_2 menor a 75 nM lo que permite que la degradación del propionato sea exergónica (ΔG_V 's < 0) ya que el H_2 en estos sitios es de 25 a 40 veces menor que en el líquido.

Consistente con la estructura en multicapas, la producción de H_2 a partir de la fase líquida y de la capa periférica del grano, ambas predominantemente con bacterias acidógenas productoras de hidrógeno, difunde hacia el núcleo del grano y hacia el seno del líquido; las bacterias consumidoras de H_2 , como B-SR, *Methanosarcina*, *Methanococcales* y *Methanospirillum*, también presentes en la capa externa, deberían utilizar el H_2 que difunde hacia el espacio del grano interno.

Los organismos sintróficos presentes en la segunda capa removerían cualquier hidrógeno remanente producido por las acetógenas. Este consumo de hidrógeno aseguraría el nivel de hidrógeno disuelto lo suficientemente bajo en el espacio intragranular para permitir una acetogénesis exergónica del propionato. Esto crea en alguna parte dentro del grano, una zona activa para las bacterias oxidadoras de propionato (OHPA's).

El modelo en multicapas del grano (Fig 4.1) propone una división en zonas tróficas especializadas a todo el radio del grano y concuerda con el modelo de difusión de productos y sustratos propuesta por **McCarty y Smith (1986)** para biopelículas. En este esquema, el sustrato que se alimenta al reactor llega a la superficie del grano, en donde se lleva a cabo la transferencia de masa; en el interior, se transforma en propionato, acetato e hidrógeno. En respuesta a los gradientes, el H_2 , el propionato y el acetato son transportados al exterior del grano, mientras que su consumo hace que éstos difundan decrecientemente hacia el centro.

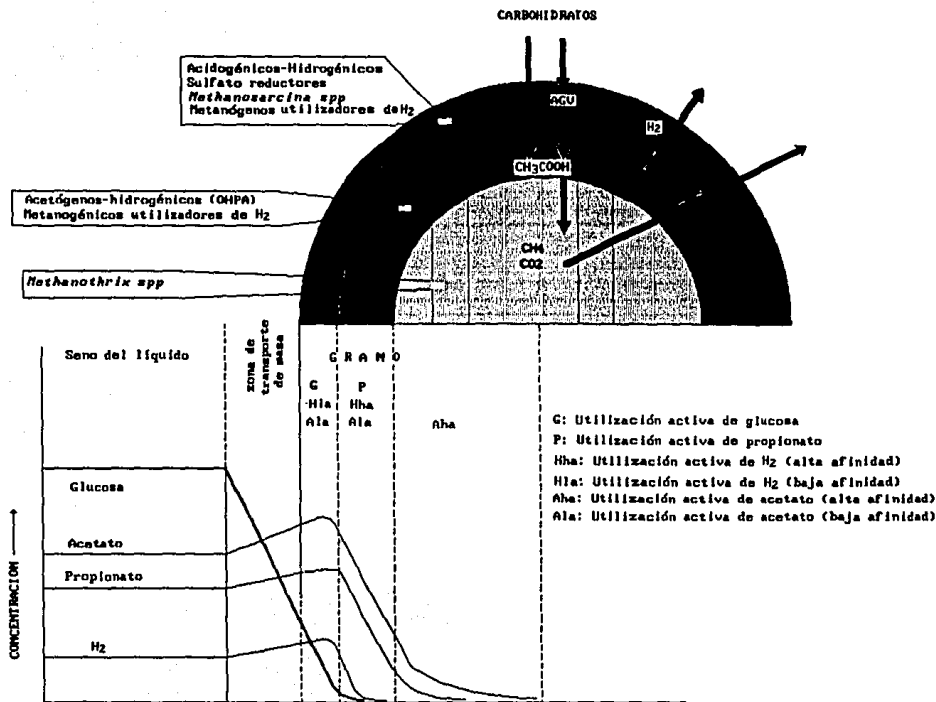


Fig 4.1. Modelo en multicapas del grano anaerobio y sus características más relevantes. Guiot et al. (1991)

IMPORTANCIA DEL INOCULO

Como se mencionó anteriormente, una de las principales limitantes para la difusión de los reactores UASB es la disponibilidad de lodo granular anaerobio en calidad y cantidad suficiente para su inoculación. En efecto, el proceso de formación de granos es lento, debido a las tasas de crecimiento reducidas de las bacterias involucradas. Al no disponer de este inóculo, el tiempo para lograr la cantidad de lodos suficiente para el buen funcionamiento de un digestor anaerobio puede durar hasta 6 meses. Lo anterior puede ser solucionado mediante la inoculación adecuada de los reactores con inóculo sustitutos.

5.1 OBTENCION DEL INOCULO

En el arranque de un reactor UASB, lo ideal es inocularlo con lodos granulares que provengan de otro reactor con influente igual o similar al que será tratado. Sin embargo, esto sólo es posible en aquellos sitios en donde se encuentren reactores de lecho de lodos en operación, y en donde la generación de lodo ha sido suficiente para poder purgarlo. Una opción es la inoculación de los reactores con lodo digerido proveniente de un digestor anaerobio, que será susceptible de transformarse en un lodo granular anaerobio.

Sin embargo, en México ambas alternativas son poco viables debido a que no es práctica común la digestión de lodos de purga y los reactores de tipo lecho de lodos instalados a nivel piloto o industrial apenas han arrancado, por lo que no se puede asegurar la producción sostenida de

inóculo.

En nuestro país un grupo interinstitucional formado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, la Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, y el Instituto Francés de Investigación Científica para el desarrollo en Cooperación (ORSTOM), propusieron diversas fuentes alternativas de inóculo para reactores UASB que son las siguientes: los lodos de purga de plantas de tratamiento aerobio, previa adaptación a las condiciones anaerobias (Arias y Noyola, 1988), lodos de tanques de vinazas, lodos de separadores de grasas, lodos granulares de digestores piloto en operación, líquido de fermentación de pulpa de café, sedimentos de ríos, lodos de fosa séptica y estiércol de vaca (García et al. 1988). Sin embargo, los resultados indicaron que sólo los lodos de fosa séptica y los lodos activados adaptados en anaerobiosis se consideran aptos como inóculos. El estiércol de vaca, no se considera un inóculo adecuado por contener relativamente pocas bacterias metanógenas y alto contenido de fibras, que no favorece la granulación, hecho que se confirmó experimentalmente (Noyola et al., 1988). La factibilidad de la transformación de lodo aerobio, en inóculo para reactores UASB ha sido demostrada (Wu et al. 1987; Arias y Noyola, 1988) siendo este inóculo la fuente potencial más adecuada para la inoculación de reactores anaerobios del tipo de lecho de lodos en México.

5.2 ANTECEDENTES EXPERIMENTALES DEL ESTUDIO

Aún cuando los inóculos antes citados ofrecen una solución parcial al problema de la inoculación y arranque de reactores de lecho de lodos, es necesario buscar una alternativa para la sistematización de la operación que favorezca la adaptación y el desarrollo de una cama de lodos de tipo granular, y que asegure una producción constante y el menor tiempo de arranque en los reactores, ya que como se ha mencionado el arranque es una etapa crítica para cualquier tipo de reactor anaerobio.

En este sentido, en el Instituto de Ingeniería se ha establecido como línea de investigación la producción de lodo granular anaerobio, así como conocer los aspectos que afectan la granulación.

En este aspecto, el trabajo realizado por González Ugalde (1988)

demostró que una ligera agitación de la cama de lodos favorece la formación de un lodo con buenas características de sedimentación y compactación. Por su parte, **Calderón (1990)** demostró que se requiere de un periodo de maduración para mejorar las características de sedimentación de este tipo de lodo.

Entre las investigaciones respecto a la granulación, se encuentran el estudio del efecto del sustrato, la carga orgánica y el tiempo de retención hidráulica sobre la granulación de lodos en UASB realizado por **Barrena (1991)**. Se concluyó que el tiempo de retención hidráulica (TRH) es un parámetro que afecta la granulación; asimismo, la carga orgánica influyó en el desarrollo de la población metanógena, y el tipo de sustrato tuvo una influencia significativa para la formación de grano en los reactores.

Con base en la información previa, es claro que los factores que promueven la granulación, así como los cambios a nivel microbiológico que resultan no han sido completamente esclarecidos, por lo que es necesario profundizar en algunos aspectos del fenómeno de la granulación. Esto se debe hacer principalmente a nivel microbiológico por ser las bacterias el elemento clave en la actividad del grano.

MATERIAL Y METODO

6.1 ARREGLO EXPERIMENTAL

La experimentación se llevó a cabo en dos reactores idénticos, de tipo lecho de lodos de flujo ascendente UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), contruidos de vidrio y con un volumen útil de 4.5 l (ver Fig 6.1).

El cuerpo está formado por una columna de 69 cm de altura y 9.75 cm de diámetro interno; se adaptaron 5 tubos laterales en forma paralela para la obtención de muestras a diferentes alturas del reactor.

La parte inferior, por donde entra el influente, tiene un diámetro de 0.8 cm y se abre en forma de cono de 12 cm de altura, con el fin de permitir una mejor repartición del lodo alimentado.

La evacuación del efluente se lleva a cabo a través de dos brazos curvos que se unen al cuerpo del reactor a 17 cm debajo del borde superior del reactor. Este diseño evita que las natas sean arrastradas por el efluente.

El extremo superior del reactor se cerró y selló herméticamente con un tapón de hule, aplicando silicón en todo el perímetro de unión con el reactor. Al tapón se le hicieron tres orificios: en el primero se instaló un sistema mecánico de agitación que consiste de un eje en el que se colocaron paletas plásticas acoplado a un motorreductor de 5 rpm

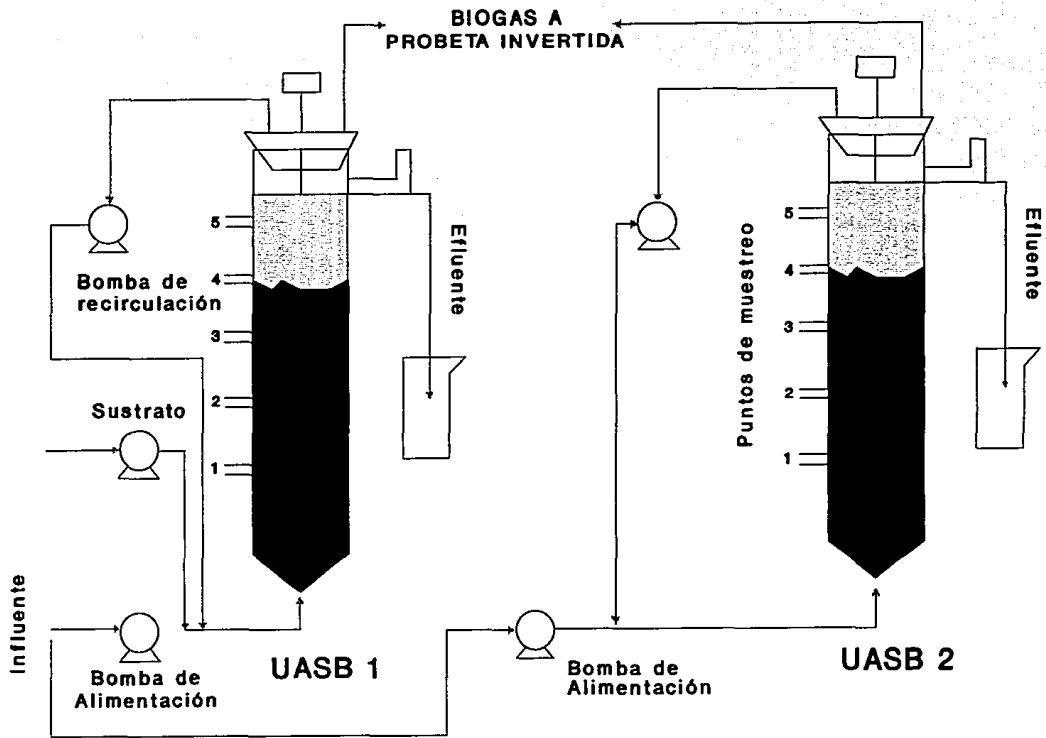


Fig. 6.1. Diagrama del equipo experimental para la obtención de lodo granular anaerobio en reactores UASB.

operando de forma intermitente, lo que permite liberar el gas presente en la cama sin crear turbulencia. Esto es necesario debido a que la burbujas de gas producidas en la cama de lodos arrastran sólidos y pueden provocar la formación de natas o hacer flotar parte de la cama. El segundo orificio es para la evacuación del gas y el último permite introducir los sensores necesarios para el registro de algunos parámetros fisicoquímicos como pH y POR (potencial de óxido reducción). Este mismo orificio fue utilizado para introducir el tubo de recirculación en aquellas corridas que la tuvieron.

El gas producido se recuperó en una probeta invertida, mediante desplazamiento de agua y se midió dos veces al día.

La alimentación de los lodos se llevó a cabo con una bomba peristáltica (Masterflex Cole Parmer), para asegurar que los sólidos alimentados entraran como una solución homogénea, se utilizó un agitador magnético, a baja velocidad de agitación para no permitir aeración. El efluente se recolectó en un tanque de almacenamiento para su análisis posterior. La instalación experimental se mantuvo a $35 \pm 2^{\circ}\text{C}$ en un cuarto a temperatura controlada.

6.1.1 ARRANQUE DE LOS REACTORES

La operación del reactor en cada corrida se efectuó alimentando lodo fresco de purga de la caja de recirculación del sistema de lodos activados de la Planta de Tratamiento de Aguas de C.U.. El lodo se concentró o se diluyó con agua residual cruda proveniente del desarenador, a fin de mantener una concentración constante de 1.5 g de SST/l ; la suspensión de lodo de alimentación se preparó diariamente.

6.1.2 CORRIDAS REALIZADAS

El trabajo experimental se puede dividir en dos etapas: en la primera se experimentó básicamente con el efecto de la velocidad ascendente para la obtención de lodo granular anaerobio manteniendo fijas el resto de las variables. En la segunda etapa se trabajó en el efecto de la adición de sustrato. Las condiciones de operación que se establecieron para cada corrida se muestran en la **TABLA 6.1**.

TABLA 6.1 CONDICIONES DE OPERACION PARA LA OBTENCION DE LODO GRANULAR ANAEROBIO EN REACTORES UASB.

CORRIDA	Duración	CARACTERISTICAS	Q_i	COM	$V_{asc.}$
	(d)		(ml/min)	(g SST/1·d)	(m/h)
PRIMERA	ETAPA				
1	30	agitación	3	1.44	0.024
2	30	agitación	1.5	1.44	0.013
3	30	agitación + recirculación	1.5	1.44	0.3
4	30	agitación + recirculación	1.5	1.5	0.15
SEGUNDA	ETAPA				
5A	60	agitación + recirculación	1.5	0.7	0.3
5B	60	agitación + recirculación vinaza:melaza (1:1) 0.5 g DQO/g SSV·d	1.5	0.7	0.3
6A	90	agitación + recirculación	1.5	0.7	0.1* 0.3
6B	90	agitación + recirculación glucosa (0.1 gDQO/g SSV·d)	1.5	0.7	0.1* 0.3
7A	90	agitación glucosa (0.1 gDQO/g SSV·d)	1.5	0.7	0.013
7B	90	agitación glucosa + NH ₃ DQO/NH ₃ (20:5)	1.5	0.7	0.013

donde:

Q_i = Gasto

COM = Carga orgánica

$V_{asc.}$ = Velocidad ascendente

* = Para primeros 15 días

En las corridas de la segunda etapa se trabajó con dos reactores de manera simultánea, con y sin sustrato. El tiempo de experimentación en cada una se fijó con base en los resultados obtenidos en la corrida anterior.

6.2 ADICION DE SUSTRATOS

6.2.1 VINAZA-MELAZA

Para las corridas con adición de sustrato, el suministro se inició desde el segundo día de operación una vez alcanzado un volumen mínimo de lodos dentro del reactor. En el caso de la corrida 5B, el sustrato se preparó a partir de una solución de melaza-vinaza en una proporción 1:1 calculada con base en el análisis previo de su DQO respectiva. Se prepararon 10 l a una concentración final de 100 g/l, a partir del cual se preparó diariamente el sustrato de alimentación; se fijó un volumen de alimentación de 800 ml/d con una carga de 0.5 g DQO/g SSV·d. Para respetar esta última condición, la concentración del sustrato adicionado a la cama de lodos se modificó cada tercer día en función de la cantidad de sólidos suspendidos totales en el reactor, estimados con la altura de la cama de lodos. Es importante señalar que la DQO en el influente, para todas las corridas con sustrato, se realizó a la corriente de lodos sin sustrato.

Para el cálculo diario de la alimentación del sustrato, se establecieron los valores encontrados en el reactor en corridas anteriores, cuando el volumen total fue ocupado por los lodos, como sigue:

Volumen del reactor = 4.5 l
Altura máxima de la cama de lodos = 72 cm
Concentración del lodo = 5.02 g SSV/l
SSV totales = 21.6 g
 Q_1 sustrato = 800 ml/d
Carga orgánica = 0.5 g DQO/g SSV·d

Se aplicó la ecuación siguiente:

$$DQO_{\text{alim}} \text{ g/l} = 13.5 \text{ g DQO/l } (H'/72)$$

Un ejemplo de cálculo se muestra en el **Anexo 3**.

Los criterios para la elección de este sustrato fueron su disponibilidad en grandes volúmenes, el ser un sustrato rico en azúcares susceptibles de degradación anaerobia y su bajo costo debido a que uno de ellos (vinaza) es un desecho de la producción de alcohol y la melaza es un subproducto de la producción de azúcar.

Lo anterior implica el poder utilizarlo a bajos costos en el suministro a reactores de tipo piloto o industrial.

6.2.2 GLUCOSA

Para la adición de glucosa en las corridas 6B, 7A y 7B, se estableció una carga menor a la de la corrida 5A, de 0.1 g DQO/g SSV·d manteniendo 800 ml de volumen alimentado pero modificando la concentración de la solución alimentada diariamente.

El sustrato se preparó a partir de una solución estándar de 100 g DQO-glucosa/l, preservada en refrigeración y renovándola cada semana. El cálculo del sustrato de alimentación se realizó en forma similar a la anteriormente descrita.

La elección de este sustrato tuvo como propósito el poder establecer una comparación entre los datos generados en este estudio y los reportados por otros autores, ya que este sustrato es ampliamente utilizado a nivel experimental debido a que es fácilmente biodegradable.

6.2.3 GLUCOSA + NH_4^+

La adición de NH_4Cl en la corrida 7B tuvo como objetivo operar bajo la hipótesis de la granulación propuesta por Sam-Soon et al. (1988) para la formación de lodo granular anaerobio, a través de la formación de una zona baja de alta presión parcial de hidrógeno y que establece como requisito un exceso de NH_4^+ .

Se conservó la relación de 0.1 g DQO/g SSV·d establecida en la corrida 7A así como los criterios de suministro. La adición de NH_4^+ fue en forma de NH_4Cl en una relación DQO-glucosa/N- NH_4 de 20:5.

6.3 TECNICAS DE ANALISIS

Para la evaluación de la operación del reactor se efectuaron dos tipos de pruebas: fisicoquímicas y microbiológicas.

6.3.1 ANALISIS FISICOQUIMICOS

En la TABLA 6.2 se presentan los parámetros determinados durante la operación de cada una de las corridas en el influente y el efluente. Los análisis se efectuaron de acuerdo con los "Standard Methods" (1985).

Para las corridas 7A y 7B (glucosa, con y sin NH_4^+) se hicieron análisis adicionales a diferentes alturas de la cama de lodos, con el fin de obtener el perfil del comportamiento de los parámetros adicionales que se presentan en la TABLA 6.3. La toma de la muestra siempre se inició por el punto más cercano a la superficie de la cama de lodos en forma descendente y con un volumen de 30 ml.

Una muestra de lodo de 0.5 ml se procesó para el análisis de la actividad metanógena descrita en el Anexo 3.

TABLA 6.2 FRECUENCIA DE LOS ANALISIS FISICOQUIMICOS EN LOS REACTORES UASB

P A R A M E T R O S		INFLUENTE	EFLUENTE
pH		5/semana	5/semana
Alcalinidad a pH 4.3	mg $CaCO_3$ /l	5/semana	5/semana
Sólidos Totales Totales	mg/l	5/semana	5/semana
Sólidos Totales Fijos	mg/l	5/semana	5/semana
Sólidos Totales Volátiles	mg/l	5/semana	5/semana
Sólidos Suspendidos Totales	mg/l	diario	5/semana
Sólidos Suspendidos Fijos	mg/l	5/semana	5/semana
Sólidos Suspendidos Volátiles	mg/l	5/semana	5/semana
DQO Total	mg/l	5/semana	5/semana
DQO Soluble	mg/l	5/semana	5/semana
POR (potencial de óxido-reducción)	mV	5/semana	5/semana
Vol. Gas	ml	5/semana	5/semana
Composición de gas	%	5/semana	5/semana

**TABLA 6.3 ANALISIS ADICIONALES EN LA CAMA DE LODOS
(CORRIDA 7A Y 7B)**

PARAMETROS	DIAS DE MUESTREO	NIVEL DE MUESTREO
Acido acético	5, 15, 30, 60 y 90	1-5
Acido propiónico	5, 15, 30, 60 y 90	1-5
Acido butírico	5, 15, 30, 60 y 90	1-5
N-NH ₃	5, 15, 30, 60 y 90	1-5
N-orgánico	5, 15, 30, 60 y 90	1-5
Proteína	5, 15, 30, 60 y 90	1-5
DQO Total y Soluble	5, 15, 30, 60 y 90	1-5

El análisis de proteína se hizo con la técnica de azul de Coomasie de Sedmak y Grossberg (1977).

6.3.1.1 Índice Volumétrico de Lodos

Debido a que con el lodo concentrado no se apreció una separación evidente de los lodos y el agua, se trabajó con una muestra del lodo de 50 ml, diluido con el efluente del mismo reactor en una probeta de 250 ml. La muestra se homogeneizó cuidando de no agitar en exceso, con el propósito de no modificar la textura y las condiciones anaerobias del lodo y se dejó sedimentar por 30 min. El procedimiento de cálculo fue el siguiente:

$$IVL = \frac{\text{volumen ocupado por los lodos después de 30 min}}{\text{contenido de SST en la probeta}}$$

6.3.1.2 Velocidad de sedimentación

El cálculo de la velocidad de sedimentación se efectuó a partir de los datos de la lectura del volumen que ocupan los lodos en la prueba del IVL cada minuto durante los primeros 15 min y cada 5 min en los 15 minutos restantes. El cálculo del área transversal de la probeta permite transformar los mililitros en cm, así puede graficarse la distancia recorrida contra el tiempo y se traza una recta tangente en donde la curva desciende más rápidamente. La pendiente de esta recta

corresponde a la velocidad máxima de sedimentación, para la dilución utilizada.

6.3.1.4 Composición del gas

El análisis de la composición del gas se efectuó desde el primer día de operación del reactor, aún cuando la producción del gas no fuera aparente. Lo anterior se hizo con el propósito de tener un registro confiable del inicio de la producción de gas así como de su composición. Para esto se utilizó un cromatógrafo con detector de conductividad térmica (Fisher gas partitioner modelo 1200) con doble columna. Las columnas están acopladas en serie: la primera es del tipo porapak Q y la segunda malla molecular 5A: esta última separa el nitrógeno del oxígeno. El gas acarreador fue helio y las condiciones de operación las siguientes:

Temperatura del inyector	120 - 130 °C
Temperatura de la columna	50 °C
Corriente del puente	150 mA
Atenuador	4
Flujo del gas acarreador	25 ml/min
Volumen de muestra inyectada	0.5 ml

6.3.1.5 Acidos Grasos Volátiles (AGV's)

Para su determinación se utilizó un cromatógrafo de gases con un detector de ionización de flama (FID) SRI 1800 con una columna de sílice fundido superox-FA, (Alhech) nitrógeno como acarreador y una mezcla de hidrógeno y aire para la combustión de la flama; las condiciones de operación fueron las siguientes:

Temperatura del inyector	120 °C
Temperatura columna	120 °C
Detector	120 °C
Atenuador	16
Presión de gas:	
Nitrógeno	30 psi
Hidrógeno	28 psi
Aire	10 psi
Vol. muestra inyectada	0.15 µ

6.3.2 ANALISIS MICROBIOLÓGICOS

Los análisis microbiológicos se efectuaron en la cama de lodos de los reactores, en los días 0, 5, 15, 30 y en su caso 60 y 90.

El procedimiento para la obtención de muestra fue el siguiente: se retiraron 200 ml de lodo a través del conducto lateral más próximo a la porción superior de la cama de lodos; la mitad se utilizó para el análisis de IVL y la velocidad de sedimentación, el restante se burbujeó durante 5 minutos, con N_2 a fin de eliminar la mayor cantidad de O_2 de la atmósfera del recipiente y mantener las condiciones anaerobias en la muestra, hasta el momento de iniciar el análisis.

La frecuencia de muestreo en la cama de lodos, así como los análisis se observan en la TABLA 6.4. Es importante aclarar que al término de cada corrida la muestra de lodos fue producto del vaciado y homogenizado del total de lodos del reactor.

TABLA 6.4 ANALISIS MICROBIOLÓGICOS EN LA CAMA DE LOS REACTORES

PARAMETROS	DIAS DE MUESTREO
NUMERO MAS PROBABLE (NMP) (Hidrogenófilas, acetoclásticas OHPA _p , OHPA _b , fermentativas y sulfatoreductoras	5, 15, 30, 60 ¹ y 90 ²
ACTIVIDAD METANOGENA (acético, butírico + propiónico)	5, 15, 30, 60 ¹ y 90 ²
GRANULOMETRIA IVL (ml/g)	5, 15, 30, 60 ¹ y 90 ²
SST, SSF y SSV (mg/l)	5, 15, 30, 60 ¹ y 90 ²

1 para corridas 5A y 5B

2 para corridas 6A, 6B, 7A y 7B.

6.3.2.1 Numeración de bacterias anaerobias (NMP)

Con el propósito de cuantificar la evolución de los diferentes grupos involucrados en la transformación del lodo aerobio de purga a un lodo anaerobio granular, se decidió seguir el crecimiento de la población metanogénica.

La numeración de las bacterias anaerobias se llevó a cabo utilizando la técnica del número más probable (NMP) descrita por **García et al. (1982)**, dentro de una cámara anaerobia marca Mc Coy. La preparación de los medios de cultivo, transferencia de sustratos y técnicas de inoculación fueron hechas según **Hungate (1969)** y **Balch et al. (1979)** (ver Anexo 3). Los tubos ya inoculados fueron incubados a 35°C durante un mes.

6.3.2.2 Prueba de actividad

La muestra de lodo para este análisis se dejó durante 24 horas en la precámara de acceso a la cámara anaerobia a un vacío de 20 mm Hg, con objeto de agotar los sustratos residuales de la muestra y facilitar la evacuación del gas producido. De esta forma se redujo al mínimo la influencia de los sustratos residuales presentes en las muestras frescas. Esta prueba se llevó a cabo en botellas de suero de 50 ml, con medio general preparado en anaerobiosis; se adicionan 4 ml de lodo y 0.2 ml de sustrato a probar. La frecuencia y duración del muestreo se determinó con base en la rapidez de la desaparición del sustrato. La metodología en detalle se describe en el Anexo 3.

6.3.2.3 Granulometría

El tamaño de los lodos granulares se midió por medio de un microscopio American Optical modelo 1138 y un ocular de Whipple calibrado con una rejilla micrométrica en micras, siguiendo la metodología descrita por **Mahoney et al. (1987)**; se midió un total de 100 granos por muestra.

CAPITULO 7

RESULTADOS

7.1 PARAMETROS FISICOQUIMICOS

PRIMERA ETAPA EXPERIMENTAL

Durante la primera etapa experimental se evaluó el efecto de la velocidad ascendente y carga orgánica. Los datos experimentales de cada una de las corridas se presentan en los Anexos 1 y 2. Los valores de los parámetros fisicoquímicos: sólidos, demanda química de oxígeno, pH y alcalinidad corresponden al promedio de los datos obtenidos en cada corrida. En aquellas en que su evolución en el tiempo mostró diferentes periodos, únicamente se consideró el más representativo de la operación del reactor.

A continuación se hace una descripción de las características más relevantes en cada una de las corridas experimentales.

7.1.1 CORRIDA 1

Las condiciones de operación que caracterizaron esta corrida fueron:

Duración	28 días
Gasto (Q_1)	3.0 ml/min
Carga orgánica (CO)	1.583 g SST/1-d
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	1.0 días
Velocidad ascendente (V_{asc})	0.024 m/h
Sin recirculación	

Los resultados obtenidos bajo estas condiciones se presentan en la Tabla 7.1.1 y en las Figuras 7.1.1 y 7.1.2.

Sólidos

La eficiencia de remoción de los STV y SSV fue de 45% y 49% respectivamente. Esta baja remoción puede atribuirse a que el gasto fue elevado con respecto al volumen del reactor, lo que propició el rápido llenado del reactor con lodo, que aunado a la baja compactación de este último, tuvo como consecuencia una evacuación temprana del mismo. La desviación estándar del efluente fue mayor que la del influente, debido a la variación en la cantidad de lodo evacuado (Fig. 7.1.1 A).

Los SSV representan el 96% de los STV; esto indica que la mayor parte de los sólidos que entraron al reactor era materia orgánica (biomasa bacteriana), lo cual era de esperarse dada la naturaleza del lodo alimentado.

TABLA 7.1.1 VALORES PROMEDIO DE LOS PARAMETROS FISICOQUIMICOS EN LA CORRIDA 1*

	STT	STF	STV	SST	SSF	SSV	DQOT	DQOs	pH	Alcal.
INFLUENTE										
\bar{X}	1892	654	1238	1563	369	1194	2126	771	7.31	192
S	176	105	137	153	160	149	886	465	0.26	29
CV	9	16	11	9	44	12	42	60	4	15
EFLUENTE										
\bar{X}	1185	499	686	746	141	605	1163	661	7.86	325
S	757	218	557	529	120	414	714	463	0.20	72
CV	64	44	81	71	85	68	61	70	3	22
% E	37	24	45	52	62	49	45	24		

* Expresados en mg/l excepto alcalinidad en mg CaCO /l y pH en unidades de pH

\bar{X} = Promedio, S = Desviación estándar,
 CV = Coeficiente de variabilidad (en porciento) y
 % E = Eficiencia de remoción.

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

El comportamiento de la DQO total y soluble se muestra en la **Figuras 7.1.1B y C**, en donde se observan variaciones importantes en la DQO de la alimentación, con un CV de 60 y 42% para la DQOs y DQOt respectivamente. En el caso de la DQO soluble, se obtuvo una eficiencia de remoción del 14%.

pH y Alcalinidad

La **Figura 7.1.2** muestra el comportamiento del pH y alcalinidad en el reactor. Se observó que los lodos de influente tienen un pH cercano a la neutralidad (pH = 7.31, **Tabla 7.1.1**), y a través de su paso por la cama de lodos el pH del efluente se incrementa a 7.8. Las variaciones para ambos son muy pequeñas, por lo que se podría considerar que estos parámetros se mantuvieron constantes. El incremento en la alcalinidad se presentó después de los 7 días, por lo que se puede pensar en un periodo de aclimatación de los microorganismos, después del cual, se inicia la metanogénesis y consecuentemente se empieza a incrementar la alcalinidad hasta un máximo de 428 mg/l como CaCO_3 . El contenido de bicarbonato del agua residual es el principal factor que determina la capacidad amortiguadora contra cambios bruscos en el pH. A valores de pH de entre 7 y 8 corresponden proporciones de 75 a 95 % de bicarbonato dentro del sistema CO_2 -bicarbonato-carbonatos (**Margalef, 1975**).

Producción de Biogás

En esta corrida no fue posible cuantificar la producción de gas, debido a problemas con el medidor electrónico de gas. El máximo porcentaje de metano en el gas producido fue del 68.4% lo cual se encuentra dentro de los intervalos reportados.

Características del lodo producido

Al finalizar la corrida, la cantidad de lodo acumulado fue de 3 litros con las siguientes características.

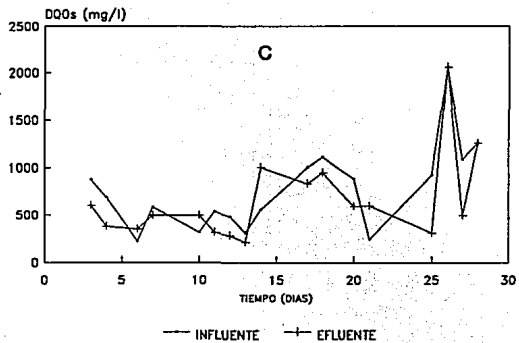
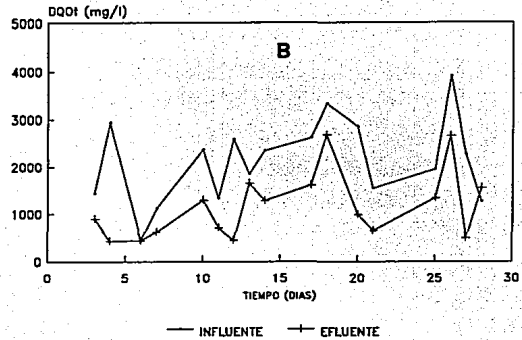
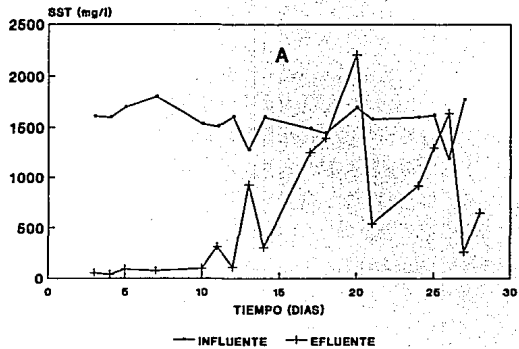
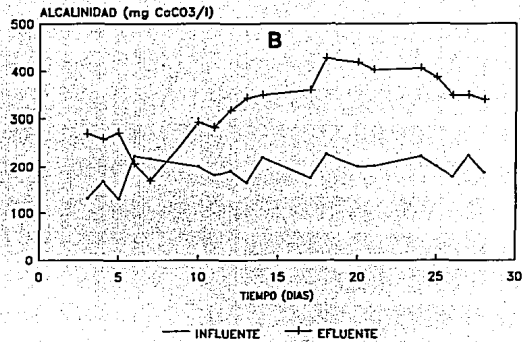
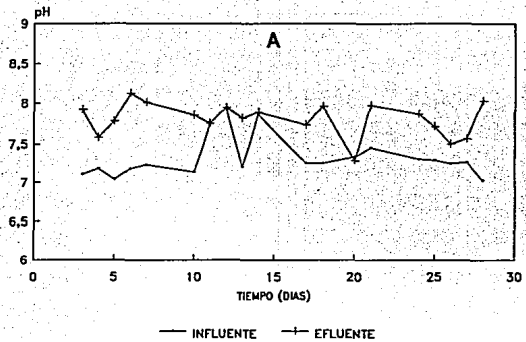


Fig. 7.1.1 Variación de los SST, DQOt y DQOs.
Corrida 1



**Fig. 7.1.2 Variacion del pH y alcalinidad.
Corrida 1**

SST = 11.0 g/l
SSF = 3.0 g/l
SSV = 8.0 g/l
% volátil = 73

IVL = 72 ml/g
V.sed = 1.49 m/h

El lodo producido tuvo un color negro de aspecto floculento, sin presentar granulaci3n. Sin embargo, tuvo una buena compactaci3n y no se present3 flotaci3n al final de la corrida.

7.1.2 CORRIDA 2

Las condiciones de operaci3n que prevalecieron en esta corrida fueron:

Duraci3n	37 d1as
Q_1	1.5 ml/min
CO	1.313 g SST/1.d
TRH	2.0 d1as
V_{asc}	0.0121 m/h
Sin recirculaci3n	

Con base en los resultados de la corrida anterior, en la que el llenado del reactor con los lodos se di3 a los 15 d1as, el criterio de operaci3n en esta corrida fue el reducir el gasto de alimentaci3n con el fin de que los lodos permanecieran m1s tiempo en el reactor antes de ser evacuados. Para esto se redujo el caudal a la mitad y consecuentemente el tiempo de retenci3n hidr1ulica se duplic3. Sin embargo se mantuvo la misma carga org1nica, mediante el incremento en la concentraci3n de SST en el influente. La Tabla 7.1.2 muestra los valores promedio en la corrida.

S3lidos

En la Tabla 7.1.2 se observa que la eficiencia de remoci3n de los SST, STV, SST y SSV fue de 81%, 90%, 95%, y 95%, respectivamente; valores que son superiores a los obtenidos en la corrida anterior. Esto se debi3 principalmente a la acumulaci3n de lodos en el reactor m1s que a una estabilizaci3n de la materia org1nica. La mayor eficiencia obtenida en esta corrida se debi3 a la baja velocidad ascendente manejada (0.0121 m/h).

Por otra parte, los altos valores del porcentaje del coeficiente de variabilidad del efluente para los sólidos suspendidos, se deben a la variación en la salida de lodos, ya que no se puede controlar la cantidad del lodo que sale fuera del reactor (Fig 7.1.3A). En esto influyen factores tales como la expansión variable de la cama de lodos, y el lavado de lodo con poca sedimentabilidad. En el influente la variabilidad fue menor que la del efluente, debido a que si se controló el contenido de sólidos que ingresaron al reactor para mantener constante la carga orgánica y la homogeneidad de la alimentación.

El porcentaje de los STV que representa los SSV fue del 99%, lo que indica que la mayor parte de los sólidos totales volátiles que entraron al reactor fue biomasa bacteriana.

TABLA 7.1.2 VALORES PROMEDIO DE LOS ANALISIS FISICOQUIMICOS EN LA CORRIDA 2.*

	STT	STF	STV	SST	SSF	SSV	DQOt	DQOs	pH	Alcal.
INFLUENTE										
\bar{X}	3303	1069	2234	2932	718	2214	3132	391	7.24	194
S	378	233	360	309	176	262	1014	274	0.2	34
CV	11	22	16	10	24	12	33	70	3	17
EFLUENTE										
\bar{X}	629	403	226	127	30	97	286	65	8.2	329
S	130	61	96	106	26	84	165	34	0.19	85
CV	21	15	42	83	87	86	57	52	2	27
% E	81	62	90	95	96	95	91	83		69

* Expresados en mg/l excepto Alcalinidad en mg CaCO /l y pH en unidades de pH.

\bar{X} = Promedio; S = Desviación estándar, CV = Coeficiente de variabilidad (en porciento) y % E = Eficiencia de remoción.

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Las eficiencias de remoción en esta corrida fueron para la DQO_t y DQO_s de 91 y 83% respectivamente, que son mayores a las obtenidas en la corrida anterior. En promedio, la DQO_t influente fue de 3132 mg/l y la efluente de 391 mg/l, en tanto que la DQO_s del influente fue de 391 mg/l y el efluente de 65 mg/l. Los valores anteriores indican que en el influente la DQO entra 87.5% en forma suspendida y 12.5% en forma soluble, mientras que en el efluente los porcentajes son de 77% en forma suspendida y 23 % en forma soluble.

La **Figura 7.1.3 B y C** muestran el comportamiento de la DQO total y soluble en donde a partir del día 34, cerca del final de la corrida la DQO efluente se incrementa debido a la evacuación de lodos al llenarse el reactor con estos (**Anexo 1, Tabla A.1.2.2**). La DQO_s influente en este mismo día, tuvo un incremento momentáneo y de nuevo descendió en el último día. Este incremento correspondió a un incremento de la DQO_s en la alimentación.

pH y Alcalinidad

Las **Figuras 7.1.4 A y B** muestran el comportamiento del pH y de la alcalinidad total durante la corrida 2, respectivamente. En general los valores de pH del influente permanecieron en un intervalo cercano a la neutralidad, con un promedio para el influente de 7.2, mientras que para el efluente se incrementó a 8.2 (**Tabla 7.1.2**).

La tendencia al incremento se hizo más notoria a partir del día 22, donde el intervalo entre las alcalinidades entre el influente y el efluente se hace mayor (**Fig.7.1.4B**).

El promedio de alcalinidad a la entrada del reactor fue de 194 mg CaCO₃/l, mientras que para el efluente la alcalinidad fue de 329 mg CaCO₃/l, lo que representa un incremento del 69%.

Producción de Biogás

A partir de esta corrida se optó por medir el gas producido por medio del desplazamiento de un líquido en una probeta invertida para evitar los problemas ocasionados por el medidor electrónico de gas. La **Figura**

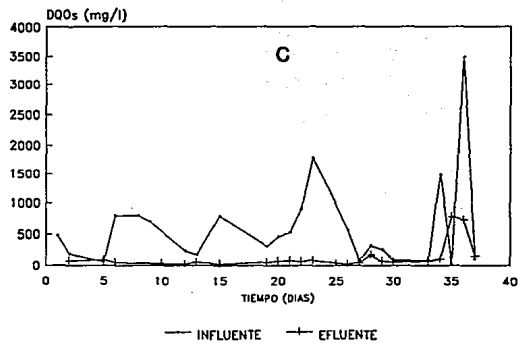
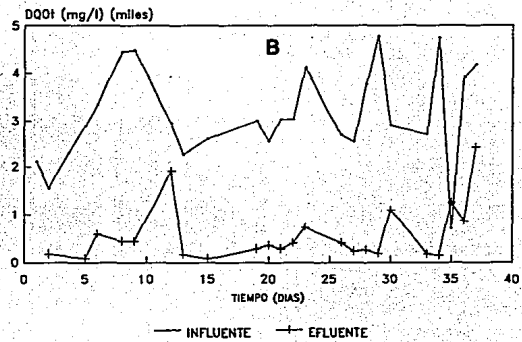
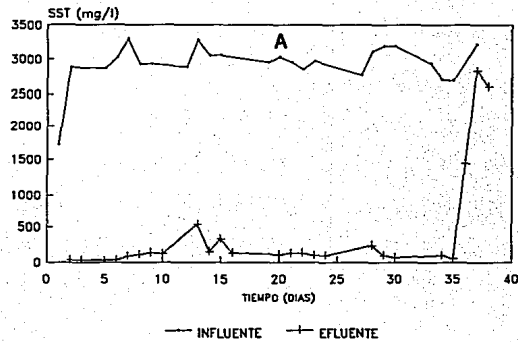


Fig. 7.13 Variación de los SST, DQOt y DQOs. Corrida 2

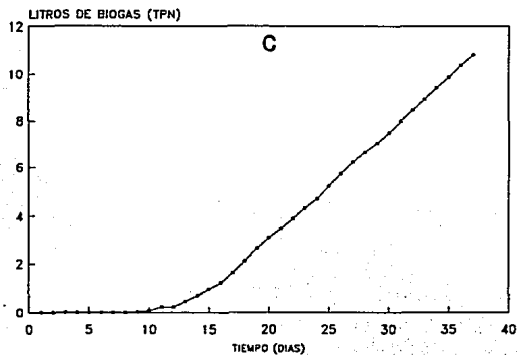
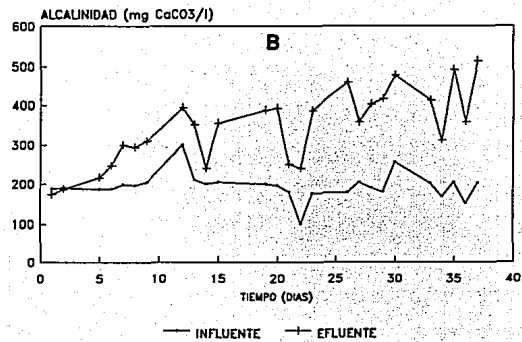
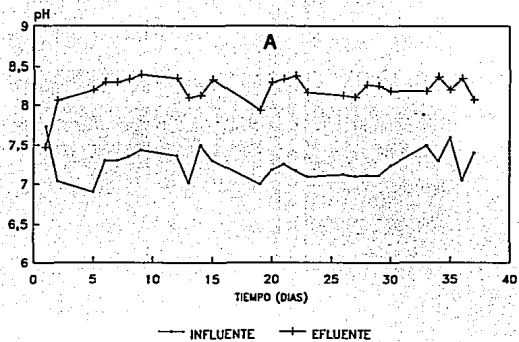


Fig. 7.1.4 Variación del pH, alcalinidad y producción de biogas. Corrida 2

7.1.4 C muestra la producción acumulada de gas durante el tiempo de muestreo, con un volumen final de 11.03 l (TPN) y un porcentaje máximo de metano de 58%. Se observó que la producción de biogás se inició a partir del día 9 y desde el 16 mantuvo una producción diaria constante de 0.084 l/1.d (TPN).

Características del lodo producido

La volumen final de lodo fue de 3.6 l con las siguientes características.

SST = 15.053 g/l	IVL = 74 ml/g
SSF = 4.515 g/l	V.sed = 1.83 m/h
SSV = 10.537 g/l	
% Volátil = 70 %	

En esta corrida se obtuvo mejor compactación del lodo pues aún cuando se llenó el reactor, la evacuación del lodo fue menor a la de la corrida anterior. En esta corrida se obtuvo un lodo de tipo flocculento-granular.

7.1.3 CORRIDA 3

En esta corrida las condiciones de operación fueron similares a las de la corrida 2, pero se introdujo recirculación. Esto con el propósito de incrementar la velocidad ascendente y favorecer la formación del lodo granular, por medio del lavado de las bacterias filamentosas así como del material no sedimentable. Las condiciones de operación fueron las siguientes:

Duración	33 días
Q_1	1.5 ml/min
CO	1.44 g SST/l-d
TRH	2.0 días
V_{asc}	0.30 m/h
Q_1 recirc	35.5 ml/min

Las características promedio del influente y del efluente (periodo III) bajo estas condiciones se muestran en la Tabla 7.1.3.

TABLA 7.1.3 VALORES PROMEDIO DE LOS ANALISIS FISICOQUIMICOS EN LA CORRIDA 3.*

	STT	STF	STV	SST	SSF	SSV	DQOt	DQOs	pH	Alcal.
INFLUENTE										
\bar{X}	3468	908	2560	2978	771	2207	3931	358	7.38	216
S	400	264	417	470	151	376	921	198	0.23	40
CV	11	29	16	16	19	17	23	55	3	18
EFLUENTE (PERIODO III)										
\bar{X}	2570	823	1747	2134	547	1587	1642	290	7.9	473
S	882	170	947	783	201	599	663	91	0.12	68
CV	34	21	54	35	37	38	40	31	1	14
% E	26	13	32	29	28	28	58	19		

* Expresados en mg/l excepto Alcalinidad en mg CaCO₃/l y pH en unidades de pH.

\bar{X} = Promedio; S = Desviación Estándar, CV = Coeficiente de variabilidad (en porciento), y % E = Eficiencia de remoción.

Sólidos

La Tabla anterior muestra que se tuvieron en general bajas eficiencias de remoción para los STT, STV, SST y SSV (de 26%, 32%, 29% y 28% respectivamente) debido al gasto de recirculación experimental, que como se esperaba, lavaría la materia orgánica con baja capacidad de sedimentación.

La evolución en el tiempo de este parámetro, mostró 3 periodos (Fig. 7.1.5): el primero que correspondió a la etapa de arranque, considerada desde el inicio de la operación del reactor hasta obtener una producción constante de biogás y en donde la concentración de SST en el efluente fue inferior a la del influente; la segunda, considerada etapa de transición, en la cual el comportamiento de la cama no es estable, por lo que se observa la evacuación esporádica del lodo con el consecuente incremento del valor de los SST, como se observa en el día 11 (Fig 7.1.5 A) y la tercera etapa de pseudo estabilidad en donde la cama de lodos se compactó, lo que se tradujo en una menor cantidad de

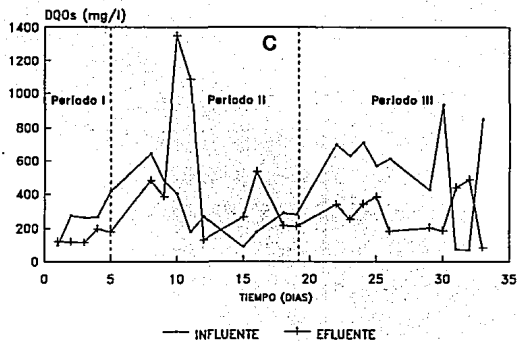
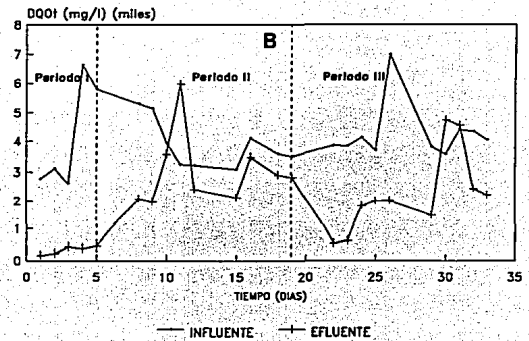
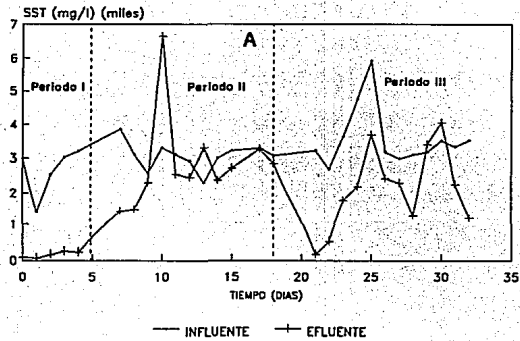


Fig. 7.1.5 Variación de los SST, DQOt y DQOs. Corrida 3

sólidos en el efluente.

Hacia el final de la corrida y debido al llenado del reactor con el lodo, así como a la expansión variable de la cama de lodo se observó una mayor cantidad de sólidos en el efluente con respecto al influente.

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

En la primera etapa de operación (5 días), aún cuando la velocidad ascendente fue alta no se evacuaron sólidos, por lo que existe una diferencia notable entre los valores de la DQO_t influente y efluente. Sin embargo, conforme la cama fue incrementando su altura, se inició su flotación lo que trajo como consecuencia que en la segunda etapa saliera una gran cantidad de lodo (días 18 a 19). El mismo comportamiento se presentó en la tercera etapa (días 30 y 31) por lo que los valores de la DQO_t del efluente fueron superiores en esos días a los de la DQO_t influente (**Fig.7.1.5 B**). Las eficiencias de remoción de la DQO_t son bajas, del orden de 58 %. Sin embargo, en esta corrida se tuvo una remoción de DQO_s de 19%, inferior a la de la corrida 2 de 83 %, con un TRH idéntico en ambas corridas. La recirculación y el aumento de la velocidad ascendente, podría haber favorecido una mayor hidrólisis de la biomasa bacteriana, generando más productos solubles.

pH y Alcalinidad

En esta corrida se estableció un nuevo punto de medición de pH en la cama de lodos; los valores promedio en la corrida fueron 7.38, 6.9, y 7.9 para el influente, cama de lodos y efluente respectivamente. El pH en la cama de lodos presentó los valores más bajos de 6.9 (**Anexo 1, Tabla A.1.3.2**) debido a que en los procesos de hidrólisis y fermentación de las bacterias presentes en el lodo, se liberan ácidos grasos volátiles que reducen el pH. Sin embargo, en estos mismos procesos se genera CO₂, que permanece en el sistema en forma de bicarbonatos, actuando como amortiguador, por lo que se incrementan los valores de alcalinidad, y se mantienen valores de pH cercanos a la neutralidad al finalizar la corrida (**Fig.7.1.6 A**).

Los valores promedio de alcalinidad logrados en esta corrida fueron para el influente y el efluente, de 216 y 473 mg de CaCO₃/l con un incremento de 25% en promedio; el comportamiento de este parámetro

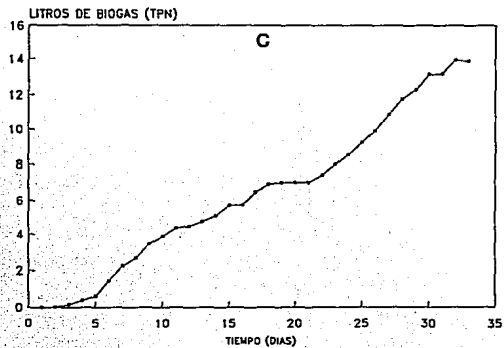
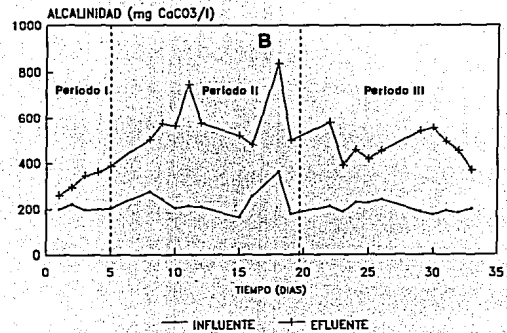
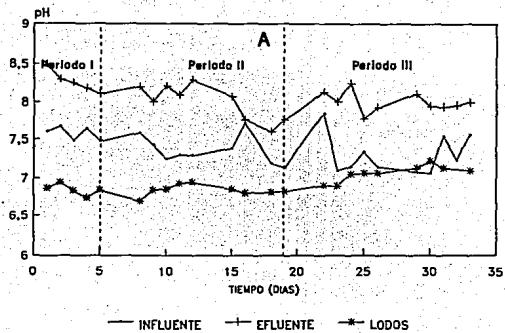


Fig. 7.1.6 Variación del pH, alcalinidad y producción de biogas. Corrida 3

también mostro tres etapas: en la primera se observó un incremento constante de la alcalinidad, en el segundo la tendencia fue mantenerse en un intervalo de 500 a 600 mg CaCO_3/l , a excepción de los días 11 y 18; en el tercer periodo la tendencia fue a una mayor estabilidad en un intervalo de 400 a 500 mg CaCO_3/l como se aprecia en la Figura 7.1.6 B.

Producción de Biogás

La producción de biogás (Fig.7.1.6 C) se inició prácticamente desde el 2do día y se obtuvo un volumen final de 13.9 l (TPN), esto corresponde a una producción promedio de 0.11 l/l.d (TPN). La fracción de metano en el gas fue de 54.8 % y hacia el final de la corrida se tuvo un máximo de 66.7 %.

Características del lodo producido

El volumen final de lodo producido fue de 4.22 l con las siguientes características

SSV = 9.13 g/l	IVL = 32.6 ml/g
SSF = 2.66 g/l	V.sed = 5.51 m/h
SSV = 6.47 g/l	
% volátil = 71%	

Alrededor del día 22, se observó una tendencia a la granulación aunque no uniforme a lo largo del reactor; para el día 27 los lodos en el efluente tendieron a mantenerse en agregados, con un aspecto intermedio entre grano y lodo floculento. Al final de la corrida (35 días) la consistencia de los lodos evacuados fue de flóculos pequeños de color negro. Sin embargo, presentaron poca compactación ya que fuera del reactor se disgregaron aproximadamente en una hora. El IVL para estos lodos fue 32.6 ml/g, lo cual es un valor cercano al del lodo granular con buena sedimentación cuyo valor se ha reportado entre 10 a 20 ml/g.

7.1.4 CORRIDA 4

En esta corrida se redujo el gasto de recirculación a la mitad con respecto a la corrida anterior, debido a su fuerte influencia sobre la expansión y evacuación de la cama de lodos. A continuación se presentan las características de la operación en el reactor.

Duración	35 días
Q_i	1.32 ml/min
CO	1.44 g SST/1·d
TRH	2.0 días
V_{asc}	0.15 m/h
Q_i recirc	17.5 ml/min

El valor promedio de los parámetros fisicoquímicos en esta corrida (Tabla 7.1.4) corresponden a la etapa 2 por considerarse la más representativa de la operación del reactor.

TABLA 7.1.4 VALORES PROMEDIO DE LOS PARAMETROS FISICOQUIMICOS EN LA CORRIDA 4*

	STT	STF	STV	SST	SSF	SSV	DQOT	DQOs	pH	Alcal.	pHl
INFLUENTE PERIODO II											
\bar{X}	2766	1065	1701	2572	920	1652	3489	416	7.41	223	
S	593	481	623	746	439	610	918	178	0.35	35	
CV	21	45	37	29	48	37	26	31	0.5	16	
EFLUENTE PERIODO II											
\bar{X}	1951	935	1016	1665	488	1177	1939	390	8.05	503	7.58
S	631	429	505	540	184	401	1169	222	0.30	33	0.12
CV	32	46	49	32	38	34	60	57	4	7	2
% E	29	12	40	35	47	28	44	6			

* Expresados en mg/l excepto Alcalinidad en mg CaCO_3 /l y pH en unidades de pH.

\bar{X} = Promedio, S = Desviación Estándar, CV = Coeficiente de variación (en por ciento), y % E = Eficiencia de remoción.

Sólidos

De acuerdo al perfil de los SST en el tiempo, se identificaron 2 periodos: el primero del día 1 al 10 que correspondió al inicio de la

operación con una baja concentración de sólidos en el efluente (Promedio = 155 mg/l) debido a su acumulación en el reactor, lo que representó un porcentaje de remoción del 95 % (Anexo 1, Tablas A.1.4.2 y A.1.4.3). En el segundo periodo, del día 11 al término de la corrida, se inició la evacuación de lodo como resultado de la saturación del reactor y posteriormente se observó la compactación del lecho de lodo.

Al finalizar la corrida durante los días 34 y 35 el incremento de los sólidos en el efluente se debió al llenado del reactor con los lodos (Fig. 7.1.7 A). Las eficiencias de remoción para los STV y SSV durante la segunda etapa fue de 40 y 28 %, respectivamente y como en las corridas anteriores, la remoción se presentó vía retención de lodo en el reactor (Tabla 7.1.4).

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La Figura 7.1.7 B mostró dos periodos. El primero, del día 1 al 10, relativamente estable, en donde el valor promedio de DQO total en el efluente fue de 364 mg/l, lo que representó eficiencias de remoción del 92%. En el segundo periodo existió una fuerte tendencia al incremento de los valores de la DQO_t efluente hasta superar la DQO_t del influente el día 15; esto se debió a la gran cantidad de lodo evacuado por el reactor en este intervalo. En este periodo, la DQO_t en el influente se redujo debido a problemas de la planta de tratamiento de aguas residuales, por lo que la concentración de sólidos de alimentación fue menor a la requerida disminuyendo la carga orgánica efectiva en 21.5 %. En cuanto a la DQO_t efluente, la tendencia a la reducción de sus valores al final de la corrida se debió a que la cama de lodos se empezó a compactar a partir del día 21.

La DQO soluble del efluente (Fig. 7.1.7 C) también mostró dos periodos: el primero del día 3 al 10 en donde la concentración del influente fue alta y baja en el efluente con una eficiencia de remoción del 84 % (Anexo 1, Tablas A.1.4.1 y A.1.4.2). En el segundo periodo del día 12 al término de la corrida con valores reducidos de DQOs en el influente por lo que la remoción fue de 6% (Tabla 7.1.4).

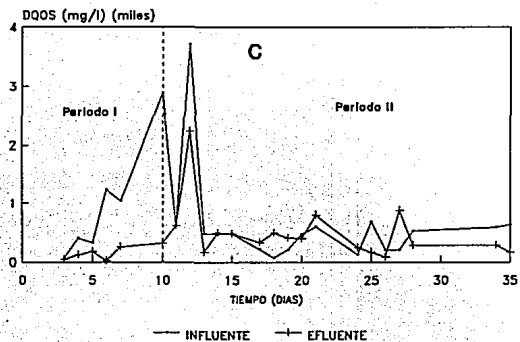
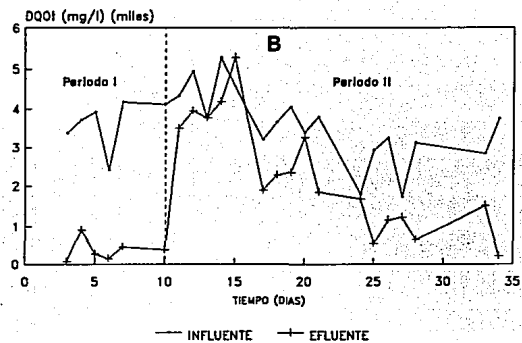
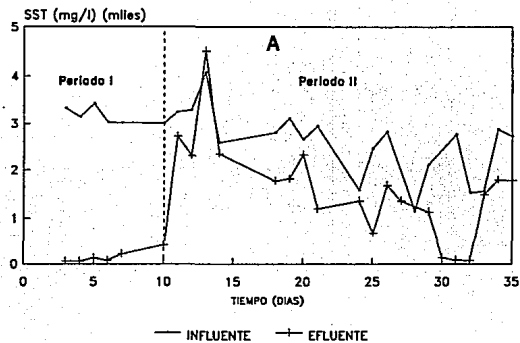


Fig. 7.17 Variación de los SST, DQOt y DQOs. Corrida 4

pH y Alcalinidad

Durante el segundo periodo de la corrida, la alcalinidad del influente alcanzó un valor promedio de 223 mg/l como CaCO_3 /l después de 10 días, mientras que la del efluente se incrementó a 503 mg/l (Tabla 7.1.4). La Figura 7.1.8 B muestra que el incremento de la alcalinidad se inició desde el tercer día de operación hasta el día 11 (Periodo I). A partir de este día la alcalinidad generada se mantuvo prácticamente constante en un intervalo de 450 a 500 mgCaCO_3 /l (Periodo II).

El incremento de la alcalinidad dió como resultado que desde el día 11, el pH de la cama de lodos lograra mantenerse en valores por arriba de 7 hasta el final de la corrida (Anexo 1, Tabla A.1.4.2), aún cuando el pH del influente presentó grandes variaciones (Fig. 7.1.8 A). Los valores iniciales de pH bajos en la cama de lodos antes del día 11 fueron resultado de la generación de ácidos liberados durante el proceso de hidrólisis y fermentación. En cuanto al pH efluente, este se mantuvo en un valor promedio de 8.0 durante toda la corrida.

Potencial de Oxido-Reducción (POR)

Los resultados del potencial de óxido reducción (electrodo de AgCl/Ag) en la cama de lodos, se presentan en el Anexo 1 (Tabla A.1.4.2) en donde se observa que los valores se van reduciendo a lo largo de la corrida, alcanzando - 360 mV al final. Lo anterior es un indicio de las condiciones reductoras que se lograron en el interior del reactor.

Producción de Biogás

En la Figura 7.1.8 C se observa el perfil de la producción de gas acumulado durante esta corrida, en donde se aprecia que el inicio de la producción de gas fue después del día 8. El volumen total de biogás fue de 12.81 l (TPN) con una producción diaria de 0.10 l/1.d (TPN). El porcentaje de metano fue de 62.32 % al final de la corrida.

Características de los lodos producidos

El aspecto del lodo al final de la corrida, fue floculento de color negro con tendencia a la agregación. Sin embargo, una vez fuera del reactor las partículas se disgregaban fácilmente por lo que no fue

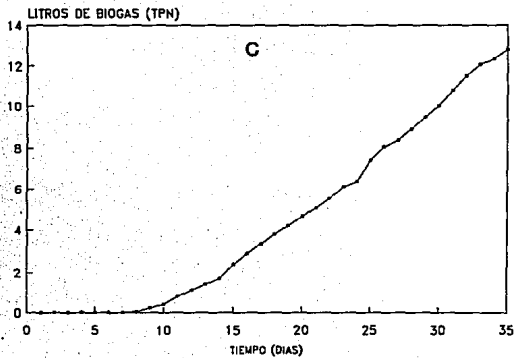
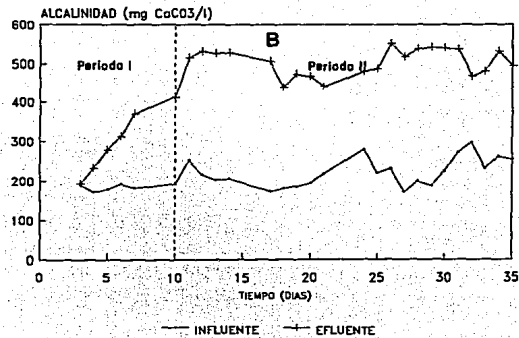
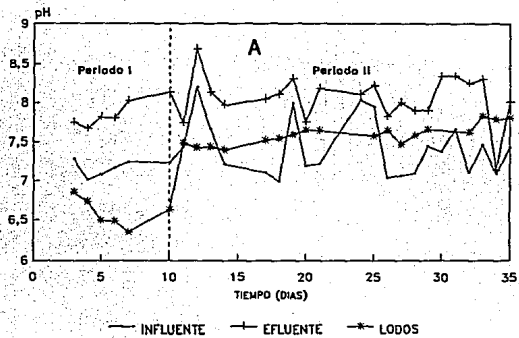


Fig. 7.18 Variación del pH, alcalinidad y producción de biogas. Corrida 4

posible realizar el análisis de granulometría. El volumen de lodo producido fue de 4.35 l con las siguientes características.

SST = 9.77 g/l	IVL = 36.6 ml/g
SSF = 3.02 g/l	$V_{sed} = 4.04$ m/h
SSV = 6.70 g/l	
% Volátil = 68.6	

En esta corrida se tuvieron problemas de flotación de lodos, lo que ocasionó que para el día 12 el reactor pareciera completamente lleno, dando lugar a la evacuación del lodo. A lo anterior, contribuyó el inicio de la producción de burbujas de gas que se adherieron a los flocúlos provocando su ascenso y salida del reactor.

A reserva de discutir más ampliamente estos resultados en el capítulo correspondiente, se puede observar que cuando se aumentó la V_{asc} a 0.30 m/h (corrida 3) se obtuvo un lodo con mejores características de sedimentación. Esto permitió establecer las condiciones de operación en la segunda etapa experimental.

SEGUNDA ETAPA EXPERIMENTAL: EFECTO DE LA ADICION DE SUSTRATO

Durante la segunda etapa experimental se evaluó el efecto de la adición de sustratos externos como glucosa y una mezcla de melaza-vinaza sobre el proceso de granulación del lodo. Las variables operacionales fueron establecidas con base en los resultados de las corridas anteriores, de acuerdo a su efecto sobre la calidad del lodo producido. Así, la velocidad ascendente se fijó primero en 0.3 m/h y luego se redujo a 0.1 m/h, al igual que la carga orgánica con el fin de retardar la evacuación del lodo. Cada corrida se realizó con dos reactores en paralelo operando uno en ausencia de sustrato y el otro en presencia del mismo, bajo idénticas condiciones de operación. En todos los casos el primer reactor (reactor A), sin sustrato, sirvió como control.

7.1.5 CORRIDA 5A (SIN VINAZA-MELAZA)

En esta corrida se establecieron los siguientes criterios de operación:

Duración	62 días
CO	0.72 g SST/l-d
TRH	2 días
Q ₁	1.45 ml
Q _{1 recirc}	17.5 ml/min
V _{asc}	0.3 m/h

Con la reducción de la carga orgánica se pretendió que el reactor no se llenara tan rápido, al aumentar el tiempo de residencia del lodo retardando así la evacuación de lodo joven que aún no había logrado su transformación en lodo granular anaerobio. Los promedios de los parámetros fisicoquímicos de esta corrida se presentan en la Tabla 7.1.5.

TABLA 7.1.5 VALORES PROMEDIO DE LOS PARAMETROS FISICOQUIMICOS EN LA CORRIDA 5A (SIN VINAZA-MELAZA)*.

	STT	STF	STV	SST	SSF	SSV	DQOt	DQOs	pH	Alcal.	pH _L	POR _L
INFLUENTE												
\bar{X}	1824	605	1220	1548	396	1152	1968	306	7.5	236		
S	391	193	387	383	163	393	658	215	0.27	35		
CV	21	32	32	25	41	34	33	70	4	15		
EFLUENTE												
\bar{X}	1110	518	592	675	207	468	893	164	8.11	343	7.57	-356
S	464	275	278	509	202	343	739	136	0.27	46	0.34	20
CV	42	53	48	75	97	73	83	82	3	13	4	6
% E	29	10	50	63	44	65	55	46				

* Expresado en mg/l excepto Alcalinidad en mg CaCO₃/l, pH en unidades de pH y POR en mV.

X = Promedio; S = Desviación estándar, L = lodo, CV = Coeficiente de variación (en porciento), y % E = Eficiencia de remoción.

Sólidos

Como en las corridas anteriores, la mayor parte de la remoción fue lograda principalmente vía retención de sólidos dentro del reactor, más

que por una degradación de los mismos. En esta corrida se presentaron problemas con el agitador que ocasionaron la flotación del lodo. Esto provocó un comportamiento de evacuación de lodos de tipo cíclico con intervalos de tiempo muy cortos entre los días 14 y 49.

Los coeficientes de variabilidad de los efluentes fueron superiores que los del influente. Como en las corridas anteriores, esto también se debe a la evacuación de lodo en cantidad variable cada día, particularmente en los 6 y 55 días, este último como respuesta al llenado del reactor (Fig. 7.1.9 A).

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

En el perfil de la DQOt en la Figura 7.1.9 B se observa que en los primeros catorce días, la concentración de DQOt del efluente fue baja debida a la retención del lodo dentro del reactor. El resto de la corrida el comportamiento fue variable, debido a la flotación del lodo anteriormente mencionada, lo cual incrementó el coeficiente de variabilidad de la DQOt del efluente aún cuando la remoción del 55 % mostrado en la Tabla 7.1.5, es similar a las corridas anteriores. Para la DQO soluble la eficiencia de remoción fue de 46%.

pH y Alcalinidad

El valor promedio de pH del influente fue de 7.5, de 8.11 en el efluente y 7.57 en la cama de lodos. La evolución de ambos parámetros se observa en la Figura 7.1.10 A.

En el caso de la alcalinidad, para el influente fue de 236 mg de CaCO_3/l , incrementandose en el efluente a 349 mg CaCO_3/l , lo que significó un incremento de alcalinidad del 48 % (Fig 7.1.10 B).

Lo anterior permitió lograr un pH adecuado en la cama de lodos para el proceso de digestión anaerobia. En este caso, la generación de alcalinidad que se observó desde el inicio de la corrida, mantuvo el pH dentro del reactor alrededor de 7 durante los primeros 20 días, a partir del cual se incrementó hasta valores cercanos al pH del efluente alrededor del día 35.

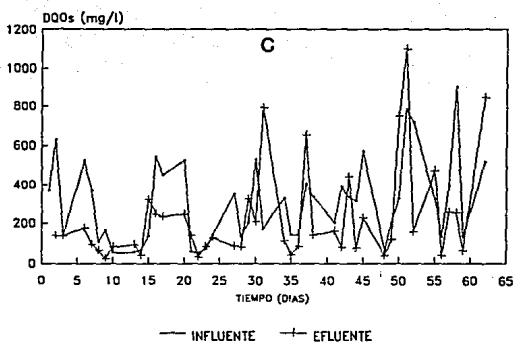
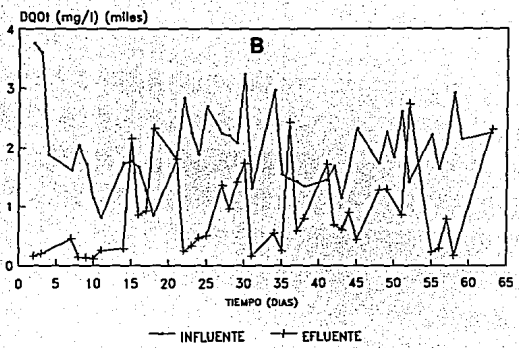
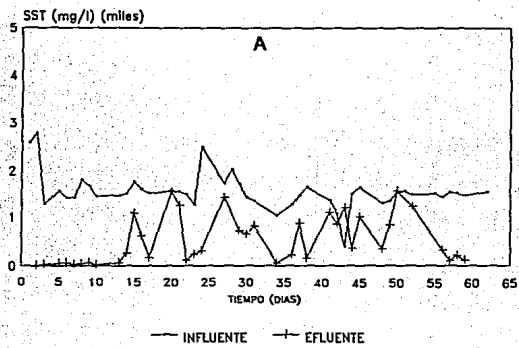


Fig. 7.19 Variación de los SST, DQOt y DQOs. Corrida 5A

Producción de Biogás

En esta corrida la producción de biogás se inició al tercer día de operación. Sin embargo, como se observa en la Figura 7.1.10 C ésta se mantuvo a un ritmo de incremento lento durante los días 14 al 28, debido a fugas en el reactor, donde apenas se alcanzó un volumen acumulado de poco más de 2 litros. Adicionalmente se tuvo un problema con control de la temperatura entre los días 29 a 44, en un intervalo de 24°C a 44°C que una vez solucionado permitió obtener una producción de gas más constante de 0.033 l/l.d. Debido a lo anterior el volumen final fue de sólo 7.62 l (TPN).

Características del lodo producido

El volumen final del lodo fue de 4.42 l caracterizado en la fracción suspendida con los siguientes valores:

SST = 8.49 g/l	IVL = 36.18 ml/g
SSF = 2.54 g/l	Vsed = 4.89 m/h
SSV = 6.20 g/l	
% Volátil = 73%	

El aspecto físico del lodo, fue un color negro floculento, poco compacto y con aspecto aun esponjoso, que fuera del reactor mostró poca resistencia al corte hidráulico. Los valores del IVL y Vsed obtenidos en esta corrida son cercanos a los esperados bajo las condiciones de operación establecidas.

7.1.6 CORRIDA 5B (CON VINAZA - MELAZA)

El sustrato adicionado consistió en una mezcla de vinaza-melaza en proporción 1:1 calculada con base en su DQO. La melaza y la vinaza son subproductos de la fabricación de azúcar y de alcohol respectivamente, por lo que se encuentran fácilmente disponibles en los ingenios azucareros. En la elección de ambos sustratos, se consideró su elevado contenido de azúcares susceptibles de ser utilizados por los microorganismos. Las variables de operación que predominaron en esta corrida fueron las siguientes:

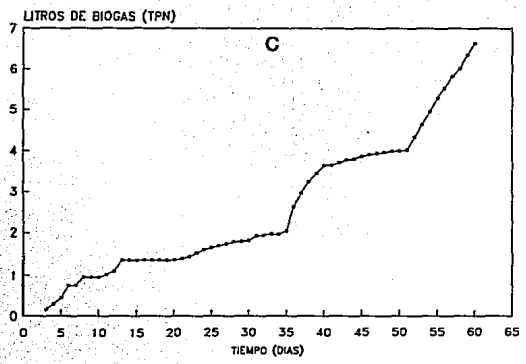
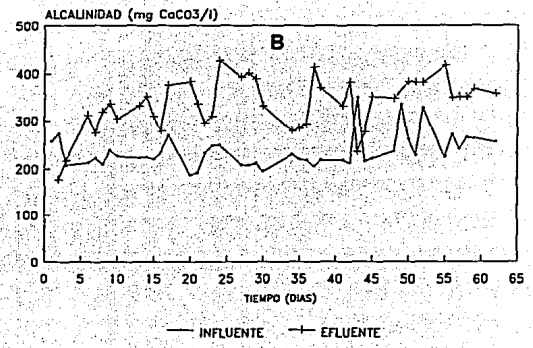
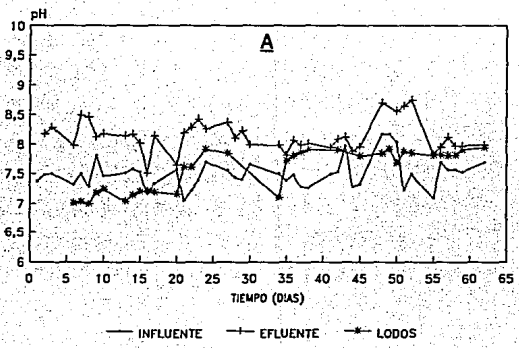


Fig. 7.1.10 Variación del pH, alcalinidad y producción de biogas. Corrida 5A

Duración	57 días
CO	0.72 g SST/1.d
TRH	2 días
Q _i	1.5 ml/min
Q _{irecirc}	34.4 ml/min
V _{asc}	0.30 m/h
Q _{isustrato}	0.48 ml/min
CO sustrato	0.5 g DQO/g SSV.d

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos de operación de esta corrida se muestran en la **Tabla 7.1.6**.

TABLA 7.1.6 VALORES PROMEDIO DE LOS PARAMETROS FISICOQUIMICOS EN LA CORRIDA 5B (CON VINAZA-MELAZA).*

	STT	STF	STV	SST	SSF	SSV	DQO _t	DQO _s	pH	Alcal.	pHL	PORL
INFLUENTE												
\bar{X}	1805	616	1188	1483	424	1059	2009	320	7.35	242		
S	309	177	310	179	160	213	568	197	0.25	35		
CV	17	29	26	12	40	20	28	61	3	14		
EFLUENTE												
\bar{X}	1399	672	727	592	102	490	1086	487	7.76	427	7.39	-352
S	589	240	379	354	77	291	756	274	0.37	95	0.22	17
CV	42	36	52	60	75	59	70	56	5	19	3	5
% E	22		39	60	76	54	46					

* Expresados en mg/l excepto Alcalinidad en mg CaCO₃/l, pH en unidades de pH y potencial de oxido reduccion (POR) en mV.

\bar{X} = Promedio, S = Desviación Estandar, CV = Coeficiente de Variabilidad (en porciento), % E = Eficiencia de remoción y L = lodo.

Sólidos

La **Tabla 7.1.7** muestra que el valor promedio de SST en el influente, fue de 1483 mg/l y 592 mg/l en el efluente lo que representa una remoción del 60%. La mayor parte de la remoción como en los casos

anteriores se debió a la retención de los lodos en el reactor. Las desviaciones estándares de los datos del efluente, siguieron siendo mayores a las del influente debido a la evacuación de lodos del reactor (Fig. 7.1.11 A).

Este comportamiento fue provocado por el llenado del reactor como respuesta a la recirculación, que favoreció la salida del lodo. Adicionalmente, la producción de gas provocó una agitación en la cama de lodos que contribuyó a su evacuación del reactor.

Nuevamente se observó variación entre los días 18 y 60 a excepción de los días 20, 39, 52 y 54 en que se observó una pérdida importante de lodos en el efluente.

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La Figura 7.1.11 B muestra el perfil de comportamiento, de la DQO del influente y efluente del reactor. Se observó que durante los primeros 19 días, la DQO del influente fue mayor a la del efluente lo que se debió a que todo el material suspendido que entró era retenido por sedimentación, el resto de la corrida el comportamiento de los valores fue inestable. La principal causa que explica esta variación, es la elevada recirculación que se manejó, por lo que los lodos que aún presentaban un aspecto esponjoso y sin buena sedimentación, fueron evacuados en cantidades variables.

En cuanto a la DQO_s (Fig.7.1.11 C), el efluente mostró un comportamiento irregular con valores mayores a los del influente durante la mayor parte del tiempo. Esto se explica al inicio de la corrida, a que la actividad microbiana aún no se había establecido por completo y en el resto de la corrida por la hidrólisis de los lodos y la adición de la mezcla vinaza-melaza.

pH y Alcalinidad

El comportamiento general de la alcalinidad corrobora lo antes mencionado en relación a inicio de la actividad microbiana, ya que después del día 15 se aceleró la generación de alcalinidad, estabilizándose en el día 35 en valores promedio de 500 mg CaCO₃/l (Fig.7.1.12 B). De esta forma, el incremento de la alcalinidad

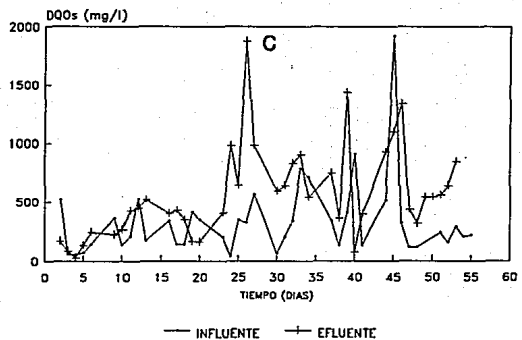
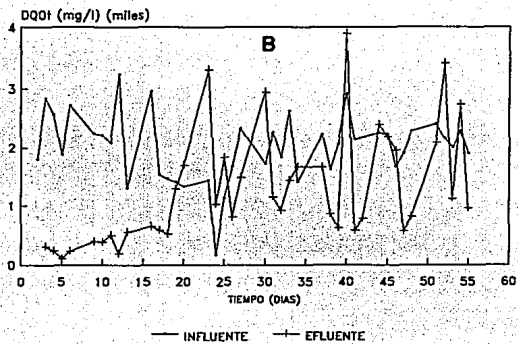
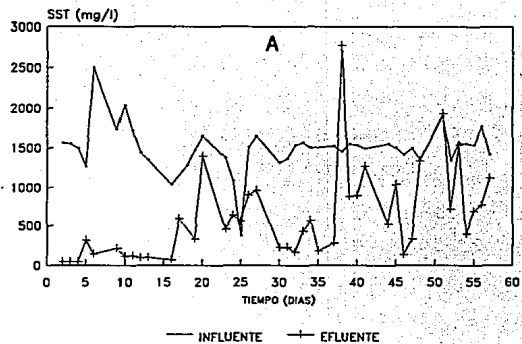


Fig. 7.1.11 Variación de los SST, DQOt y DQOs.
Corrida 5B

generada fue de 78 % con un valor promedio de 242 mg CaCO_3 /l en el influente y 427 mg CaCO_3 /l en el efluente.

El perfil del pH del influente, efluente y lodos en la **Figura 7.1.12**, mostró que el pH del influente y efluente fue muy alto y variable, con un coeficiente de variabilidad de 3 y 5. El valor promedio de para el influente, efluente y cama de lodos fue de 7.35, 7.76 y 7.38 respectivamente (**Tabla 7.1.7**).

Potencial de Oxido - Reducción

El POR promedio que caracterizó esta corrida fue de -349 mV, con condiciones reductoras adecuadas casi desde el inicio de la corrida. Esto en principio pudo deberse a la rápida utilización del oxígeno disuelto en la alimentación y de las formas oxidadas del nitrógeno por las bacterias facultativas, en presencia del sustrato adicional y posteriormente a la rápida implantación de la anaerobiosis.

Producción de Biogás

La producción de gas en cantidad suficiente para medirse se inició a partir del día 3 de operación. La **Figura 7.1.12 C** muestra que la producción acumulada de gas, fue exponencial hasta aproximadamente el día 35, a partir del cual la producción se mantiene constante. El volumen final de gas producido fue de 28.97 litros (TPN), con un porcentaje máximo de metano de 67% y un mínimo de 16.4%, con una producción de 0.134 l/l.d.

Características del lodo Producido

Al finalizar la corrida, el volumen de lodos producido fue de 4.3 l con las siguientes características:

SST = 5.6 g/l	IVL = 50 ml/g
SSF = 1.28 g/l	V _{sed} = 3.67 m/h
SSV = 4.32 g/l	
% Volátil = 77%	

Desde los primeros días se observó una tendencia a la granulación; aun cuando los granos eran escasos, se observaron como entidades

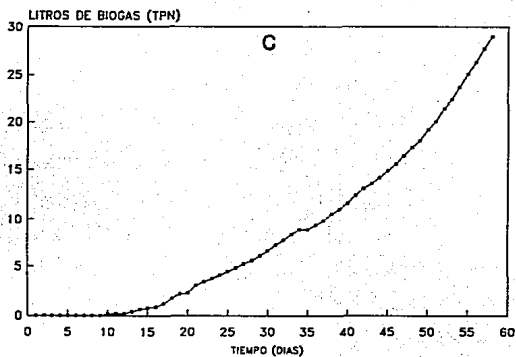
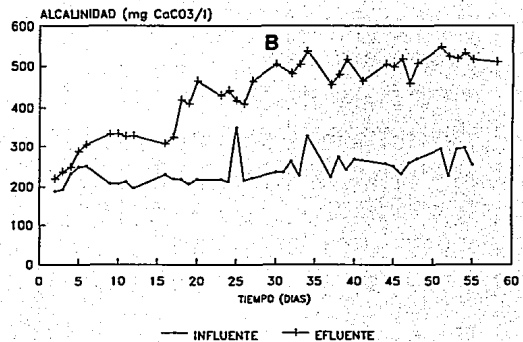
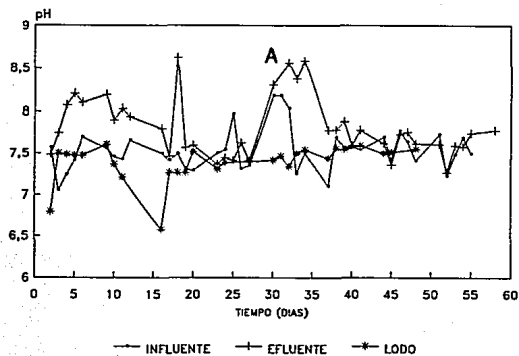


Fig. 7.112 Variación del pH, alcalinidad y producción de biogas. Corrida 5B

individuales con buenas características de sedimentación. Estos se apreciaron principalmente cuando la producción de gas produjo turbulencia en la cama de lodos, elevando los pequeños granos a la parte superior de la cama (2 mm).

La reducción en la cantidad de grano así como su pérdida se observó a partir del día 20, precedida de una compactación de la cama de lodos.

7.1.7 CORRIDA 6A (SIN GLUCOSA)

Con las corridas 6A (sin glucosa) y 6B (con glucosa) se evaluó el efecto de la adición de este sustrato. En ambas se aplicó una velocidad ascendente de 0.1 m/h durante los primeros 15 días (Etapa I), con el propósito de minimizar la expansión de la cama de lodo, durante el inicio, y los 75 días restantes (Etapa II) la velocidad ascendente se fijó en 0.3 m/h.

La duración de la corrida se incrementó para favorecer el desarrollo y actividad de la población metanogénica, así como sus propiedades de sedimentación, esperando con esto mejorar las características del lodo final.

Los valores promedio que caracterizaron esta corrida se presentan a continuación:

	ETAPA I	ETAPA II
Duración	15 días	75 días
CO	1.5 g SST/1-d	1.5 g SST/1-d
Q_1	1.5 ml/min	1.5 ml/min
TRH	2 días	2 días
Vasc	0.1 m/h	0.3 m/h
$Q_{1recirc}$	11.73 ml/min	35.2 ml/min

Los resultados en el Anexo 1, Tablas A.1.6 y A.1.6A.1 de las etapas de operación I y II, bajo una velocidad ascendente de 0.1 m/h y 0.3 m/h respectivamente, mostraron que las eficiencias de remoción en los dos periodos fue prácticamente la misma; por lo que se consideró a la segunda etapa como representativa del funcionamiento del reactor debido al mayor tiempo en que se mantuvo la corrida bajo estas condiciones.

El valor promedio de los parámetros fisicoquímicos de esta corrida se presentan en la **Tabla 7.1.7**.

Sólidos

La remoción de los STT, STV, SST y SSV fue de 71, 83, 95 y 95% respectivamente (**Tabla 7.1.7**). Como en corridas anteriores, la remoción se debió a la retención de sólidos en el reactor, lo que se vió favorecido por la baja velocidad ascendente aplicada durante los primeros 15 días de operación. De esta forma una vez lograda una cama con buenas características de sedimentación, el incremento de la velocidad ascendente no modificó la sedimentabilidad del lodo. Es importante señalar la gran estabilidad en los sólidos del efluente que caracterizó a esta corrida, a lo que tal vez contribuyó la baja velocidad ascendente aplicada al inicio de la operación así como a un mejor control de los sólidos del influente.

El efluente se observó claro, sin gran cantidad de sólidos salvo contadas excepciones debido a fallas en el sistema de agitación (**Fig. 7.1.13 A**).

TABLA 7.1.7 VALORES PROMEDIO DE LOS PARAMETROS FISICOQUIMICOS EN LA CORRIDA 6A (SIN GLUCOSA)*.

	SST	STF	STV	SST	SSF	SSV	DQOt	DQOs I	DQOs II	pH	Alcal.
INFLUENTE											
\bar{X}	1946	574	1372	1514	300	1214	2018	181	364	7.01	195
S	334	233	254	103	52	95	241	115	247	0.19	40
CV	17	41	18	7	17	8	12	63	68	3	21
EFLUENTE ETAPA II											
\bar{X}	566	346	220	74	12	62	233	160	91	6.7	344
S	92	85	78	36	7	32	80	54	24	0.23	63
CV	16	24	35	48	54	52	34	34	26	3	18
% E	71	39	83	95	96	95	89	12	75		

* Expresados en mg/l a excepción de Alcalinidad en mg CaCO₃/l y pH en unidades de pH.

\bar{X} = Promedio, S = Desviación estándar, CV = Coeficiente de variabilidad (en porcentaje), % E = Eficiencia de remoción, DQOs I y II = DQOs en el periodo I y II

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La DQO total promedio del influente fue de 2018 mg/l y 233 mg/l en el efluente con un porcentaje de remoción del 88 % (Fig.7.1.13 B). En este parámetro, como en los sólidos se observó una marcada estabilidad en los valores del efluente con relación a la baja variación del influente (CV = 12 %, Tabla 7.1.7).

Para la DQO soluble se distinguen dos periodos; el primero desde el inicio de la operación hasta el día 52, en donde la DQO soluble influente y la remoción son bajos (12%). El segundo periodo hacia el final de la segunda etapa, del día 53 al término de la corrida, con un incremento de la DQOs del influente y una remoción superior a la del periodo I (75%). Esto se puede asociar al establecimiento de una comunidad anaerobia bien definida en donde los procesos de degradación se presentaron ya con una cierta estabilidad.

pH y Alcalinidad

El pH promedio en el influente fue de 7.01 y 6.7 en efluente, esto muestra que la alcalinidad generada fue suficiente para mantener valores adecuados para la actividad metanogénica. La alcalinidad del influente fue de 195 mg CaCO₃/l y en el efluente de 344 mg CaCO₃/l, lo que representa un incremento del 77% (Tabla 7.1.7).

La evolución de ambos parámetros se muestra en las Figuras 7.1.14 A y B, en donde se observa que el pH de la alimentación fue en general mayor al del efluente, el cual a partir del día 10 se mantuvo en un intervalo de 6.6, a diferencia de los primeros días en donde el efluente fue mayor al del influente para posteriormente decrecer. Esto puede deberse al pH del agua con que se llenó el reactor al inicio de la operación. Este comportamiento es resultado de la acumulación de AGV en el reactor hasta el día 11, cuando el pH del reactor (efluente) presentó un valor francamente ácido (6.18), y es a partir de este día donde se inició el incremento en la generación de alcalinidad.

Producción de Biogás

En esta corrida el volumen de biogás producido fue muy limitado, de aproximadamente 5.70 l (TPN), ya que se presentaron fugas en el

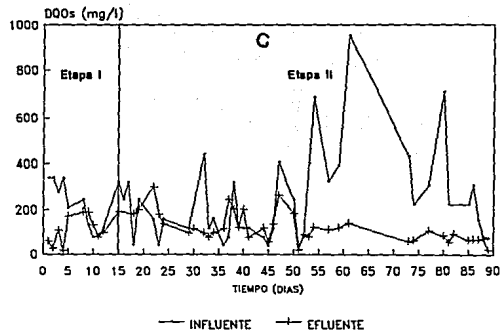
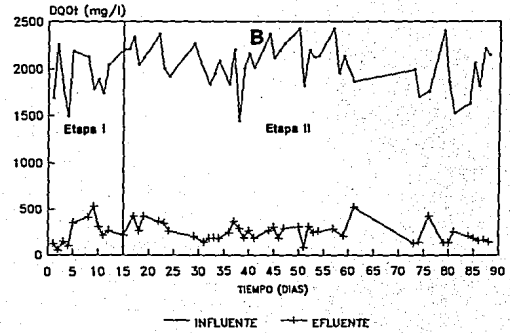
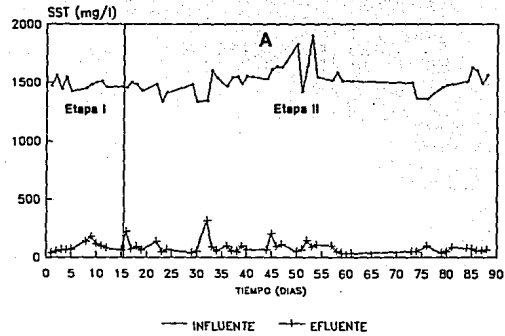


Fig. 7.1.13 Variación de los SST, DQOt y DQOs.
Corrida 6A

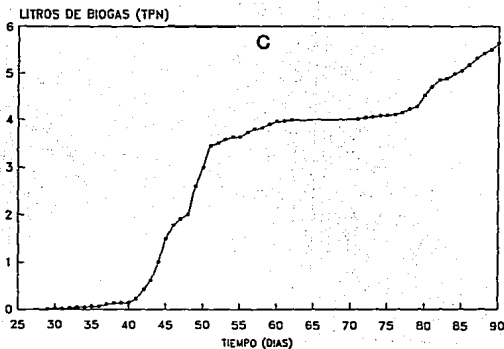
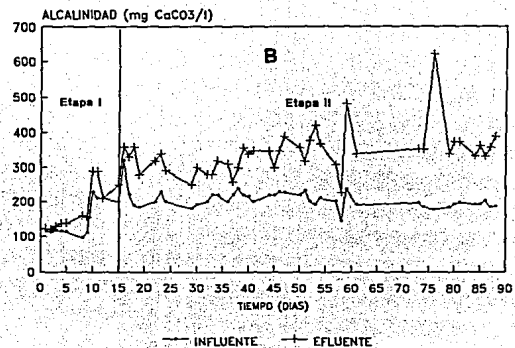
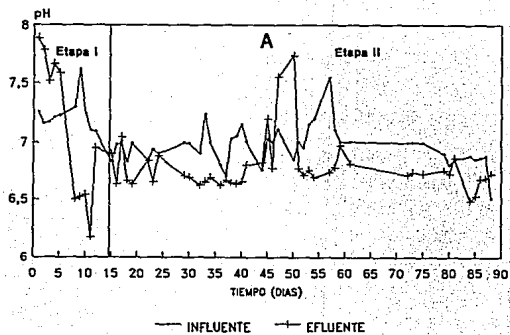


Fig. 7.1.14 Variación del pH, alcalinidad y producción de biogas. Corrida 6A

reactor, que impidieron la cuantificación del biogás. Debido a esto, los resultados se presentan desde el día 29. A partir del día 52 al 80 la producción de biogás disminuyó considerablemente debido a que de nuevo se presentaron fugas en el reactor. El máximo porcentaje de metano en el reactor fue de 60.7%, con una producción de 0.023 l/l·d (Fig. 7.1.14 C).

Características de los lodos producidos

La cuantificación de los SST al término de los 90 días, así como índice volumétrico de lodos y velocidad de sedimentación mostraron lo siguiente:

SST = 6.2 g/l	IVL = 71.3 ml/g
SSF = 1.9 g/l	V _{sed} = 1.150 m/h
SSV = 4.2 g/l	
% Volátil = 69 %	

El lodo obtenido presentó un color negro, de aspecto floculento con tendencia a la agregación. Sin embargo, fuera del reactor se disgregó por lo que no fue posible llevar a cabo el análisis granulométrico. La cama de lodos presentó buena compactación, con expansión variable.

7.1.8 CORRIDA 6B (CON GLUCOSA)

La adición de dos diferentes concentraciones de glucosa como sustrato, fue la variable experimental que la diferenció con respecto a la 6A. Las variables de operación se describen a continuación.

	ETAPA I	ETAPA II
Duración	15 días	75 días
CO	1.5 g SST/l·d	1.5 g SST/l·d
TRH	2 días	2 días
V _{asc}	0.1 m/h	0.3 m/h
Q _{rectre}	11.73 ml/min	35.2 ml/min
COglucosa	0.1 g DQO/g·SSV·d	0.05 gDQO/g SSV·d

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos bajo las dos etapas de operación (Anexo I, Tablas A.1.6 y A.1.6B.1), muestran que las eficiencias de remoción en el segundo periodo fueron ligeramente

superiores en la etapa II, principalmente en las fracciones de los sólidos totales y DQOt. Como en la corrida 6A, se consideró la etapa II como representativa del funcionamiento del reactor, debido al mayor tiempo en que se sometió la cama de lodos a éstas condiciones de operación.

El valor promedio de los parámetros fisicoquímicos que caracterizaron la operación de la corrida se muestran en la **Tabla 7.1.8** y se describen brevemente a continuación.

Sólidos

Los valores promedio de la **Tabla 7.1.8** muestran el porcentaje de remoción de los SST de 95 % y 94 % para la fracción volátil; en el influente los SST representaron el 78% de los STT del influente mientras que los SSV el 88% de la fracción suspendida. Los coeficientes de variabilidad del influente muestran valores más pequeños con respecto a las corridas anteriores lo que indica que se tuvo un buen control de sólidos en la solución de alimentación.

TABLA 7.1.8 VALORES PROMEDIO DE LOS PARAMETROS FISICOQUIMICOS EN LA CORRIDA 6B (CON GLUCOSA)*

	STT	STF	STV	SST	SSF	SSV	DQOt	DQOs I	DQOs II	pH	alcal
INFLUENTE											
\bar{X}	1946	574	1372	1514	300	1214	2018	181	364	7.01	195
S	334	233	254	103	52	95	241	115	247	0.19	40
CV	17	41	18	7	17	8	12	63	68	3	21
EFLUENTE ETAPA II											
\bar{X}	502	255	247	81	12	70	257	205	79	6.3	251
S	109	79	108	47	7	42	124	81	49	0.15	30
CV	22	31	44	58	7	59	48	39	62	2	11
% E	74	55	82	95	96	94	87		78		

* Expresados en mg/l excepto Alcalinidad en mg CaCO₃/l y pH en unidades de pH

\bar{X} = Promedio, S = Desviación estándar, CV = Coeficiente de variación, (en porciento), DQOs I y II = DQOs en periodo I y II y % E = eficiencia de remoción.

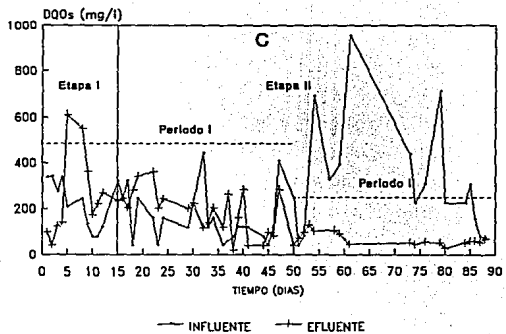
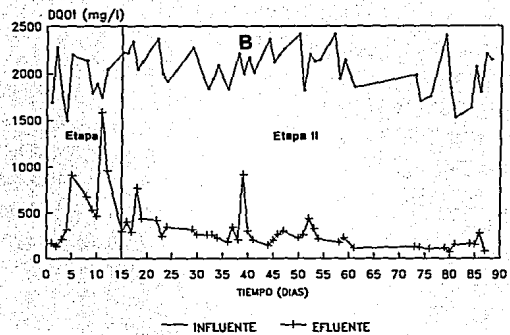
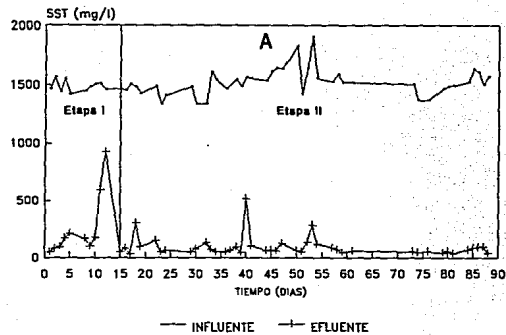


Fig. 7.1.15 Variación de los SST, DQOt y DQOs.
Corrida 6B

Por otra parte las variaciones en el efluente que se tuvieron fueron debidas a los días en que el reactor evacuó gran cantidad de lodos (días 11, 12, 40 y 53) como se observa en el **Anexo 1, Tabla A.1.6B.1 y Figura 7.1.15 A.**

Al inicio de la corrida, del día 4 al 12, se tuvieron en el efluente una gran cantidad de sólidos, debido a que aún cuando la velocidad ascendente fue relativamente baja (0.1 m/h) lavó el material filamentosos o sin buena sedimentación.

El resto de la corrida con el incremento a 0.3 m/h, la concentración de SST en el efluente permaneció en valores constantes con muy pocas excepciones (**Fig 7.1.15 A**).

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

El comportamiento de la DQO total y soluble se muestra en las **Figuras 7.1.15 B y C**; la primera mostró un comportamiento estable con un promedio de 2018 mg/l de DQO total (**Tabla 7.1.9**), que es resultado del control de los sólidos en el influente. El efluente también mostró un comportamiento estable, a excepción de los días en donde se evacuó una cantidad importante de lodo, con una eficiencia de remoción del 87 %.

Para la DQO soluble se observaron dos periodos: En el primero, del día 1 al 50 no se obtuvo en promedio remoción, ya que frecuentemente los valores del efluente eran superiores al influente debido a que predominaron los procesos de hidrólisis y a la acumulación de AGV en los primeros días de la prueba. El segundo periodo, del día 53 al final, la eficiencia de remoción promedio fue del 78%. El comportamiento de este parámetro fue similar al observado en la corrida 6A debido a que el influente era el mismo para ambas corridas. En ambos casos, aun cuando la fracción soluble del influente se incrementó en el segundo periodo, no ocurrió lo mismo en la DQOs del efluente debido a que como ya se mencionó, los procesos de degradación se presentaron ya con una cierta estabilidad y la glucosa adicional era consumida.

pH y Alcalinidad

El comportamiento del pH (**Figura 7.1.16 A**) mostró 2 intervalos. El

primer periodo comprendió del día 1 al 15, donde el efluente tendió a la acidificación y alcanzó un valor de 5.8 el día 5. Este comportamiento indicó que la carga del sustrato fue mayor a la capacidad de consumo de sustrato del sistema. Se debe resaltar que al inicio de la operación los fenómenos de fermentación se encuentran presentes. a diferencia de la metanogénesis; sobre todo en este caso, debido a que el sustrato adicionado fue glucosa, que es fácilmente degradable; esto lleva a una acumulación de los AGV. Como consecuencia de este comportamiento, se decidió reducir la carga de sustrato a la mitad, con un valor de 0.05 g DQO/g SSV·d, con lo que se incrementó el valor promedio del pH en la cama de lodos a 6.3 durante el segundo periodo, manifestando una clara tendencia a la estabilidad.

El comportamiento de la alcalinidad siguió la misma tendencia que el pH, ya que durante los 5 primeros días, fue menor en el efluente debido a su utilización para contrarrestar el proceso de acidificación. Con la reducción en la carga del sustrato, el comportamiento de la alcalinidad del efluente en el segundo periodo mostró una tendencia hacia la estabilización. Sin embargo, el valor promedio del efluente, de 251 mg/l, no se considera suficiente para lograr un sistema de amortiguación adecuado, ya que el incremento de alcalinidad fue del 15% con respecto al influente.

Producción de Biogás

En esta corrida se presentó el problema de fuga de biogás, por lo que su cuantificación se inició a partir del día 29. Al finalizar la corrida, se tuvo un volumen de 20.3 l (TPN) y una producción promedio de 0.073 l/l.d (TPN).

Características de los lodos producidos

El volumen total de lodos en esta corrida fue de 4.3 l con las siguientes características:

SST = 5.4 g/l	IVL = 64.4 ml/g
SSF = 1.6 g/l	V _{sed} = 2.2 m/h
SSV = 3.8 g/l	
% Volátil = 70%	

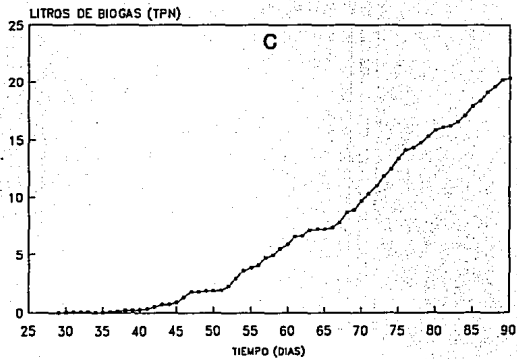
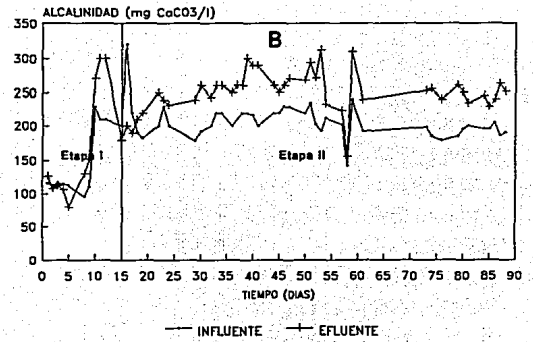
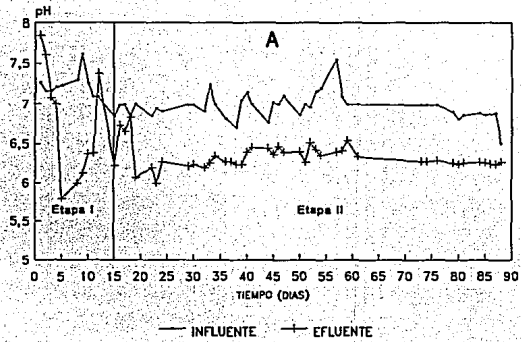


Fig. 7.1.16 Variación del pH, alcalinidad y producción de biogás. Corrida 6B

El lodo producido presentó un color negro con aspecto floculento-granular, sin embargo fuera del reactor rápidamente se dispersó por lo que no se realizó la prueba de granulometría.

En esta corrida fueron escasos los problemas de flotación que originaron evacuación de lodos, aun cuando se observó en forma esporádica la expansión de la cama de lodos, y 5 días antes de terminar la corrida se observó una compactación muy marcada de la misma.

7.1.9 CORRIDA 7A (CON GLUCOSA SIN NITROGENO)

En las corridas 7A y 7B se evaluaron dos de las variables que señalan Sam-Soon et al. (1988) como las adecuadas para la obtención de un lodo granular anaerobio; exceso de nitrógeno y un sustrato capaz de generar una presión parcial de hidrógeno alta. Bajo estas condiciones, de acuerdo a la teoría de estos autores, se esperaba la estratificación de lodo en el reactor. Por lo anterior, se decidió eliminar la recirculación con el propósito de no interferir en la estratificación del lodo.

La corrida 7A se operó de forma simultánea a la corrida 7B, con fines comparativos sin adicionar nitrógeno. Al inicio de la operación de la corrida 7A, se presentaron problemas de reducción del pH, por lo que se disminuyó la carga orgánica de la glucosa lo cual delimitó dos etapas en la operación del reactor. Las condiciones de operación promedio fueron las siguientes:

	ETAPA I	ETAPA II
Duración	14 días	76 días
CO	0.73 g SST/1·d	0.73 g SST/1·d
Q_1	0.75 ml/min	0.75 ml/min
TRH	2 días	2 días
CO glucosa	0.1 g DQO/g SSV·d	0.05 g DQO/g SSV·d
Vasc	0.013 m/h	0.013 m/h
Sin recirculación		

Al comparar las eficiencias de remoción en las dos etapas de operación del reactor (Anexo 1, Tablas A.1.7.1 y A.1.7A.1), no se observaron diferencias significativas, excepto para la DQOs en la etapa I en la

cual no se obtuvo remoción. En esta corrida, como en la 6A y 6B, se consideró a la segunda etapa como representativa del funcionamiento del reactor, debido al mayor tiempo en que se mantuvo la corrida bajo estas condiciones y a lo antes mencionado. El valor promedio de los parámetros fisicoquímicos en el influente y efluente mostraron los valores de la **Tabla 7.1.9**.

Sólidos

La remoción de los sólidos suspendidos totales fue de 98% (**Tabla 7.1.9**) y el porcentaje que representan de los STT del efluente fue del 7%, 1% y 16 % para los SST, SSF y SSV respectivamente, valores obviamente inferiores a los del influente donde los porcentajes representan el 81%, 54% y 93% de los STT, STF y STV, lo que significó una adecuada retención de la fracción suspendida en el reactor (**Fig.7.1.17A**), similar a las corridas 2, 6A y 6B. Durante toda la corrida no se presentaron problemas de flotación de lodos.

TABLA 7.1.9 VALORES PROMEDIO DE LOS PARAMETROS FISICOQUIMICOS DE OPERACION DE LA CORRIDA 7A (CON GLUCOSA)*.

	STT	STF	STV	SST	SSF	SSV	DQOt	DQOs	pH	Alcal.
INFLUENTE										
X	1877	592	1285	1518	324	1194	1956	206	7.27	238
S	138	107	130	95	71	91	294	108	0.27	22
CV	7	18	10	6	22	8	15	52	4	9
EFLUENTE ETAPA II										
X	479	290	189	36	5	31	165	117	6.6	309
S	71	52	64	12	3	11	79	77	0.16	57
CV	15	18	34	33	60	35	48	66	2	18
% E	74	51	85	98	98	97	92	43		

* Expresado en mg/l excepto Alcalinidad en mg CaCO₃/l y pH en unidades de pH.

X = Promedio, S = Desviación estándar, CV = Coeficiente de variabilidad (en porciento), y % E = Eficiencia de remoción.

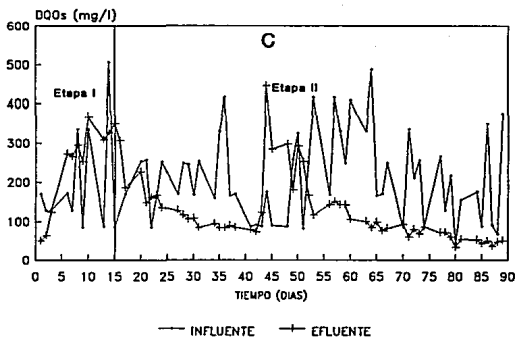
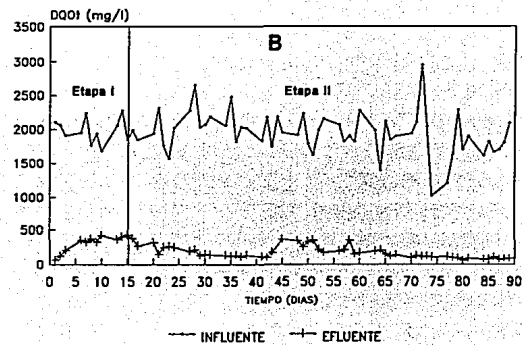
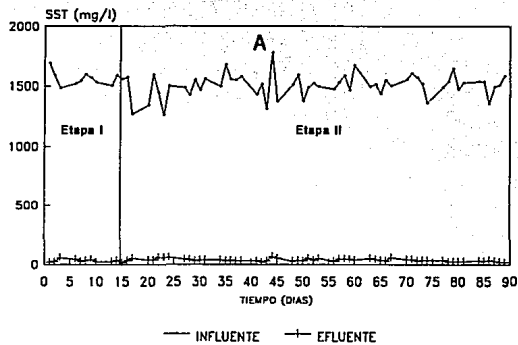


Fig. 7.1.17 Variacion de los SST, DQOt y DQOs.
Corrida 7A

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

El valor promedio de la DQO total influente fue de 1956 mg/l y de 165 mg/l en el efluente, lo que significó una eficiencia de remoción del 92 %, con un CV en el influente bajo (15%).

Para la DQO soluble los valores promedio fueron de 206 y 117 mg/l en el influente y efluente, con 43 % de remoción. La **Figura 7.1.17 C** muestra una elevada variación en el comportamiento de la DQOs del influente, con un CV de 52% (**Anexo 1, Tabla A.1,7.1**). En general hasta el día 13, los valores del efluente fueron superiores a los del influente lo que sugiere que durante este lapso los fenómenos que dominaron fueron los de hidrólisis. El día 30 involuntariamente se incrementó la temperatura a un valor superior a 50°C, sin observarse cambios aparentes en el comportamiento del reactor.

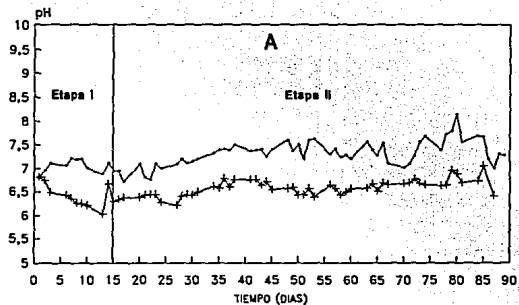
pH y Alcalinidad

El valor de pH promedio en el influente del reactor se mantuvo en 7.27 y 6.6 en el efluente (**Tabla 7.1.9**). La variación temporal de este parámetro se muestra en la **Figura 7.1.18 A**, donde el pH del efluente empezó a disminuir hasta un valor ácido a los 9 días, por lo que a partir del día 15 se redujo a la mitad la carga de glucosa alimentada.

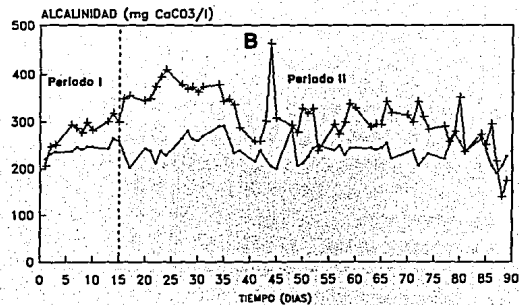
La alcalinidad promedio en el influente del reactor fue de 238 mg CaCO₃/l y 309 mg CaCO₃/l para el efluente. El incremento debido a la generación de alcalinidad en el reactor fue de 29 %.

Producción de Biogás

La generación de gas se inició a partir del día 9, en que fueron aparentes pequeñas burbujas de gas atrapadas dentro de la cama de lodos, sin embargo debido al problema de fuga del gas no fue posible su cuantificación exacta (**Fig.7.1.18 C**). El análisis cualitativo de la composición del gas producido indicó un porcentaje de metano del 58%, con un valor mínimo de 53 % y un máximo de 63 %. El volumen obtenido a partir de la fecha en que fue posible su medición fue de 31.27 l (TPN), con una producción de 0.097 l/l·d (TPN).



— INFLUENTE + EFLUENTE



— INFLUENTE + EFLUENTE

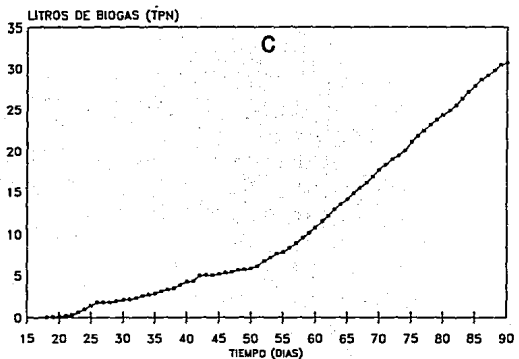


Fig. 7.1.18 Variación del pH, alcalinidad y producción de biogas. Corrida 7A

Características del lodo producido

Al término de los 90 días, el volumen de lodos en el reactor fue de 4.5 l; las características físicas incluyeron un color negro de aspecto floculento y tendiente a la agregación, que una vez fuera del reactor se disgregó por lo que tampoco se realizaron pruebas de granulometría. En cuanto a la concentración de sólidos suspendidos, IVL y velocidad de sedimentación se tuvieron los siguientes resultados.

SST = 10.0 g/l	IVL = 50 ml/g
SSF = 3.1 g/l	Vsed = 2.2 m/h
SSV = 6.9 g/l	
% Volátil = 69%	

7.1.10 CORRIDA 7B (CON GLUCOSA Y NH_4^+)

En esta corrida se adicionó nitrógeno en exceso (NH_4Cl) y glucosa; la relación DQO/N fue de 20:5. En esta corrida se tuvieron dos etapas de operación en el reactor, con base en la diferente carga orgánica de la glucosa alimentada, como consecuencia de la reducción del pH en el efluente. La operación del reactor se adecuó a los siguientes criterios:

	ETAPA I	ETAPA II
Duración	14 días	76 días
CO	0.73 g SST/l-d	0.73 g SST/l-d
Q_1	0.75 ml/min	0.75 ml/min
TRH	2 días	2 días
CO glucosa	0.1 g DQO/g SSV-d	0.05 g DQO/g SSV-d
Vasc	0.013 m/h	0.013 m/h
Sin recirculación		
Relación DQO/N	20:5	20:5

La comparación de las eficiencias de remoción en las dos etapas de operación del reactor (Anexo 1, Tablas A.1.7.1 y A.1.7B.1) no mostró diferencias significativas. En esta corrida como en la 7A, se consideró a la etapa II como representativa del funcionamiento del reactor debido a lo antes mencionado y al mayor tiempo en que se

mantuvo a la cama de lodos bajo estas condiciones.

El análisis fisicoquímico del influente y efluente del reactor mostraron los valores del Anexo 1, Tablas A.1.7B.1 y A.1.7B.2. Los valores promedios se muestran en la Tabla 7.1.10.

Sólidos

La Tabla 7.1.10 muestra una remoción de 98%, 98% y 97% para los SST, SSF y SSV, respectivamente, igual a la corrida 7A. Como en ésta, gran parte de la remoción se logró mediante la retención de sólidos en el reactor, a la que seguramente influyó la ausencia de la recirculación. Este comportamiento explicaría las pequeñas variaciones en el efluente en comparación al influente (Fig. 7.1.19 A).

TABLA 7.1.10 VALORES PROMEDIO DE LOS PARAMETROS FISICOQUIMICOS DE LA CORRIDA 7B (CON GLUCOSA Y NH_4).*

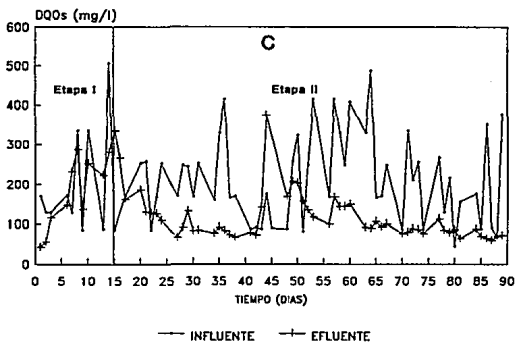
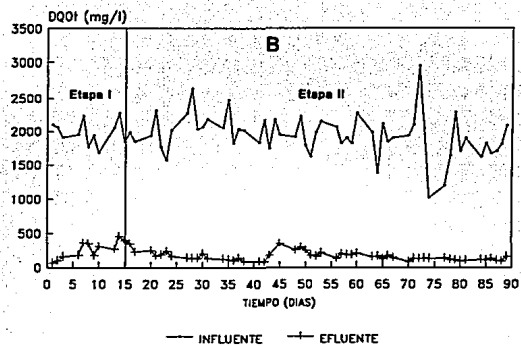
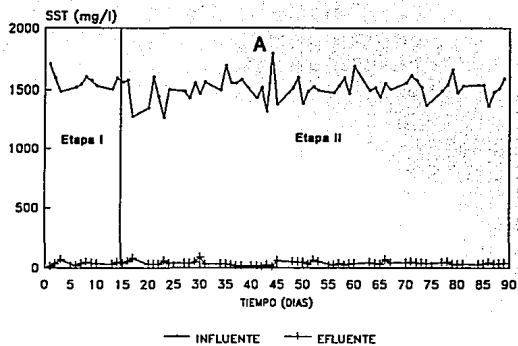
	STI	STF	STV	SST	SSF	SSV	DQO _t	DQO _s	pH	Alcal
INFLUENTE										
X	1877	592	1285	1518	324	1194	1956	206	7.27	238
S	138	107	130	95	71	91	294	108	0.27	22
CV	7	18	10	6	22	8	15	52	4	9
EFLUENTE ETAPA II										
X	548	276	272	36	5	31	151	112	6.63	274
S	94	61	83	14	3	12	49	53	0.16	57
CV	17	22	30	39	60	34	32	47	2	21
% E	70	53	79	98	98	97	92	45		

* Expresados en mg/l a excepción de Alcalinidad en mg CaCO_3 /l y pH en unidades de pH.

X = Promedio, S = Desviación estándar, CV = Coeficiente de variabilidad (en porciento), y % E = eficiencia de remoción.

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La DQO total promedio en el influente fue de 1956 mg/l y 151 mg/l en el



**Fig. 7.19 Variación de los SST, DQOt y DQOs.
Corrida 7B**

efluente, lo que significó un 92 % de remoción (Tabla 7.1.10). El comportamiento en la Figura 7.1.19 B mostró una estabilidad del influente y efluente por lo que los CV fueron de 15 y 32% respectivamente. Gran parte de la remoción, como en el caso de los sólidos, se debe a la retención del lodo en el reactor.

En cuanto a la DQO soluble (Fig.7.1.19 C, Tabla 7.1.10) la remoción fue del 45%, con una gran variación en el influente lo que representó un CV del 52%.

pH y Alcalinidad

La Tabla 7.1.10 muestra que el pH promedio del influente fue de 7.27 y de 6.63 para el efluente, valores adecuados para la actividad microbiana, la Figura 7.1.20 A y B muestran el comportamiento del pH y alcalinidad durante toda la operación. El pH efluente registró un descenso a 6.0 durante los primeros 15 días por lo que, al igual que la corrida 7A, se redujo la concentración de la glucosa a 0.05 g DQO/g SSV·d; esto dió como resultado un incremento de pH a 6.7.

La alcalinidad en el influente fue de 238 mg CaCO₃/l y 274 mg CaCO₃/l en el efluente, lo que significó sólo un incremento del 15%.

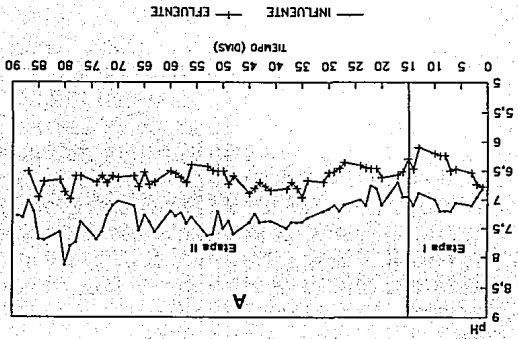
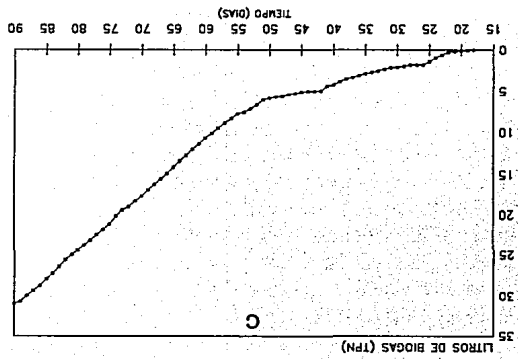
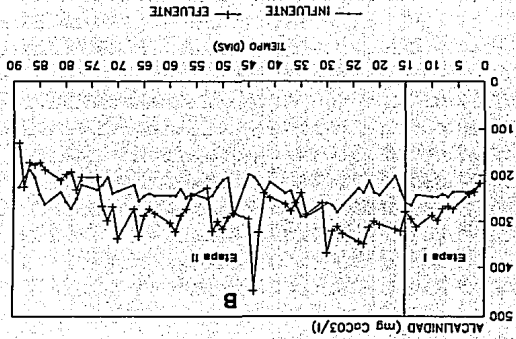
Producción de Biogás

La cuantificación de biogás presentó dificultades de carácter técnico, lo que impidió hacer mediciones desde el inicio. Los valores registrados son a partir del día 15 de operación (Fig.7.1.20 C), con un porcentaje máximo de metano de 63.8%. Aún cuando no fue posible cuantificar el gas producido, cualitativamente se observó la formación de burbujas de gas en la cama de lodos a partir del día 5 de operación. El volumen de gas producido fue de 20.14 l (TPN) y una producción de 0.072 l/l.d (TPN).

Características del lodo producido

El volumen de lodo producido fue de 4.5 l de aspecto floculento, con tendencia a la agregación, que una vez fuera del reactor se disgregaba, por esta razón no se hicieron pruebas de granulometría. El análisis de SST, IVL y velocidad de sedimentación mostró las siguientes

Fig. 7.1.20 Variación del pH, alcalinidad y producción de biogas. Corrida 7B



características:

SST = 8.5 g/l

IVL = 48 ml/g

SSF = 2.6 g/l

V_{sed} = 2.4 m/h

SSV = 5.8 g/l

% Volátil = 68 %

Durante la corrida no se tuvieron problemas por flotación de lodos, excepto los días 82 y 83 en que incrementó considerablemente la altura de la cama de lodos por fallas en el sistema de agitación.

Así mismo, a causa de una falla en el control eléctrico el día 40, la temperatura se elevó hasta casi 50°C, durante aproximadamente 12 horas como en la corrida 7A. Esta situación no tuvo repercusión en los parámetros fisicoquímicos como son pH, alcalinidad y DQO. Físicamente en el efluente se observó un incremento de la turbiedad y una disminución en la producción del biogás.

7.2 PARAMETROS MICROBIOLÓGICOS

Los valores en detalle de cada uno de los análisis microbiológicos de todas las corridas, se encuentran en el **Anexo 2**. En el **Anexo 3** se incluyen algunos datos de interés como la composición de los medios de cultivo para los diferentes grupos tróficos, así como los procedimientos de inoculación y cálculo. La descripción de las condiciones de la operación para cada una de las corridas, se muestran en el Capítulo 6, sección 6.1, **Tabla 6.1** y su presentación en detalle en el Capítulo 7, secciones 7.1.1 a 7.1.10.

7.2.1 LODO DE ALIMENTACION

Con el propósito de conocer la actividad metanogénica inicial y el número de bacterias de los diferentes grupos bacterianos involucrados, se caracterizó el material de alimentación, el lodo aerobio de purga. De esta forma se tuvo un punto de referencia para evaluar el efecto de las diferentes variables experimentales; los resultados obtenidos se presentan a continuación.

Número más Probable (NMP)

La cuantificación a través de esta técnica, mostró que el lodo aerobio de purga contiene todos los grupos bacterianos involucrados en la digestión anaerobia, los cuales en orden de magnitud fueron los siguientes: fermentativas, 9.7×10^7 ; acetógenas productoras obligadas de hidrógeno consumidoras de butirato (OHPAb), 2.3×10^7 ; consumidoras de propionato (OHPAp) 4.1×10^7 ; bacterias hidrogenófilas, 3.4×10^8 y acetoclásticas, 1.3×10^7 . La actividad metanógena que caracterizó a este lodo fue de $0.03 \text{ g DQO-CH}_4/\text{ gSSV-d}$ referida al ácido acético; no se observó consumo de ácidos propiónico y butírico.

7.2.2 CORRIDAS 1 Y 2

Número más Probable (NMP)

En la corrida 1 se observa que en todos los grupos, el número de bacterias tiende a disminuir con respecto al tiempo (Tabla 7.2.1), a diferencia de la corrida 2 en la que únicamente disminuyeron de manera sensible las bacterias metanógenas hidrogenófilas (MH) y fermentativas (F). En cuanto a las bacterias metanógenas acetoclásticas (BMA), en la corrida 1 el número disminuyó, a diferencia de la corrida 2 donde se incrementó (Tabla 7.2.1). Las bacterias OHPA y MH mantuvieron niveles similares entre sí al finalizar ambas corridas (Tabla 7.2.1).

Actividad Metanogénica Específica (Asp)

En estas corridas no se obtuvieron de inmediato los datos de actividad metanogénica, ya que no se contaba en ese momento con un cromatógrafo para su análisis. Tomando en cuenta lo anterior, se decidió preservar las muestras de los diferentes muestreos (5, 15 y 30 días) congeladas para su análisis posterior. La duración de la prueba se estableció *a priori* en 6 horas con intervalos de 30 minutos entre cada toma de muestra. Sin embargo, debido a la baja actividad del lodo, una vez obtenidos los resultados, no se observó consumo de acetato, propionato o butirato durante las 6 horas de muestreo. Con base en lo anterior, la duración de las siguientes pruebas de actividad metanogénica se incrementó a 10 días con intervalos de 24 horas entre cada toma de muestra.

TABLA 7.2.1 CUANTIFICACIÓN DEL NMP DE BACTERIAS ANAEROBIAS EN LAS CORRIDAS 1 Y 2

Día de operación	B A C T E R I A S (NMP/ g SSV)				
	F	MH	MA	OHPAp	OHPAb
CORRIDA 1					
5	1.2E+11	8.2E+08	1.6E+07	2.3E+07	1.2E+07
15	2.4E+10	2.4E+08	1.7E+07	2.8E+06	2.4E+06
30	1.1E+09	8.6E+05	1.0E+06	8.6E+05	6.8E+05
CORRIDA 2					
5	2.2E+05	4.2E+06	4.9E+05	3.5E+06	2.5E+05
15	5.1E+03	6.3E+05	1.4E+07	4.6E+06	1.4E+06
30	4.2E+03	4.5E+05	1.7E+07	5.2E+06	1.6E+06

* F = fermentativas, MH y MA = metanógenas hidrogenófilas y acetoclásticas, OHPAp y OHPAb = utilizadoras de propionato y butirato.

7.2.3 CORRIDAS 3 Y 4

Número Más Probable (NMP)

La Tabla 7.2.2 muestra las diferencias en el número de bacterias de cada grupo de las corridas 3 y 4. En ambas corridas el número de OHPA consumidoras de propionato y butirato fue inferior a los otros grupos; el único incremento en el orden de magnitud lo presentaron las bacterias MA y OHPA utilizadoras de butirato, de la corrida 4.

TABLA 7.2.2 CUANTIFICACION DEL NMP DE BACTERIAS ANAEROBIAS EN LAS CORRIDAS 3 Y 4.

Día de operación	B A C T E R I A S (NMP/ g SSV)				
	F	MH	MA	OHPA _p	OHPA _b
CORRIDA 3					
15	1.5E+09	9.7E+08	9.6E+05	2.3E+04	6.1E+05
30	3.9E+08	5.8E+08	5.4E+05	5.4E+04	6.9E+04
CORRIDA 4					
5	1.1E+12	1.2E+08	3.8E+05	1.5E+04	1.5E+04
15	3.5E+09	1.4E+07	6.7E+05	1.4E+04	4.2E+02
30	1.5E+07	1.5E+07	1.8E+06	1.0E+03	1.3E+05

* F = fermentativas, MH y MA metanógenas hidrogenófilas y acetoclásticas, OHPA_p y OHPA_b = utilizadoras de propionato y butirato.

Al comparar los resultados al término de las corridas 1, 2, 3 y 4, se observó que el mayor número de bacterias MA, OHPA_p y OHPA_b se obtuvo en la corrida 2 (Tablas 7.2.1 y 7.2.2) en la cual se manejó la velocidad ascendente mas baja (0.012 m/h).

Con lo que respecta a las bacterias MH, el mayor número se obtuvo al término de las corridas 3 y 4 en donde se aplicaron velocidades ascendentes mayores (0.30 m/h y 0.15 m/h, respectivamente).

Actividad Metanogénica Especifica (Asp)

La actividad metanogénica especifica de estas corridas no se presenta debido a que se consideran valores poco confiables, en virtud de que para su preservación se adicionó ácido sulfúrico al 50%. Este ácido mostró ejercer un efecto negativo sobre la columna de sílice fundido (superox-FA), incrementando la señal de la respuesta del cromatógrafo y con lo cual, a largo plazo, se podría dañar la columna en forma permanente.

Posteriormente, se decidió acidificar las muestras con ácido fórmico al 50%. Sin embargo, al analizarlas en el cromatógrafo, se observó que éste interfería en la lectura de la concentración del ácido acético, aún cuando el fórmico empleado fue de grado cromatografía. No se presentó una relación directa entre el volumen adicionado y la respuesta del cromatógrafo, por lo que los resultados obtenidos al agregar este ácido tampoco se consideraron confiables. Este es el caso de las corridas 3, 4, 5A, 5B y los primeros 60 días de las corridas 6A y 6B.

El ácido que finalmente permitió preservar las muestras de actividad, sin alterar la concentración de los ácidos grasos presentes en la muestra o producir daños a la columna fue el ácido clorhídrico al 50%.

7.2.4 CORRIDAS 5A Y 5B

Número más Probable (NMP)

Los resultados del NMP en ambas corridas (Tabla 7.2.3) muestran que la corrida 5B (con vinaza-melaza) presentó el mayor incremento de bacterias a los 60 días en comparación con la corrida 5A (sin vinaza-melaza).

El NMP de bacterias anaerobias al término de la corrida 5B (vinaza-melaza) se presenta en la Tabla 7.2.3, en donde también se observa que en la corrida 5A el NMP de estos mismos grupos fue menor. Lo anterior sugiere un efecto estimulante de la adición de sustrato para el incremento de las bacterias. El comportamiento en el tiempo no muestra una tendencia de crecimiento sostenida de la población, excepto en la corrida 5B, en donde se observó un incremento de todos los grupos, principalmente de las MA, las F y MH.

En estas corridas por primera vez se cuantificaron las bacterias sulfato reductoras (SR) que lograron un mayor crecimiento en la corrida 5A (sin vinaza-melaza).

Es importante señalar que en esta corrida se presentó temporalmente la granulación del lodo adicionado de melaza-vinaza con un promedio de grano de 2 mm, como ya ha sido mencionado anteriormente.

TABLA 7.2.3 CUANTIFICACION DEL NMP DE BACTERIAS ANAEROBIAS EN LAS CORRIDAS 5A Y 5B.

Día de operación	B A C T E R I A S (NMP/g SSV)					
	F	MH	MA	OHPAp	OHPAb	SR
CORRIDA 5A						
5	1.2E+10	8.8E+10	3.8E+08	7.7E+07	1.0E+08	
15	2.3E+09	8.3E+09	9.8E+09	1.9E+08	2.6E+08	1.3E+10
30	1.7E+09	4.4E+09	2.2E+10	3.0E+08	1.5E+10	9.6E+09
60	2.8E+08	7.6E+09	4.0E+08	1.1E+09	8.8E+06	2.0E+10
CORRIDA 5B						
5	9.8E+06	3.1E+06	8.3E+08	1.3E+08	1.8E+08	
15	2.5E+04	6.4E+08	1.0E+09	2.2E+05	4.5E+06	
30	1.6E+11	1.1E+13	1.2E+10	2.8E+08	8.0E+07	1.5E+09
60	1.0E+10	6.4E+12	2.0E+10	1.2E+09	5.6E+08	8.8E+09

* F = fermentativas, MH y MA = metanógenas hidrogenófilas y acetoclásticas, OHPAp y OHPAb = utilizadoras de propionato y butirato, SR = sulfatoreductoras.

Actividad Metanogénica específica (Asp)

En estas corridas no se obtuvieron resultados de actividad metanógena debido a los problemas expuestos en el inciso anterior.

7.2.5 CORRIDA 6A

Número Más Probable (NMP)

Los resultados del NMP de las bacterias anaerobias se presentan en la Tabla 7.2.4 en donde se observa que las bacterias que incrementaron su número a los 90 días fueron las MA, OHPAp y OHPAb.

TABLA 7.2.4 CUANTIFICACION DEL NMP DE BACTERIAS ANAEROBIAS EN LAS CORRIDAS 6A.

Día de operación	B A C T E R I A S [*] (NMP/ g SSV)					
	F	MH	MA	OHPAP	OHPAb	SR
CORRIDA 6A						
5	1.3E+10	1.1E+10	2.8E+07	1.3E+06	1.1E+07	
15	1.3E+09	3.5E+09	1.3E+07	1.8E+08	7.1E+07	2.4E+09
30	5.8E+08	1.8E+11	4.1E+06	1.3E+08	1.6E+07	4.1E+08
60	4.6E+09	4.6E+10	1.3E+06	4.6E+07	6.6E+07	1.7E+09
90	1.5E+10	1.1E+10	1.1E+08	2.9E+07	1.5E+08	9.3E+07

* F = fermentativas, MH y MA = metanógenas hidrogenofilas y acetoclásticas, OHPp y OHPAb = utilizadoras de propionato y butirato, SR = sulfatoreductoras.

Como se muestra en la Tabla 7.2.4 las bacterias que mantuvieron un número similar al inicial (5 días) fueron las F y MH. En cuanto a las SR se observó una reducción en su número a 9.3×10^7 .

La comparación entre las corridas 5A (sin vinaza-melaza) y 6A (sin glucosa), permite observar que hubo más bacterias F, MH y OHPAb en la corrida 6A, mientras que para las OHPp y SR, el mayor número se obtuvo en la corrida 5A. Las bacterias MA se mantuvieron en un nivel similar en las corridas 5A y 6A. En ambas se aplicó la misma velocidad ascendente (0.30 m/h), pero con una reducción del 50% en la carga orgánica aplicada a la corrida 5A con respecto a la 6A.

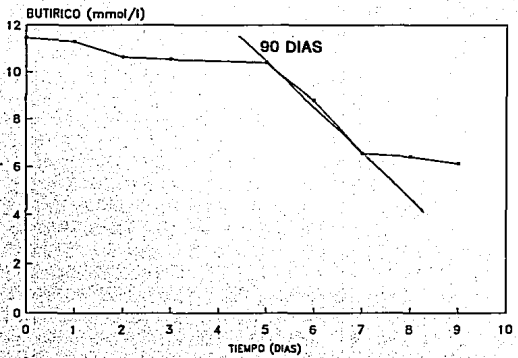
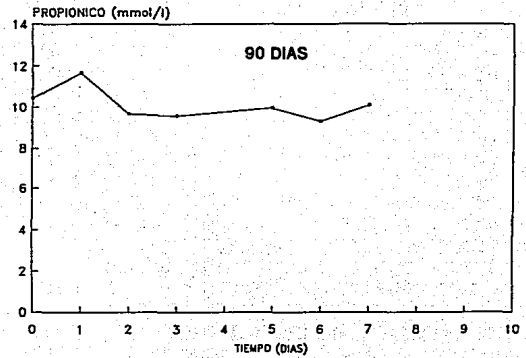
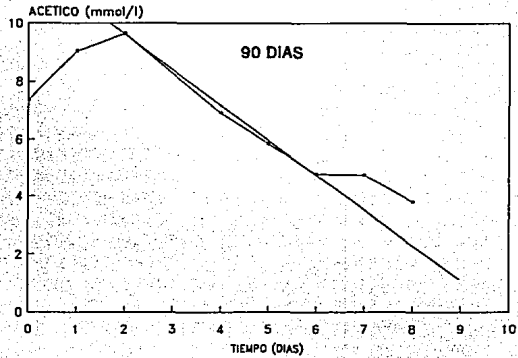


Fig. 7.2.1 Cinetica de consumo del acido acetico, propionico y butirico. Lodo de la corrida 6A

Actividad Metanógena Específica (Asp)

Los resultados de la actividad metanogénica específica a los 90 días de esta corrida mostraron que el valor más alto expresado en unidades de g DQO-CH₄/g SSV-d correspondió a la actividad a partir del butirato (0.14), seguidas del acético (0.09). En este caso es importante señalar que la actividad al butirato (Fig 7.2.1) principió 5 días después del inicio de la prueba y se observó un incremento en la concentración de acético los primeros dos días. En cuanto al ácido propiónico no hubo una degradación evidente.

7.2.6 CORRIDA 6B

Número más Probable (NMP)

La evolución de los diferentes grupos anaerobios en el tiempo se presentan en la Tabla 7.2.5 (Anexo 2).

Al término de la corrida (90 días) se observó un incremento de todas las bacterias, y de forma más clara de las bacterias MH y SR.

TABLA 7.2.5 CUANTIFICACION DEL NMP DE BACTERIAS ANAEROBIAS EN LA CORRIDA 6B.

Día de operación	BACTERIAS (NMP/ g SSV)					
	F	MH	MA	OHPAP	OHPAB	SR
Corrida 6B						
15	2.3E+10	1.7E+09	1.7E+09	2.3E+07	2.3E+07	2.3E+09
30	2.0E+10	3.8E+07	3.8E+05	1.7E+08	1.4E+06	3.8E+09
60	4.3E+09	1.6E+09	2.4E+08	4.3E+08	1.9E+08	7.7E+08
90	4.6E+10	1.0E+13	3.3E+09	1.0E+08	1.0E+08	1.7E+11

* F = fermentativas, MH y MA = metanógenas hidrogenófilas y acetoclásticas, OHPAP y OHPAB = utilizadoras de propionato y butirato, SR = sulfatoreductoras.

Al comparar las corridas 6B (con glucosa) con la 6A (sin glucosa) se observó un incremento mayor en presencia de sustrato (corrida 6B). De la misma forma se observó un incremento de la población en la corrida

5B con adición de vinaza-melaza. En este sentido, se observó un número mayor de bacterias MA y OHPAP en la corrida 5B con vinaza-melaza, en comparación con la corrida 6B, con glucosa (Tablas 7.2.4 y 7.2.5).

Actividad Metanogénica Específica (Asp)

Los resultados de la actividad metanógena acetoclástica a los 90 días fue mayor a la degradación del butirato, (0.24 y 0.15 g DQO-CH₄/g SSV-d), sin presentar cinética de consumo del ácido propiónico. El comportamiento de las cinéticas de consumo para los tres ácidos grasos, se muestran en la Fig 7.2.2; en sta se observan las rectas trazadas para el cálculo correspondiente.

En este caso la actividad butiritrófica fue idéntica para las corrida 6A y 6B (0.14 y 0.15 g DQO-CH₄/g SSV-d), mientras que la acetoclástica fue mayor para 6B (0.09 y 0.24 g DQO-CH₄/g SSV-d).

7.2.7 CORRIDA 7A

Las corridas 7A (con glucosa) y 7B (con glucosa y NH₄Cl) se operaron en paralelo, con el propósito de operar en condiciones cercanas a las propuestas por Sam-Soon et al. (1987) para la obtención de lodo granular anaerobio.

Los requisitos señalados por este autor para la formación del grano en reactores UASB como ya ha sido mencionado son: exceso de nitrógeno, presión parcial de hidrógeno alta y ausencia de cisteína. Para satisfacer estas condiciones, en el reactor 7B se conservó la glucosa como fuente de carbono, pero se adicionó de NH₄Cl como fuente de nitrógeno en una relación DQO/N de 20:5.

En cuanto a la cisteína, no fue posible cuantificar la concentración que aportó el lodo, sin embargo se asumió que ésta fue baja, proveniente únicamente por la lisis de los microorganismos del lodo aerobio de alimentación.

Para favorecer la eventual elevación de la presión parcial de hidrógeno en la parte baja de la cama, se decidió suspender la recirculación, a fin de no modificarla por el mezclado de la fase líquida del reactor al incrementar la velocidad ascendente de la alimentación.

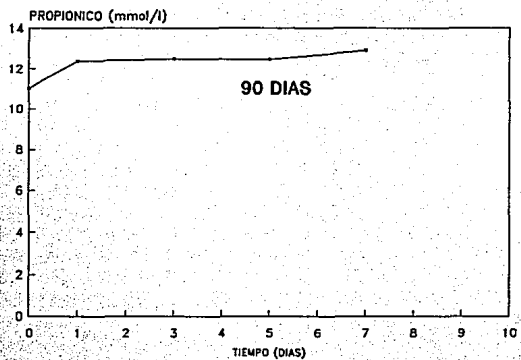
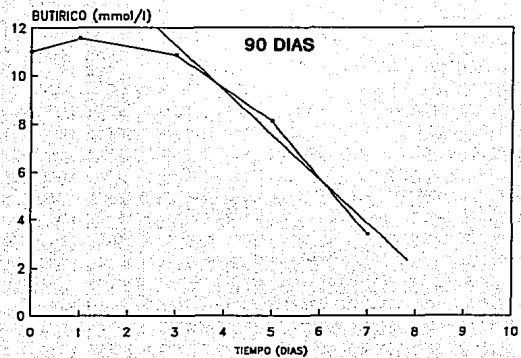
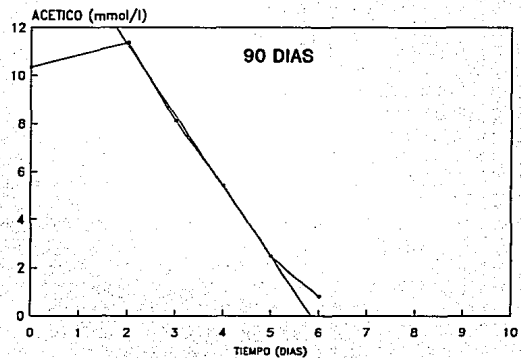


Fig. 7.2.2 Cinetica de consumo del acido acetico propiónico y butírico. Lodo de la corrida 6B

Número Más Probable (NMP)

El análisis del NMP de bacterias anaerobias a diferentes tiempos en el reactor aportó los resultados de la **Tabla 7.2.6 y Anexo 2** en donde se aprecia que las únicas bacterias que incrementaron su número fueron las bacterias MH y una tendencia hacia la reducción para las bacterias F, OHPAp, OHPAb y MA. En ésta como en las corridas anteriores, el patrón de comportamiento en las diferentes fechas de muestreo no fue claro.

Actividad Metanogénica Específica (Asp)

La evolución de la actividad metanogénica específica del lodo a diferentes tiempos de operación, se presenta en la **Tabla 7.2.7**.

TABLA 7.2.6 CUANTIFICACION DEL NMP DE BACTERIAS ANAEROBIAS EN LA CORRIDA 7A.

Día de operación	B A C T E R I A S (NMP/g SSV)					
	F	MH	MA	OHPAp	OHPAb	SR
Corrida 7A						
15	1.3E+11	2.4E+10	2.4E+08	7.6E+08	3.3E+08	1.3E+09
30	7.1E+08	2.2E+10	2.7E+07	2.2E+07	4.4E+08	4.4E+08
60	5.2E+08	1.2E+10	1.7E+09	1.2E+07	6.6E+05	3.3E+08
90	2.5E+10	1.8E+13	3.3E+06	1.0E+07	1.3E+07	5.1E+09

* F = fermentativas, MH y MA = metanógenas hidrogenófilas y acetoclásticas, OHPAp y OHPAb = utilizadoras de propionato y butirato y SR = sulfatoreductoras.

TABLA 7.2.7 ACTIVIDAD METANOGENA ESPECIFICA OBTENIDA DEL LODO DE LA CORRIDA 7A.

Muestreo (día)	Asp. Hac. gDQO-CH ₄ /gSSV·d	Asp. Hpr. gDQO-CH ₄ /gSSV·d	Asp. Hbut. gDQO-CH ₄ /gSSV·d
15	0.42 (4)*	N.D.	0.17 (7)*
30	0.47 (3)*	N.D.	0.28 (5)*
60	0.20 (5)*	0.034	N.D.
90	N.D.	N.D.	N.D.

N.D. = no detectado, Hac = ácido acético, Hbut = ácido butírico, Hpr = ácido propionico y (*) = día que inicio el consumo.

La actividad específica sobre ácido acético mostró los valores más altos, un máximo de 0.42g DQO-CH₄/g SSV-d con una tendencia a disminuir en el lapso de 15 a 90 días. El comportamiento de las cinéticas de consumo de ácido acético se presentan en la Fig.7.2.3. La actividad sobre propionato no se pudo cuantificar debido a que no se obtuvo ningún perfil cinético de degradación excepto el d a 60 con 0.034 g DQO-CH₄/g SSV.d (Fig.7.2.4).

En cuanto a la actividad sobre ácido butírico, el valor a los 15 y 30 días fue de 0.17 y 0.28 g DQO-CH₄/g SSV-d (Fig.7.2.5).

Al poner los lodos en condiciones de reposo en anaerobiosis se pudo observar que aún no estaban estabilizados (inclusive al momento del muestreo a 90 días), ya que se observan incrementos en la concentración de los AGV's debido a la hidrólisis de la biomasa. Las variaciones más evidentes fueron las de los ácidos propiónico y butírico.

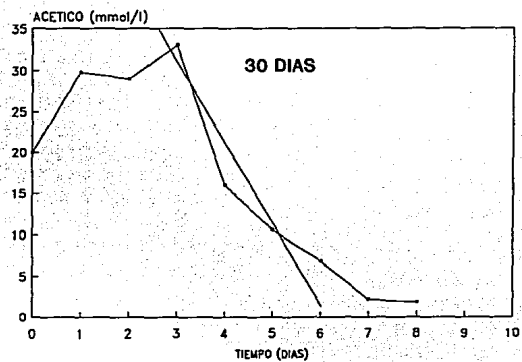
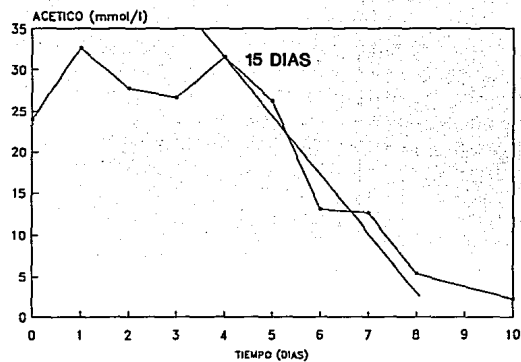
Perfiles de diversos parámetros a diferentes alturas de la cama de lodos.

De acuerdo a la hipótesis de Sam-Soon et al. (1987), la granulación en un reactor UASB con flujo pistón, se presenta como resultado de la separación parcial de las fases acidogénica y metanogénica, lo que provoca la estratificación de la cama de lodos en dos regiones: de alta y baja presión parcial de hidrógeno ($\bar{p} H_2$). La estratificación permite identificar tres zonas, desde la parte baja de la cama de lodos a la parte superior de la misma denominadas: zona activa baja, zona activa superior y zona inactiva.

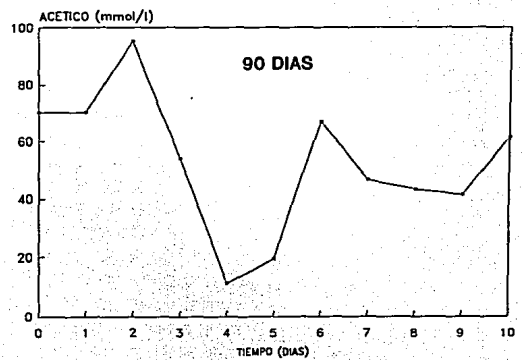
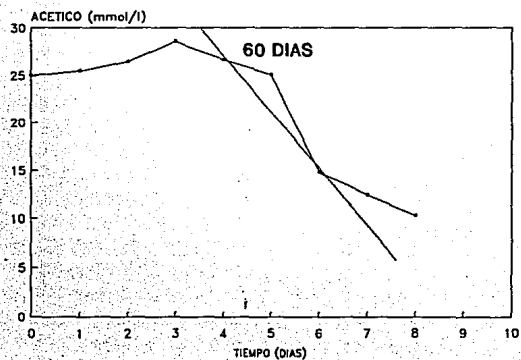
El análisis de algunos parámetros fisicoquímicos y de los productos de fermentación (AGV's) a lo largo de la cama de lodos, se realizó con el propósito de determinar si en las corridas con adición de glucosa (7A) y glucosa más NH₄⁺ (7B) se obtuvo la estratificación y así relacionarla con la eventual granulación del lodo.

Los resultados de los análisis para la caracterización del reactor 7A, se muestran en la Tabla 7.2.8.

Acidos Grasos Volátiles (AGV's). De acuerdo a la hipótesis anterior, la máxima concentración de ácidos grasos volátiles (acético y propiónico)



**Fig. 7.2.3 Cinética de consumo del ácido acético a distintos tiempos de operación
Lodo de la corrida 7A**



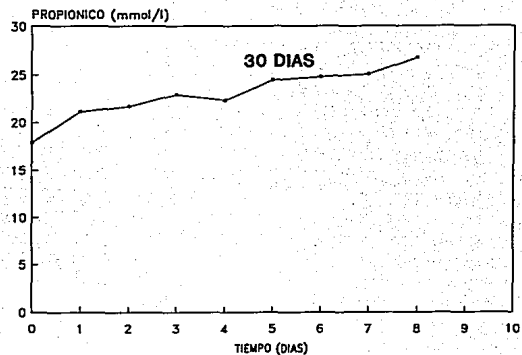
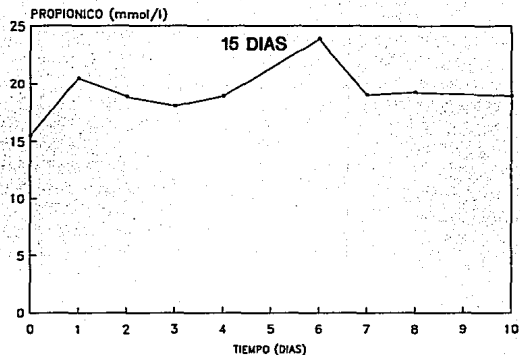
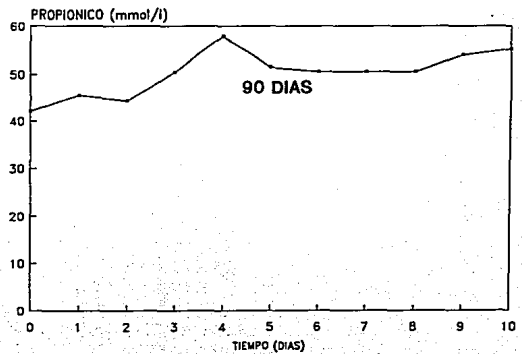
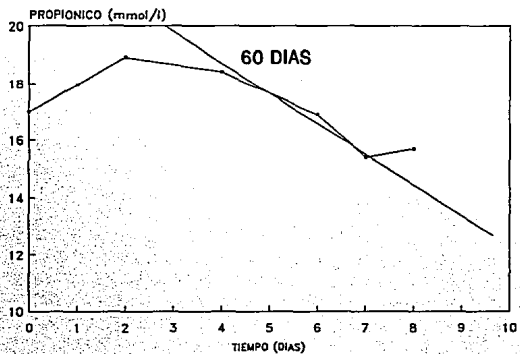


Fig. 7.2.4 Cinetica de consumo al acido propionico a distintos tiempos de operacion.
Lodo de la corrida 7A



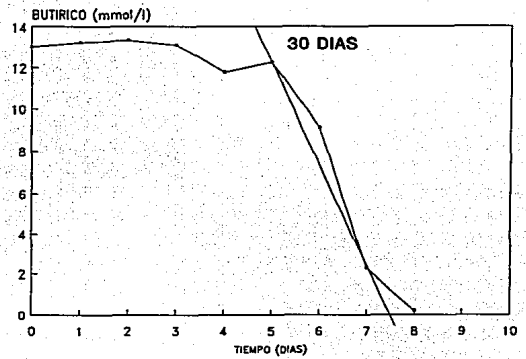
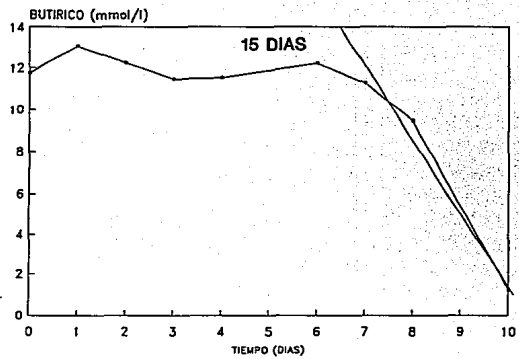
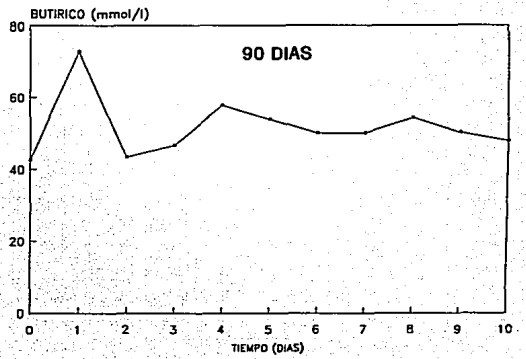
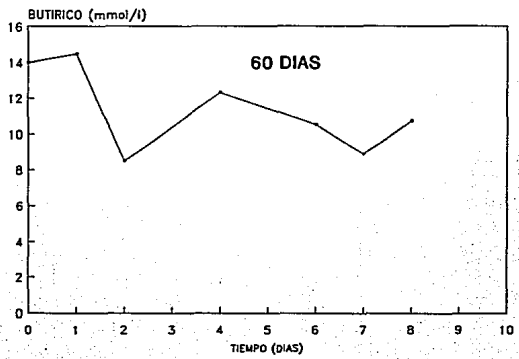


Fig. 7.2.5 Cinetica de consumo al acido butirico a distintos tiempos de operacion. Lodos de la Corrida 7A



se encuentra en la zona activa inferior que corresponde a la parte baja de la cama de lodos, en donde los procesos de hidrólisis y fermentación son intensos, lo que genera una elevada $\bar{p} H_2$. A través de su paso por la cama de lodos, los AGV's serán transformados en CH_4 en la zona activa superior en donde prevalece una baja $\bar{p} H_2$.

Los resultados de la **Tabla 7.2.8** indican que a los 15 días, el ácido que mostró mayor concentración fue el propiónico seguido del acético, sin variaciones importantes a lo largo de la cama de lodos. Esta misma situación se presentó a los 60 días, más no a los 15 y 90 días.

El acético se cuantificó en mayor proporción que el propionico a los 35 días pero en baja concentración; a los 90 días se observó una muy marcada acumulación a lo largo del reactor.

NH_3 . En cuanto a la adición de $N-NH_4^+$ en exceso (DQO:20/N:5), su propósito fue acercarse a las condiciones de Sam-Soon *et al*, 1987.

Este parámetro mostró un incremento en el nivel 1, hasta el día 60, y conforme aumentó la acumulación de lodos en el reactor se observó una tendencia al incremento de amonio a lo largo del reactor (**Tabla 7.2.8**).

Sólidos Suspendidos Volátiles y Proteína. La determinación de los SSV es una medida indirecta de la concentración celular. En un reactor estratificado, la mayor generación de SSV se encuentra en la zona inferior activa, debido a que el crecimiento del grano se encuentra restringido a esta zona. Con lo que respecta a la cuantificación de proteína, el propósito fue el de verificar si la concentración de N-org estaba asociado al incremento de proteínas como producto de la secreción de polipéptidos extracelulares.

La concentración de los sólidos para el nivel 1 disminuyó hasta el día 60 mientras que en el resto de los puntos se mostró una tendencia al incremento.

Los perfiles de proteína asociados a los SSV muestran una reducción en la fracción de proteína en todos los niveles hasta el día 60, con un incremento en el día 90. (**Tabla 7.2.8**).

TABLA 7.2.8 RESULTADOS DE DIVERSOS PARAMETROS A DIFERENTES ALTURAS DE LA CAMA DE LODOS. CORRIDA 7A (GLUCOSA)

Nivel	Hac. mg/l	Hpr mg/l	Hbut mg/l	NH ₃ mg/l	N. org mg/l	SSV mg/l	Prot/SSV mg/mg	DQO ₅ mg/l	pH
15 DIAS									
1	39	185	N. D.	17	-	9240	0.1390	-	-
2	32	207	N. D.	17	-	7460	0.1497	-	-
3	39	176	10	11	-	4890	0.1722	-	-
35 DIAS									
1	87	42	N. D.	56	-	8520	0.1232	1745	-
2	94	41	N. D.	90	-	9780	0.1278	873	-
3	101	21	N. D.	67	-	8740	0.0970	873	-
4		N. D.	N. D.	56	-	2820	0.0290	873	-
60 DIAS									
1	43	655	N. D.	73	672	7620	0.0664	1627	-
2	29	422	N. D.	73	907	9240	0.0575	814	-
3	34	408	N. D.	67	890	10060	0.0789	1627	-
4	7	264	N. D.	64	857	9240	0.0920	-	-
5		200	N. D.	56	101	820	0.0610	-	-
90 DIAS									
1	2926	N. D.	N. D.	40	582	7940	0.1180	1704	6.27
2	2277	N. D.	N. D.	45	795	9580	0.1004	1166	-
3	2596	N. D.	N. D.	39	711	11220	0.1448	1839	6.30
4	3344	N. D.	N. D.	90	1215	11040	0.1291	2781	-
5	6863	N. D.	N. D.	84	224	2260	-	1525	6.37

donde:

N. D. = no detectado

- = No determinado

Demanda Química de Oxígeno (DQO). El comportamiento esperado del perfil de la DQO sería una reducción de aproximadamente 50% en la parte baja del reactor (zona baja activa), y su disminución conforme asciende a la parte superior de la cama de lodos (zona activa superior).

La **Tabla 7.2.8** muestra que la tendencia de la DQO₅ fue a la reducción en el nivel 2 a los 30, 60 y 90, mientras que en los niveles superiores el comportamiento fue variable a los diferentes tiempos de muestreo.

7.2.8 CORRIDA 7B

Número Más Probable (NMP)

Los resultados de la evolución de los diferentes grupos implicados en la digestión anaerobia en función del tiempo, se observan en la **Tabla 7.2.9**. La ausencia de datos para el muestreo del día 5 de operación fue debido a que la altura de la cama de lodos, era insuficiente para tomar muestras en el nivel 1.

TABLA 7.2.9 CUANTIFICACION DEL NMP DE BACTERIAS ANAEROBIAS EN LA CORRIDA 7B.

Día de operación	BACTERIAS* (NMP/g SSV)					
	F	MH	MA	OHPAp	OHPAb	SR
CORRIDA 7B						
15	1.3E+11	8.9E+10	7.5E+08	3.3E+08	4.7E+08	3.3E+09
30	1.7E+09	3.3E+09	9.3E+07	2.3E+08	6.3E+08	3.3E+07
60	6.1E+09	4.5E+10	1.9E+08	6.1E+07	1.1E+07	8.9E+08
90	3.8E+10	2.1E+14	8.1E+06	8.1E+08	2.5E+09	1.1E+11

* F = fermentativas, MH y MA = metanógenas hidrogenófilas y acetoclásticas, OHPAp y OHPAb = utilizadoras de propionato y butirato y SR = sulfatoreductoras.

El comportamiento de la población bacteriana en general, mostró un incremento del NMP a los 90 días para las bacterias MH, OHPAb y SR, mientras que para las MA el número se redujo. Para las OHPAp no se observaron variaciones importantes y disminuyeron las F con respecto a

su número inicial.

Actividad Metanogénica Específica (Asp)

Los resultados de la actividad metanogénica en batch, se muestran en la **Tabla 7.2.10**. Los valores encontrados para la actividad al ácido acético se encuentran en el intervalo de 0.16 a 0.25, y para el ácido butírico de 0.16 a 0.20 DQO-CH₄/g SSV-d; no se observó cinética de consumo del ácido propiónico.

El comportamiento en detalle de la actividad sobre ácido acético para los muestreos del día 15 y 30 (**Fig 7.2.6**), mostró que el consumo de sustrato no fue inmediato, sino que en general el primer día se registró un incremento de la concentración del acético, para posteriormente a partir del segundo día, iniciar la reacción de consumo para los muestreos del día 15 y 30. A los 60 días la cinética de consumo de sustrato fue más lenta iniciando a los 4 días, mientras que a los 90 días se inició el día 2.

TABLA 7.2.10. ACTIVIDAD METANOGENICA ESPECIFICA DEL LODO DE LA CORRIDA 7B.

Muestreo (día)	Asp. Hac. gDQO-CH ₄ /g SSV-d	Asp. Hpr. gDQO-CH ₄ /g SSV-d	Asp. Hbut. gDQO-CH ₄ /g SSV-d
15	0.23 (2)*	N.D.	0.20 (7)*
30	0.16 (2)*	N.D.	0.16 (6)*
60	0.19 (4)*	N.D.	N.D.
90	0.25 (2)*	N.D.	N.D.

Hac = ácido acético, Hpr = ácido propiónico, Hbut = ácido butírico,
(*) = día de inicio del consumo y N.D. = no detectado.

En el caso del ácido propiónico, no se observó un patrón de consumo claro, por lo que no se obtuvo un valor de actividad. Sin embargo, se registró un incremento de la concentración del sustrato durante los primeros días, para posteriormente seguir un comportamiento irregular y en otros casos continuar el incremento (**Fig. 7.2.7**).

La actividad sobre el ácido butírico (Fig. 7.2.8) mostró un retardo muy marcado para el inicio de la actividad, del orden de 7 a 8 días. Es importante mencionar que aún cuando en esta prueba se adiciona una concentración fija del sustrato elegido (10 mmol), al evaluar el tiempo cero se encontraron valores diferentes a los esperados, siendo más notorios en las muestras de los 90 días, para los tres ácidos :80 mmol ácido acético, 50 mmol ácido propiónico y 50 mmol ácido butírico. En este caso, de la misma forma que en la corrida 7A (glucosa), el comportamiento de los AGV's indicó que los lodos aún no estaban estabilizados.

Perfiles de diversos par metros a diferentes alturas de la cama de lodos

El propósito del análisis de los productos de fermentación a diferentes niveles de la cama de lodos, fue el de evaluar su posible estratificación, como ya fue comentado en la corrida 7A (glucosa).

Acidos Grasos Volátiles (AGV's). La Tabla 7.2.11 muestra la concentración de los AGV's en los distintos niveles de la cama de lodos, a diferentes tiempos de la corrida. Se encontró que a los 15 días el ácido en mayor concentración fue el propiónico seguido del acético y del butírico. Este orden cambió a los 35 días, donde la mayor concentración corresponde al ácido acético que presentó una tendencia a reducirse en los niveles superiores de la cama de lodos, mientras que la concentración del ácido propiónico se redujo y se mantuvo constante a lo largo de la cama de lodos. El ácido butírico se detectó en pequeñas concentraciones únicamente a los 15 días, a los 60 días sólo en los nivel 1 y 5. A los 90 días el único ácido presente fue el acético, sin una tendencia clara y a elevadas concentraciones.

Nitrógeno y Sólidos Suspendidos Volátiles

Los perfiles de la concentración de NH_3 en la cama de lodos en el tiempo (Tabla 7.2.11), mostraron una tendencia a reducir su concentración en la parte baja del reactor (nivel 1) y a su aumento en la parte alta. La concentración de los SSV en los distintos niveles en el tiempo mostró una tendencia a incrementar su valor.

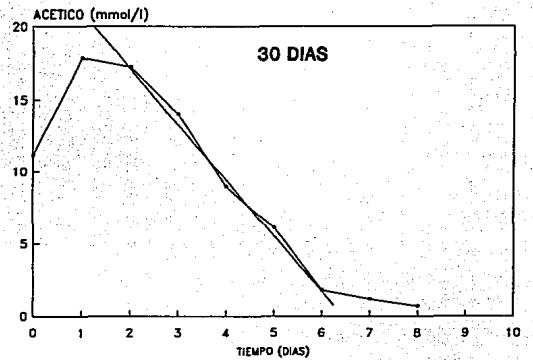
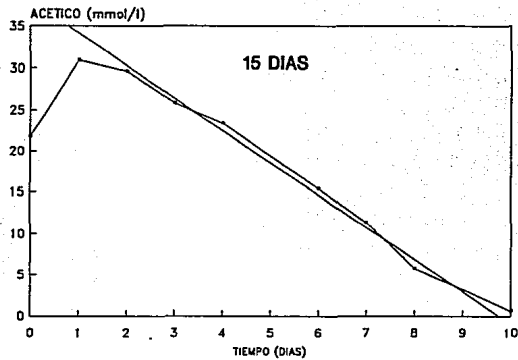
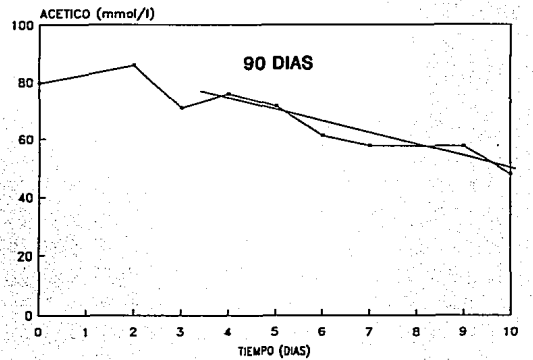
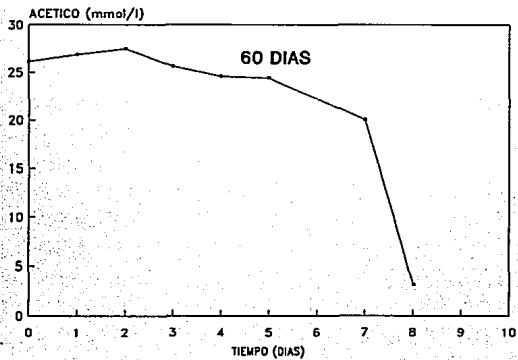


Fig. 7.2.6 Cinetica de consumo del acido acetico a distintos tiempos de operacion.
Lodos de la Corrida 7B



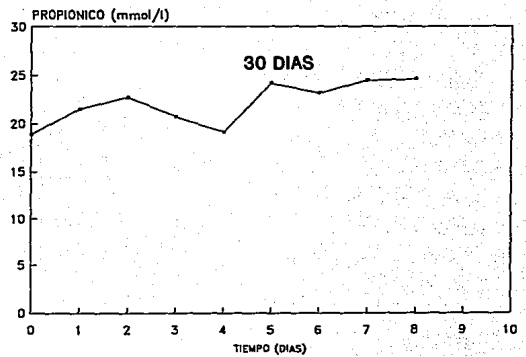
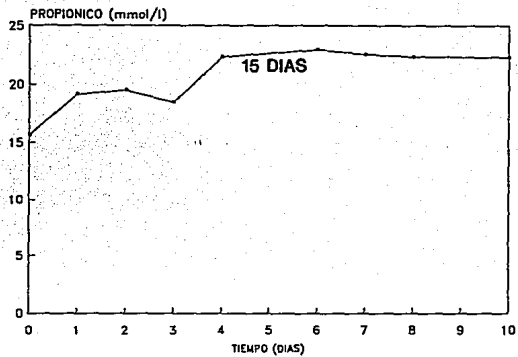
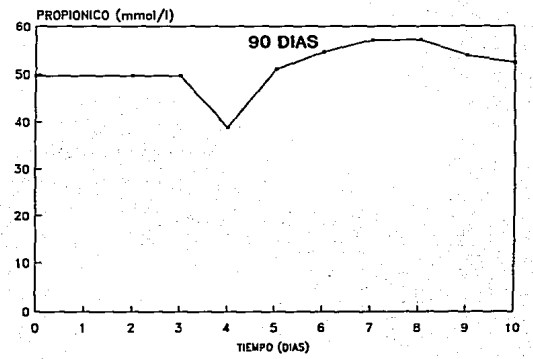
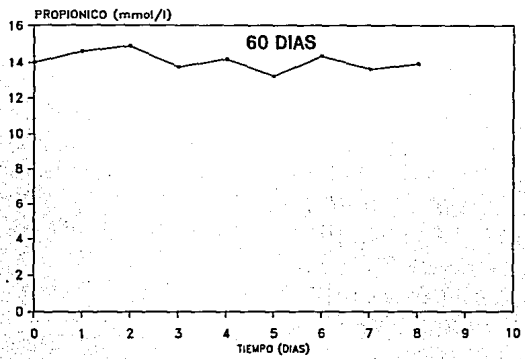


Fig. 7.2.7 Cinetica de consumo al acido propionico a distintos tiempos de operacion.
Lodos de la corrida 7B



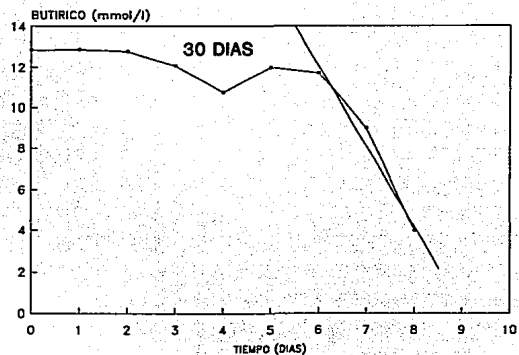
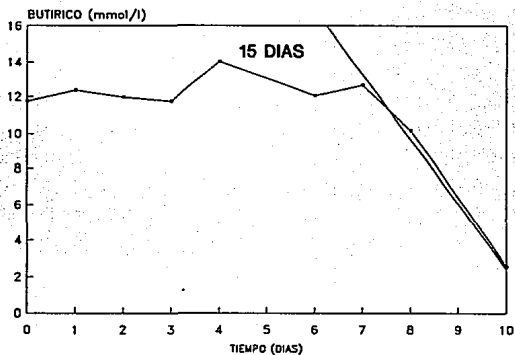
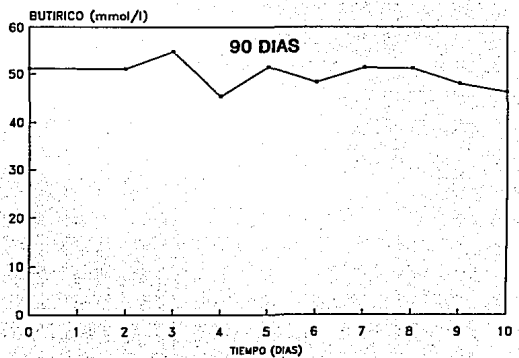
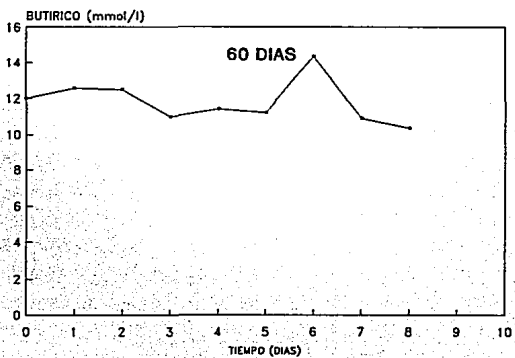


Fig. 7.2.8 Cinetica del acido butirico a distintos tiempos de operacion.
Lodos de la corrida 7B



DQO soluble

El comportamiento durante el tiempo mostró un incremento de la DQO soluble en el nivel 1 del reactor. En el perfil de cada muestreo se observó que la mayor remoción de la DQO se presentó hasta el nivel 2, en el resto del reactor el comportamiento fue variable (Tabla 7.2.11).

Relación proteína/SSV

La Tabla 7.2.11 muestra la relación de proteína/SSV en donde se observa una tendencia hacia su disminución del día 15 al día 60 en los diferentes niveles y un ligero aumento al día 90.

El análisis de proteínas de muestras tomadas a diferentes niveles de la cama de lodos para las corridas 7A (glucosa) y 7B (glucosa y amonio) mostró que la adición de amonio no tuvo el efecto esperado, ya que el contenido de proteínas no difirió entre ambas corridas. Así mismo los perfiles de DQO soluble, nitrógeno y AGV's no mostraron una estratificación en la cama de lodos.

TABLA 7.2.11 RESULTADOS DE DIVERSOS PARAMETROS A DIFERENTES ALTURAS DE LA CAMA DE LODOS. CORRIDA 7B (GLUCOSA Y NH4)

Nivel	Hac. mg/l	Hpr mg/l	Hbut mg/l	NH3 mg/l	N.org mg/l	SSV mg/l	Prot./SSV	DQO ₅ mg/l	pH
15 DIAS									
1	48	125	14	154	-	7210	0.2035	-	
2	35	121	17	106	-	4900	0.2270	-	
3	28	134	16	106	-	5790	0.1986	-	
4	22	126	17	87	-	1420	0.1673	-	
35 DIAS									
1	140	37	N.D.	129	-	7540	0.1326	873	
2	94	38	N.D.	106	-	6600	0.1515	873	
3	103	448	N.D.	78	-	6940	0.1441	873	
4	62	36	N.D.	112	-	7200	0.1389	873	
60 DIAS									
1	700	28	2.3	90	574	6640	0.0774	3310	
2	715	23	10	101	616	8740	0.0885	1655	
3	395	8	N.D.	112	571	6660	0.0379	1655	
4	325	53	N.D.	134	806	7480	0.1088	828	
5	1113	37	5.3	129	549	7520	0.0629	2483	
90 DIAS									
1	2545	N.D	N.D.	73	599	8160	0.145	4444	6.2
2	2202	N.D	N.D.	140	493	5880	0.138	1111	
3	1461	N.D	N.D.	151	711	8040	0.131	1111	6.3
4	1809	N.D	N.D.	123	678	9200	0.122	1111	
5	2135	N.D	N.D.	112	51	580	-	-	6.3

donde:

N.D. = No detectado

- = No determinado

CAPITULO 8

DISCUSION

8.1 PARAMETROS FISICOQUIMICOS

Desde el punto de vista operacional, las variables que se experimentaron para la transformación de un lodo aerobio en uno granular anaerobio fueron: velocidad ascendente (corridas 1, 2, 3, 4 y 6A), carga orgánica (3 y 5A), influencia de sustrato (5A, 5B, 6A, 6B) y de amonio (7A y 7B). El análisis sobre el efecto de estas variables se hará en conjunto, agrupando aquellas corridas en las que se modificó la misma variable experimental.

8.1.1 EFECTO DE LA VELOCIDAD ASCENDENTE (CORRIDAS 1, 2, 3, 4 y 6A)

Hulshoff Pol et al, (1988) consideran al lavado de lodos, resultado de la carga hidráulica o velocidad ascendente y de la tasa de producción de gas, como factor de suma importancia para el proceso de granulación. La influencia de la velocidad ascendente se observa en el lavado de las bacterias filamentosas y del material de pobre sedimentación, lo cual permite la selección de lodos que muestran mejores características de sedimentación.

En los resultados de la Tabla 8.1.1 se observa que en las dos primeras corridas con las velocidades ascendentes de 0.024 y 0.012 m/h, se obtuvieron lodos cuyos valores de IVL no mostraron diferencias entre sí, ya que se registraron valores de 72 y 74 ml/g para las corridas 1 y 2, respectivamente.

TABLA 8.1.1. EFECTO DE LA VELOCIDAD ASCENDENTE SOBRE LA FORMACION DE LODO GRANULAR

PARAMETRO	CORRIDAS				
	1	2	3	4	6A
CONDICIONES DE OPERACION					
Duración (días)	28	37	33	35	90
Qi (ml/min)	3.0	1.5	1.5 ⁺	1.3 ⁺	1.5 ⁺
CO (g SST/l.d)	1.58	1.3	1.44	1.44	1.5
Vasc (m/h)	0.024	0.012	0.30	0.15	0.1/0.3
TRH	1	2	2	2	2
CARACTERISTICAS DE LOS LODOS OBTENIDOS					
STT (g/l)	11	15	9.1	9.7	6.2
SSF (g/l)	3	4.5	2.6	3.0	1.9
SSV (g/l)	8	10.5	6.4	6.7	4.2
% Volátil	73	70	71	69	69
IVL (ml/g)	72	74	33	37	71
Vsed (m/h)	1.4	1.83	5.5	4.04	1.15
EFICIENCIA DEL PROCESO					
% E SST	37	81	26	29	71/70
% E STV	45	90	32	40	83/83
% E SST	52	95	29	35	95/95
% E SSV	49	95	28	28	95/95
% E DQot	45	91	58	44	89/89
% E DQOs	24	83	19	6	*12/75
Producción de biogás (l/l.d)	-	0.084	0.11	0.10	0.023
Volumen final de biogás (TPN)	-	11	13.9	12.8	5.7
% Máximo de CH ₄	68	58	67	62	61

/ = primera y segunda etapa

* = primer y segundo periodo

+ = no se considera el gasto de recirculación

Con el propósito de hacer más evidente el efecto de la velocidad ascendente, en las corridas 3 y 4 los reactores se operaron con recirculación, aumentando así la Vasc a 0.15 m/h y 0.30 m/h, respectivamente. Con esto se obtuvo una reducción en los valores del IVL de un 50 % con respecto a las dos primeras corridas. Sin embargo, aun cuando el IVL de los lodos obtenidos en las corridas 3 y 4 fue prácticamente el mismo, la velocidad de sedimentación fue mejor en la

corrida 3, con 5.5 m/h. Esto confirma que la aplicación de velocidades ascendentes adecuadas, promueven una mejor sedimentabilidad del lodo mediante el lavado del material filamentosos de poca sedimentabilidad. Aún cuando los valores de IVL obtenidos bajo estas condiciones, no corresponden a los de un lodo granular, el cual se encuentra entre 10 y 20 ml/g, si se lograron características de un lodo floculento-granular.

En el caso de las corridas 3 y 6A (Etapa II), la V_{asc} fue la misma (0.3 m/h), pero la duración de la segunda bajo esas condiciones fue casi el doble de la primera. Bajo esas condiciones, se esperaba que el IVL final del lodo obtenido en la corrida 6A, fuera semejante al de la corrida 3. Sin embargo, el IVL final de la corrida 6A fue superior al de la corrida 3 (77 y 33 ml/g respectivamente).

La diferencia observada puede atribuirse a la menor V_{asc} aplicada durante los primeros 15 días (0.1 m/h), en la corrida 6A (Etapa I), lo que favoreció la retención del material filamentosos y de baja sedimentación. El incremento posterior a 0.3 m/h, no fue suficiente para lograr un lavado efectivo del lodo disperso acumulado en el reactor, por lo que se obtuvo un valor de IVL semejante al de las corridas 1 y 2 con velocidades ascendentes de 0.024 y 0.012 m/h.

Por lo anterior, la V_{asc} debe ser mayor a las aquí experimentadas, y de acuerdo a los resultados anteriores, se debe ejercer desde el inicio de la operación del reactor, con el propósito de obtener un lavado efectivo del material de baja sedimentabilidad. Esto podría explicar la mejor sedimentabilidad del lodo de la corrida 4 con respecto al de la corrida 6A (Etapa II), aún cuando la velocidad ascendente de la primera fue la mitad de la segunda pero se aplicó desde el inicio de la operación.

En cuanto al contenido de sólidos y las eficiencias de remoción, se observó un incremento de ambos parámetros en las corridas con las V_{asc} menores. De esta forma, en la Tabla 8.1.1 se observa que el orden de mayor a menor concentración de sólidos fue el siguiente: 2, 1, 4 y 3 en donde la velocidad ascendente para cada una fue de 0.012, 0.024, 0.15 y 0.30 m/h respectivamente.

En el caso de las corridas 2 y 6A el porcentaje de remoción de sólidos fue semejante, aún cuando en la segunda se aplicó una V_{asc} mayor. A lo

anterior, pudo contribuir el mayor tiempo de operación de la corrida 6A, lo que confirió mayor estabilidad al lecho de lodos en cuanto a compactación se refiere y por lo tanto una menor evacuación del lodo.

Guiot *et al*, (1988c, 1992) proponen una velocidad ascendente de 1 m/h para desarrollar granos estándar (3 mm), y mencionan que es posible incrementar el diámetro del grano con el incremento gradual de la velocidad ascendente (0.9 a 6.6 m/h), aunque se corre el peligro de una erosión parcial de los granos.

Valores de IVL menores a los reportados en este estudio, fueron obtenidos por Wu *et al*, (1987) a partir de lodos activados de purga (21 ml/g), lo cual corresponde a lodo tipo granular.

Hulshoff Pol (1987) señala que al inicio de la operación debe aplicarse una velocidad ascendente de 0.1 a 1.0 m/d y posteriormente incrementarse hasta 30-50 m/d en reactores estables a nivel piloto. Por otro lado, Cuervo (1988) propone como velocidad mínima para obtener granulación 0.0125 m/h. Lo anterior pone en evidencia que los valores de velocidad ascendente aplicados en este trabajo, estuvieron dentro de los intervalos recomendados para la obtención de lodo granular, por lo que la presión de selección aplicada al sistema en estas corridas, no se considera limitante para inducir la granulación del lodo, sin embargo, se obtuvo un lodo de aspecto floculento-granular que mostró ser adecuado para la inoculación de otros reactores a nivel laboratorio.

En cuanto a los parámetros fisicoquímicos que caracterizaron estas corridas, la DQO total presentó mayores eficiencias de remoción en las corridas 2 y 6A, la que se efectuó vía sedimentación (retención) de los lodos. Debe recordarse que no se perseguía la degradación del lodo como tal, sino su transformación en un lodo granular anaerobio, por lo que este dato es solo una medida indirecta para conocer el funcionamiento del reactor. Las bajas eficiencias de remoción de la DQO soluble reflejan la baja actividad de los lodos. En las corridas 3 y 4, en donde se midió el pH de la cama de lodos, se alcanzaron valores de hasta 6.9, reflejo de la producción de ácidos grasos volátiles.

Respecto a la producción de biogás, los mayores volúmenes se obtuvieron en las corridas 3 (13.9 l TPN) y 4 (12.8 l TPN), a las que se aplicó

las mayores velocidades ascendentes, lo que probablemente incrementó el contacto sustrato-microorganismo.

8.1.2 EFECTO DE LA CARGA ORGANICA (CORRIDAS 3 y 5A)

Con el propósito de determinar el efecto de la carga orgánica sobre la transformación de lodos de purga aerobios en lodos anaerobios, se disminuyó la concentración de SST en la alimentación al reactor en la corrida 5A en casi un 50 % con respecto a la corrida 3; esto representó una reducción también del 50% en la carga orgánica. La velocidad ascendente se mantuvo constante a 0.3 m/h, al igual que el flujo de alimentación. La consecuencia lógica de la reducción de la carga alimentada fue que el reactor tardara el doble de tiempo en llenarse de lodos.

La velocidad ascendente aplicada provocó una mayor expansión de la cama en la corrida 5A debido al menor contenido de biomasa lo que incrementó el movimiento del lodo, dando como resultado la formación de granos en la parte inferior del reactor durante los primeros 6 días, con un tamaño de 4 mm de diámetro durante la primera semana de operación. Esta granulación se perdió cuando se incrementó el volumen del lecho de lodos, impidiendo la fluidificación de la parte inferior del reactor.

La **Tabla 8.1.2** muestra que el lodo final de las corridas 3 y 5A, presentó una concentración similar de las fracciones de sólidos suspendidos. Sin embargo, el lodo de la corrida 5A no mostró mejoría en cuanto a consistencia se refiere y por el contrario mantuvo un carácter más floculento que los de la corrida 3. Esto no se vio reflejado en los parámetros típicos, ya que el IVL de los lodos de la corrida 5 fue 36 ml/g y una velocidad de sedimentación de 4.9 m/h, mientras que para los lodos de la corrida 3 el IVL fue de 32 ml/g y la velocidad de sedimentación de 5.5 m/h que pueden considerarse semejantes.

El incremento del contacto sustrato-microorganismo en la corrida 5A debida a la fluidificación del lodo, probablemente promovió una más rápida aparición del biogás al tercer día, mientras que en la corrida 3 se inició hasta el octavo día de operación. La **Tabla 8.1.2** muestra que el volumen de gas producido en la corrida 3 fue de 13.9 l (TPN) a diferencia de la corrida 5A que fue de 7.62 l (TPN), aún cuando la

duración de esta última fue el doble de la primera. La diferencia puede deberse a la diferencia en la carga orgánica aplicada.

Una comparación adicional a la Tabla 8.1.2, con respecto al efecto de la carga orgánica, se puede establecer entre las corridas 5A y 6A (Etapa II). La carga orgánica se redujo en la corrida 5A en un 50% con respecto a la 6A, y la V_{asc} en ambas se mantuvo en 0.3 m/h como se observa en la Tabla 8.1.3, aunque la 6A se arrancó con 0.1 m/h.

TABLA 8.1.2 EFECTO DE LA CARGA ORGANICA SOBRE LA FORMACION DE LODO GRANULAR

PARAMETRO	CORRIDAS	
CONDICIONES DE OPERACION	3	5A
Duración (días)	33	62
Q_i (ml/min)	1.5+	1.45 ⁺
CO (g SST/l.d)	1.44	0.72
V_{asc} (m/h)	0.30	0.3
TRH	2	2
CARACTERISTICAS DE LOS LODOS OBTENIDOS		
SST (g/l)	9.1	8.49
SSF (g/l)	2.6	2.54
SSV (g/l)	6.4	6.20
% Volátil	71	73
IVL (ml/g)	33	36
V_{sed} (m/h)	5.5	4.89
EFICIENCIA DEL PROCESO		
% E STT	29	29
% E STV	32	50
% E SST	24	63
% E SSV	33	65
% E DQOt	58	55
% E DQOs	19	46
Producción de biogás (l/l.d)	0.11	0.033
Volumen final de biogás (TPN)	13.9	7.62
% Máximo de CH_4	67	66

+ no se considera el gasto de recirculación

Para las dos corridas el lodo final presentó un aspecto diferente; en la 5A fue floculento y en el caso de la 6A floculento-granular con un porcentaje volátil similar. Sin embargo, el IVL fue menor en la corrida 5A con respecto al de la corrida 6A (36 y 71 ml/g, respectivamente). La diferencia se puede deber a la disminución de la V_{max} aplicada en la primera etapa de la operación de la corrida 6A, como ya se discutió anteriormente (inciso 8.1.1), más que al efecto de la carga orgánica aplicada en cada corrida.

8.1.3 EFECTO DE LA ADICION DE SUSTRATO (CORRIDAS 5A, 5B, 6A y 6B)

Los lodos de la corrida 5A (sin vinaza-melaza), mostraron un carácter floculento durante toda la corrida, aún cuando su IVL fue inferior al lodo de la corrida 5B con vinaza melaza (Tabla 8.1.3). El haber obtenido un valor de IVL mayor en la corrida 5B, se puede explicar con base en el tipo de sustrato adicionado, el cual favoreció el crecimiento de las bacterias fermentativas, las cuales por su crecimiento disperso no favorecen la compactación del lodo en la primera etapa de la formación del grano Vanderhaegen *et al.* (1991).

Las eficiencias de remoción de la DQO total fueron de 55 y 46% para las corridas 5A y 5B, respectivamente; en cuanto a la DQO soluble, en la corrida 5A fueron del 46% y en la 5B este parámetro se incrementó con respecto al valor de entrada. Esto se debió probablemente al aumento en la actividad de las bacterias fermentativas, e hidrolíticas estimuladas por el aporte de sustrato, situación que sobrepasó la capacidad de las bacterias metanogénicas para degradar el sustrato, cuantificándose en el efluente un incremento en la DQO soluble. Es importante señalar que a pesar de este incremento, el sustrato sí generó la suficiente alcalinidad para mantener los valores de pH adecuados en la cama de lodos (7.39) y no inhibir la actividad bacteriana.

La mayor producción de gas correspondió a la corrida 5B con 29 l (TPN) mientras que en la 5A fue de 7.6 l (TPN), lo cual se relaciona directamente con la adición de sustrato en el influente del reactor 5B.

TABLA 8.1.3 EFECTO DE LA ADICION DE SUSTRATO SOBRE LA FORMACION DE LODO GRANULAR

PARAMETRO	CORRIDAS			
	5A	5B	6A	6B
CONDICIONES DE OPERACION				
Duración (días)	60	57	90	90
Sustrato	-	V+ M	-	glucosa
Q _i (ml/min)	1.45 ⁺	1.5 ⁺	1.5 ⁺	1.5 ⁺
CO lodo (g SST/1.d)	0.72	0.72	1.5	1.5
CO sustrato (g DQO/g SSV.d)	-	0.5	-	0.1/0.05
V _{asc} (m/h)	0.3	0.3	0.1/0.3	0.1/0.3
TRH	2	2	2	2
CARACTERISTICAS DE LOS LODOS OBTENIDOS				
SST (g/l)	8.49	5.6	6.2	5.4
SSF (g/l)	2.54	1.28	1.9	1.6
SSV (g/l)	6.20	4.32	4.2	3.8
% Volátil	73	77	69	70
IVL (ml/g)	36	50	71	64
V _{sed} (m/h)	4.9	3.7	1.15	2.2
EFICIENCIA DEL PROCESO				
% E STT	29	22	71/71	69/74
% E STV	50	39	83/83	76/82
% E SST	63	60	94/95	92/95
% E SSV	65	54	94/95	91/94
% E DQOt	55	46	88/89	79/87
% E DQOs	46	-	*12/75	* -/78
Producción de biogás (l/1.d)	0.033	0.134	0.023	0.073
Volumen final de biogás (TPN)	7.6	28.9	5.7	20.3
% Máximo de CH ₄	66	67	61	58

V+M = vinaza-melaza

/ = primera y segunda etapa

* = primer y segundo periodo

+ = no se considera el gasto de recirculación

En el caso de las corridas 6A (sin sustrato) y 6B (con glucosa), la diferencia en el volumen de biogás producido también se asocia a la adición de sustrato en el influente del reactor. La desproporción en el volumen final de biogás entre ambas corridas a diferencia de las corridas 5A (sin vinaza-melaza) y 5B (con vinaza-melaza) se debió a la dificultad de cuantificar con exactitud el volumen como ya fue comentado anteriormente.

En las corridas 6A (sin glucosa) y 6B (glucosa) se probó el efecto de la glucosa como sustrato externo en donde a diferencia de la corrida 5B (vinaza-melaza), no se observó claramente la granulación, aunque sí se noto la tendencia a la agregación del lodo y a la transformación de su carácter floculento en un lodo floculento-granular, en ambos reactores.

El IVL de los lodos fue de 71 y 64 ml/g para las corridas 6A y 6B, respectivamente, en tanto que las velocidades de sedimentación fueron de 1.1 y 2.2 m/h respectivamente.

La literatura recomienda cargas orgánicas iniciales para el arranque de un reactor UASB entre 0.05 y 0.1 kg DQO/kg SSV-d (Hulshoff, 1987; Lettinga y Hulshoff, 1986), por lo que la carga alimentada al reactor (0.05 g DQO/g SSV-d) no puede ser considerada una carga elevada. Se reportan conversiones máximas de sustrato de 1.03 g glucosa/g SSV-d. (Hickey and Wu, 1991). En el caso específico de este trabajo se tuvo una sobrecarga de sustrato debido a que el lodo empleado aún no había desarrollado una actividad metanogénica estable ya que se encontraba en etapa de transición, y generalmente cargas superiores a la aquí experimentada se aplican con éxito en reactores con una biomasa anaerobia activa bien establecida y donde el consorcio bacteriano ha logrado ya un cierto equilibrio.

La reducción del pH en la corrida 6B suplementada con glucosa a 0.05 g DQO/g SSV·d, en comparación con la 5B a 0.5 g DQO/g SSV·d, en la que no se presentó descenso del pH, se debió a que la glucosa es un azúcar simple de fácil fermentación, a diferencia de la mezcla de vinaza-melaza en donde no todo el sustrato se constituía de azúcares fácilmente fermentables y consecuentemente la proporción de AGV's formados fue menor con respecto a la obtenida de la fermentación de la glucosa.

La influencia de la glucosa (corrida 6B) y vinaza-melaza (corrida 5B) en la agregación del lodo fue notoria, sobre todo en la corrida 5B en donde se obtuvieron granos bien definidos, durante aproximadamente la mitad de la corrida con un diámetro de 2 mm. En el caso de la corrida 6B el lodo final mostró una apariencia floculenta-granular.

Lo anterior sugiere que la composición de la solución de vinaza-melaza alimentada al reactor, contiene algún elemento o nutrimento que favoreció la agregación bacteriana.

La estrategia, por etapas, para el incremento de la velocidad ascendente en las corridas 6A y 6B (0.1 m/h durante los primeros 15 días y 0.3 m/h los 75 días restantes), aumentó la eficiencia en porciento de la remoción de SST; pero no mejor sustancialmente el IVL del lodo con respecto al de las corridas 5A y 5B, en donde se aplicó una V_{asc} de 0.3 m/h. Esto podría estar relacionado con el hecho de que a bajas V_{asc} existe un menor lavado del lodo con baja sedimentabilidad, por lo que la presión de selección es menor dando lugar a un lodo con una menor sedimentabilidad.

8.1.4 EFECTO DE LA ADICION DE NH_4^+ (CORRIDAS 7A y 7B)

Las corridas 7A y 7B se operaron en presencia de glucosa, y sin recirculación pero en la 7B se adicionó además un exceso de nitrógeno en forma de NH_4Cl . La recirculación se eliminó con el propósito de no interferir en la eventual estratificación de la cama de lodos de acuerdo con la Teoría de Sam-Soon *et al*, (1987).

Bajo esas condiciones se esperaba que los lodos de la corrida 7B, presentaran mejores características físicas en cuanto a granulación ya que estos autores proponen que la granulación es el resultado de la producción de polipéptidos específicos secretados por las bacterias, bajo presiones parciales de H_2 altas que actúan como enlace entre las bacterias promoviendo su aglomeración, por lo que la adición de nitrógeno favorecería la producción de estos polipéptidos (inciso 4.8.4).

Los resultados obtenidos no mostraron diferencias en cuanto a la calidad del lodo obtenido, así como tampoco su granulación. Sin embargo, sí presentó apariencia floculenta-granular. Esto sugiere que

no hubo producción de dichos polipéptidos en la corrida 7B.

En la **Tabla 8.1.4** se observa que el IVL final de los lodos de ambas corridas fue prácticamente el mismo, de 50 y 48 ml/g y una velocidad de sedimentación similar de 2.4 y 2.2 m/h para las corridas 7A y 7B, respectivamente, lo que significa una diferencia de solo 4%.

TABLA 8.1.4 EFECTO DE LA ADICION DE AMONIO SOBRE LA FORMACION DE LODO GRANULAR

PARAMETRO	CORRIDAS	
	7A	7B
CONDICIONES DE OPERACION		
Duración (días)	90	90
Sustrato	glucosa	glucosa
Q _i (ml/min)	0.75	0.75
CO lodo (g SST/1·d)	0.73	0.73
CO sustrato (g DQO/g SSV·d)	0.1/0.05	0.1/0.05
Relación DQO/N		20:5
V _{asc} (m/h)	0.013	0.013
TRH	2	2
CARACTERISTICAS DE LOS LODOS OBTENIDOS		
SST (g/l)	10	8.5
SSF (g/l)	3.1	2.6
SSV (g/l)	6.9	5.8
% Volátil	69	68
IVL (ml/g)	50	48
V _{sed} (m/h)	2.2	2.4
EFICIENCIA DEL PROCESO		
% E STT	73/74	73/71
% E STV	80/85	80/79
% E SST	98/98	98/98
% E SSV	97/97	97/97
% E DQOt	83/92	88/92
% E DQOs	-/43	-/45
Producción de biogás (l/1.d)	0.097	0.072
Volumen final de biogás (TPN)	31.27	20.14
% Máximo de CH ₄	63	63.8

La DQO total mostró remoción del 92% en ambas corridas; eficiencias muy altas debido a que no se tuvieron problemas de flotación de lodos. En cuanto a la DQO soluble las eficiencias obtenidas son similares, de 43 y 45% para la corrida 7A y 7B respectivamente, aplicando la misma DQO soluble influente. Sin embargo, éstas no se relacionan con el volúmen de gas producido en ambas corridas esto se puede explicar en parte debido a las fugas de gas que se observaron durante las corridas por lo que los volúmenes finales se consideran solo aproximados.

8.1.5 EFECTO DE LA ADICION DE SUSTRATOS SOBRE LA GRANULACION

Vanderhaegen et al. (1991) proponen que el factor que más influencia tiene en el crecimiento granular es la presencia en la alimentación de compuestos de alta energía como son los azúcares.

De los dos sustratos probados, con el que se observó granulación fue con la mezcla de vinaza-melaza obteniendo un grano de diámetro promedio de 2 mm; sin embargo, los agregados presentaron características floculento-granulares y poca resistencia al corte. La granulación con sustratos como glucosa y melaza ha sido obtenido en los trabajos de **Sam-Soon et al. (1989)**, **Wu et al. (1987)** y **Barrena (1990)**.

Un análisis de la composición de la vinaza y melaza (**Tabla 8.2.7**) mostró que la melaza contiene algunos elementos que son reportados como aquellos que activan a las bacterias productoras de metano como es el caso de (*Ni Co* y *Zn*), además de algunas vitaminas necesarias para el crecimiento de las bacterias anaerobias. La vinaza sin embargo, presenta altas concentraciones de sodio, sulfatos y potasio que en concentraciones elevadas inhiben el proceso anaerobio. En nuestro caso estas concentraciones tal vez no tuvieron un efecto negativo aparente debido a la gran dilución de la solución de alimentación.

Van der Berg (1980) observaron que una mezcla apropiada de metales traza (esencialmente *Ni*, *Mo* y *Zn*) promovía el crecimiento de la población metanógena y el grosor y la actividad de la biopelícula.

Guiot et al. (1988) propusieron que el proceso de granulación se asocia a un incremento en la concentración de células viables por unidad de masa, o sea a la proporción de poblaciones acetógenas y metanógenas así como fermentativas, ya que las metanógenas son encontradas en

biopelículas y granos en mayor proporción que en las suspensiones libres, contrariamente a los acidógenos (Dolfing et al. 1985; Guiot et al. 1991).

TABLA 8.1.5 PRINCIPALES CATIONES Y VITAMINAS PRESENTES EN LA MELAZA DE CAÑA

CATION	mg/kg	VITAMINAS	mg/kg	VINAZAS	
				ELEMENTO	mg/l
Ca	8,800	Tiamina	1400	SO ⁻⁴	5762
Co	1.7	Rivoflavina	7000	S ⁻⁴	1,191
K	31.800	Ac. Pantotético	5400	Na ⁺	137
Mg	3.013	Biotina	320	K ⁺	8,122
Mn	13.9			Mn	6.1
Ni	4.9			Ni	0.8
Fe	519			Cu	1.4
Zn	13.3			Li	38
Cd	0.15				

* Fuente: Manual de los derivados de la caña de azúcar (1990)

En nuestros experimentos, el mayor crecimiento de bacterias acetoclásticas se presentó en el reactor adicionado de vinaza-melaza (corrida 5B) que fue donde se presentó una granulación temporal que en el transcurso de la operación se perdió, sin identificar el motivo de ésta pérdida. La formación del grano en la biomasa se observó aproximadamente entre el día 2 y el día 20.

También se ha asociado una mejor granulación con una alimentación que contenga 90% de carbohidratos comparado con una alimentación de 100% de ácidos grasos volátiles (Hulshoff et al. 1983). En nuestro caso la glucosa no favoreció la granulación, y en las corridas donde se adicionó se observó un descenso de pH debido probablemente a que como ya se discutió en la sección 8.1 la carga orgánica del sustrato (0.1 g DQO/g SSV.d) representó una sobrecarga en el sistema.

A pesar de la baja actividad metanogénica desarrollada de los lodo obtenidos en las diversas corridas, la producción de lodo inóculo por

este método se considera una buena alternativa ya que se obtiene sin digestión previa de lodo aerobio de purga y en continuo. Esto permite obtener un lodo de carácter floculento granular en tiempos de retención hidráulica cortos (2 a 3 días) con tiempo de retención celular de 40 días, con una actividad entre 0.2 y 0.4 g CH₄-DQO/g SSV-d y buenas características de sedimentación para el arranque de otros reactores UASB.

8.1.6. EFECTO DE LA TEMPERATURA

Para el correcto funcionamiento de los reactores anaerobios, es necesario entre otros factores, mantener un control adecuado de la temperatura, independientemente del intervalo al que se opere. Este parámetro es de vital importancia, ya que afecta las constantes de equilibrio termodinámico así como la actividad biológica.

En las diferentes corridas experimentales, se logró un control de temperatura en el intervalo mesofílico en un intervalo de $35 \pm 2^{\circ}\text{C}$, a excepción de las corridas 7A y 7B en que se incrementó involuntariamente a más de 50°C durante 12 horas. Los efectos aparentes como ya fue comentado anteriormente fueron físicamente un incremento de la turbiedad y una disminución en la producción de biogás en ambas corridas.

El efecto que la variación de la temperatura ejerce en los reactores anaerobios, se relaciona con la duración de ésta. Se menciona que el incremento de la temperatura entre 12 y 24 h no causa problemas serios porque el proceso puede generalmente recuperarse aún cuando existen riesgos de inhibición por el incremento en la concentración de los ácidos grasos volátiles y la disminución del pH (Weigant, 1986 y Valdes et al., 1990), así mismo puede ser una ayuda para la digestión de sobrecargas orgánicas del reactor (Iza, 1988) sin embargo, el proceso se hace más vulnerable a cambios en la operación (Hulshoff Pol, 1989). La influencia del aumento en la temperatura sobre la granulación al final de nuestros experimentos no se observó, ya que el lodo de ambas corridas presentó un aspecto similar al de las corridas que no se vieron afectadas.

El efecto de la variación en la temperatura, se relaciona directamente con las especies bacterianas dominantes en el ecosistema. Zinder et

al. (1984) reportaron que un incremento en la temperatura de 58°C a 64°C durante 24 h modificó la actividad metanogénica de *Methanosarcina* ya que mostró un incremento en la concentración de ácido acético, con la consecuente disminución de la metanogénesis, mientras que cuando *Methanotrix* predominó, la incubación a 65°C no causó acumulación del ácido acético lo que demuestra mayor sensibilidad de un género con respecto al otro.

En nuestra experimentación la disminución en la producción de biogás pudo haber sido resultado de la inhibición del proceso metanogénico, lo cual sugiere que las bacterias presentes en los reactores fueron altamente sensibles a un cambio en la temperatura.

8.1.7 EFECTO DEL pH

Las corridas que mostraron una marcada reducción en el pH del lodo, fueron aquellas en las que se adición glucosa a una carga de 0.1 g DQO/g SSV-d (6A, 7A y 7B). Esto se debió a una sobrecarga en el reactor, ya que al inicio de la operación la actividad metanogénica es aún muy baja, y la glucosa al ser un sustrato fácilmente fermentable, produce una gran cantidad de ácidos grasos volátiles que se acumulan en el reactor reduciendo el pH en la cama de lodos. Debido a esto se recomienda el aporte externo de alcalinidad con el propósito de operar en condiciones de pH óptimo para favorecer la actividad metanogénica.

Attal et al. (1988) al estudiar el efecto en lote de la variación del pH en poblaciones acetogénicas, acetoclásticas e hidrogenófilas presentes en lodo digerido aclimatado a glucosa (500 mg/l), encontró que las poblaciones acetoclásticas y acetogénicas fueron inhibidas progresivamente con la reducción del pH por la presencia de los ácidos grasos no ionizados que actúan como un agente desacoplante, lo que no ocurre con las bacterias hidrogenófilas por lo que se propone que el mecanismo de inhibición es diferente para cada una de ellas.

Se sabe que las bacterias metanogénicas tienen un intervalo limitado de pH óptimo alrededor de la neutralidad; para *Methanotrix soehngenii*, es entre 7.4 y 7.8 y se inactiva abajo de 6.8 (Huser et al. 1982). Es claro que en nuestra experimentación en donde los valores de pH al inicio de la operación tuvieron un intervalo de 5.8-6.0, las condiciones ambientales no eran las adecuadas para el desarrollo de los

microorganismos, y sin embargo la actividad generada puede explicarse con base a la existencia de microambientes en los cuales existe un pH mayor al interior del grano (Attal et al., 1988).

8.2 PARAMETROS MICROBIOLÓGICOS

La discusión de los resultados de los análisis microbiológicos ya presentados, se centrará en el objetivo principal de este estudio que fue el obtener lodo granular anaerobio, a partir de lodo activado de purga del sistema de lodos activados de la planta de tratamiento de C.U. sin adaptación previa en anaerobiosis. Con el propósito de comparar el efecto de las diferentes condiciones de operación sobre la granulación, los resultados más relevantes de cada corrida se discutirán agrupándolos en aquellas pruebas que mejor describen las características cualitativas y cuantitativas de la formación del grano.

8.2.1 ACTIVIDAD METANOGENICA ESPECIFICA

Los valores de actividad metanogénica registrados al finalizar cada corrida se muestran en la Tabla 8.2.1. Como ya fue mencionado, para las dos primeras corridas no se presentó consumo de sustrato en las 6 horas de duración que se fijaron en su momento para esa prueba en cada muestreo. Resultados similares han sido reportados por Barrena (1991), García et al. (1991) y Fajardo (1989) quienes al trabajar con lodo adaptado en anaerobiosis, similar al producido en esta experimentación, proponen como explicación que el tiempo de adaptación o aclimatación no permitió que crecieran las diversas poblaciones al nivel adecuado.

La misma justificación se aplica a este trabajo con lodo fresco. Al determinar la actividad del lodo de purga del sistema de lodos activados como material alimentado al reactor, se obtuvo un valor relativamente alto ($0.03 \text{ g DQO-CH}_4/\text{g SSV}\cdot\text{d}$), sobre todo si consideramos la condición aerobia del lodo, pero bajo si se compara con lo reportado por Hulshoff et al. (1989) para un lodo digerido de desecho ($.05 \text{ a } 0.25 \text{ g DQO-CH}_4/\text{g SSV}\cdot\text{d}$).

Los valores de la actividad metanogénica para las corridas 3, 4, 5A y 5B (Tabla 8.2.1), se calcularon de forma indirecta a partir de los reactores alimentados en continuo y de la fracción de metano en el gas producido.

TABLA 8.2.1. COMPARACION DE LA ACTIVIDAD METANOGENICA ESPECIFICA CALCULADA VIA PRODUCCION DE METANO EN REACTOR Y EN LOTE (prueba convencional)

CORRIDA	SUSTRATO	BIOGAS l/l-d	ACTIVIDAD ESPECIFICA g DQO-CH ₄ /g SSV·d	
			REACTOR	LOTE
Lodo fresco				0.03
2		0.08	0.01	N. D.
3		0.11	0.03	N. D.
4		0.10	0.03	N. D.
5A	sin vinaza-melaza	0.03	0.02	N. D.
5B	con vinaza-melaza	0.13	0.07	N. D.
6A	sin glucosa	0.02	0.01	0.09
6B	glucosa	0.07	0.06	0.24
7A	glucosa	0.09	0.04	N. D.
7B	glucosa + NH ₄ ⁺	0.07	0.04	0.25

N.D. = No Determinado

En esta tabla se observa que las actividades específicas calculadas vía producción de metano en reactor, son menores que las obtenidas de manera convencional con los lodos en pequeñas botellas de suero. Lo anterior es de esperarse dadas las condiciones óptimas para su crecimiento y actividad que se proporcionan en las pruebas en lote.

El cálculo de la actividad específica en esta tabla muestra que en las corridas con adición de sustrato se obtuvieron los valores más altos (corridas 5B, 6B, 7A y 7B) a diferencia de las que no lo tuvieron (corridas 2, 3, 4, 5A y 6A). Aparentemente, el mismo comportamiento se confirma en las corridas en donde la actividad se calculó vía prueba convencional en lote como se observa en las corridas 6A (sin glucosa) y 6B (con glucosa). Lo anterior permite inferir que las corridas de la 3, 4 y 5A en donde no se tiene dato de la actividad específica en lote, estas ser an inferiores a las corridas suplementadas con sustrato. Con base en lo anterior, la discusión del efecto de adición de sustrato y de la actividad generada, se puede generalizar para todas las corridas.

En el caso de las corridas de la primera etapa experimental (sin sustrato), la mayor actividad vía producción de metano correspondió a las corridas 3 y 4 (0.03 g DQO-CH₄/g SSV-d, en ambas) con una velocidad ascendente de 0.30 y 0.15 m/h respectivamente, en donde se obtuvo mejor sedimentabilidad del lodo (IVL de 33 y 37 ml/g respectivamente), como ya fue mencionado en los parámetros fisicoquímicos.

La actividad específica en lote obtenida en este estudio, fue inferior a las reportadas por otros autores para lodos cultivados en sustratos ricos en carbono, como lo muestra la Tabla 8.2.2.

TABLA 8.2.2 VALORES DE LA ACTIVIDAD METANOGENICA ESPECIFICA PRODUCIDA EN SUSTRATOS RICOS EN CARBONO

Sustrato	Actividad Especifica (g CH ₄ -DQO /g SSV·d)	Autor
Sacarosa 90% y AGV 10%	0.75	Hulshoof, 1989
Azúcar de remolacha	0.3 - 1.14	Dolfing et al., 1985
Sacarosa	0.62	Harada et al., 1988
Glucosa	1.27	Barrena et al., 1990
Sacarosa	1.3 - 2.6	Guiot, 1989
Glucosa	0.12 - 0.42	Este estudio

* diferentes corridas, diversos tiempos.

Se menciona que la formación de lodo granular se ve favorecida al tratar aguas de desecho que contengan glucosa (Lettinga et al., 1980, 1985; Ross, 1984). Por otro lado Sam-Soon et al. (1988) proponen que no se logra granulación o se ve disminuida con sustratos que no producen hidrógeno o que requieren para su degradación presiones bajas de hidrógeno (como el caso del propionato, butirato y lípidos).

Bajo las diferentes condiciones de operación empleadas en este estudio, se observó que la adición de glucosa tuvo un efecto positivo sobre la actividad del lodo. La mayor actividad la presentaron las bacterias acetoclásticas, comparada con la corrida donde no se adicionó glucosa (corrida 6A, Tabla 8.2.3). Resultados similares que demuestran el predominio de la actividad acetoclástica, fueron obtenidos por Dolfing (1985), Guyot et al. (1990), Hulshoff Pol et al. (1983) y Harada et al.

(1988) (Tabla 8.2.2).

El incremento de la actividad acetoclástica en presencia de glucosa puede explicarse en función de lo reportado por Dolfing y Bloemen (1985) quienes proponen que la actividad específica de varios grupos tróficos se presenta en el siguiente orden de sustratos: azúcares > acetato > propionato.

En la corrida 7B, la actividad acetoclástica en lote a diferentes tiempos, mostró una fuerte reducción a los 30 días, comparada con la actividad inicial a los 15 días. Para la corrida 7A (glucosa), la actividad disminuyó el día 60, y el día 90 no se pudo detectar, debido probablemente al mezclado de los lodos dentro del reactor, al término de la corrida que incorporó lodo de diferentes edades.

Posteriormente la actividad de la corrida 7B se restableció hasta los 90 días en un valor ligeramente superior al de los primeros 15 días.

Un comportamiento de reducción de la actividad metanogénica a lo largo del tiempo sobre los ácidos acético, propiónico y butírico fue reportado por Hulshoff Pol et al. (1989) con un lodo digerido alimentado con sacarosa y AGV's en proporción 95:5, con una actividad inicial de 0.76 g DQO-CH₄/g SSV·d a los 88 días, para reducirse a 0.59 g DQO-CH₄/g SSV·d a los 96 días, sin encontrar una explicación para este comportamiento. De forma semejante Barrena (1990) encontró una actividad a los 45 días de 1.27 g DQO-CH₄/g SSV/d, y de 0.61 g DQO-CH₄/g SSV·d, a los 225 días para un lodo adaptado en anaerobiosis alimentado con glucosa.

En nuestro estudio el hecho de que la actividad a los 90 días haya sido prácticamente igual a los 15 días (corrida 7B), se explica con base en el método de muestreo, ya que a los 15, 30 y 60 días en todas las corridas se obtuvieron muestras de la porción de la cama de lodos más próxima a la superficie, que es el lodo de más edad. El muestreo a los 90 días fue sobre la mezcla total de la cama de lodos, que contenía tanto lodo fresco aún no adaptado depositado en la parte inferior del reactor, como el lodo de la parte superior; esto puede explicar el comportamiento aparentemente ilógico en la cinética de degradación al término de las corridas (Figs. 7.2.3, 7.2.4 y 7.2.5), así como el incremento del tiempo necesario para el inicio del consumo de sustrato.

Dubourgier et al. (1988b) menciona que la degradación del propionato es la principal etapa limitante en la metanogénesis a partir de sustratos solubles. En este caso, la comunidad propionitrófica se establece con grupos muy especializados en una estrecha relación de sintrofia, donde la presión parcial de hidrógeno deberá mantenerse por abajo de 10^{-4} atm y un pH de 7, para hacer energéticamente favorable la degradación del propionato. Estas condiciones sólo se pueden generar una vez que las bacterias anaerobias se adapten a las condiciones específicas de operación del reactor, y se logre una eficiente remoción del H_2 por las bacterias metanógenas hidrogenófilas.

Se asume que la acetogénesis a partir del propionato es llevada a cabo por la ruta del succinato (Dubourgier et al. 1988), en la que participan organismos OHPAP como *Syntrophobacter wolinii* en cocultivo con *Desulfovibrio* sp. Boone y Bryant (1980), experimentalmente han demostrado que dicho cocultivo requiere condiciones muy estrictas para llevar a cabo la degradación de propionato a acetato.

Con base en lo anterior y dado que se demostró la presencia de bacterias OHPA en los lodos generados, mediante el NMP, es probable que la ausencia de actividad sobre propionato pueda deberse a una saturación con los productos de fermentación. De acuerdo a lo anterior, es probable que las actividades al ácido propiónico generadas hasta los 60 días (corridas 7A), se deba precisamente al tiempo necesario para su crecimiento y que se establezcan las condiciones de sintrofia con el microorganismo adecuado.

En cuanto a la granulación y la actividad, Guiot et al. (1988) encontraron que la granulación se correlaciona claramente con el incremento en la proporción de bacterias acetógenas y metanógenas por unidad de masa y con un incremento en la actividad específica cuando se adicionaron metales traza. Por lo tanto propone que es posible que el crecimiento de las bacterias acetógenas acelere el proceso de granulación o que la estructura organizada del grano facilite la transferencia interespecie de metabolitos lo que a su vez incremente la actividad metanógena. En este sentido, debe considerarse la posibilidad de experimentar la adición de metales traza para elevar la actividad del lodo.

Hulshoff Pol et al. (1989) demostraron que es factible obtener un lodo

granular activo a partir de sustratos sin acidificar o parcialmente acidificados, en donde el principal componente fueron carbohidratos (sacarosa). La ventaja de utilizar sustratos sin acidificar es la reducción de tiempo en que se lleva a cabo la granulación, así como la mayor cantidad de lodo producido. Esto se debe a que los organismos acidógenos presentan un mayor rendimiento celular en comparación con los metanógenos ($Y = \pm 0.15$ y 0.03 Kg SSV/Kg DQO removida), por lo que la granulación sobre sacarosa se presenta más rápido que sobre una mezcla de AGV's. Sin embargo, en aguas residuales cuyo principal componente son carbohidratos, es necesario ejercer una presión de selección mayor, debido a que gran parte de las bacterias acidógenas son bacterias de tipo filamentosas que confieren baja sedimentabilidad al lodo. Por lo tanto, propuso que para obtener la granulación con sacarosa, en un reactor UASB, la tasa de dilución adecuada (D), es aquella cuyo valor es la mitad de la tasa máxima de crecimiento específico, en este caso de 6.6 d^{-1} .

Las determinaciones experimentales realizadas por Hulshoff Pol (1989), indicaron que el tiempo para obtener lodo con alta actividad metanogénica es de al menos 40 días, cuando se inicia con un lodo digerido y la actividad metanogénica sobre diferentes sustratos permanece constante después de 70 días de operación continua, lo cual es un reflejo de la composición microbiana del lodo.

En el caso de los desechos ricos en carbohidratos como la glucosa se requiere de mayor tiempo para la formación de la microflora apropiada que contenga todos los microorganismos requeridos para la conversión del sustrato a metano.

En este estudio el tiempo para la formación de la microflora apropiada bajo las condiciones de operación establecidas, incluyendo la adición de sustrato fue entre 30 y 90 días, dentro del tiempo de duración de las corridas. Esto se apoya en el hecho de que la cuantificación de los AGV's en el efluente para las corridas suplementadas con glucosa mostró que el ácido que más se acumuló durante el primer mes de operación fue el ácido propiónico, hasta 87 mg/l en los primeros días de arranque, en segundo lugar el butírico y el acético en tercero, durante los primeros 12 días.

En el efluente del reactor con NH_4^+ (corrida 7B) se observó que durante

los primeros 15 días el ácido en mayor proporción fue el propiónico, en segundo lugar el butírico y el acético en tercer lugar, a los quince días se detectó únicamente ácido acético. La composición del reactor con glucosa sin NH_4^+ (corrida 7A) mostró un comportamiento similar únicamente que la concentración del acético fue mayor (70 mg/l).

Lo anterior indica que la degradación del propionato fue el paso limitante en la metanogénesis a partir de sustratos solubles, y que esta población responsable, llegó a ser significativa después de que se desarrollaron poblaciones activas para acetato y butirato.

En este sentido Guiot *et al.* (1988) proponen que al crecer la población utilizadora de propionato se podría llegar a invertir la etapa limitante del proceso de transformación del sustrato en metano, en el caso de una sobrecarga orgánica. Es decir, que en vez de una acumulación de propionato, sería el acetato el que se acumularía en primer lugar. En nuestro estudio se observó un comportamiento similar entre los 60 y 90 días donde la concentración del ácido acético llegó a ser muy elevada (3000 mg/l) por lo que se podría pensar en una inhibición de las bacterias acetoclásticas por exceso de sustrato, lo que se tradujo en valores de actividad bajos (Tablas 7.2.7 y 7.2.8).

Otros resultados que apoyan lo anterior son el incremento de la concentración inicial del sustrato de los ácidos acético, propiónico y butírico en las pruebas de actividad, sin modificar la cantidad inicial de sustrato adicionado ni la carga orgánica de glucosa (0.05 g DQO/g SSV) alimentada al reactor.

Las corridas adicionadas con glucosa y una velocidad ascendente de 0.1 y 0.3 m/h que presentaron la mayor actividad a los 90 días fueron las corridas 6B (0.25), 7B (0.25) y 7A (0.12) expresada en g DQO- CH_4 /g SSV.d. Con esto se muestra un efecto positivo de la adición de sustrato al compararla con la corrida (6A) sin adición de glucosa y bajas velocidades ascendentes (0.013 m/h) en donde la actividad fue más baja (0.09 g DQO- CH_4 /g SSV.d).

En el caso de las corridas 6A y 7A la actividad se mantuvo en valores cercanos, 0.12 y 0.09 g DQO- CH_4 /g SSV.d, respectivamente aún cuando en la corrida 7A se adicionó glucosa; la baja actividad de esta última no se puede justificar fácilmente, únicamente se puede mencionar que en

esta corrida se presentó un incremento de la temperatura superior a 50°C, el cual aparentemente no afectó al reactor 7A.

Por lo que respecta al nitrógeno se sabe que la principal fuente aprovechada por las bacterias anaerobias, es el amonio, que es un producto terminal de la fermentación anaerobia de las proteínas y otros compuestos que contienen nitrógeno.

Se ha observado que el nitrógeno en forma de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ a concentraciones superiores a 1000 mg/l, no favorece el crecimiento e inhibe la degradación del ácido propiónico, sin observarse claramente la granulación (Hulshoof Pol et al. 1989).

En la corrida con adición de NH_4^+ (7B), la relación DQO/N que se aplicó fue de 20:5 (en forma de NH_4^+ Cl) por lo que hubo un exceso de NH_4^+ disponible para crecimiento celular.

Heinreichs et al. (1990) observaron que en cultivos mixtos el nitrógeno amoniacal a una concentración de 123 mg/l inhibe parcialmente a las bacterias metanógenas acetoclásticas en pruebas en lote. En nuestro caso, a pesar de aplicar una concentración superior a esta, en la corrida 7B (Tablas 7.2.8 y 7.2.11) no se afectó el crecimiento de las bacterias metanógenas, como se demuestra en las Tablas 7.2.5 y 7.2.6 en donde el NMP de las bacterias MA en ambas corridas es equivalente.

Dolfing (1986), reportó que a concentraciones de NH_4^+ mayores a las requeridas para el crecimiento sin limitación de nitrógeno, la actividad metanogénica específica es mayor; este comportamiento no se presentó en el reactor adicionado de NH_4^+ , corrida 7B (Tabla 8.2.11).

8.2.2 NUMERO MAS PROBABLE (NMP)

Como ya ha sido mostrado, el NMP del lodo de purga utilizado como sustrato en este estudio, mostró un valor inicial adecuado de todos los grupos implicados en la digestión anaerobia del orden de 10^7 bacterias/g SSV, un número alto si consideramos que es un lodo aerobio. La presencia de bacterias anaerobias en este tipo de desecho ya ha sido mencionado por Wu et al. (1987), quienes explican su presencia a la existencia de núcleos anaerobios en el flóculo, los cuales pueden desarrollarse al presentarse las condiciones adecuadas de anaerobiosis

y posteriormente generar una mayor población adaptada.

El seguimiento temporal de las distintas comunidades responsables de la digestión anaerobia, bajo las condiciones experimentales de operación, indicaron que no fue constante la relación entre el número de bacterias de cada grupo y el tiempo así como la actividad que presentaron (Tablas 7.2.1 a 7.2.9).

Resultados similares fueron reportados por Morgan *et al.* (1991), al evaluar la microbiología de digestores anaerobios tratando agua residual de la fabricación de helado, en donde el número de bacterias metanógenas y no metanógenas permanecieron similares en todos los digestores sin mostrar una relación con el tiempo después del arranque.

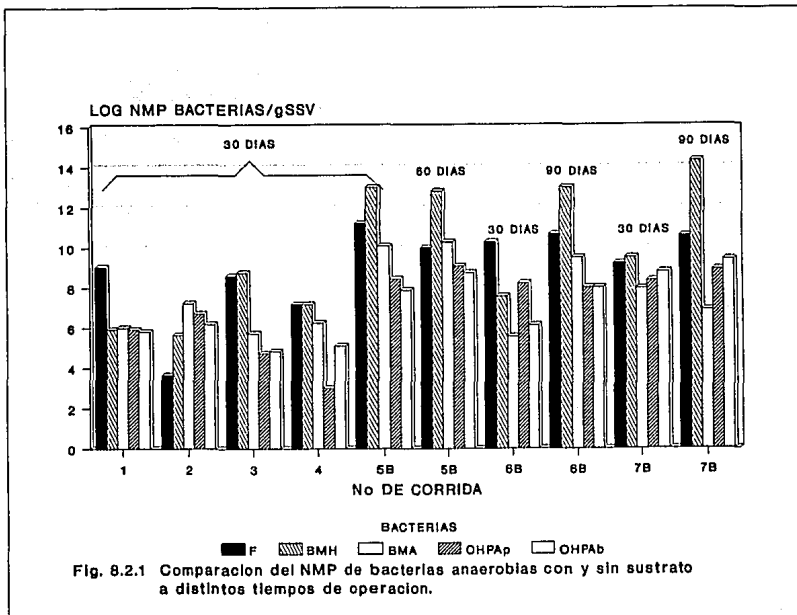
Una comparación referente a la evolución bacteriana entre este estudio y otros es difícil, dado que en la mayoría de los estudios se registra únicamente el número inicial y/o final de los diferentes grupos tróficos, por lo cual la variación temporal difícilmente puede ser comparada; además los resultados son reportados en número de bacterias/ml a diferencia de este estudio en el cual se han adoptado las unidades propuestas por Guyot *et al.* (1989) en número de bacterias/g SSV. Lo anterior se basa en la dificultad de obtener siempre la misma cantidad de lodo y agua en la muestra, y porque las bacterias de interés se encuentran asociadas a la fracción sólida que son los lodos.

Los reportes existentes se dirigen principalmente hacia el tipo de microorganismo dominante en el grano, de esta forma Weigant (1986) reporta a *Methanothrix* como el organismo predominante en cultivos con butirato y acetato. Aún cuando *Methanothrix* es el organismo más comúnmente referido como organismo predominante, Li y Hu (1988, en Hulshoff, 1989) reportan que en agua residual de jugo de malta de cerveía diluido, el organismo más abundante fue *Methanosarcina* asociado a bacterias del tipo *Methanothrix soehngenii*, en tanto que Sam-Soon *et al.* (1988) reporta a *Methanobacterium* cepa AZ como la bacteria clave en los granos; de lo anterior queda claro que los diferentes sustratos influyen de una manera directa sobre la selección del tipo de microorganismos que colonizan el grano, así como de la actividad generada. En sustratos como acetato a concentraciones elevadas, las condiciones cinéticas favorecen el crecimiento de

organismos del género *Methanosarcina* sobre los de *Methanotrix*.

Hulshoff Pol (1989) establece que el crecimiento en un sustrato carbohidratado consiste predominantemente de organismos acidogénicos, que son más voluminosos por tratarse de bacterias filamentosas, las cuales tienen un crecimiento mayor que las metanógenas. Además, presentan una alta afinidad por agregarse debido a la segregación de exopolímeros lo cual permite observar en aguas de desecho carbohidratadas mayores tamaños de grano. Además, la observación al microscopio de esos granos revelaron un cambio en las poblaciones del grano formado, los organismos filamentosos fueron reemplazados por bacterias tipo bacilo. El mismo fenómeno se observó en los granos cultivados en AGV's como sustrato, lo cual fue interpretado como un efecto de maduración del grano.

En este estudio algunas observaciones al microscopio revelaron que el lodo dentro del reactor consistía principalmente de material filamentososo, por lo cual estaríamos en la primera etapa de formación granular.



Los resultados obtenidos al final de las corridas, mostraron que la adición de sustratos y amonio (corridas 5B, 6B, 7A y 7B) promovió incrementos significativos en el tamaño de la población (Fig 8.2.1) a diferencia de las corridas 1 a 4, 5A y 6A en donde no se adicionó sustrato aún cuando en estas corridas las velocidades ascendentes aplicadas no ejercieron una presión de selección significativa en el lavado de bacterias.

Esto demostró que la adición de sustrato favorece el crecimiento de todas las comunidades del ecosistema anaerobio, debido a la disponibilidad de sustrato para crecimiento de todos los niveles tróficos, dando así una mayor estabilidad al ecosistema. En los controles sin sustrato 5A y 6A se tuvieron más bacterias que en las corridas 1, 2, 3 y 4 (sin sustrato). Esto se puede deber a las condiciones experimentales o a las características iniciales de los lodos utilizados en las corridas 5A y 6A. En el caso de la corrida 5B hay diferencias notables en comparación con la corrida 5A con respecto a las MH y fermentativas que se incrementaron, con una reducción de las OHPAb mientras que las MA se mantuvieron constantes.

El NMP mostró que en casi todas las corridas, las bacterias fermentativas e hidrogenófilas presentaron la mayor proporción de la población cuantificada. En el caso de las bacterias fermentativas se debe a que presentan las tasas más altas de crecimiento ($\mu = 0.3 \text{ h}^{-1}$). Sin la adición de sustrato rico en azúcares, se observó una reducción de la población con el transcurso del tiempo (Tabla 8.2.5).

TABLA 8.2.5 VARIACION DEL NMP DE LAS BACTERIAS FERMENTATIVAS EN LAS CORRIDA SIN SUSTRATO (No. Bacterias/g SSV)

MUESTREO (días)	CORRIDA			
	1	2	3	4
5	1.2 E^{11}	2.2 E^5	1.5 E^9	1.1 E^{12}
15	2.4 E^{10}	5.1 E^3	--	3.5 E^9
30	1.1 E^9	4.2 E^3	3.9 E^8	1.5 E^7

El incremento de la población hidrogenófila en presencia de sustratos como glucosa ha sido registrado por García y Mendoza (1991) y sobre

glucosa y albúmina por Barrena (1990). En ambos casos al parecer, se relaciona con los productos de fermentación del sustrato, dado que el hidrógeno es proporcional al flujo del sustrato utilizado en el sistema, el cual tendrá que ser removido por la población metanogénica autotrófica para que se lleve a cabo la degradación de los ácidos propiónico y butírico.

Nuestros resultados muestran que las poblaciones con mayor número, fueron las bacterias fermentativas e hidrogenófilas seguidas por las sulfato-reductoras (Figura 8.2.1). En casi todos los casos las bacterias con menor número fueron las OHPAp, OHPAb y acetoclásticas. En las corridas 5A, 5B, 6A y 6B el nivel de SR era equivalente o superior al de las MA. En presencia de sulfatos las SR tienen un papel competitivo; en ausencia su papel es en el proceso acetogénico vía el fenómeno de la transferencia interespecie de H_2 .

En presencia de sulfatos, su conversión a H_2S mediante la acción de las bacterias sulfato reductoras se considera que tiene un efecto tóxico a las bacterias metanogénicas; sin embargo, actúa también como nutriente esencial para la metanogénesis a concentraciones de 1-25 mg/l. Speece (1983) reporta como nivel óptimo 13 mg/l H_2S -S.

Los cambios en la población anaerobia han sido observados al modificar el TRH. Li y Noike (1990) en un reactor completamente mezclado experimentaron con tiempos de retención de 1 a 10 días y encontraron la población máxima de metanógenas totales a un tiempo de 5 días al utilizar lodos activados de desecho pretratados a 175°C, como sustrato; observando que la presencia de un grupo específico para un sustrato cambia con el tiempo de retención.

8.3 OPERACION DEL REACTOR EN CONDICIONES CERCANAS DE ESTRATIFICACION PARA PROMOVER LA GRANULACION DE ACUERDO A SAM-SOON *et al.* (1987)

Sam-Soon *et al* (1987) establecen que uno de los requisitos para la granulación es la estratificación de la cama de lodos en los reactores UASB la cual consiste de tres zonas: una zona activa inferior con presión parcial de hidrógeno ($\bar{p}H_2$) alta, una zona activa superior con $\bar{p}H_2$ reducida y una tercera en donde las reacciones bioquímicas no son significativas. Estas condiciones son las que pretendieron reproducirse durante la operación de los reactores 7A y 7B, como se

mencionó anteriormente.

Los productos de la fermentación de la glucosa dependen en gran medida de la $\bar{p}H_2$ que predomina en el reactor. Cuando la $\bar{p}H_2$ es de $10^{-3.7}$ atmósferas (atm) se generan los ácidos acético y butírico, además de hidrógeno y dióxido de carbono, y cuando la $\bar{p}H_2$ es mayor a $10^{-3.7}$ atm se genera ácido propiónico además de los productos anteriores. Los resultados de las corridas 7A y 7B (Tablas 7.2.8 y 7.2.11) mostraron la producción de los tres principales ácidos grasos volátiles durante la digestión anaerobia (acético, propiónico y butírico).

Para la corrida 7A (glucosa), la evolución de los ácidos grasos no mostró un comportamiento claro, sin embargo en general hasta el día 60, únicamente se produjeron los ácidos acético y propiónico, a excepción del nivel 3 de la cama de lodos, en donde a los quince días se presentó el butírico. Posteriormente a los 90 días el único ácido detectado fue el acético. La evolución de estos ácidos a lo largo del tiempo para los diferentes niveles (Tabla 7.2.8) mostró a los 90 días, la máxima concentración de ácido acético acoplado a la desaparición del propiónico.

El comportamiento de la corrida 7B (glucosa + NH_4^+) con respecto al tiempo se observa en la Tabla 7.2.11 y muestra una tendencia similar durante los 90 días de operación: incremento del ácido acético y reducción del ácido propiónico en todos los niveles.

Lo anterior implica de una manera indirecta que en ambos reactores no se establecieron las tres zonas esperadas.

En nuestro caso el TRH fue de 2 días, por lo cual se necesitó un lapso de 15 días para que las bacterias pudieran adaptarse y generar actividad. Por otro lado, como ya se ha mencionado, no se obtuvieron zonas definidas en la cama de lodos, posiblemente en el interior del reactor la $\bar{p}H_2$ fue tal que se favoreció la degradación del butirato pero no del propionato, es decir que la $\bar{p}H_2$ estuvo entre $10^{-4.1}$ y $10^{-2.7}$. Esto confirma los resultados obtenidos en la prueba de actividad específica obtenida sobre butirato, donde aproximadamente a los 15 días se observó una actividad significativa para la degradación de este ácido.

La adición de $N-NH_4^+$ en exceso de acuerdo a Sam-Soon et al (1987), debe satisfacer la demanda de la zona activa inferior que es donde se lleva a cabo el crecimiento granular, por lo que el consumo será intenso debido a su transformación durante la síntesis celular y la conversión en nitrógeno orgánico, ya sea en forma de aminoácidos que son liberados al medio o excretados como cadenas de polipéptidos.

La concentración de NH_3 durante la corrida en el reactor 7A (glucosa sin NH_4^+), en los diferentes niveles de la cama de lodos mostró una tendencia al incremento, a diferencia del reactor 7B (glucosa con NH_4^+) que presentó un comportamiento menos claro.

El comportamiento en ambos reactores no corresponde a los perfiles típicos obtenidos por Sam Soon et al. (1987) en los que se observa una marcada reducción de la concentración de nitrógeno en la parte inferior del reactor, acoplado al incremento de nitrógeno orgánico.

La Tabla 8.3.1 muestra la relación DQO/NH_3 para las corridas 7A (glucosa sin NH_4^+) y 7B (glucosa + NH_4^+) en los distintos niveles de la cama de lodos, así como su relación con el nitrógeno orgánico y la biomasa total en el reactor. En esta se observa que la relación DQO/NH_3 es muy baja en ambos reactores hasta el día 60, sin embargo a los 90 días en el reactor sin amonio, esta cifra se duplicó con respecto a la del reactor adicionado de NH_4^+ , lo que corresponde a bajas concentraciones de NH_3 . Los valores tan bajos de esta relación, encontrado en el reactor con NH_4^+ , deberían favorecer el incremento del

TABLA 8.3.1 VALORES PROMEDIO DE LA RELACION DQO/NH_3 , PROT/SSV Y BIOMASA DE LAS CORRIDAS 7A Y 7B.

Días	NH_3 mg/l	DQOs mg/l	N-org mg/l	DQO/NH_3	Biomasa total(g)	Prot/SSV mg/mg
Corrida 7A (glucosa sin amonio)						
35	67	1091		16	18.4	0.23
60	67	1356	831	20	25.7	0.07
90	60	1803		30	31.6	0.12
Corrida 7B (glucosa con NH_4^+)						
35	106	873		8	16.5	0.14
60	113	1896	623	17	20.6	0.07
90	120	1944	598	16	24.4	0.13

nitrógeno orgánico y de la biomasa, debido al exceso del amonio adicionado. Sin embargo no fue así, ya que el mayor incremento de N-org y biomasa se obtuvo en el reactor sin NH_4^+ .

Lo anterior se confirma con la biomasa total en la **Tabla 8.3.1** y al observar las **Figuras 8.3.1 y 8.3.2** donde se observa la mayor concentración de SSV en la corrida control, sin amonio. Los resultados obtenidos sugieren que el exceso de NH_4^+ muestra un efecto inhibitorio sobre la actividad microbiana dentro del reactor.

Barrena et al. (1991) obtuvieron un incremento de biomasa con una relación DQO/N de 100:20. Sin embargo, parece que el hecho de aplicar una relación mayor a las recomendadas (70:1) es favorable sólo en aquellos lodos que presenten una actividad metanogénica mayor a la aquí reportada, con lo cual permitiría tratar elevadas cargas de DQO con una alta demanda de NH_4^+ sin alcanzar las concentraciones aparentemente inhibitorias aquí encontradas.

Los perfiles de la DQO_s en las **Tablas 7.2.8 y 7.2.11** mostraron que en el reactor sin NH_4^+ se observó una concentración constante hasta el día 60, posteriormente se incrementó sin guardar relación entre la concentración de acético y su equivalencia en DQO del influente, lo que sugiere que el incremento puede deberse a un fenómeno de hidrólisis intensa en este tiempo (90 días).

En la corrida 7B (glucosa + NH_4^+), no se observó un comportamiento definido, únicamente se puede hacer notar que la concentración de DQOs durante el tiempo en cada nivel de la cama de lodos fue superior a la del reactor control, probablemente debido a que el lodo generó una baja actividad metanogénica.

En cuanto a la relación mg proteína/mg SSV (**Fig. 8.3.3 y 8.3.4**) en los dos reactores disminuye de manera similar excepto para el nivel 4 de la corrida control. En ambas corridas se observó que después de los 60 días existe una tendencia a incrementarse. Es posible que el incremento real de la biomasa bacteriana, que se observó a los 90 días, sea indicativo de la aclimatación de las bacterias a las condiciones anaerobias y consecuentemente se inicia la excreción de proteínas o polipéptidos que darían como resultado la agregación bacteriana.

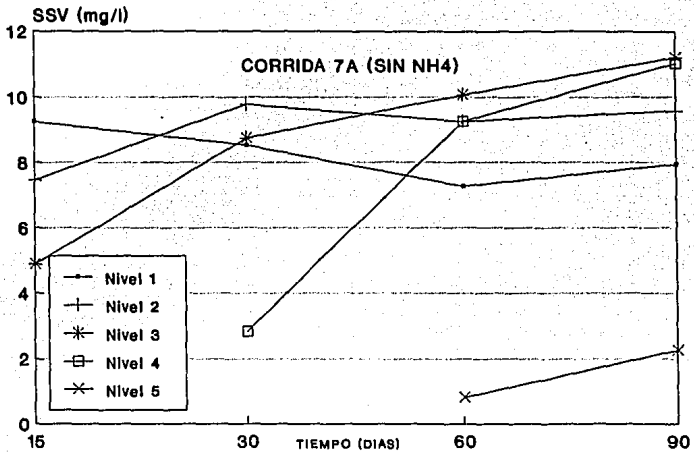


Fig. 8.3.1 Perfil de SSV a diferentes niveles de la cama de lodos.

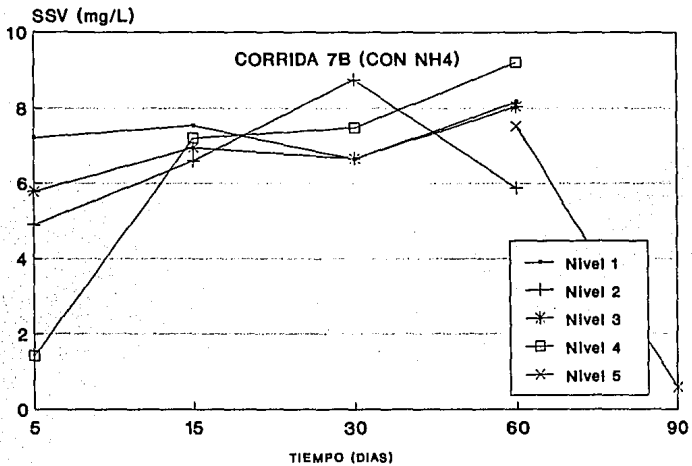


Fig. 8.3.2 Perfil de SSV a diferentes niveles de la cama de lodos.

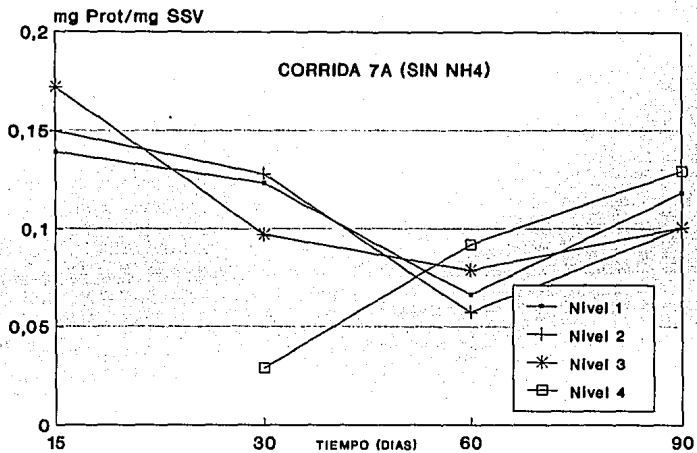


Fig. 8.3.3 Relación Proteína/SSV a diferentes niveles de cama de lodos.

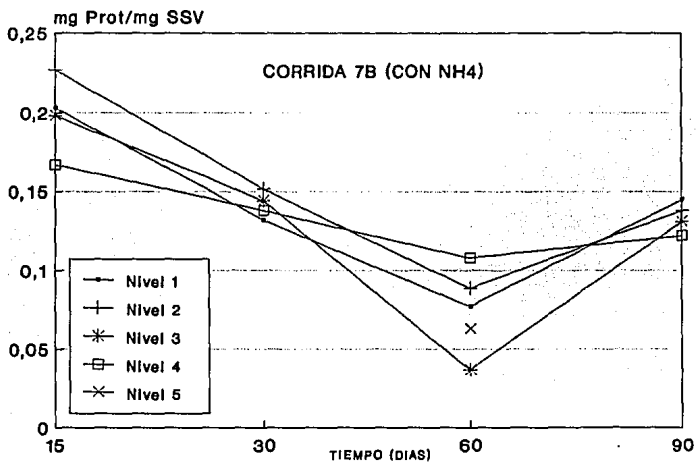


Fig. 8.3.4 Relación Proteína/SSV a diferentes niveles de la cama de lodos.

Son varias las razones por las que no se pudo observar estratificación de la cama de lodos, entre estas se puede citar la necesidad de mantener un régimen hidráulico de tipo pistón (Sam-Soon, 1988) condición que de acuerdo a nuestros resultados no se presentó, aún cuando en las corridas se mantuvo la velocidad ascendente en el valor más bajo (0.0123 m/h). Los perfiles de AGV's obtenidos se asemejan más a un reactor completamente mezclado, seguramente el biogás generado en la cama de lodos y la ligera agitación que se proporcionó al sistema influyeron de manera importante.

Otro aspecto que debe recordarse es que nuestros reactores fueron alimentados con lodo aerobio el cual tomó cierto tiempo para adaptarse a condiciones anaerobias.

Por otro lado, aún cuando la glucosa adicionada fue capaz de generar una alta presión parcial de hidrógeno, éste fue utilizado por bacterias sulfato-reductoras, las cuales compiten con las bacterias metanógenas acetoclásticas, ya que de acuerdo a los resultados obtenidos el número de las primeras fue elevado.

Adicionalmente, no podemos asegurar la ausencia de cisteína en el influente, y de acuerdo a Sam-Soon et al. (1987) la presencia de ésta impide el proceso de granulación.

CAPITULO 9

CONCLUSIONES

1. Es factible la producción en continuo de un inóculo anaerobio de tipo floculento granular para reactores UASB, a partir de lodo de purga de un sistema de lodos activados, con adición de sustrato y velocidad ascendente del orden de 0.3 m/h.
2. La sedimentación del lodo se favorece con el incremento de la velocidad ascendente. El máximo valore de IVL se alcanzó con una V_{asc} 0.30 m/h respectivamente.
3. Variaciones de la carga orgánica (1.5 y 0.7 g SST/1-d) bajo la misma velocidad ascendente (0.3 m/h) sin adición de sustrato, no tuvo efectos aparentes sobre las propiedades de sedimentabilidad de los lodos.
4. La transformación de lodos activados de purga en lodo anaerobio se favoreció con la adición de un sustrato externo, la actividad metanogénica específica aumentó, de 0.12 a 0.40 g CH_4 -DQO/g SSV-d.
5. Se observó el inicio de la granulación en la corrida con adición de vinaza-melaza y V_{asc} de 0.30 m/h; los gránulos presentaron un diámetro de 0.2 mm pero poca resistencia mecánica, que sin explicación aparente desaparecieron.
6. No se observó correlación entre la actividad metanogénica específica y el número de bacterias de los diferentes grupos tróficos a lo largo del tiempo, particularmente las metanógenas.

7. La adición de sustratos como glucosa y vinaza-melaza favorecieron el crecimiento de bacterias fermentativas e hidrogenófilas principalmente, sin que se haya observado un crecimiento importante de los demás grupos bacterianos.
8. El menor NMP, correspondió a las bacterias OHPAb y OHPAp. Los valores de actividad más bajos correspondieron a las bacterias propionitróficas (0.02 a 0.03 g CH₄-DQO/g SSV-d) y butiritróficas de 0.14 a 0.28 g CH₄-DQO/g SSV-d).
9. Bajo las condiciones de operación aplicadas en este estudio, la adición de NH₄⁺ no propició la granulación del lodo, probablemente al no lograrse la estratificación de la cama de lodos.
10. No se observó un incremento de la relación proteína/SSV por lo que se deduce que no se presentó la producción de polipéptidos necesarios para la granulación, de acuerdo con lo propuesto por Sam-Soon et al. (1987).

CAPITULO 10

BIBLIOGRAFIA

Alibhai, K.R. and C.F. Forster. (1986b). Physicochemical and biological characteristics of sludges produced in anaerobic upflow blanket reactors. *Enz. Microbiol. Technol.* 8:601-606.

APHA-AWWA-WPCF. (1985). *Estandar Methods for the examination of water and wastewater*. 16th.ed. Washington, D. C.

Archer, D.B. (1987). Report on the microbiological aspects of granulation. In *Granular anaerobic sludge: Microbiology and Technology*. Lettinga., Zehnder, A.J.B., Grotenhuis, J.T.C. and Hulshoff Pol, L.W. (eds). *Proceedings of the GASMAT-workshop*, Luntern, Pudoc Wageningen, The Netherlands, pp. 146-152.

Arias, O.A. y Noyola R.A. (1988). Tratamiento de un agua residual urbana mediante el reactor anaerobio de lecho de lodos (UASB). *En avances de Ingeniería Química*. Leyva R., Medellín F.y Navarro J. editores. Prensa Universitaria Potosina.

Attal, A., Ehlinger, F., Audic, J.M. and Faup, G.M. (1988). pH inhibition mechanisms of acetogenic, acetoclastic and hydrogenophilic populations. In *Anaerobic Digestion*. E.R. Hall and P.N Habson (eds.). *Proceedings of the 5th. International Symposium on Anaerobic Digestion*. ed. A. Tilche & Rozzi. Monduzzi Editore Bologna, Italy. pp.71-78.

Balch, W.E., and Wolfe, R.S. (1976). New approach to the cultivation of methanogenic bacteria: 2-mercaptoethanosulfonic acid (HS-CoM)-dependent growth of *Methanobacterium ruminatum* in a pressurized

atmosphere. *Appl. Environ. Microbiol.* 32:781-791.

Balch, W.E., Fox, G.E., Magrum, L.J., Woese, C.R. and Wolfe, R.S. (1979). Methanogens: reevaluation of a unique biological group. *Microbiol. Rev.* 43 (2): 260-296.

Barrena, G. C. (1991). Efecto del sustrato de la carga orgánica y tiempo de retención hidráulica sobre la granulación de lodo en reactores anaerobios de lecho de lodos (UASB). Tesis de Maestría-Biología. Facultad de Ciencias. UNAM. 83 pp.

Beefnik, H.H. and P. Staugard. (1986). Structure and dynamics of the anaerobic bacterial aggregates in a gas-lift reactor. *Appl. and Environ. Microbiol.* 52 pp.

Benefield, L.D. and Randall, C.W. *Biological Process Design for Waste Water Treatment*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.Y. 1980.

Boone, D.R. and Bryant, M.P. (1980). Propionate-degrading bacterium, *Syntrophobacter wolinii* sp. nov. gen. no., from methanogenic ecosystems. *Appl. Environ. Microbiol.*, 40:626-632.

Calzada, J.F. (1990). Digestión anaerobia en América Latina. En *Taller de Tratamiento Anaerobio de aguas residuales en América Latina*. UNAM, ORSTOM, ICAITI, UAM-I, SEDUE y CONACyT. Cd. Universitaria, México. pp.67-71.

Calderón, M.C. (1990). Instalación y arranque de un digestor tipo lecho de lodos a nivel piloto para tratamiento de lodos de purga. Tesis Licenciatura. División de Ciencias Básicas en Ingeniería, UAM-I. 60 pp.

Cuervo, F.H. (1988). Generalidades sobre tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales. En *Manual del Curso: Tratamiento Anaeróbico de Aguas Residuales*. Microbiología y Bioquímica. Medellín, Colombia. pp.1-36.

Cuervo, F.H. (1990). Aplicación del proceso anaerobio de manto de lodos y flujo ascendente UASB en el tratamiento de desechos líquidos industriales. En *Taller sobre Tratamiento anaerobio de aguas residuales en América Latina*. UNAM, ORSTOM, ICAITI, UAM-I, SEDUE y CONACyT. Cd. Universitaria, México. pp.67-71.

- De Zeeuw, W. (1988). Granular sludge in UASB reactors. In Granular anaerobic sludge: Microbiology and Technology. Lettinga., Zehnder, A.J.B., Grotenhuis, J.T.C. and Hulshoff Pol, L.W. (eds). *Proceedings of the GASMAT-workshop*, Luntern, Pudoc Wageningen, The Netherlands, pp. 132-145.
- Dolfing, J. (1985). Kinetics of methane formation by granular sludge at low substrates concentrations. *Applied Microbiology Biotechnology*, 22:77-81.
- Dolfing, J. and Bloemen, W.G.B.M. (1985). Activity measurement as a tool to characterize the microbial composition of methanogenic environments. *J. Microbiol.* 4:1-12.
- Dolfing, J. (1986). Granulation in UASB reactors. *Water Science and Technology*, 12:15-25.
- Dolfing, J. (1988). Hydrogen-based interactions in syntrophic propionate degrading microbial consortia. In Anaerobic Digestion. E.R. Hall and P.N.Hobson (eds.). *Proceedings of the 5th. International Symposium on Anaerobic Digestion*. ed. A. Tilche & A. Rozzi. Monduzzi Editore. Bologna Italy, pp. 31-34..
- Dubourgier, H.C., Prensier G., Albagnac, G. (1988a). Structure and Microbial Activities of granular Anaerobic Sludge. In Granular anaerobic sludge: Microbiology and Technology. Lettinga, G. Zehnder, A.J.B., Grotenhuis, J.T.C. and Hulshoff Pol. L.W. (eds). *Proceedings of the GASMAT-workshop*. Lunteren , Pudoc Wageningen, The Netherlands, pp.18-33.
- Dubourgier, H.C., D.B. Archer, G. Albagnac and G. Prensier. (1988b). Structure and metabolism of methanogenic microbial conglomerates. In Anaerobic Digestion. E.R. Hall and P.N.Hobson (eds.). *Proceedings of the 5th. International Symposium on Anaerobic Digestion*. ed. A. Tilche & A. Rozzi. Monduzzi Editore. Bologna Italy, pp. 85-92.
- Fajardo, C., J.P. Guyot., A. Noyola y C. Barrera. (1989). Study of the transition of activated sludge to an adapted anaerobic inoculum for anaerobic digester: FEMS Symposium in Microbiology of stric anaerobes involved in interespecific H₂ transfer. Marsella-Francia.

García, J.L. Guyot, J.P., Oliver, B., Trad, M., and Paycheng, C. (1982). *Ecologie de la Digestion Anaerobie*. Cha.ORSTOM, Ser.Biol., 45:3-15.

García, M.S., G. Silva y J.P. Guyot. (1988). Selección de fuentes potenciales de inóculos y materiales para digestores anaerobios. En *XIX Congreso Nacional de Microbiología*. Monterrey, N.L., México, pp. 22-29.

García, A.D. y Mendoza, F.S. (1991). Estudio del Arranque de Reactores UASB, alimentados con varias clases de Efluentes e Inoculados con lodos Activados Adaptados o Estiercol de Vaca. Tesis de Licenciatura. ENEP-Iztacala, UNAM. México.

González, U.L. (1988). Efecto de la agitación en la transformación de lodos activados de purga en inóculo anaerobio para reactores de tipo lecho de lodos. Proyecto terminal, UAM-A, 79 pp.

Grotenhuis, J.T.C., Van Lier, C.M. Plugge and A.J.M. Stams. (1988). Effect of calcium removal on size and strength of methanogenic granules. In *Anaerobic Digestion*. E.R. Hall and P.N.Hobson (eds.). *Proceedings of the 5th. International Symposium on Anaerobic Digestion*. (Posters). ed. A. Tilche & A. Rozzi. Monduzzi Editore. Bologna Italy, pp. 117-120.

Guiot, S.R., Gorur, S.S. and Kennedy, K.J. (1988a). Nutritional and Environmental upflow anaerobic sludge bed filter (UBF) reactor start-up. In *Anaerobic Digestion*. E.R. Hall and P.N.Hobson (eds.). *Proceedings of the 5th. International Symposium on Anaerobic Digestion*. ed. A. Tilche & A. Rozzi. Monduzzi Editore. Bologna Italy, pp. 117-120.

Guiot, S.R., Gorur, S.S., Bourque, D. and Samsoun, R. (1988b). Metal effect on microbial aggregation during upflow anaerobic sludge-bed filter (UBF) reactor start-up. In *Granular anaerobic sludge: Microbiology and Technology*. Lettinga., Zehnder, A.J.B., Grotenhuis, J.T.C. and Hulshoff Pol, L.W. (eds). *Proceedings of the GASMAT-workshop*, Luntern, Pudoc Wageningen, The Netherlands, pp. 146-152.

Guiot, S.R., A. Paus, D. Bourque, M. El Housseini, L. Lavoie, C. Beauliev and R. Samsoun (1988c). Effect of upflow liquid velocity on

granule size distribution in a upflow anaerobic bed-filter (UBF) reactor. In *Anaerobic Digestion*. E.R. Hall and P.N.Hobson (eds.). *Proceedings of the 5th. International Symposium on Anaerobic Digestion*. (Posters). ed. A. Tilche & A. Rozzi. Monduzzi Editore. Bologna Italy, pp. 117-120.

Guiot, R.S., Pauss and J.W. Costerton. (1991). A structural Model of the Anaerobic Granule Consortium. *Proceeding of the 6th International Symposium on Anaerobic Digestion, IAWPRC*, Sao Paulo, Brazil.

Guiot, S. (1992). Bioinmovilization in Anaerobic reactors. En *Bioprocesos Anaerobios para el tratamiento de efluentes industriales*. UAM-I, ORSTOM, IMP. México.

Gujer, W. & Zehnder A.J.B. (1983). Conversion processes in anaerobic digestion. *Wat. Sci. Technol.* 15:127-167.

Guyot, J.P. (1988). Microbiología de la Digestión Anaerobia. En *Manual del Curso: Tratamiento Anaerobico de Aguas Residuales (Microbiología y Bioquímica)*. Medellín, Colombia.

Guyot, J.P., A. Noyola, F. Ramírez y O. Monroy. (1990). Actividades metanogénicas de lodos granulares de un digestor de lecho de lodos. *Biotech. Letters*. 2(12):155-160.

Guyot, J.P. (1990). Introducción a la Micobiología de los Digestores Anaerobios. En *Taller de Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales en América Latina*. UNAM, México, pp 83-95.

Harada, H., Endo, G., Tohya Y. and Monoi, K. (1988). Hight rate a performance and its related characteristics of granulated sludges in UASB reactors treating various wastewater. In *Anaerobic Digestion*. E.R. Hall and P.N.Hobson (eds.). *Proceedings of the 5th. International Symposium on Anaerobic Digestion*. (Posters). ed. A. Tilche & A. Rozzi. Monduzzi Editore. Bologna Italy, pp. 117-120.

Heinrichs, M.D., M.H. Poggi- Varaldo and A.J. Oleszkiewicz. (1990). Effects of Ammonia on Anaerobic Digestion of simple Organic Substrates. *Journal of Environmental Engineering*. 116 (4): 698-710.

Hickey, F.P., Wu, M.W., Vega, M.C. and Jones, R. (1991). Start-up, operation, monitoring and control of High-rate anaerobic treatments systems. *Water Sci.Tech.* 24 (8):207-255.

Hulshoff Pol, L.W., Zeeuw, W.J., Velzeboer, C.F. and Lettinga, G. (1983). Granulation in UASB reactors. *Water Science & Technology.* 15:291-304.

Hulshoff Pol, L.W., Heijnenkamp K. and Lettinga, G. (1987). The selection pressure as a driving force behind the granulation of anaerobic sludge. In *Granular anaerobic sludge: Microbiology and Technology.* Lettinga, G., Zehnder, A.J.B., Grotenhuis, J.T.C. and Hulshoff Pol, L.W. (eds). *Proceedings of the GASMAT-workshop*, Luntern, Pudoc Wageningen, The Netherlands, pp. 153-162.

Hulshoff Pol, L.W., K. Heijnenkamp and G. Lettinga. (1988). The selection pressure as a driving force behind the granulation of anaerobic sludge. In *Granular anaerobic sludge; microbiology and Technology.* Pudoc, Wageningen, The Netherlands.

Hulshoff Pol, L.W. (1989). The phenomenon of granulation of anaerobic sludge. PhD-tesis. Agricultural University of Wageningen, The Netherlands. 120 pp.

Hungate, R. E. (1969). A roll tube method for cultivation of strict anaerobes. In *Method in Microbiology.* J.R. and D.W. Rivbons. Edit. Academic Press. N.Y. USA, 3(8):117-132.

Husser, B.A., Wuhrmann, K. and Zender A.J.B. (1982). *Methanothrix soehngenii* gen. nov. sp.nov., a new acetotrophic non hydrogen oxidizing methanobacterium. *Arch. Microbiol.* 132:1-12.

ICIDCA (1990). *Manual de los derivados de la caña de azúcar.* 2a.ed. Edit. por GEPLACEA-PNUD. México, 447 p.

Iza, L.J. (1988). Control de reactores anaerobios: parámetros y procedimientos. En *4o Seminario Depuración Anaerobia de aguas residuales.* Univ. de Valladolid, España. pp. 111-138.

Lettinga, G., A.F.M. van Velsen, S.W. Hobma, W.J. de Zeeuw and A.

Klapwijk. (1980). Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. *Biotechn. Bioeng.* 22:699-734.

Lettinga, G., de Zeeuw, W.J., Hulshoff Pol, L.W., Hobma, S.W., Grind, P.C., Weigant, W.M., Van Velsen, A.F.M. Koster, I.W. (1982). Anaerobic waste water treatment using the UASB treatment process. En *2o Simposio Avances en Digesti n Anaerobia: Combustibles por Fermentaci n.* UAM-I/ICAITI, Guatemala.

Lettinga, G. and Hulshoff Pol, L.W. (1986). Adelantos en el diseo, operaci3n y economi a de reactores anaerobicos. En *Manual del Curso: Tratamiento Anaer3bico de Aguas Residuales (Microbiologia y Bioquimica)*. Medellin, Colombia.

Lettinga, G. and P.L. Hulshoff (1991). UASB-Process design for varius types of wastewater. *Wat.Sci. Tech.* (24)8:87-105.

Li, Y. Y. and Noike, T. (1990). The characteristics of Methanogenic Bacterial population and organic degradation in Anaerobic Digestion. In *Water Pollution Research and Control*. IAWPRC. Kyoto, Japon. pp. 423-426.

Loosdrecht, M.C.M. Van., Lyklema, J. Norde, W., Schroa, G. and Zehnder, A.J.B. (1987). The role of bacterial cell wall hidrophobicity in adhesion. *Applied and Environmental Microbiology*, 53:1893-1897.

Mahoney, E.M., Varangu, L.K., Cairns, W.L., Kosaric, N., Murray, W.I. (1987). The effect of calcium on microbial agregation during UASB reactor start-up. *Wat. Sci. Tech.* (19):249-260.

Margalef, R. (1975). *Ecologia*. Ed. Omega, S.A. Barcelona, Espafia.

McCarty, P.L. (1964). Anaerobic waste treatment fundamental. In *Pub.Works.* (95):9, 107-112; 10, 123-126, 91-94; 12, 95-99.

McCarty, P.L. and D.P. Smith (1986). Anaerobic wastewater treatment. *Environmental Science and Technology*. 20:1200-1206.

McInerney, M.J. and Bryant, M.P. (1981). Basic principles of

bloconversion in anaerobic digestion and methanogenesis. In *Biomass Conversion Processes for energy and Fuels*. Sofer S.S. and Zaborsky, O.R. (eds). Plenum Publishing corp. pp. 277-296.

Morgan, W.J., L. M. Evison and F.C. Forster. (1991). The impact of anaerobic extracellular polymers on the metabolism of granular anaerobic sludge. In *Environmental Technology*. (12):421-430.

Mosey, F.E. (1983). Kinetic descriptions of anaerobic digestion. In *3th. International Symposium on Anaerobic Digestion*. USA. pp.37-52.

Noyola, A. y Briones, R. (1988). Tratamiento anaerobio de vinazas a escala piloto: Inoculación y Arranque de reactores tipo lecho de lodos y filtro anaerobio. En *Memorias del VI Congreso Nacional SMISAAC*. Querétaro, Qro.

Pauss, A., Samsoon and S. Guiot. (1990). Thermodynamic evidence of trophic microniches in methanogenic granular sludge-bed reactors. *Appl. Microbiol. Biotechnol*, 33:88-92.

Prensier, G., Dubourgier, H.C., Thomas, I., Albagnac, G. and Buisson, M.N. (1988). Specific immunological probes for studying the bacterial associations in granules and biofilms. In *Granular anaerobic sludge: Microbiology and Technology*. Lettinga., Zehnder, A.J.B., Grotenhuis, J.T.C. and Hulshoff Pol, L.W. (eds). *Proceedings of the GASMAT-workshop*, Luntern, Pudoc Wageningen, The Netherlands, pp. 55-61.

Rojas, Ch.O. (1988). Factores ambientales que inciden en la aplicación de los procesos anaerobios. En *Manual del Curso: Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales (Microbiología y Bioquímica)*. Medellín, Colombia. pp.45-89.

Ross, W.R. (1984). The phenomenon of sludge pelletization in the anaerobic treatment of a maize procesing waste. *Waste S, A*, 10(4):197-204.

Sam-Soon, PALNS., R.E. Loewenthal, P.L. Dold and G.R. Marais (1987). Hypothesis for pelletization in the Upflow Anaerobic Sludge Bed reactor. *Water S A*, 13(2):69-80.

- Sam-Soon, PALNS., R.E. Loewenthal, P.L. Dold and GvR Marais. (1988). Pelletization in upflow anaerobic sludge bed reactors. In *Anaerobic Digestion*. E.R. Hall and P.N. Hobson (eds.). *Proceedings of the 5th. International Symposium on Anaerobic Digestion*. ed. A. Tilche & A. Rozzi. Monduzzi Editore. Bologna Italy, pp. 55-60.
- Sam-Soon, PALNS., R.E. Loewenthal, M.C. Wetzel and GvR. Marais. (1990). Growth of biopellets on glucose in upflow anaerobic sludge bed (UASB) systems. *Water S.A.* 16(3):151-164.
- Seedmak, J.J. and S.E. Grossberg. (1977). A rapid, sensitive and versatile assay for protein using Coomassie brilliant blue G250. *Analytical Bioch.* (79):544-552.
- Smith, P.H., and Mah, R.A. (1966). Kinetics of acetate metabolism during sludge digestion. *Appl. Microbiol.* 14:368-371.
- Speece, R.E. (1983). Anaerobic biotechnology for Industrial wastewater treatment. In *Environ. Sci. Tech.* 9(7):416-427A.
- Stronach, S.M., T.Rudd., and J.N. Lester. (1986). *Anaerobic digestion processes*. In *Industrial wastewater Treatment*. Springer Verlag. Germany. 120pp.
- Thauer, R.K., Jungerman, K., Decker, K. (1977). Energy conservation in chemotrophic anaerobic bacteria. *Bacteriol. Rev.* 41:514-41.
- Thiele, J.H. and J. Gregory Zeikus. (1988). Control of Interspecies Electron Flow during Anaerobic Digestion: Significance of formate Transfer versus Hydrogen Transfer during Syntrophic Methanogenesis in Floc. *Applied and Environmental Microbiology*, 54(1):20-29.
- Toerlen, D.F. & W.H. J. Hatting. (1969). Anaerobic digestion. I. The Microbiology of anaerobic digestion. *Wat. Res.* 3:385-416.
- Valdés, J.M.E., M.C. Obaya Abreu, J. Ramos Alvarez. (1990). Experiencia Cubanas en el proceso de digestión anaerobia con el uso de los reactores UASB. En *Taller de Tratamiento Anaerobio de aguas residuales en América Latina*. UNAM, ORSTOM, ICAITI, UAM-I, SEDUE y CONACyT. Cd. Universitaria, México.

Van den Berg, L., Lamb, K.A., Murray, W.D., and Armstrong, D.W. (1980). Effects of sulphate, iron and hydrogen on the microbiological conversion of acetic acid to methane. *J. Appl. Bacter.*, 48:437-447.

Vanderhaegen, B., E. Ysebaert., K. Fauere. M. Van Wambeke., T. Petters., V. Panic., V. Vander Langenbergh and W. Verstraete. (1991). Acidogenesis in relation to in reactor granule yield. *Proceeding of the 6th International Symposium on Anaerobic Digestion, IAWPRC, Sao Paulo, Brazil.*

Weigant, W.M. y de Man W.A. (1986). Granulation of biomass in thermophilic upflow anaerobic sludge blanket reactor treating acidified wastewaters. *Biotechnol. Bioeng.* (28): 718-727.

Weigant, W.M. (1988). The "Spagueti Theory" on anaerobic granular formation, or the inevitability of granulation. In Granular anaerobic sludge: Microbiology and Technology. Lettinga., Zehnder, A.J.B., Grotenhuis, J.T.C. and Hulshoff Pol, L.W. (eds). *Proceedings of the GASMAT-workshop*, Luntern, Pudoc Wageningen, The Netherlands, pp. S14-152.

Wu, W., Hu, X., Gu, Y. Zhao, H. Zhang and G. Gu. (1987). Cultivation of anaerobic granular sludge in UASB reactors with aerobic activated sludge as seed. *Water Research.* 21(7): 789-799.

Yoda, M., Kitagawa and Y. Miyagi. (1989). Granular sludge formation in the anaerobic expanded micro-carrier process. *Water Science and Technology.* 21:109-122.

Zehnder, B.J. (1988). *Biology of anaerobic microorganisms.* John Wiley and sons. USA. 872 pp.

Zinder, S.H., S.C. Cardwell, T. Anguish, M. Lee and M. Koch, (1984). Methanogenesis in a thermophilic (58oC) anaerobic digester: *Methanotherix* sp. as an important aceticlastic methanogen. *Appl. Environm. Microbiol.*, 47:796-807.

A N E X O 1

PARAMETROS FISICOQUIMICOS

TABLA A.1.1.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA CORRIDA 1

I N F L U E N T E										
DIA	STT (mg/l)	STF (mg/l)	STV (mg/l)	SST (mg/l)	SSF (mg/l)	SSV (mg/l)	DDOT (mg/l)	DDOS (mg/l)	pH	ALCALINIDAD (mgCaCO ₃ /l)
1										
2										
3	1611	573	1038	1600	320	1280	1438	875	7.10	130
4	1882	656	1226	1590	400	1190	2937	687	7.18	168
5	1925	655	1270	1688	620	1068			7.04	129
6	1825	651	1174				434	217	7.18	223
7	1963	682	1281	1795	731	1064	1116	580	7.23	218
8										
9										
10	1836	601	1235	1530	514	1016	2366	312	7.13	200
11	1678	515	1163	1510	453	1057	1330	533	7.75	181
12	1887	596	1291	1600	320	1280	2590	480	7.94	190
13	1870	561	1309	1280	85	1195	1850	308	7.20	165
14				1595	285	1310	2344	558	7.86	221
15										
16										
17	1732	643	1089	1490	447	1043	2622	1004	7.25	175
18	1910	610	1300	1450	220	1230	3320	1106	7.25	227
19										
20	1986	606	1380	1690	338	1352	2857	887	7.33	200
21	1946	606	1340	1580	310	1270	1547	238	7.45	201
22										
23										
24	2103	758	1345	1597	282	1315			7.30	222
25	1807	616	1191	1615	484	1131	1954	926	7.29	200
26	2401	901	1500	1190	225	965	3909	2058	7.24	178
27				1765	225	1540	2264	1083	7.26	224
28	1805	886	919				1260	1260	7.02	187
29										
30										
DEL DIA 1 AL 28										
No. DATOS	17	17	17	17	17	17	17	17	19	19
X	1892	654	1238	1563	369	1194	2126	771	7.31	192
S	176	105	137	153	160	149	886	465	0.26	29
CV	9	16	11	9	44	12	42	60	4	15

TABLA A.1.1.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA CORRIDA 1

E F L U E N T E										
DIA	STT (mg/L)	STF (mg/L)	STV (mg/L)	SST (mg/L)	SSF (mg/L)	SSV (mg/L)	DOOT (mg/L)	DOOS (mg/L)	pH	ALCALINIDAD (mgCaCO ₃ /L)
1										
2										
3										
4	479	281	198	+ 52	+ 2	+ 50	900	600	7.92	270
5	449	283	166	+ 40	+ 4	+ 36	425	375	7.58	259
6	519	288	231	+ 93	+ 3	+ 90			7.78	272
7	504	282	222				434	348	8.13	207
8	491	277	214	75	7	68	625	491	8.01	170
9										
10	590	334	256	+ 98	+ 0	+ 98	1294	491	7.85	292
11	715	365	350	313	77	236	710	310	7.75	282
12	550	358	192	114	8	106	450	275	7.94	318
13	1466	592	874	930	90	840	1651	211	7.81	344
14	1742	728	1014	307	32	275	1283	1004	7.88	351
15										
16										
17	1788	664	1124	1255	360	895	1618	837	7.73	360
18	1639	650	989	1400	280	1120	2687	949	7.96	428
19										
20	2843	1000	1843	+2215	+ 455	+1760	985	591	7.28	420
21	2241	825	1416	562	97	445	655	595	7.97	403
22										
23										
24	1798	572	1226	919	172	747			7.86	406
25	1817	557	1260	1300	250	1050	1337	309	7.71	387
26	1779	587	1192	1635	327	1308	2675	2058	7.50	350
27	687	351	336	260	10	250	492	492	7.56	350
28	705	582	123	650	130	520	1550	1260	8.03	340
29										
30										
DEL DIA 1 AL 28										
No. DATOS	19	19	19	19	13	13	17	17	19.00	19
X	1185	499	686	746	141	605	1163	661	7.80	325
S	757	218	557	529	120	414	714	463	0.20	72
CV	64	44	81	71	85	68	61	70	3	22

TABLA A.1.2.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA CORRIDA 2

I N F L U E N T E										
DIA	STT (mg/L)	STF (mg/L)	STV (mg/L)	SST (mg/L)	SSF (mg/L)	SSV (mg/L)	DOOT (mg/L)	DOOS (mg/L)	pH	ALCALINIDAD (mgCaCO ₃ /L)
1				1720	410	1310	2107	476	7.73	188
2				2870	775	2095	1562	187	7.03	190
3										
4										
5	3165	1220	1945	2860	670	2190	2875	62	6.90	186
6	3990	1000	2990	3020	670	2350	3354	793	7.30	187
7				3300	909	2391			7.30	198
8	2922	952	1970	2920	670	2250	4450	791	7.35	196
9	3427	1197	2230	2930	470	2460	4471	696	7.43	204
10										
11										
12	2932	876	2056	2880	610	2270	2952	233	7.36	300
13	3360	1038	2322	3280	860	2420	2246	173	7.01	210
14	3691	1361	2330	3050	450	2600			7.49	200
15	4022	1084	2938	3060	918	2142	2592	784	7.30	204
16										
17										
18										
19	3170	920	2250	2945	725	2220	3009	304	7.00	199
20	3184	990	2194	3030	630	2400	2546	449	7.18	196
21	3130	1018	2112	2952	417	2535	3043	519	7.25	180
22	2959	812	2147	2845	570	2275	3043	891	7.17	100
23	3015	833	2182	2966	596	2370	4100	+ 1789	7.09	176
24										
25										
26	3042	880	2162				2678	551	7.12	178
27	3118	976	2142	2755	730	2025	2521	79	7.10	204
28	4127	1345	2782	3110	1000	2110	3746	312	7.11	190
29	3548	980	2568	3185	885	2300	4771	247	7.11	180
30	3636	1162	2474	3190	920	2270	2912	86	7.23	256
31										
32										
33	3225	1845	1380	2935	810	2125	2699	84	7.49	202
34	2912	1050	1862	2690	830	1860	4735	+ 1495	7.29	168
35	2932	822	2110	2680	745	1935	697	+ 20	7.60	204
36	3146	1162	1984				3900	+ 3500	7.05	150
37				3215	965	2250	4175	99	7.40	202
DEL DIA 1 AL 37 EXCEPTO +										
No. DATOS	22	22	22	24	24	26	24	20	26	26
X	3303	1069	2234	2932	718	2214	3132	391	7.24	194
S	378	233	360	309	176	262	1014	281	0.2	34
CV	11	22	16	10	24	12	32	72	3	17

TABLA A.1.2.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA CORRIDA 2

E F L U E N T E										
DIA	STT (mg/L)	STF (mg/L)	STV (mg/L)	SST (mg/L)	SSF (mg/L)	SSV (mg/L)	DQOT (mg/L)	DQOS (mg/L)	pH	ALCALINIDAD (mgCaCO ₃ /L)
1				30	4	26			7.47	174
2				33	5	28	175	77	8.05	186
3										
4										
5	655	530	125	34	9	25	80	94	8.19	216
6	455	347	108	92	25	67	561	48	8.30	247
7	585	380	205	111	35	76			8.30	300
8	707	460	247	140	45	95	415		8.34	294
9				127	30	97	417		8.40	310
10										
11										
12	808	420	388	530	106	424	+ 1907	19.5	8.35	394
13	656	434	222	156	33	123	166	55	8.09	353
14	665	426	239	+ 330	+ 170	+ 160			8.12	240
15	674	418	256	144	56	88	72	19	8.33	356
16										
17										
18										
19	694	382	312	116	22	94	261	55	7.93	388
20	736	436	300	132	35	97	341	68	8.30	392
21	696	438	258	132	14	118	258	72	8.34	250
22	629	376	253	97	12	85	382	58	8.38	240
23	562	314	248	100	9	91	714	85	8.16	386
24										
25										
26	730	393	337				381	18.6	8.12	460
27	898	472	426	238	90	148	212	44	8.10	360
28	606	452	154	102	10	92	243	168	8.26	402
29	454	338	116	73	15	58	177	69	8.25	416
30	404	309	95				+ 1113	55	8.18	478
31										
32										
33	354	280	74	100	20	80	162	71	8.18	412
34	617	464	150	60	25	35	129	99	8.37	312
35	+ 1656	+ 626	+ 1030	+ 1445	+ 440	+ 1005	+ 1285	+771	+8.20	+ 492
36	+ 3274	+ 774	+ 2500	+ 2825	+ 565	+ 2260	+ 862	+730	+8.35	+ 360
37	+ 3212	+ 318	+ 2894	+ 2594	+ 519	+ 2075	+ 2407	+147	+8.07	+ 514
DEL DIA 1 AL 37 EXCEPTO +										
No. DATOS	20	20	20	20	20	20	19	18	23	23
X	629	403	226	127	30	97	286	65	8.19	329
S	130	61	96	106	26	84	165	34	0.19	85
CV	21	15	42	83	87	86	57	52	2	26

TABLA A.1.3.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA CORRIDA 3

I N F L U E N T E											
DIA	STT (mg/L)	STF (mg/L)	STV (mg/L)	SST (mg/L)	SSF (mg/L)	SSV (mg/L)	DOOT (mg/L)	DOOS (mg/L)	pH	ALCALINIDAD (mgCaCO ₃ /L)	pH Lodos
1	3165	1183	1982	2895	1030	1865	2787	98	7.60	200	6.86
2	2993	793	2200	1376	351	1025	3116	273	7.67	220	6.94
3	2595	937	1658	2550	663	1887	2624	262	7.48	198	6.83
4	3893	840	3053	3030	750	2280	6646	264	7.64	200	6.74
5	3673	615	3058	3195	831	2364	5804	415	7.47	206	6.84
7											
8											
9	+4518	+2118	+2400	+3850	+1001	+2849	+5314	+644	7.58	276	6.70
10	3834	314	3520	3095	805	2290	5153	483	7.42	240	6.83
11	2941	528	2413	2590	673	1917	3945	403	7.25	206	6.85
12	3670	1334	2336	3290	1020	2270	3261	181	7.30	212	6.92
13	3489	863	2626	3100	740	2360	3226	269	7.29	210	6.94
14	3456	984	2472	2920	770	2150					
15	2913	255	2658	2281	601	1680					
16	3134	914	2220	3106	781	2325	3103	+89	7.38	166	6.85
17	4115	1165	2950	2419	710	1709	4100	178	7.71	256	6.80
18	3800	1068	2732	3280	660	2620	3592	287	7.19	364	6.81
19	3158	833	2325	3065	810	2255	3501	280	7.13	182	6.82
20											
21											
22	3946	816	3170	3210	500	2710	3852	700	7.85	212	6.90
23	3648	948	2700	2700	702	1998	3835	628	7.10	190	6.89
24	3984	1200	2784	3620	941	2679	4113	709	7.15	230	7.05
25	+5308	+1326	+3982	+4770	+1320	+3450	3688	567	7.33	228	7.06
26	+6322	+1244	+5078	+5920	+1539	+4381	+7012	610	7.15	244	7.06
27	3294	960	2334	3170	861	2309					
28	3053	753	2300	2980	775	2205					
29	3302	1160	2142	3090	803	2287	3807	423	7.08	192	7.13
30	3460	1026	2434	3160	822	2338	3566	+930	7.06	178	7.22
31	3582	1084	2498	3500	910	2590	4386	73	7.54	196	7.13
32	3472	1084	2388	3320	863	2457	4336	68	7.23	185	
33	4123	1066	3057	3510	912	2597	4043	+851	7.56	204	7.10
DEL DIA 1 AL 33 EXCEPTO +											
No. DATOS	25	25	25	25	25	25	22	20	24	24	24
X	3468	908	2560	2978	771	2207	3931	358	7.38	216	6.9
S	400	264	417	470	151	376	921	198	0.23	40	0.14
CV	11	29	16	16	19	17	23	55	3	18	2

TABLA A.1.3.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA CORRIDA 3

E F L U E N T E											
DIA	STT (mg/L)	STF (mg/L)	STV (mg/L)	SST (mg/L)	SSF (mg/L)	SSV (mg/L)	DDOT (mg/L)	DOOS (mg/L)	pH	ALCALINIDAD (mgCaCO ₃ /l)	pH LDOOS
1	550	262	288	86	6	80	164	123	8.49	258	6.86
2	280	206	74	68	6	62	231	119	8.29	296	6.94
3	500	378	122	165	43	122	426	117	8.24	346	6.83
4	496	244	256	250	60	190	386	196	8.17	362	6.74
5	454	148	306	224	26	198	468	179	8.10	390	6.84
6											
7											
8	1784	1270	514	1410	367	1043	2077	483	8.19	502	6.7
9	1566	102	1464	1465	381	1084	1981	386	8.00	576	6.83
10	3350	995	2355	2320	663	1717	3575	+1353	8.20	566	6.85
11	+6998	+2772	+4276	+6640	+1726	+4914	+5978	1087	8.08	746	6.92
12	2962	1140	1822	2565	830	1735	2419	134	8.28	580	6.94
13	3108	1120	1988	2460	810	1650					
14	3822	986	2836	3290	855	2435					
15	2618	1090	1528	2385	620	1765	2128	266	8.06	520	6.85
16	3614	1314	2300	2730	660	2070	3476	535	7.76	480	6.8
17											
18	3626	1392	2234	3240	842	2398	2909	216	7.60	832	6.81
19	3370	1038	2332	2850	+1025	1825	2836	210	7.76	502	6.82
20											
21											
22	+1726	+ 512	+1214	+ 178	+ 53		546	336	8.12	584	6.9
23	+1284	+ 584	+ 700	+ 505	+ 480	+ 45	628	251	8.00	392	6.89
24	2180	936	1244	1760	580	1180	1830	340	8.24	458	7.05
25	3072	660	2412	2190	569	1621	2000	383	7.78	416	7.06
26	3974	600	3374	3670	954	2716	2012	183	7.92	454	7.06
27				2440	590	1850					
28	2973	925	2048	2300	460	1840					
29	1845	856	989	1260	328	932	1472	203	8.10	546	7.13
30	+3725	+1240	+2485	+3380	+ 879	+2501	+4744	186	7.94	558	7.22
31	+4775	+1908	+2868	+4050	+1053	+2997	+4561	439	7.93	498	7.13
32	2650	1072	1578	2260	588	1672	2439	+ 488	7.95	454	
33	1302	714	588	1190	309	881	2213	+ 85	7.99	372	7.1
PERIODO I DEL DIA 1 AL 5 EXCEPTO +											
No. DATOS	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
X	456	248	209	159	28	130	335	147	8.25	330	6.84
S	93	76	93	72	21	55	117	34	0.13	47	0.06
CV	20	31	44	45	75	42	35	23	2	14	
PERIODO II DEL DIA 8 AL 19 EXCEPTO +											
No. DATOS	10	10	10	10	9	10	8	8	9	9	9
X	2982	1045	1937	2471	670	1772	2675	415	7.9	589	6.83
S	735	340	616	604	178	441	585	286	0.22	113	0.06
CV	25	32	32	24	26	25	22	69	3	19	
PERIODO III DEL DIA 20 AL 33 EXCEPTO +											
No. DATOS	7	7	7	8	8	8	8	8	10	10	9
X	2570	823	1747	2134	547	1587	1642	290	7.99	473	7.06
S	882	170	947	783	201	599	663	91	0.12	68	0.1
CV	34	21	54	35	37	38	40	31	1	14	1
% PERIODO I	87	73	92	95	96	94	91	59			
% PERIODO II	14		26	18	16	22	32				
% PERIODO III	26	9	32	29	28	26	58	19			

TABLA A.1.4.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA CORRIDA 4

I N F L U E N T E										
DIA	SST (mg/L)	STF (mg/L)	STV (mg/L)	SST (mg/L)	SSF (mg/L)	SSV (mg/L)	DQOT (mg/L)	DQOS (mg/L)	pH	ALCALINIDAD (mgCaCO3/L)
1										
2										
3	3608	560	3048	3353	532	2793	3377	59	7.28	190
4	3276	1048	2228	3140	1005	2135	3712	395	7.01	170
5	3862	550	3312	3430	489	2941	3909	319	7.08	178
6	3520	1252	2268	3025	332	1936	2403	1240	7.17	192
7	3294	328	2966	3015	253	2713	4167	1042	7.25	182
8										
9										
10	3352	1156	2236	3010	993	2017	4115	2881	7.24	194
11	3758	1424	2334	3255	1237	2018	4321	617	7.43	252
12	3308	1308	2000	3289	1151	2138	4938	+3704	8.18	218
13	+4900	+1460	+3440	4084	1225	2859	3757	478	7.65	204
14	+5304	+4204	+1100	2590	2046	544	5260	478	7.22	208
15										
16										
17	2512	2440	72				3210	205	7.11	174
18	3044	1174	1870	2810	1068	1742	3659	+ 68	6.99	182
19	3250	1402	1848	3110	1337	1773	4049	202	7.98	188
20	2942	1184	1758	2660	1064	1596	3400	467	7.2	196
21	3150	896	2254	2949	855	2094	3800	600	7.22	220
22										
23										
24	1958	262	1696	1560	203	1357	1793	199	8.02	280
25	2558	1062	1496	2470	1037	1433	2937	+ 68	7.94	222
26	2970	846	2124	2830	400	2430	3254	199	7.04	232
27							1726	199	7.07	174
28	2036	962	1074	1140	390	750	3121	531	7.1	202
29	2648	1050	1598	2110	844	1266			7.44	190
30									7.37	226
31	2944	1292	1652	2770	1219	1551			7.65	272
32	1792	562	1230	1520	471	1049			7.11	298
33	1726	824	902	1540	739	801	2844		7.45	232
34	3080	972	2108	2880	922	1958	3750	595	7.1	262
35	3352	446	2906	2730	355	2375		644	7.42	254
PERIODO I DEL DIA 1 AL 10 EXCEPTO +										
No. DATOS	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
X	3485	816	2676	3162	601	2422	3614	989	7.17	184
S	207	350	445	169	296	403	602	941	0.19	8
CV	6	43	17	5	49	17	17	95	3	4
PERIODO II DEL DIA 11 AL 35 EXCEPTO +										
No. DATOS	17	17	17	18	18	18	16	16	21	21
X	2766	1065	1701	2572	920	1652	3489	416	7.41	223
S	593	481	623	746	439	610	918	178	0.35	35
CV	21	45	37	29	48	37	26	31	0.05	16

TABLA A.1.4.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA CORRIDA 4.

DIA	E F L U E N T E									ALCALINIDAD (mgCaCO ₃ /L)	POR (3/L) mV	pH
	STT (mg/L)	STF (mg/L)	STV (mg/L)	SST (mg/L)	SSF (mg/L)	SSV (mg/L)	DOOT (mg/L)	DOOS (mg/L)	pH			
1												
2												
3												
4				56	10	46	71	47	7.74	194	-125	6.85
5	298	100	198	51	28	23	900	118	7.66	234	-15	6.74
6	302	60	242	122	35	87	263	167	7.81	278	-24	6.49
7	722	392	330	75	19	56	140	23	7.8	312	-51	6.48
8	422	326	96	214	50	150	438	250	8.02	370		6.34
9												
10	1184	702	482	410	85	325	370	309	8.12	412	-104	6.63
11	2780	1356	1424	2735	820	1914	3498	617	7.74	514	-69	7.48
12	2562	1912	650	2310	693	1617	3951	+2222	8.68	530	-67	7.42
13	+5026	+1806	+3220	+4510	+1353	+3157	3770	164	8.12	524	-62	7.43
14	+5576	+4426	+1150	+2350	+705	+1645	+4180	492	7.96	526	-73	7.39
15							+5260	478				
16												
17	2410	1444	966				1185	328	8.04	504	-78	7.51
18	1828	1194	634	1760	528	1232	2276	488	8.1	440	-85	7.53
19	2818	1340	1478	1810	670	1140	2348	405	8.3	472	-97	7.58
20	3008	1074	1934	2330	580	1750	3267	400	7.75	468	-97	7.64
21	1672	556	1116	1190	430	760	1840	800	8.17	442	-92	7.63
22												
23												
24	2138	186	1952	1350	90	1260	1673	239	8.09	480	-78	
25	1204	682	522	675	275	400	533	164	8.21	486	-320	7.56
26	2304	936	1368	1660	498	1162	1155	80	7.82	550		7.63
27	1762	962	800	1350	405	945	1235	876	7.99	516	-34	7.46
28							637	279	7.89	536	-159	7.57
29	1884	1152	732	1120	336	784		7.9		540	-87	7.65
30	840	596	244	+ 137	+ 67	+ 70		8.33		538		
31	944	604	340	+ 83	+ 25	+ 58		8.34		536		
32	1144	482	662	+ 73	+ 3	+ 70		8.23		468	-366	7.61
33	1548	622	926	1480	444	1036	1508	278	8.3	480	-341	7.82
34	2280	1258	1022	1780	534	1246	205	159	7.15	530	-335	7.78
35	1998	468	1530	1770	531	1239		8		492	-366	7.8
PERIODO I DEL DIA 3 AL 10 EXCEPTO +												
No. DATOS	5	5	5	6	6	6	6	6	6	6	5	6
X	586	316	270	155	38	115	364	152	6.56	300	64	6.59
S	337	231	130	127	25	102	271	103	2.94	75	44	0.17
CV	56	73	48	82	66	89	74	68	2	25	69	2
PERIODO II DEL DIA 11 AL 35 EXCEPTO +												
No. DATOS	18	18	18	14	14	14	15	16	21	21	18	18
X	1951	935	1016	1665	488	1177	1939	390	8.05	503	156	7.58
S	631	429	505	540	184	401	1169	222	0.30	33	120	0.12
CV	32	46	49	32	38	34	60	57	4	7	77	2
% E PERIODO I	83	61	90	195	94	95	92	85				
% E PERIODO II	29	12	40	35	47	28	44	6				

TABLA A.1.5A.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA CORRIDA 5A

I N F L U E N T E										
DIA	STT (mg/L)	STF (mg/L)	STV (mg/L)	SST (mg/L)	SSF (mg/L)	SSV (mg/L)	DQOT (mg/L)	DQOS (mg/L)	pH	ALCALINIDAD (mgCaCO3/L)
1	2948	632	2316	2580	520	2060	3765	366	7.38	256
2	2970	696	2274	2790	550	2240	3608	627	7.49	274
3	1534	460	1074	1270	160	1110	1882	138	7.50	206
5	2016	750	1266	1550	320	1230				
6	1684	482	1202	1400	280	1120	1621	523	7.33	212
7	1718	206	1512	1410	230	1180	2039	366	7.50	222
8				1800	250	1550	1720	108	7.30	208
9	2058	722	1336	1660	380	1280	1138	163	7.80	238
10	1818	402	1416	1450	280	1170	806	54	7.46	226
13	2020	828	1192	1460	555	905	1741	54	7.51	222
14	1648	650	998	1500	300	1200	1769	68	7.58	224
15	2122	850	1272	1760	352	1408	1667	133	7.53	220
16	1846	736	1110	1600	320	1280	1282	540	7.17	234
17				1510	250	1260	840	452	7.34	270
20	1592	632	960	1560	312	1248	1800	523	7.57	188
21	1694	796	898	1550	310	1240	2836	58	7.05	192
22	1620	678	942	1490	298	1192	2252	62	7.23	232
23	1624	252	1372	1260	240	1020	1875	59	7.40	248
24	2680	208	2472	2500	125	2375	2708	139	7.70	250
27	1834	440	1394	1730	570	1160	2241	350	7.56	208
28	2089	610	1479	2030	210	1820	2218	134	7.45	208
29	1804	706	1098	1720	671	1049	2083	202	7.42	212
30	1570	438	1132	1430	400	1030	3228	527	7.66	196
31				1340	170	1170	1318	170		
34	1306	858	448	1040	686	354	2964	329	7.50	230
35	1644	304	1340				1547	141	7.40	220
36	1460	484	976	1275	421	854	1477	141	7.49	218
37	2040	828	1212	1470	456	1014	1423	407	7.30	206
38	1798	656	1142	1650		1040	1344	336	7.28	218
41	1546	490	1056	1370	439	931	1455	198	7.50	218
42	1754	852	902	1085	240	845	1693	391	7.54	212
43	720	138	582	375	100	275	1141	336	7.97	350
44	1830	672	1158	1510	559	951	1692	313	7.30	216
45	1876	728	1148	1650	644	1006	2327	566	7.34	222
48	1642	626	1016	1310	459	851	1726	66	8.18	236
49	1530	556	974	1355	488	867	2267	200	8.18	336
50	2170	1068	1102	1535	614	921	1837	328	8.04	262
51	1684	610	1074	1570	565	1005	2614	784	7.24	228
52	1532	674	858	1500	660	840	1427	713	7.50	328
55	1846	608	1238	1520	502	1018	2222	327	7.10	224
56	1826	606	1220	1450	270	1180	1634	131	7.70	272
57				1550	400	1150	2058	398	7.57	242
58	1854	706	1148	1530	582	948	2917	903	7.58	266
59	1584	560	1024	1490	300	1190	2148	130	7.54	264
60	2112	652	1460							
62	1980	544	1436	1550	260	1290	2252	514	7.70	256
DEL DIA 1 AL 62										
No. DATOS	42	42	42	44	44	44	44	44	43	43
X	1824	605	1220	1548	396	1152	1968	306	7.50	236
S	391	193	387	383	163	393	658	215	0.27	35
CV	21	32	32	25	41	34	33	70	4	15

TABLA A.1.5A.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA CORRIDA 5A

E F L U E N T E												
DIA	STT (mg/L)	STF (mg/L)	STV (mg/L)	SST (mg/L)	SSF (mg/L)	SSV (mg/L)	DOOT (mg/L)	DOOS (mg/L)	pH	ALCALINIDAD (mgCaCO3/L)	pH CAMA LOOS	POR LOOS
2	500	374	126	+ 4	+ 0	+ 4	151	138	8.18	178		
3	440	92	348	+ 14	+ 0	+ 14	201	138	8.29	216		
5	1340	574	730	42	16	26						
6	+5058	+1770	+3288	+4680	+1660	+3020	452	176	7.98	312	7.02	
7	900	138	762	+ 26	+ 3	+ 23	142	94	8.50	276	7.04	-375
8				+ 39	+ 2	+ 37	129	64	8.46	318	7	-375
9	742	262	480	+ 60	+ 4	+ 56	104	26	8.12	336	7.19	-352
10	764	270	494	+ 19	+ 1	+ 18	258	81	8.18	304	7.25	-280
13	608	296	312	54	23	31	118	91	8.14	332	7.04	-348
14	1668	870	798	240	40	200	286	41	8.17	352	7.15	-307
15	1794	992	802	1080	280	800	2160	320	8.02	310	7.21	-353
16	1566	534	1032	600	145	455	850	243	7.52	280	7.23	-357
17				150	30	120	930	233	8.14	376	7.20	-375
20	1908	744	1164	1540	601	939	2334	244	7.65	384	7.17	-368
21	1502	856	646	1250	712	538	1806	139	8.19	336	7.61	-326
22	266	132	134	+ 100	+ 15	+ 85	250	31	8.29	296	7.61	-347
23	676	160	516	225	190	35	333	83	8.43	310		-338
24	+2762	+2312	+ 450	295	15	280	458	125	8.26	428	7.91	-374
27	1720	654	1066	1430	660	770	504	84	8.37	394	7.84	-370
28	1092	508	584	1190	330	860	1371	81	8.11	402		
29	1200	630	570	720	190	530	968	323	8.23	390		
30	1048	368	680	640	200	440	1423	206	7.99	332		
31				820	170	650	1739	+ 791				
34	688	566	122	42	20	22	158	111	7.98	280	7.11	-326
35	1194	468	726				549	42	7.81	286	7.72	-374
36	566	348	218	210	45	165	253	84	8.07	294	7.8	-356
37	1216	564	652	880	317	563	2439	650	7.99	414	7.86	-355
38	858	616	242	143	33	110	585	141	8.01	370	7.9	-350
41	1334	512	822	1100	330	770	794	159	7.94	332		
42	1714	892	822	860	180	680	1719	78	8.09	382	7.9	-333
43	1592	286	1306	1210	260	950	686	443	8.12	236		
44	854	534	320	345	65	280	602	75	7.88	278		
45	1158	616	542	1015	255	760	906	226	7.96	352	7.8	-356
48	544	230	314	340	85	255	438	40	8.70	348	7.84	-329
49	1924	1346	578	850	150	700	1280	120			7.92	-376
50	1928	1080	848	1570	370	1200	1299	+ 748	8.57	384	7.69	-336
51	1356	580	776	1480	640	840	+3137	+1098	8.65	382	7.87	-359
52	1398	604	794	1240	330	910	856	156	8.75	382	7.85	-365
55	+3247	+ 938	+2309	+2880	+ 670	+2210	2745	471	7.83	418	7.82	-390
56	878	448	430	315	60	255	235	39	7.95	350	7.82	-371
57				92	42	50	287	255	8.12	352	7.81	-387
58	724	404	320	205	43	163	792	250	7.97	352	7.82	-358
59	890	294	596	100	16	84	172	63	7.97	368	7.9	-380
60	882	456	426									
62	756	370	386	+ 50	+ 15	+ 35	2316	+ 849	7.99	358	7.94	-366
DEL DIA 4 AL 62 EXCEPTO +												
No. DATOS	38	38	38	33	33	33	40	37	39	39	33	33
X	1110	518	592	675	207	468	893	164	8.11	349	7.57	-356
S	464	275	288	509	202	343	739	136	0.27	46	0.34	20
CV	42	53	48	75	97	73	83	82	3	13	4.00	6

TABLA A.1.5.B.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA CORRIDA 5B

I N F L U E N T E										
DIA	STT (mg/L)	STF (mg/L)	STV (mg/L)	SST (mg/L)	SSF (mg/L)	SSV (mg/L)	DDOT (mg/L)	DDQS (mg/L)	pH	ALCALINIDAD (mgCaCO ₃ /L)
1										
2	1592	632	960	1560	624	936	1800	523	7.57	188
3	1694	796	898	1550	728	821	2836	+ 58	7.05	192
4	1620	678	942	1490	626	864	2552	+ 52	7.23	232
5	1624	252	1372	1260	240	1020	1875	+ 69	7.4	248
9	2680	208	2472	+2500	+2325	+2250	2708	139	7.7	250
10	1834	440	1394	1730	415	1315	2241	350	7.56	208
11	2089	610	1479	1479	429	1050	2218	134	7.45	208
12	1804	706	1098	+1720	+ 86	+1634	2083	202	7.42	212
13	1570	438	1132	1430	400	1030	3228	527	7.66	196
16				1340	170	1170	1318	170		
17	1306	858	448	1040	645	395	2964	329	7.5	230
18	1644	304	1340				1547	141	7.4	220
19	1460	484	976	1275	421	854	1477	141	7.49	218
20	2040	828	1212	1470	603	867	1423	407	7.3	206
23	1798	656	1142	1650	610	1040	1344	336	7.28	218
24	1546	490	1056	1370	438	932	1455	198	7.5	218
25	1754	852	902	1085	240	845	169	+ 39	7.54	212
26	720	138	582	+ 375	+ 100	+ 275	1141	336	7.97	350
27	1830	672	1158	1510	559	951	1692	313	7.3	216
30	1876	728	1148	1650	644	1006	2327	566	7.34	222
31	1642	626	1016	1310	498	812	1726	+ 66	8.18	236
32	1530	556	974	1355	488	867	2267	200	8.18	236
33	2170	1068	1102	1535	599	936	1837	328	8.04	262
34	1684	610	1074	1570	565	1005	2614	784	7.24	228
36	1532	674	858	1500	660	840	1427	713	7.5	328
37					270	1250	2222	327	7.1	224
38	1846	608	1238	1520	270	1180	1634	131	7.7	272
39	1826	606	1220	1450	400	1150	2058	398	7.57	242
40				1550	581	949	2917	903	7.58	266
41	1854	706	1148	1530	522	968	2148	130	7.54	264
42	1584	652	1024	1490						
44	2112	544	1460							
45	1980	544	1436	1550	260	1290	2252	514	7.7	256
46	2024	1312	1312	1500	260	1240	2235	+1922	7.41	250
47	1864	1242	1242	1410	230	1180	1686	314	7.77	232
48				1490	160	1330	1902	118	7.64	258
51				1350	240	1110	2287	116	7.4	268
52	2228	746	1482	2100	570	1530	2403	233	7.73	292
53	1954	658	1296	1440	330	1110	2171	155	7.22	226
54	1996	638	1358	1560	280	1280	2008	281	7.48	292
55	2064	644	1420	1550	260	1290	2289	201	7.69	296
56	1920	676	1244	1530	300	1230	1901	214	7.49	254
57	2130	734	1396	1770	410	1360				
58	1964	630	1334	1410	150	1260				
DEL DIA 1 AL 58 EXCEPTO+										
No. DATOS	39	39	39	38	38	38	40	34	39	39
X	1805	616	1188	1483	423	1059	2009	320	7.53	242
S	309	177	310	179	168	213	568	197	0.25	35
CV	17	15	26	12	40	20	28	61	3	14

TABLA A.1.5.B.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA CORRIDA 58

E F L U E N T E												
DIA	STT (mg/L)	STF (mg/L)	STV (mg/L)	SS1 (mg/L)	SSF (mg/L)	SSV (mg/L)	DOOT (mg/L)	DQOS (mg/L)	pH	ALCALINIDAD (mgCaCO3/L)	pH CAMA LODOS	POR LODOS
1												
2	908	492	416	+ 44	+ 2	+ 42	307	167	7.48	220	6.8	-388
3	388	344	44	+ 42	+ 1	+ 41	237	84	7.75	236	7.5	-318
4				+ 42	+ 0	+ 42	103	26	8.07	248	7.48	-313
5				+ 314	40	274	233	133	8.2	286	7.47	-328
6	558	248	310	146	19	127	400	233	8.1	304	7.47	-342
9	480	302	178	216	102	114	387	218	8.19	332	7.61	-368
10	634	302	332	116	32	104	194	258	7.9	334	7.36	-376
11	880	480	400	122	18	104	194	419	8.03	326	7.2	-377
12	654	330	324	92	20	72	553	443	7.94	328		
13	886	358	528	+ 96	+ 2	+ 94	648	522				
16	642	358	284	+ 68	+ 2	+ 66	585	395	7.8	306	6.58	-311
17	886	358	528				523	422	7.46	324	7.26	-358
18	1054	522	532	585	105	480	1308	338	8.63	420	7.25	-341
19	1214	696	518	330	55	275	1707	163	7.57	410	7.26	-355
20	2000	944	1056	+1390	+ 140	+1250	+3306	161	7.6	464	7.52	-331
23	1294	644	650	455	65	390	1032	397	7.36	430	7.3	-355
24	1878	994	884	625	125	500	1836	977	7.44	418		
25	1516	490	1026	555	95	460	806	645	7.41	418		
26	1614	808	806	900	200	700	1504	+1880	7.63	464	7.39	-340
27	1670	852	818	960	120	840	2943	981	7.4	464	7.39	-340
30	1034	672	362	154	+ 23	+ 231	1155	598			7.41	-310
31	1194	664	532	228	60	168	920	640			7.46	-353
32	1368	886	482	+ 168	+ 15	+ 153	1456	827	8.56	482	7.33	-336
33	1122	600	522	435	70	365	1686	902	8.37	504	7.49	-349
34	1724	950	774	561	78	483	1673	545	8.59	538	7.54	-367
37	1270	674	596	+ 180	+ 10	+ 170	863	745	7.78	456	7.43	-373
38	1400	686	714	+ 278	+ 13	+ 265	627	353	7.79	480	7.56	-365
39				+2780	+ 660	+2120	+3904	+1434	7.88	516	7.54	-379
40	1854	706	1148	880	90	790	583	+ 77	7.6			
41	1356	644	712	890	80	810	781	391	7.78	464	7.6	-369
42	+2866	+1020	+1846									
44	2194	868	1326	1270	310	960	2393	926	7.62	504	7.49	-363
45	2292	966	1326	520	80	440	2196	1098	7.35	498	7.51	-345
46	2258	932	1326	1040	140	900	1961	+1333	7.73	518		-349
47				+ 135	+ 10	+ 125	569	431	7.76	460		-371
48				330	60	270	814	310	7.62	506	7.55	-356
51	2436	996	1440	1330	270	1060	2093	543	7.61	548		
52	+3032	+1258	+1774	+1930	+ 420	+1510	+3411	543	7.26	524		
53	1744	828	916	710	120	590	1124	562	7.59	518		
54	+2824	+ 956	+1868	+1540	+ 270	+1270	2731	643	7.58	532		
55	1530	830	700	395	30	365			7.75	516		
56	1836	820	1016	680	50	630						
57	2042	880	1162	765	150	615						
58	2568	1070	1498	1120	265	855			7.78	510		
DEL DIA 2 AL 58 EXCEPTO +												
No. DATOS	36	36	36	28	28	28	36	35	38	37	28	30
X	1399	672	727	592	102	490	1086	487	7.76	427	7.38	-352
S	589	240	379	354	77	291	756	274	0.37	95	0.22	17
CV	42	36	52	60	75	59	70	56	5	19	3	5

TABLA A.1.6.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LAS CORRIDAS 6A (SIN GLUCOSA) Y 6B (CON GLUCOSA)

I N F L U E N T E										
DIA	SST (mg/L)	STF (mg/L)	STV (mg/L)	SST (mg/L)	SSF (mg/L)	SSV (mg/L)	DOOT (mg/L)	DOOS (mg/L)	pH	ALCALINIDAD-INF (mgCaCO3/l)
1	1726	573	1153	1470	325	1145	1689	338	7.26	116
2	1874	607	1267	1565	350	1215	2260	342	7.16	112
3	1866	543	1323	1440	355	1085	1796	271	7.17	116
4	1720	563	1157	1550	305	1185	1491	338	7.21	114
5	1837	577	1260	1420	295	1125	2187	208	7.23	112
8	1770	467	1303	1450	330	1120	2130	240	7.3	96
9	1765	560	1203	1485	345	1140	1787	137	7.62	110
10	1773	550	1223	1505	330	1175	1885	77	7.25	230
11	1893	607	1286	1510	320	1190	1739	79	7.1	210
12	1850	543	1307	1460	300	1160	2041	122	7.09	210
15	1847	520	1327	1465	260	1205	2209	321	6.83	200
16	3647	807	2840	1455	260	1195	2209	241	6.98	320
17	1807	537	1270	1505	260	1245	2329	321	6.99	220
18	1993	533	1460	1485	255	1230	2040	+40	6.83	190
19	1747	533	1213	1425	255	1170	2120	240	6.99	183
22	1837	537	1300	1490	275	1215	2360	160	6.84	200
23	1663	477	1186	1335	255	1080	2000	+40	6.94	230
24	1597	437	1160	1410	240	1170	1912	159	6.9	200
29	1900	583	1317	1485	250	1235	2262	119	6.99	179
30	1710	533	1177	1335	240	1095			6.99	192
32	2057	400	1657	1340	129	1211	1833	438	6.9	200
33	1857	540	1317	1605	260	1345	1944	119	7.24	220
34	1827	533	1293	1540	225	1285	2080	160	7	220
36	1813	503	1310	1470	270	1200	1833	+40	6.8	200
37	1943	567	1376	1545	280	1205	2200	80	6.7	220
38	1753	493	1260	1555	275	1280	1441	321	7.03	240
39	1897	537	1360	1490	275	1215	2000	122	7.05	220
40	1987	600	1387	1560	300	1260	2160	120	7.15	217
41	1933	537	1397	1550	275	1275	2008	120	7	200
44	2040	616	1424	1530	240	1290	2360	80	6.75	220
45	2122	610	1512	1615	270	1345	2111	+40	7.02	220
46	2142	604	1538	1640	280	1360	2191	119	7	230
47	2290	504	1786	1635	255	1380	2258	403	7.11	230
50	1906	684	1222	1825	355	1470	2419	242	6.85	220
51	2104	578	1526	1420	265	1155	1814	+40	7	235
52	1988	346	1642	1640	295	1245	2190	83	6.95	202
53	1982	438	1550	1900	350	1550	2120	400	7.15	192
54	1847	463	1383	1550	285	1265	2137	+685	7.2	212
57	1948	170	1778	1520	275	1245	2419	323	7.55	202
58	2080	587	1493	1590	245	1345	1943		7.1	142
59	1730	484	1246	1515	295	1220	2129	387	7	240
61	1826	526	1300	1515	330	1185	1857	+954	7	192
73	1904	454	1450	1500	325	1175	1985	433	6.99	198
74	2008	874	1134	1365	265	1100	1698	221	6.99	185
76	1738	636	1102	1365	300	1065	1752	305	6.99	179
79	1884	582	1302	1465	330	1135	2400	+706	6.9	184
80	1878	590	1288	1480	360	1120	1846	221	6.8	195
81	1836	594	1242	1490	350	1146	1527	221	6.85	200
84	2004	488	1516	1515	440	1075	1625	221	6.88	195
85	2022	618	1404	1635	435	1200	2057	304	6.85	195
86	1904	682	1222	1605	390	1215	1800	150	6.86	205
87	1800	414	1386	1495	320	1175	2203	79	6.88	185
88	3300	2088	1212	1565	335	1230	2133	76	6.85	190

DEL DIA 1 AL 88 EXCEPTO +										
No. DATOS	53	53	53	53	53	53	52	42	53	53
X	1946	574	1372	1514	300	1214	2018	220	7.01	195
S	334	233	254	103	52	95	241	111	0.19	40
CV	17	41	18	7	17	8	12	50	3	21

TABLA A.1.6A.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA CORRIDA 6A (SIN GLUCOSA)

E F L U E N T E										
DIA	STT (mg/L)	STF (mg/L)	STV (mg/L)	SST (mg/L)	SSF (mg/L)	SSV (mg/L)	DOOT (mg/L)	DOOS (mg/L)	pH	ALCALINIDAD (mgCaCO ₃ /l)
1	475	340	135	36	4	32	127	+ 59	7.89	122
2	488	301	187	48	2	46	+ 51	+ 26	7.79	120
3	556	298	258	64	16	48	152	110	7.52	128
4	490	335	155	62	8	54	102	+ 16	7.67	136
5	570	377	193	68	36	32	347	174	7.59	138
8	637	297	340	136	18	118	412	189	6.5	158
9	754	367	387	175	18	157	+533	189	6.52	154
10	560	277	285	112	4	108	308	135	6.54	290
11	647	357	290	96	10	86	217	79	6.18	290
12	593	373	230	78	10	68	265	102	6.95	210
15	514	272	242	62	8	54	221	191	6.9	250
16	388	160	228	223	27	196			6.83	360
17	496	363	133	68	5	63	421		7.04	330
18	623	370	253	90	2	88	261	181	6.66	360
19	556	403	153	63	5	58	420	200	6.63	280
22	679	393	286	132	20	112	360	300	6.84	320
23	529	408	121	45	8	37	340	180	6.65	340
24	495	327	168	64	16	48	260	140	6.88	292
29	610	425	185	37	4	33	199	100	6.7	250
30	498	366	132	48	6	42	139	119	6.69	300
32	565	317	248	+ 320	+ 80	+ 248	179	100	6.62	280
33	707	537	170	84	6	78	179	+ 79	6.65	280
34	598	405	193	52	14	38	180	100	6.69	320
36	563	343	220	92	14	78	239	119	6.62	310
37	605	345	260	54	25	29	360	240	6.66	260
38	612	387	225	46	2	44	281	201	6.64	300
39	573	388	185	94	22	72	183	122	6.63	358
40	645	453	192	60	14	46	260	200	6.65	340
41	589	442	147	84	20	64	181	+ 80	6.8	350
44	778	340	438	60	8	52	260	120	6.82	350
45	636	408	228	+ 220	+ 50	+ 152	299	+ 60	7.2	300
46	725	398	327	88	12	76	179	139	6.77	390
47	576	278	298	108	20	88	282	262	7.56	390
50	603	445	158	44	4	44	302	181	7.74	358
51	705	447	258	60	8	52	+ 81	+ 20	6.77	319
52	+ 921	+ 288	+ 633	142	22	120	302	91	6.71	379
53	608	321	287	86	14	72	236	84	6.75	419
54	677	420	257	106	32	74	250	125	6.69	369
57			98	18	80	278	113	6.73	309	
58	532	252	280	44	2	42			6.78	229
59			28	8	20	197	120	6.97	485	
61	456	313	143	+ 30	+ 0	+ 30	+ 521	141	6.81	342
73	413	310	103	46	6	40	123	61	6.71	356
74	507	247	260	46	10	36	133	66	6.73	355
76	+ 603	+ 520	+ 85	98	98	+ 427	107	6.72	107	6.72
79	540	347	193	32	12	20	127	85	6.75	342
80	453	283	170	48	6	42	133	+ 59	6.72	375
81	495	365	130	86	8	78	247	94	6.86	375
84	590	250	340	78	16	62	199	66	6.48	337
85	530	143	387	72	14	58	175	68	6.52	365
86	450	273	177	58	16	42	150	67	6.67	335
87	417	300	117	+ 52	+ 0	+ 52	157	71	6.68	360
88	476	163	313	66	18	48	137	+ 23	6.72	390
89	+1430	+1160	+ 270							

ETAPA I DEL DIA 1 AL 15 EXCEPTO +										
Vasc = 0,01 m/h										
No. DATOS	11	11	11	11	11	11	9	8	11	11
X	571	327	235	85	12	73	239	146	7.09	181
S	80	37	91	40	9	38	98	42	0.58	63
CV	14	11	39	47	75	52	41	29	8	35

ETAPA II DEL DIA 16 AL 89 EXCEPTO +										
Vasc = 0,3 m/h										
No. DATOS	38	38	38	38	38	38	37	33	42	42
X	566	346	220	74	12	62	233	132	6.77	344
S	92	85	78	36	7	32	80	59	0.23	63
CV	16	24	35	48	54	52	34	45	3	18

X E ETAPA I	71	43	83	94	96	94	88	34		
X E ETAPA II	71	39	83	95	96	95	88	40		

TABLA A.1.6R.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA CORRIDA 6B (CON GLUCOSA)

E F L U E N T E											
DIA	STT (mg/l)	STF (mg/l)	STV (mg/l)	SST (mg/l)	SSF (mg/l)	SSV (mg/l)	DOOT (mg/l)	DOOS (mg/l)	pH	ALCALINIDAD (mgCaCO ₃ /L)	
1	418	315	103	48	8	40	160	101	7.85	127	
2	450	248	202	80	12	68	128	43	7.61	108	
3	538	206	332	97	15	82	203	127	7.08	112	
4	563	280	283	174	22	152	313	144	7	106	
5	841	343	498	215	25	190	903	608	5.8	80	
8	744	287	457	172	15	157	670	550	5.99	130	
9	685	313	372	102	16	86	533	361	6.12	152	
10	632	247	385	177	22	155	462	173	6.37	270	
11	+1590	+ 593	+ 997	+ 600	+ 95	+ 505	+1581	218	6.38	300	
12	+1445	+ 535	+ 910	+ 925	+175	+ 750	+ 959	266	7.37	300	
15	474	197	277	53	3	50	291	231	6.22	180	
16	747	262	485	+ 84	+ 0	+ 84	402	241	6.72	200	
17	467	305	157	+ 33	+ 1	+ 32	281	201	6.65	190	
18	820	350	470	305	40	265	760	280	6.82	210	
19	509	332	177	97	10	87	440	340	6.06	220	
22	620	287	333	149	12	137	420	360	6.19	250	
23	490	253	237	49	2	47	240	200	5.99	240	
24	433	246	187	64	14	50	339	239	6.27	233	
29	530	337	193	51	9	42	317	198	6.21	240	
30	464	310	227	82	8	74	259	219	6.23	260	
32	464	187	177	132	24	108	258	119	6.19	243	
33	476	313	163	74	6	68	260	140	6.25	260	
34	447	297	150	22	4	48	219	199	6.34	260	
36	470	307	163	48	5	43	180	120	6.26	250	
37	520	253	267	68	10	58	341	261	6.26	260	
38	454	297	157	96	6	90	203	+ 20	6.23	260	
39	+1023	+ 410	+ 613	44	10	34	+ 920	160	6.23	300	
40	554	307	247	+ 520	+125	+ 395	301	+281	6.39	290	
41	523	333	190	110	14	96	200	40	6.45	290	
44	560	193	367	64	12	52	139	40	6.44	260	
45	364	227	137	68	8	60	199	100	6.36	250	
46	667	347	320	60	4	56	262	81	6.46	260	
47	557	120	437	128	18	110	302	+282	6.39	270	
50	412	243	169	66	22	44	222	40	6.4	267	
51	590	307	283	54	2	52	264	74	6.26	294	
52	710	253	457	134	26	108	440	100	6.51	271	
53	559	169	390	+ 282	+ 54	+ 228	331	129	6.42	312	
54	633	430	203	122	10	112	214	105	6.35	234	
57	493	260	233	90	10	80	80	6.39	225		
58	516	233	283	72	2	70	174	108	6.41	156	
59	420	155	265	+ 44	+ 0	+ 44	229	91	6.54	310	
61	400	175	225	62	8	54	112	47	6.33	240	
73	450	383	67	52	8	44	126	52	6.27	252	
74	345	215	130	50	14	36	114	46	6.27	255	
76	415	248	167	52	10	42	99	56	6.28	240	
79	373	230	143	42	10	32	111	52	6.25	260	
80	347	190	157	56	18	38	+ 65	29	6.23	250	
81	416	63	353	36	6	30	148	62	6.25	235	
84	370	207	163	70	2	68	160	61	6.25	245	
85	373	260	113	84	10	74	157	60	6.25	230	
86	520	67	453	90	16	74	283	55	6.24	240	
87	+1283	+1000	+ 283	96	10	86	+ 76	69	6.23	262	
88				42	2	40			6.26	250	

ETAPA I DEL DIA 5 AL 15 EXCEPTO + Vas = 0.1 m/h y CON glucosa = 0.1 g D00/g SSV-d											
No. DATOS	9	9	9	9	9	9	9	9	*18	11	11
X	591	271	323	124	17	109	407	219	6.67	169	
S	127	47	116	58	9	55	259	85	0.6	81	
CV	21	17	36	47	53	50	64	39	9	48	

ETAPA II DEL DIA 16 AL 88 EXCEPTO + Vas = 0.3 m/h y CON glucosa = 0.05 g D00/g SSV-d											
PERIODO II											
No. DATOS	37	37	37	37	37	37	37	**28	42	42	
X	502	255	247	81	11	70	257	79	6.30	251	
S	108	79	108	47	7	42	124	49	0.15	30	
CV	22	31	44	58	7	59	48	62	2	11	

% E ETAPA I	69	51	76	92	94	91	79			8	
% E ETAPA II	75	56	83	95	96	94	88	78		15	

* PERIODO I
** PERIODO II

TABLA A.1.7.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LAS CORRIDAS 7A (GLUCOSA)

I N F L U E N T E										
DIA	STT (mg/L)	STF (mg/L)	STV (mg/L)	SST (mg/L)	SSF (mg/L)	SSV (mg/L)	DOOT (mg/L)	DOOS (mg/L)	pH	ALCALINIDAD (mgCaCO ₃ /L)
1	1973	450	1523	1695	340	1355	2105	168	6.8	219
2	1883	487	1397	1590	305	1285	2063	126	6.95	230
3	1943	327	1617	1485	250	1235	1911	127	7.1	235
4	1960	573	1387	1520	255	1265	1953	170	7.05	235
5	2033	540	1493	1545	275	1270	2232	126	7.2	246
6	1860	567	1293	1600	305	1295	1768	337	7.19	246
7	1960	600	1360	1570	315	1255	1937	84	7.2	246
8	1933	493	1440	1530	290	1240	1684	337	7.2	246
9	1853	500	1353	1505	235	1270	2057	86	6.88	242
10	1907	500	1407	1590	285	1305	2274	+505	7.1	264
11	1920	487	1433	1560	280	1280	1853	84	6.95	259
12	1807	520	1287	1575	350	1225	1987		6.95	232
13	1502	345	1157	1270	260	1110	1853	168	6.7	202
14	1760	507	1253	1345	245	1100	1937	253	7.09	242
15	1923	583	1340	1600	265	1335	2314	257	6.8	237
16	1830	580	1250	1445	230	1215	1770	84	6.75	211
17	1680	393	1287	1260	220	1040	1572	165	7.1	237
18	1920	580	1340	1500	295	1205	2021	253	7	227
19	1937	640	1287	1490	275	1215	2274	168	7.09	264
20	1943	515	1428	1430	275	1155	2648	248	7.2	280
21	2052	563	1488	1550	295	1255	2034	244	7.1	264
22	2008	587	1422	1470	330	1140	2069	165	7.15	259
23	1855	528	1327	1495	350	1210	2189	253	7.2	269
24	2117	663	1453	1685	390	1295	2057	157	7.32	290
25	2078	740	1338	1555	320	1235	2483	331	7.39	290
26	1995	697	1298	1550	310	1240	2034	163	7.39	233
27	1855	627	1229	1580	170	1250	2021	168	7.5	238
28	1765	578	1187	1435	300	1135	1833	87	7.37	214
29	1877	615	1262	1515	305	1210	2174	91	7.38	238
30	1643	512	1132	1310	290	1020	1745	87	7.4	219
31	2022	672	1350	1785	385	1400	2182	174	7.25	204
32	1730	580	1150	1375	320	1055	1956	89	7.4	199
33	1893	685	1208	1510	340	1170	1920	87	7.6	288
34	1980	571	1409	1595	340	1255	2229	257	7.37	204
35	1772	607	1165	1380	290	1090	1790	325	7.5	209
36	2013	740	1273	1490	350	1140	1627	81	7.2	224
37	1890	683	1207	1525	370	1155	1987	248	7.6	243
38	1940	665	1275	1495	355	1140	2152	414	7.62	250
39	1790	587	1203	1475	345	1130	2069	165	7.3	239
40	1800	579	1222	1530	330	1200	1821	414	7.41	249
41	1905	635	1270	1590	360	1230	1903	331	7.23	229
42	1647	453	1194	1470	270	1200	1821	248	7.29	244
43	2005	662	1343	1680	360	1320	2278	407	7.2	244
44	2009	692	1317	1495	300	1195	1986	331	7.56	244
45	2060	713	1347	1515	330	1185	1383	488	7.39	239
46	1904	632	1272	1440	310	1130	2115	163	7.27	244
47	2089	638	1451	1550	380	1170	1853	168	7.54	254
48	1867	627	1240	1505	320	1185	1903	248	7.11	220
49	1893	693	1200	1555	700	855	1937	84	7.03	234
50	1860	573	1287	1610	375	1235	2105	337	7.1	239
51	1875	627	1249	1575	320	1255	2947	210	7.27	204
52	1774	497	1277	1520	295	1225	2039	255	7.56	220
53	1367	520	847	1465	215	1250	1019	85	6.69	231
54	1494	573	921	1515	340	1175	1200	265	7.39	220
55	1900	620	1280	1540	350	1190	1635	126	7.73	251
56	1933	643	1390	1655	390	1265	2289	216	7.8	272
57	1700	650	1050	1475	335	1140	1707	43	8.14	257
58	2033	767	1266	1530	340	1190	1898	153	7.56	236
59	1980	694	1286	1540	400	1140	1614	174	7.7	262
60	1893	680	1215	1540	410	1130	1824	87	7.68	241
61	1717	580	1137	1360	385	975	1671	353	7.2	204
62	1927	707	1220	1495	455	1040	1705	90	7.01	
63	1740	659	1081	1510	365	1145	1808	67	7.31	204
64	1900	700	1200	1585	390	1195	2087	376	7.28	225

DEL DIA 1 AL 9 EXCEPTO +										
No. DATOS	64	64	64	65	65	65	65	63	65	65
X	1877	592	1285	1518	324	1194	1956	204	7.27	238
S	138	107	130	95	71	91	294	108	0.27	22
CV	7	18	10	6	22	8	15	52	4	9

TABLA A.1.7A.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA CORRIDA 7A (GLUCOSA)

DIA	E F L U E N E								pH	ALCALINIDAD-R2 (mgCaCO3/L)
	STT (mg/L)	STF (mg/L)	STV (mg/L)	SST (mg/L)	SSF (mg/L)	SSV (mg/L)	DOOT (mg/L)	DOOS (mg/L)		
1	397	297	100	17	5	12	+ 67	+ 50	6.81	205
2	553	313	240	27	3	24	130	+ 63	6.73	246
3	550	107	443	56	4	52	208	123	6.48	251
6	521	343	178	45	8	37	348	272	6.42	293
7	510	210	300	25	+14	11	324	265	6.35	287
8	521	273	248	34	1	33	370	295	6.26	277
9	563	305	258	41	+10	31	328	253	6.24	298
10	538	223	315	21	3	18	413	370	6.2	282
13	489	272	217	22	3	19	360	309	6.03	300
14	422	120	302	33	1	32	396	328	6.65	316
15	+ 648	+ 133	+515	+14	+ 9	+ 5	421	354	6.29	300
16	520	307	213	34	9	25	372	306	6.33	348
17	+ 375	+ 98	+277	55	6	49	269	185	6.36	353
20	487	255	232	37	3	34	320	227	6.38	343
21	521	333	188	36	3	33	154	146	6.42	348
22	520	323	197	63	6	37	253	160	6.44	374
23	535	182	353	61	4	4	58	265	6.44	305
24	665	325	340	63	12	51	253	135	6.27	409
27	503	325	178	44	4	40	194	126	6.21	378
28	464	142	322	42	6	37	215	116	6.4	368
29	515	298	217	29	4	25	138	106	6.43	373
30	380	247	133	36	4	32	157	108	6.43	362
31	452	240	212	39	13	21	143	84	6.49	373
34	464	227	237	39	7	32	137	94	6.61	378
35	489	342	147	31	8	23	124	83	6.57	342
36	586	393	193	32	3	29	132	83	6.78	347
37	462	320	142	30	6	22	114	89	6.6	335
38	539	387	152	31	3	28	135	84	6.76	287
41	461	377	84	28	3	25	113	78	6.76	258
42	482	320	162	19	2	18	100	72	6.76	258
43	465	295	170	28	4	24	174	122	6.63	301
44	+ 748	+412	+336	65	8	57		+ 445	6.72	461
45	672	319	353	54	4	51	364	284	6.55	306
50	570	362	208	26	1	25	340	297	6.57	292
51	525	220	305	33	4	29	257	180	6.59	277
52	552	327	225	28	2	27	325	293	6.43	326
53	522	334	188	53	7	47	348	252	6.44	316
54	506	330	174	35	4	31	215	165	6.57	326
55	459	527	132	50	6	44	174	116	6.39	238
56	360	248	112	25	1	24	199	149	6.64	293
58	398	204	194	46	13	33	215	149	6.59	273
60	431	284	147	44	10	34	348	141	6.43	298
61	473	247	226	42	6	37	157	141	6.5	337
62	476	284	192	39	3	37	171	106	6.56	327
65	507	314	193	48	3	39	199	99	6.58	288
66	557	327	230	40	6	35	211	84	6.67	293
67	458	296	162	32	5	27	155	98	6.52	293
68	460	280	180	31	6	25	118	76	6.7	342
69	446	290	156	58	5	52	141	82	6.66	317
71	467	320	147	40	7	33	101	93	6.68	312
72	371	254	117	41	7	34	126	59	6.7	298
73	572	312	260	31	5	27	114	80	6.78	341
74	469	250	219	34	6	29	119	68	6.69	309
75	500	340	160	34	5	29	110	85	6.66	283
78	501	304	197	33	3	31	115	71	6.66	289
79	444	300	144	20	5	25	100	71	6.64	257
80	380	243	137	21	2	19	95	60	6.97	278
81	343	213	130	20	3	17	60	34	6.9	351
82	477	347	130	27	4	25	89	54	6.71	236
83	389	239	150	28	6	22	74	52	6.75	272
86	390	310	80	25	4	21	82	43	7.06	251
87	380	188	192	34	5	29	106	49	6.78	293
88	394	307	87	27	4	23	72	36	6.42	215
89	553	277	256	18	2	17	78	67	6.42	140
90	387	287	100	19	3	16	88	50	6.42	173

ETAPA I DEL DIA 1 AL 14 EXCEPTO +										
CO DE GLUCOSA = 0.1 g D00/g SSV-d										
No. DATOS	10	10	10	10	8	10	9	8	10	14
X	511	243	251	33	5	29	328	274	6.39	293
S	67	76	77	13	3	12	80	67	0.2	39
CV	13	31	31	40	60	41	24	24	3	13

ETAPA II DEL DIA 15 AL 90 EXCEPTO +										
CO DE GLUCOSA = 0.05 g D00/g SSV-d										
No. DATOS	52	52	52	54	54	54	54	52	55	
X	479	290	191 ^(A)	36	5	31	165	117	6.6	309
S	71	52	67 ^(B)	12	3	11	79	77	0.16	57
CV	15	19	35	33	60	35	48	66	2	18

X E ETAPA I	73	59	80	98	98	97	83			
X E ETAPA II	74	51	85	98	98	97	92	43		

TABLA A.1.78.1. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA CORRIDA 78 (GLUCOSA + NH4)

E F L U E N T E											
DIA	STT (mg/L)	STF (mg/L)	STV (mg/L)	SST (mg/L)	SSF (mg/L)	SSV (mg/L)	DOOT (mg/L)	DOOS (mg/L)	pH	ALCALINIDAD (mgCaCO3/L)	
1	353	200	153	10	2	8	+ 67	+ 42	6.77		216
2	527	327	200	32	9	23	97	+ 55	6.73		235
3	537	110	427	67	+ 14	53	157	115	6.53		239
6	500	303	197	17	1	16	178	144	6.47		272
7	450	218	282	32	1	31	358	232	6.5		266
8	513	247	266	44	3	41	345	286	6.24		272
9	546	336	210	37	1	36	177	135	6.24		298
10	+880	+ 225	+ 364	33	6	27	303	253	6.2		287
13	515	277	238	29	4	25	266	223	6.1		311
14	533	186	347	44	6	38	+445	279	6.47		295
15	500	100	400	38	4	34	396	337	6.3		279
16	440	233	207	53	8	45	+348	265	6.52		321
17	492	140	352	78	11	67	227	160	6.57		316
20	532	230	302	+ 30	+ 0	+ 30	244	185	6.62		306
21	592	377	215	29	1	28	171	129	6.46		300
22	458	218	240	29	2	27	185	126	6.46		312
23	526	133	393	63	9	54	232	124	6.45		348
24	557	310	247	36	2	34	160	109	6.41		343
27	573	303	270	37	3	34	143	67	6.36		326
28	545	212	333	32	6	26	132	91	6.46		311
29	567	270	297	47	9	38	138	130	6.52		321
30	427	260	167	+ 86	+ 28	+ 58	199	83	6.53		368
31	503	208	295	29	4	25	135	84	6.69		259
34	455	258	197	31	4	27	120	77	6.67		285
35	547	330	217	31	8	23	116	91	6.96		238
36	655	397	258	23	4	19	99	83	6.8		259
37	511	343	168	15	3	12	138	73	6.81		277
38	455	369	86	15	3	12	84	67	6.81		262
41	509	334	175	13	2	11	87	78	6.84		238
42	547	320	227	3	3	5	81	72	6.77		324
43	562	280	282	22	3	19	174	140	6.7		447
44	800	425	375	+118	+ 65	+ 53		+375	6.8		296
45	567	282	285	59	8	51	+347		6.89		282
50	540	317	223	50	3	47	253	166	6.6		292
51	602	227	375	47	3	44	291	206	6.73		316
52	647	330	317	45	7	38	244	203	6.51		301
53	636	292	344	30	3	27	179	155	6.52		321
54	600	352	248	61	5	56	165	132	6.5		227
55	561	292	269	51	10	41	207	116	6.43		244
58	537	279	258	20	5	15	132	99	6.4		273
59	536	252	284	32	8	24	199	165	6.7		288
60	499	285	214	24	7	17	182	141	6.62		322
61	593	253	340	31	4	27	182	141	6.55		303
62	710	288	422	33	4	30	203	146	6.51		283
65	552	262	290	43	1	42	157	91	6.69		288
66	611	324	287	42	8	34	163	89	6.74		327
67	488	275	213	28	2	26	130	106	6.53		288
68	861	339	522	44	9	55	168	93	6.78		332
69	515	312	203	42	4	37	141	99	6.6		337
71	741	314	427	40	9	31	84	76	6.62		268
72	447	240	207	44	7	37	130	79	6.6		299
73	543	234	309	38	4	34	126	88	6.71		267
74	535	200	335	39	5	34	136	85	6.6		204
75	572	317	255	34	4	30	127	76	6.7		204
78	554	254	300	43	6	37	137	111	6.6		231
79	555	293	262	45	10	35	117	84	6.6		194
80	509	248	261	28	4	24	108	78	6.99		199
81	414	253	161	27	3	24	90	85	6.87		210
82	560	320	240	29	3	26	98	63	6.66		189
83	498	260	238	25	4	21	113	87	6.69		173
86	374	234	140	31	3	28	109	69	6.96		178
87	436	199	237	42	8	34	129	63	6.52		173
88	718	307	411	31	2	29	103	58	6.52		225
89	364	264	100	35	7	28	91	69	6.52		131
90	560	280	280	36	6	30	154	71			

ETAPA I DEL DIA 1 AL 14 EXCEPTO +											
CO DE GLUCOSA = 0.3 g DDO/g SSV-d											
No. DATOS	9	10	10	10	9	10	8	8	10	10	10
X	497	243	268	34	4	30	235	208	6.4	269	
S	58	67	82	15	3	12	90	63	0.21	29	
CV	12	28	31	44	75	40	38	30	3	11	

ETAPA II DEL DIA 15 AL 90 EXCEPTO +											
CO DE GLUCOSA = 0.05 g DDO/g SSV-d											
No. DATOS	55	55	55	52	52	52	53	53	52	55	
X	548	276	272	36	5	31	151	112	6.63	274	
S	94	61	83	14	3	12	49	53	0.16	57	
CV	17	22	30	39	60	38	32	47	2	21	

% E ETAPA I	73	59	80	98	99	97	88				
% E ETAPA II	70	53	79	98	98	97	92	45			

TABLA A.1.8.1. CUANTIFICACION DEL BIOGAS PRODUCIDO EN CADA CORRIDA

CORRIDA 2			CORRIDA 3		CORRIDA 4		CORRIDA 5A			CORRIDA 5B	
DIA	PROD. GAS 1 (TPM)	% CH4	PROD. GAS 1 (TPM)	% CH4	PROD. GAS 1 (TPM)	% CH4	DIA	PROD. GAS 1 (TPM)	% CH4	PROD. GAS 1 (TPM)	% CH4
1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	3	0.131	1.45	0	0
4	0	0	0	0	0	0	4	0.126	7.31	0	0
5	0	0	0	0	0	0	5	0.159	10.3	0	0
6	0	0	0	0	0	0	6	0.328	4.28	0	0
7	0	0	0.164	42.6	0	4.02	7		23.38	0	0
8	0	0	0.213	50.2	0.048	20	8	0.196	16.36	0	0
9	0.021	5	0.242	50	0.152	40	9		18.44	0	0
10	0.048	6	0.794	50	0.213	47.83	10		13.46	0.149	16.4
11	0.164	6.5	0.811	50.98	0.377	54.76	11	0.071	37.42	0.019	14.96
12	0.171	8	0.427	46.57	0.321	48.46	12	0.078	40	0.036	22.45
13	0.233	9.5	0.779	64.21	0.301	46.57	13	0.268	61.76	0.181	47.72
14	0.251	15	0.460	61.7	0.314	50.98	14		58.95	0.222	44.91
15	0.266	20	0.468	55.4	0.626	51	15		22.45	0.164	48.65
16	0.275	23	0.124	55	0.512	51	16		47.72	0.087	38.83
17	0.377	27	0.270	55	0.468	57.28	17		62.7	0.328	45.1
18	0.470	30	0.328	57.3	0.475	50.35	18		63	0.572	45.85
19	0.534	28	0.655	59.8	0.418	45.94	19		63	0.434	46.78
20	0.459	27			0.401	52.24	20		63.2	0.473	39.76
21	0.395	28.5	0.712	56.02	0.434	54.76	21	0.041	53.8	0.367	40
22	0.393	31	0.402	52.24	0.498	55	22	62.230	56.15	0.337	45
23	0.453	36	0.109		0.614	55	23	0.088	62.23	0.343	51.46
24	0.401	47			0.246	60.8	24	0.063	51.46	0.358	39.76
25	0.523	50	0.016	42.8	0.999	62.32	25	0.061	55	0.382	44.91
26	0.478	34	0.413	52.24	0.639	56.65	26	0.044	58.01	0.385	43.98
27	0.478	40	0.580	63.58	0.344	50.98	27	0.044	57.08	0.404	48.66
28	0.451	48	0.557	44.68	0.498	52.24	28	0.047	55.21	0.370	35.55
29	0.406	53	0.712	57.28	0.562	53	29	0.006	56.14	0.483	45
30	0.452	55	0.712	57	0.590	53	30	0.026	50.53	0.497	50.53
31	0.459	58	0.956	57.91	0.770	54.4	31	0.109	64.1	0.570	52.4
32	0.462	54	0.855	57.91	0.704	54.76	32	0.019	36.49	0.555	59.89
33	0.466	51	0.522	57.91	0.524	53.5	33	0.019	48.65	0.630	49.8
34	0.478	54	0.840	61.06	0.328	50.98	34		52.4	0.545	48.65
35	0.467	56	0.057	61.06	0.442	54.13	35	0.076	45.85		50
36	0.525	54	0.773	66.73			36	0.581	59.89	0.465	60
37	0.484	55					37	0.324	58.02	0.463	67.38
							38	0.293	48.66	0.744	58.02
							39	0.208	48	0.485	37.42
							40	0.208	48	0.550	40
							41		29	0.781	47.72
							42	0.063	54.27	0.668	48
TOTAL	11.03		13.95			12.81					

TABLA A.1.8.2. CUANTIFICACION DEL BIOGAS PRODUCIDO EN CADA CORRIDA

CORRIDA 6A			CORRIDA 6B		CORRIDA 7A			CORRIDA 7B	
DIA	PROD. GAS 1 (TPN)	% CH4	PROD. GAS 1 (TPN)	% CH4	DIA	PROD. GAS 1 (TPN)	% CH4	PROD. GAS 1 (TPN)	% CH4
29	0.007		0.007		18	0.013		0.022	
30	0.007		0.007		19	0.066		0.271	
31	0.008		0.007		20	0.031		0.085	
32	0.008		0.007		21	0.068	53.21	0.049	55.09
33	0.008		0.007		22	0.083	55.59	0.075	54.41
34	0.008		0.007		23	0.345			
35	0.008		0.007		24	0.349		0.044	
36	0.008		0.034		25	0.450		0.115	56.45
37	0.044		0.020		26	0.369	53.37		56.45
38	0.014		0.088		27		54.23	0.024	56.11
39	0.007		0.014		28		54.74	0.099	55.08
40	0.007		0.014		29	0.183	54.41	0.378	56.62
41	0.068		0.108		30	0.113	52.69	0.205	56.79
42	0.182		0.162		31	0.059			
43	0.203		0.175		32	0.173		0.131	
44	0.412		0.007		33	0.212	54.74	0.244	56.62
45	0.460		0.149		34	0.161		0.088	
46	0.317		0.460		35	0.212		0.069	
47	0.135		0.474		36	0.194	55.76	0.154	53.89
48	0.095		0.007		37	0.209		0.232	
49	0.581		0.081		38	0.208		0.510	
50	0.405		0.007		39	0.345		0.559	
51	0.433		0.007		40	0.347	57.64	0.170	57.31
52	0.061		0.386		41	0.159			
53	0.081		0.676		42	0.576		0.063	
54	0.047		0.676		43	0.049	59.18		59.52
55	0.014		0.237		44	0.042			
56	0.095		0.189		45	0.083			
57	0.061	54.2	0.676	56.11	46	0.207			
58	0.040		0.231		47	0.103			
59	0.081	55.2	0.544	57.31	48	0.187	58.16		57.31
60	0.052		0.422		49	0.080	59.86	0.035	57.99
61	0.027	60.7	0.686	59.8	50	0.147			
62	0.017		0.042		51	0.222	59.86		58.67
63			0.527		52	0.632		0.075	
64			0.068		53	0.499			
65			0.007		54	0.469		0.368	

TABLA A.1.8.2. CUANTIFICACION DEL BIOGAS PRODUCIDO EN CADA CORRIDA

(CONTINUACION)

CORRIDA 6A			CORRIDA 6B		CORRIDA 7A			CORRIDA 7B	
DIA	PROD. GAS 1 (TPN)	% CH4	PROD. GAS 1 (TPN)	% CH4	DIA	PROD. GAS 1 (TPN)	% CH4	PROD. GAS 1 (TPN)	% CH4
66			0.106		55	0.173		0.030	
67			0.453		56	0.551		0.065	
68			0.873		57	0.531	62.94	0.076	62.26
69			0.264		58	0.612	60.55	0.178	59.18
70			0.750		59	0.615		0.198	
71	0.028		0.613		60	0.571		0.411	
72	0.034		0.664		61	0.688	55.25	0.491	58.67
73	0.007	56.4	0.831	57.8	62	0.716	59.69	0.624	60.21
74	0.014	54.4	0.666	48.6	63	0.745	59.35	0.172	57.99
75	0.027	58.16	0.961	57.4	64	0.645	59.01	0.424	59.86
76	0.007		0.706		65	0.695	58.67	0.281	60.72
77	0.034	59.5		58.5	66	0.685		0.401	
78	0.091		0.216		67	0.640		0.466	
79	0.047		0.405		68	0.698	59.01	0.451	59.72
80	0.245	57.8	0.552	58.3	69	0.709		0.447	
81	0.195	57.4	0.535	56.4	70	0.790	60.72	0.751	61.57
82	0.145		0.301	57.3	71	0.675		0.318	
83	0.027		0.135		72	0.712		0.475	
84	0.106		0.378		73	0.413		0.699	
85	0.055	56.96	0.555	57.29	74	0.673		0.019	
86	0.113	53.21	0.758	52.86	75	0.947	61.24	0.527	
87	0.145	56.28	0.380	54.41	76	0.660		0.673	
88	0.112	56.96	0.764	58.67	77	0.726	55.59	0.706	61.57
89	0.074		0.493		78	0.715	59.01	0.663	59.18
90	0.149		0.607		79	0.595	61.91	0.518	60.21
91	0.083		0.162		80	0.640		0.540	
	5.73094		20.3454		81	0.570		0.465	
					82	0.626	61.06	0.502	59.69
					83	0.775	57.81	0.565	61.57
					84	0.799	61.74	0.595	59.69
					85	0.659	60.03	0.451	58.33
					86	0.761	58.51	0.489	58.67
					87	0.641		0.329	
					88	0.597		0.690	
					89	0.759	59.69	0.356	56.79
					90	0.300	57.81	0.361	55.59
					91	0.482	58.84		57.31
TOTAL					31.43404		19.452		

TABLA A.1.8.2. CUANTIFICACION DEL BIOGAS PRODUCIDO EN CADA CORRIDA

(CONTINUACION)

CORRIDA 5A			CORRIDA 5B	
DIA	PROD. G 1 (TPN)	% CH ₄	PROD. GAS 1 (TPN)	% CH ₄
43	0.063	37.4	0.475	48
44	0.029	47.72	0.622	49.13
45	0.051	54.27	0.712	55.21
46	0.051	60.82	0.712	56.61
47	0.026	60	0.856	55.21
48	0.023	54.27	0.865	51.93
49	0.024	43.04	0.712	52
50	0.016	50.53	1.164	52
51	0.019	74.4	0.889	52.87
52	0.306	56.14	1.392	56.14
53	0.300	60	0.999	53.34
54	0.306	60	1.316	55.21
55	0.339	70.18	1.364	57.08
56	0.251	47.72	1.179	52.3
57	0.290	62.7	1.395	40.23
58	0.185	57.42	1.279	56.3
59	0.336	59.89		
60	0.290	60		
61	0.545	60		
62	0.444	66.44		
TOTAL	69.7992		28.9766	

A N E X O 2

PARAMETROS MICROBIOLÓGICOS

TABLA A.2.1. RESULTADOS DEL NUMERO MAS PROBABLE (NMP) No. BACTERIAS/g SSV

CORRIDA 1						CORRIDA 2					
DIA 5 SSV = 1.5 g/l						DIA 5 SSV = 1.5 g/l					
GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG	GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG
BMA	520	1E-03	5	1.6E+07	7.2	BMA	510	1E-02	3.5	4.9E+05	5.69
OHPAp	521	1E-03	7	2.3E+07	7.36	OHPAp	542	1E-02	25	3.5E+06	6.54
OHPAb	510	1E-03	3.5	1.2E+07	7.07	OHPAb	533	1E-01	17.5	2.5E+05	5.4
BMH	550	1E-04	25	8.2E+08	8.91	BMH	543	1E-02	30	4.2E+06	6.62
F	510	1E-07	3.5	1.2E+11	11.08	F	554	1E-01	16	2.2E+03	5.34
DIA 15 SSV = 7.16 g/l						DIA 15 SSV = 3.55 g/l					
GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG	GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG
BMA	542	1E-03	25	1.7E+07	7.23	BMA	500	1E-04	2.5	1.4E+07	7.15
OHPAp	441	1E-03	4	2.8E+06	6.45	OHPAp	530	1E-04	8	4.6E+06	6.66
OHPAb	440	1E-03	3.5	2.4E+06	6.38	OHPAb	500	1E-03	2.5	1.4E+06	6.15
BMH	544	1E-04	35	2.4E+08	8.38	BMH	531	1E-02	11	6.3E+05	5.8
F	510	1E-07	3.5	2.4E+10	10.38	F	220	1E-01	0.9	5.1E+03	3.71
DIA 30 SSV = 8.113 g/l						DIA 30 SSV = 10.53 g/l					
GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG	GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG
BMA	533	1E-02	17.5	1.0E+06	6	BMA	510	1E-04	3.5	1.7E+07	7.23
OHPAp	532	1E-02	14	8.6E+05	5.93	OHPAp	531	1E-03	11	5.2E+06	6.72
OHPAb	532	1E-02	11	6.8E+05	5.83	OHPAb	510	1E-03	3.5	1.6E+06	6.2
BMH	532	1E-02	14	8.6E+05	5.93	BMH	522	1E-02	9.5	4.5E+05	5.65
F	533	1E-05	17.5	1.1E+09	9.04	F	220	1E-01	0.9	4.2E+03	3.62

TABLA A.2.2. RESULTADOS DEL NUMERO MAS PROBABLE (NMP) No. BACTERIAS/g SSV

CORRIDA 3						CORRIDA 4					
DIA 5 SSV = 5.69 g/l						DIA 5 SSV = 6.6 g/l					
GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG	GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG
BMA	531	1E-02	11	9.6E+05	5.98	BMA	520	1E-02	5	3.8E+05	5.58
OHPAp	500	1E-01	2.5	2.3E+04	4.36	OHPAp	10	1E-02	0.2	1.5E+04	4.18
OHPAb	521	1E-02	7	6.1E+05	5.79	OHPAb	10	1E-02	0.2	1.5E+04	4.18
BMH	531	1E-05	11	9.7E+08	8.99	BMH	410	1E-05	1.7	1.2E+08	8.08
F	541	1E-05	7	1.5E+09	9.18	F	532	1E-08	14	1.1E+12	12.04
						DIA 15 SSV = 7.12 g/l					
GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG	GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG
BMA	522	1E-02	9.5	6.7E+05	5.83	BMA	522	1E-02	9.5	6.7E+05	5.83
OHPAp	100	1E-02	0.2	1.4E+04	4.15	OHPAp	100	1E-02	0.2	1.4E+04	4.15
OHPAb	120	1E-02	0.6	4.2E+04	4.62	OHPAb	120	1E-02	0.6	4.2E+04	4.62
BMH	100	1E-05	0.2	1.4E+07	7.08	BMH	100	1E-05	0.2	1.4E+07	7.08
F	520	1E-06	5	3.5E+09	9.54	F	520	1E-06	5	3.5E+09	9.54
						DIA 30 SSV = 6.47 g/l					
GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG	GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG
BMA	521	1E-02	7	5.4E+05	5.73	BMA	510	1E-03	3.5	1.8E+06	6.26
OHPAp	521	1E-01	7	5.4E+04	4.73	OHPAp	100	1E-01	0.2	1.0E+03	3
OHPAb	220	1E-02	0.9	6.9E+04	4.84	OHPAb	533	1E-01	17.5	1.3E+05	5.11
BMH	540	1E-05	7.5	5.8E+08	8.76	BMH	100	1E-05	0.2	1.5E+07	7.18
F	504	1E-05	5	3.9E+08	8.59	F	100	1E-05	0.2	1.5E+07	7.18

TABLA A.2.3. RESULTADOS DEL NUMERO MAS PROBABLE (NMP) No. BACTERIAS/g SSV

CORRIDA 5B (SIN VINAZA - MELAZA)						CORRIDA 5A (SIN VINAZA - MELAZA)					
DIA 5 SSV = 3.5 g/l						DIA 5 SSV = 4.55 g/l					
GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG	GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG
BMA	530	1E-05	8	8.3E+08	8.92	BMA	510	1E-05	3.5	3.8E+08	8.57
OHPap	540	1E-04	13	1.3E+08	8.11	OHPap	521	1E-04	7	7.7E+07	7.88
OHPab	541	1E-04	17	1.8E+08	8.26	OHPab	522	1E-04	9.5	1.0E+08	8.02
BMH	543	1E-02	30	3.1E+06	6.49	BMH	530	1E-07	8	8.8E+10	10.94
F	522	1E-03	9.5	9.8E+06	6.99	F	531	1E-06	11	1.2E+10	10.07
DIA 15 SSV = 3.92 g/l						DIA 15 SSV = 6.6 g/l					
GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG	GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG
BMA	530	1E-05	8	1.0E+09	9.01	BMA	540	1E-06	13	9.8E+09	9.99
OHPap	533	1E-01	17.5	2.2E+05	5.34	OHPap	500	1E-05	2.5	1.9E+08	8.28
OHPab	510	1E-03	3.5	4.5E+06	6.65	OHPab	510	1E-05	3.5	2.6E+08	8.41
BMH	520	1E-05	5	6.4E+08	8.81	BMH	531	1E-04	11	8.3E+09	9.92
F	420	1E-01	2	2.5E+04	4.4	F	543	1E-05	30	2.3E+09	9.36
						B-SR	533	1E-06	17.5	1.3E+10	10.11
DIA 30 SSV = 5.7 g/l						DIA 30 SSV = 5.7 g/l					
GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG	GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG
BMA	531	1E-06	11	1.3E+10	10.1	BMA	542	1E-06	25	2.2E+10	10.34
OHPap	500	1E-05	2.5	2.8E+08	8.45	OHPap	510	1E-05	3.5	3.0E+08	8.48
OHPab	521	1E-04	7	8.0E+07	7.9	OHPab	541	1E-06	17	1.5E+10	10.18
BMH	540	1E-09	13	1.1E+13	13	BMH	520	1E-06	5	4.4E+09	9.64
F	532	7E-07	14	1.6E+11	11.2	F	420	1E-06	2	1.7E+09	9.23
B-SR	541	1E-05	17	1.5E+09	9.28	B-SR	531	1E-06	11	9.6E+09	9.98
DIA 60 SSV = 6.25 g/l						DIA 60 SSV = 6.25 g/l					
GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG	GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG
BMA	500	1E-07	2.5	2.0E+10	10.3	BMA	520	1E-05	5	4.0E+08	8.6
OHPap	532	1E-05	14	1.2E+09	9.08	OHPap	532	1E-05	14	1.1E+09	9.05
OHPab	521	5E-05	7	5.6E+08	8.75	OHPab	531	1E-03	11	8.8E+06	6.94
BMH	530	1E-09	8	6.4E+12	12.8	BMH	522	1E-06	9.5	7.6E+09	9.88
F	400	7E-07	1.3	1.0E+10	10	F	510	1E-05	3.5	2.8E+08	8.45
B-SR	531	1E-06	11	8.8E+09	9.94	B-SR	542	1E-06	25	2.0E+10	10.3

TABLA A.2.4. RESULTADOS DEL NUMERO MAS PROBABLE (NMP) No. BACTERIAS/g SSV

CORRIDA 6A (SIN GLUCOSA)						CORRIDA 6B (CON GLUCOSA)					
DIA 5 SSV = 4.44 g/l											
GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG	GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG
BMA	542	1E-03	25	2.8E+07	7.45						
OHPap	523	1E-02	12	1.3E+06	6.11						
OHPab	522	1E-03	9.5	1.1E+07	7.04						
BMH	522	1E-06	9.5	1.1E+10	10.04						
F	531	1E-06	11	1.3E+10	10.11						
DIA 15 SSV = 3.54 g/l						DIA 15 SSV = 3.74 g/l					
GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG	GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG
BMA	522	1E-03	9.5	1.3E+07	7.11	BMA	544	1E-05	13	2E+09	9.2
OHPap	544	1E-04	13	1.8E+08	8.26	OHPap	533	1E-03	17.5	2E+07	7.36
OHPab	520	1E-04	5	7.1E+07	7.85	OHPab	541	1E-03	17.5	2E+07	7.36
BMH	500	1E-06	2.5	3.5E+09	9.54	BMH	540	1E-05	13	2E+09	9.23
F	522	1E-05	9.5	1.3E+09	9.11	F	541	1E-06	17	2E+10	10.36
B-SR	541	1E-05	17	2.4E+09	9.38	B-SR	541	1E-05	17	2E+09	9.36
DIA 30 SSV = 3.02 g/l						DIA 30 SSV = 3.30 g/l					
GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG	GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG
BMA	542	1E-02	25	4.1E+06	6.61	BMA	500	1E-02	2.5	4E+05	5.58
OHPap	530	1E-04	8	1.3E+08	8.11	OHPap	531	1E-04	11	2E+08	8.23
OHPab	522	1E-03	9.5	1.6E+07	7.2	OHPab	522	1E-02	9.5	1E+06	6.14
BMH	531	1E-07	11	1.8E+11	11.26	BMH	542	1E-03	25	4E+07	7.57
F	510	1E-05	3.5	5.8E+08	8.76	F	540	1E-06	13	2E+10	10.3
B-SR	500	1E-05	2.5	4.1E+08	8.61	B-SR	542	1E-05	25	4E+09	9.57
DIA 60 SSV = 3.75 g/l						DIA 60 SSV = 2.9 g/l					
GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG	GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG
BMA	522	1E-02	9.5	1.3E+06	6.11	BMA	532	1E-04	14	2E+08	8.38
OHPap	510	1E-04	3.5	4.6E+07	7.66	OHPap	542	1E-04	25	4E+08	8.63
OHPab	520	1E-04	5	6.6E+07	7.82	OHPab	531	1E-04	11	2E+08	8.28
BMH	544	1E-06	3.5	4.6E+10	10.66	BMH	522	1E-05	9.5	2E+09	9.58
F	510	1E-06	3.5	4.6E+09	9.66	F	500	1E-06	2.5	4E+09	9.63
B-SR	540	1E-05	13	1.7E+09	9.23	B-SR	511	1E-05	4.5	8E+08	8.89
DIA 90 SSV = 4.3 g/l						DIA 90 SSV = 3.8 g/l					
GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG	GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG
BMA	522	1E-04	9.5	1.1E+08	8.04	BMA	500	1E-06	2.5	3E+09	9.52
OHPap	542	1E-03	25	2.9E+07	7.46	OHPap	530	1E-04	8	1E+08	8.02
OHPab	540	1E-04	13	1.5E+09	8.18	OHPab	530	1E-04	8	1E+08	8.02
BMH	522	1E-06	9.5	1.1E+10	10.04	BMH	530	1E-09	8	1E+13	13.02
F	540	1E-06	13	1.5E+10	10.18	F	530	1E-09	3.5	5E+10	10.66
B-SR	530	1E-04	8	9.3E+07	7.97	B-SR	540	1E-07	13	2E+11	11.23

TABLA A.2.5. RESULTADOS DEL NUMERO MAS PROBABLE (NMP) No. BACTERIAS/g SSV

CORRIDA 7A (CON GLUCOSA)						CORRIDA 7B (GLUCOSA + NH ₄)					
DIA 15 SSV = 5.28 g/l						DIA 15 SSV = 5.3 g/l					
GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG	GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG
BMA	542	1E-04	25	2.4E+08	8.38	BMA	530	1.0E-05	8	8E+08	8.88
OHPap	510	1E-05	3.5	3.3E+08	8.52	OHPap	510	1.0E-05	3.5	3E+08	8.52
OHPab	530	1E-05	8	7.6E+08	8.88	OHPab	520	1.0E-05	5	5E+08	8.67
BMH	542	1E-06	25	2.4E+10	10.38	BMH	522	1.0E-07	9.5	9E+10	10.95
F	532	1E-07	14	1.3E+11	11.11	F	532	1.0E-07	14	1E+11	11.1
B-SR	532	1E-05	14	1.3E+09	9.11	B-SR	544	1.0E-05	35	3E+09	9.52
DIA 30 SSV = 5.6 g/l						DIA 30 SSV = 7.49 g/l					
GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG	GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG
BMA	543	1E-03	30	2.7E+07	7.41	BMA	532	1E-04	14	9E+07	7.97
OHPap	500	1E-04	2.5	2.2E+07	7.34	OHPap	510	1E-05	3.5	2E+08	8.36
OHPab	520	1E-04	5	4.4E+08	8.64	OHPab	522	1E-05	9.5	6E+08	8.8
BMH	542	1E-06	25	2.2E+10	10.34	BMH	520	1E-06	5	3E+09	9.52
F	530	1E-05	8	7.1E+08	8.85	F	500	1E-06	2.5	2E+09	9.23
B-SR	520	1E-05	5	4.4E+08	8.64	B-SR	520	1E-04	5	3E+07	7.52
DIA 60 SSV = 10.59 g/l						DIA 60 SSV = 7.91 g/l					
GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG	GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG
BMA	510	1E-06	3.5	1.7E+09	9.2	BMA	543	1E-04	30	2E+08	8.28
OHPap	542	1E-03	25	1.2E+07	7.08	OHPap	522	1E-04	9.5	6E+07	7.79
OHPab	532	1E-02	14	6.6E+05	5.82	OHPap	533	1E-03	17.5	1E+07	7.04
BMH	500	1E-07	2.5	1.2E+10	10.04	BMH	521	1E-07	7	5E+10	10.65
F	531	1E-05	11	5.2E+08	8.72	F	522	1E-06	9.5	6E+09	9.78
B-SR	521	1E-05	7	3.3E+08	8.52	B-SR	523	1E-05	14	9E+08	8.95
DIA 90 SSV = 6.91 g/l						DIA 90 SSV = 5.89 g/l					
GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG	GRUPO	CODIGO	MAX.DIL	TABLAS	NMP	LOG
BMA	511	1E-03	4.5	3.3E+06	6.52	BMA	522	1.0E-03	9.5	8E+06	6.9
OHPap	532	1E-03	14	1.0E+07	7	OHPap	522	1.0E-05	9.5	8E+08	8.9
OHPab	533	1E-03	17.5	1.3E+07	7.11	OHPab	543	1.0E-05	30	3E+09	9.4
BMH	550	1E-09	25	1.8E+13	13.25	BMH	550	1.0E-11	25	2E+14	14.32
F	510	1E-07	3.5	2.5E+10	10.4	F	511	1.0E-07	4.5	4E+08	10.58
B-SR	521	1E-06	7	5.1E+09	90.7	B-SR	540	1.0E-07	13	1E+11	11.04

A N E X O 3

MEDIOS DE CULTIVO

1.	COMPOSICION DE LAS SOLUCIONES Y SUSTRATOS PARA EL CULTIVO DE BACTERIAS ANAEROBIAS	213
2.	PREPARACION DE LOS MEDIOS DE CULTIVO ANAEROBIO	217
3.	METODOLOGIA PARA LA INOCULACION	221
4.	PRUEBA DE ACTIVIDAD METANOGENA ESPECIFICA	225
5.	PREPARACION DE GRANOS Y FLOCULOS ANAEROBIOS PARA SU OBSERVACION AL MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIDO	232
6.	ANALISIS GRANULOMETRICO	235
7.	DETERMINACION DE PROTEINA CON COOMASSIE G250	237
8.	CALCULO PARA ALIMENTACION DE SUSTRATO EXTERNO (MEZCLA DE VINAZA-MELAZA)	239
9.	CALCULOS PARA LA ADICION DE GLUCOSA Y NITROGENO	241

1. COMPOSICION DE LAS SOLUCIONES Y SUSTRATOS PARA EL CULTIVO DE BACTERIAS ANAEROBIAS

A. SOLUCIONES MINERALES

La preparación de las soluciones minerales se lleva a cabo en condiciones aerobias y con agua destilada, preservar a 4°C.

A.1 SOLUCION MINERAL 1 (1000 ml)

K_2HPO_4 6.0 g

A.2 SOLUCION MINERAL 2. CON SULFATOS (1000 ml)

Balch et al. (1977)

KH_2PO_4 6.0 g

$(NH_4)_2SO_4$ 6.0 g (45.4 mM)

NaCl 12.0 g

$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 2.6 g (10.55 mM)

$CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 0.16 g

$CaCl_2$ (cuando no hay la anterior) 0.12 g

A.3 SOLUCION MINERAL 2. SIN SULFATOS (1000 ml)

Balch et al. (1977)

KH_2PO_4 6.0 g

NH_4Cl 2.4 g

NaCl 12.0 g

$MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 2.1 g

$CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 0.16 g

$CaCl_2$ (Cuando no hay la anterior) 0.12 g

A.4 SOLUCION DE VITAMINAS

(1000 ml)

Balch et al. (1977)

Biolina	2.0 mg
Acido fólico	2.0 mg
Piridoxina HCL	10.0 mg
Tiamina HCL	5.0 mg
Riboflavina	5.0 mg
Acido nicotínico	5.0 mg
D.L Pantotenato de Ca	5.0 mg
Vitamina B12	0.1 mg
Acido p-aminobenzóico	5.0 mg
Acido lipóico	5.0 mg

A.5 SOLUCION DE OLIGOELEMENTOS

(1000 ml)

Balch et al. (1977)

Acido nitrilotriacético	1.5 ml
-------------------------	--------

Ajustar el pH a 6.5 con KOH antes de agregar los siguientes minerales

$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	3.0 g
$MnSO_4 \cdot H_2O$	0.5 g
NaCl	1.0 g
$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	0.1 g
$CoSO_4$	0.1 g
$CoCl_2$ (cuando no hay la anterior)	0.1 g
$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	0.1 g
$ZnSO_4$	0.1 g
$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	0.01 g
$AlK(SO_4)_2$	0.01 g
H_3BO_3	0.01 g
$Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$	0.01 g

El agua destilada se neutraliza previamente con KOH

B. SUSTRATOS Y SOLUCION REDUCTORA

B.1 SUSTRATOS PARA LA DETERMINACION DEL NMP

La preparación de los sustratos requeridos se lleva a cabo colocando en un tubo tipo Hungate lo siguiente:

1. Acido butírico: 1 ml del ácido y una lenteja de NaOH
2. Acido propiónico: 1 ml del ácido más una lenteja de NaOH
3. Glucosa : 2.5 g de dextrosa

Procedimiento

1. Los tubos se tapan y en el septo se colocan dos agujas antes de meter a la precámara anaerobia, con el propósito de lograr el cambio de atmósferas dentro del tubo.
2. Poner a reducir aproximadamente 300 ml de agua destilada bajo una corriente de nitrógeno.
3. Enfriar y tapar de la manera ya descrita.
4. Dentro de la cámara anaerobia poner 9 ml de agua reducida a cada tubo de los ácidos butírico y propiónico y 10 ml a los tubos de glucosa.
5. Tapar cada tubo con tapón de rosca y septo, sacar y esterilizar 15 minutos a 15 lb/pulg². Estos sustratos deben almacenarse a 4°C.

B.2 SOLUCION DE SULFURO DE SODIO

Concentración aproximada al 2.5%, se utiliza para reducir el medio al momento de inocularlo.

Preparación

1. A poco más de 100 ml agregar 1 lenteja de NaOH
2. Reducir y enfriar bajo corriente de nitrógeno
3. Aparte, en un frasquito, lavar 3 g de Na₂S con agua destilada.

Checar que queden 2.0 a 2.5 g.

4. Agregar el Na_2S al agua reducida y fría, retirar la corriente de nitrógeno y tapar
5. En la cámara anaerobia repartir la solución en 10 tubos con 10 ml en cada uno
6. Esterilizar a 15 lb/pulg² durante 15 minutos.

B.3 SUSTRATOS PARA LA ACTIVIDAD METANOGENA ESPECIFICA

En cada botella se colocan:

Acido propiónico:	0.557 ml y dos lentejas de NaOH
Acido butírico:	0.697 ml y dos lentejas de NaOH
Acido acético:	0.30 ml y dos lentejas de NaOH

El procedimiento de preparación es el mismo que para los sustratos de enumeración bacteriana, pero adicionar 14.4, 14.30 y 9.7 ml de agua reducida a los tubos de propiónico, butírico y acético respectivamente.

2. PREPARACION DE LOS MEDIOS DE CULTIVO ANAEROBIOS

A. MEDIO GENERAL

Cantidades para preparar 1000 ml

Solución mineral 1	50.0 ml
Solución mineral 2*	50.0 ml
Solución de oligoelementos	10.0 ml
Solución de vitaminas	10.0 ml
Resarzurina (0.1%) en agua destilada	1.0 ml
Extracto de levadura	1.0 g
Peptona de caseína	1.0 g
Bicarbonato de sodio	3.0 g
Sol. $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (2%)	1.0 ml
Sol. NiCl_2 (5 mg/100 ml)	10.0 ml
Cisteína	0.5 g

* Con sulfatos o con cloruros dependiendo del grupo bacteriano

B. MEDIO PARA BACTERIAS ACETOCLASTICAS, FERMENTATIVAS E HIDROGENOFILICAS

Se utiliza medio general, pero se emplea la solución mineral 2 con sulfatos. En el caso de las bacterias acetoclásticas se adiciona además 5.0 g/l de acetato de sodio, antes de comenzar a reducir el medio de cultivo.

C. MEDIO PARA BACTERIAS SINTROFICAS CONSUMIDORAS DE PROPIONATO Y BUTIRATO (OHPA_P Y OHPA_B).

En este caso se emplea el medio mineral 2 sin sulfatos

Procedimiento

1. Colocar los reactivos excepto la cisteína en un matraz de 1000 ml, aforar con agua destilada.
2. Repartir el medio en dos matraces de 1000 ml, adicionar un excedente de 150-200 ml de agua destilada a cada matraz.
3. Colocar dentro de cada matraz una jeringa sin aguja, conectada con manguera a un sistema distribuidor de gas (manifold) mantener la jeringa por encima del nivel del líquido y tapar con papel de aluminio.
4. El medio se pone a calentar en parrilla y una vez que comienza a ebullición se introduce la jeringa a una altura aproximada de 1.5 cm por debajo del nivel del líquido con una corriente de nitrógeno constante, hasta que el medio vire de rosa a incoloro (reducción completa).
5. Se procura mantener en caso necesario, el volumen requerido con agua destilada hasta la completa reducción del medio.
6. Una vez reducidos se enfrían en un recipiente con agua, manteniendo la corriente de nitrógeno.
7. Una vez tibio el medio (aproximadamente a 30°C), se agrega la cisteína rápidamente dejándola resbalar por las paredes del matraz. Evitar en lo posible, la introducción de aire, tapar y burbujear con la corriente de nitrógeno durante 10 minutos adicionales.
8. Quitar la corriente de nitrógeno y tapar con tapón de hule, sellando el perímetro del matraz con cinta adhesiva. Dejar un extremo libre de la cinta para quitarlo una vez dentro de la cámara anaerobia.
9. Introducir a la cámara anaerobia los medios, tubos de cultivo y el equipo necesario para su dosificación (los tubos y el equipo pueden meterse etiquetados desde el día anterior). Hacer tres cambios de vacío antes de introducir el material.

10. Poner 5 ml de medio a cada tubo y 9 ml en los tubos de dilución.
11. Fuera de la cámara anaerobia, cambiar atmósferas utilizando un sistema distribuidor de gases, con la mezcla requerida durante 2 min. Una vez introducida la corriente de gas, se coloca otra aguja que servirá para la evacuación de la atmósfera interna. Las mezclas de acuerdo al grupo bacteriano son las siguientes:

 Hidrogenofilicas: H_2-CO_2 (20% - 80%)

 Fermentativas, acetoclásticas, OHPA y SR: N_2-CO_2 (20%-80%)

12. Esterilizar 15 min en autoclave a 15 lb/pulg²
13. Medir el pH final (6.8-7.5)
14. Guardar en la cámara anaerobia hasta el momento de inocular

D. MEDIO PARA BACTERIAS SULFATO-REDUCTORAS (SR)

Para preparar 1000 ml

Solución mineral 1	100 ml
Solución mineral 2 con sulfatos	100 ml
Resazurina	1.0 ml
Extracto de levadura	1.0 g
$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	0.5 g
Sol. de ácido láctico neutralizado	8.5 ml
Cisteína	0.25 ml

Procedimiento

1. Colocar todos las sustancias en un matraz inclusive la cisteína
2. Adicionar aproximadamente 300 ml de H_2O destilada y medir pH, que generalmente es ácido, ajustar con una solución de NaOH 0.01 M, a un pH de 7.8
3. Aforar a 1000 ml

4. Reducir el medio de la misma forma que el medio general, hasta obtener condiciones reductoras (vire de rosa a amarillo paja)
5. Enfriar el medio en baño de agua manteniendo la corriente de nitrógeno. Una vez frío, medir el pH y ajustar a 7.8, tapar y meter a la cámara anaerobia para su dosificación en tubos
6. Esterilizar 15 min en autoclave
7. Comprobar que el pH se encuentre en un intervalo de 6.8 a 7.5.

3. METODOLOGIA PARA LA INOCULACION

A. PREPARACION DE DILUCIONES DE LA MUESTRA PROBLEMA

1. En caso de no procesar de inmediato la muestra, hacer cambio de atmósferas con una mezcla de N_2-CO_2 durante 15 min y tapar.
2. Introducir la muestra homogénea a la cámara anaerobia haciendo tres cambios de vacío. Macerar la muestra del lodo con macerador de tejidos y vaciar a un recipiente pequeño.
3. Preparar diluciones del lodo en tubos con 9 ml de medio general de la siguiente manera: tomar 1 ml de lodo con jeringa estéril y aguja hipodérmica de 23 x 25 mm, inyectar en el tubo marcado como 10^{-1} y agitar. Con otra jeringa estéril, tomar 1 ml de esta dilución e inyectarla al tubo marcado como 10^{-2} , seguir así sucesivamente, hasta terminar con la última dilución.

B. INOCULACION DE MEDIOS (NMP CON 5 TUBOS POR DILUCION)

1. Inocular entre dos mecheros para asegurar condiciones asépticas.
2. Fuera de la cámara anaerobia flamear el septo de los tubos con alcohol.
3. Adicionar 0.1 ml de la solución de Na_2S a cada tubo, con jeringa, purgando con nitrógeno entre cada adición, retirar los tubos en otra gradilla para no equivocarse.
4. Agregar 0.1 ml del sustrato requerido (glucosa, ácido butírico o ácido propiónico) lo más rápidamente posible, purgando la jeringa entre cada toma de sustrato. Utilizar una jeringa para cada

sustrato. La inoculación de las bacterias fermentativas deberá hacerse necesariamente entre dos mecheros.

5. Con otra jeringa agregar 0.2 ml de la dilución requerida, empezando por la máxima; purgar con nitrógeno y agitar la dilución en un vortex, entre cada toma de muestra.
6. Si se desconoce la muestra, trabajar con 10 diluciones, en caso contrario inocular por lo menos 6 diluciones por muestra.
7. Agitar los tubos e incubarlos a 35°C durante 1 ó 1.5 meses a excepción de las fermentativas que se incuban una semana.
8. Las bacterias hidrogenófilas deben incubarse horizontalmente y alimentarse cada tercer día mediante la introducción de una corriente de CO₂ - H₂ sin colocar aguja para desalojo del gas.

La característica distintiva de crecimiento es la producción de metano que se cuantifica por cromatografía de gases, a excepción de las bacterias fermentativas en donde se observa turbiedad en el medio.

C. INOCULACION DE BACTERIAS SULFATO-REDUCTORAS

1. Seguir la metodología antes descrita sin adicionar Na₂S ni sustrato, pues ya está incorporado en el medio.
2. Incubar a 35°C durante una semana
La característica de crecimiento la da una coloración negra del medio por la formación de FeS.

E. CALCULO DE NUMERO MAS PROBABLE (NMP)

Al finalizar el período de incubación indicado para cada grupo bacteriano, se pasa una muestra de cada tubo (0.25 ml) al cromatógrafo de gases, si se registra la presencia de metano se considera como positivo. Para el caso de las bacterias F el indicador positivo es un color lechoso y para las S deberán mostrar un color negro por la

formación de FeS.

Ejemplo:

Para obtener el NMP de las bacterias hidrogenófilas se obtiene el código de la siguiente manera:

Los resultados de cada serie se enlistan de menor a mayor dilución y a partir de la máxima dilución en que todos los tubos resulten positivos, cuantificar el número de tubos positivos para las siguientes diluciones, y tomar 3 cifras. Para el ejemplo anterior se tiene:

BACTERIAS HIDROGENOFILAS EN SERIES DE 5 TUBOS

DILUCION	No. DE TUBOS	
	positivos	negativos
1 X 10 ⁻⁵	5	0
1 X 10 ⁻⁶	5	0
1 X 10 ⁻⁷	5	0
1 X 10 ⁻⁸	5	0
1 X 10 ⁻⁹	5	0
1 X 10 ⁻¹⁰	3	2
1 X 10 ⁻¹¹	0	5

CODIGO = 5 3 0

Esta combinación de números se localiza en la Tabla de Mc Grady y se obtiene el número de bacterias que en este caso es 8.

Proceder al cálculo del NMP con los siguientes datos:

Máxima dilución en que todos fueron positivos = 10⁻⁹

No. de bacterias en la Tabla de Mac Grady = 8

SSV del lodo al término de la corrida = 6.2 g/l

Volumen de inóculo en cada tubo = 0.2 ml

Substituyendo en la fórmula:

$$\text{NMP} = \frac{(\text{No. en tablas})(\text{máxima dilución positiva})(1000)}{(\text{volumen de inóculo})(\text{SSV})}$$

$$\text{NMP} = \frac{(8)(10^8)(1000)}{(0.2)(6.2)} = 6.45 \times 10^{12}$$

$$\text{NMP} = 6.45 \times 10^{12} \text{ bacterias/g SSV}$$

TABLA PARA LA LECTURA DEL CODIGO, DEL NUMERO MAS PROBABLE DE BACTERIAS ANAEROBIAS, POR PRUEBAS EN TUBO MULTIPLE

A	B	A	B	A	B	A	B
000	0.0	203	1.2	400	1.3	513	8.5
001	0.2	210	0.7	401	1.7	520	5.0
002	0.4	211	0.9	402	2.0	521	7.0
010	0.2	212	1.2	403	2.5	522	9.5
011	0.4	220	0.9	410	1.7	523	12.0
012	0.6	221	1.2	411	2.0	524	15.0
020	0.4	222	1.4	412	2.5	525	17.5
021	0.6	230	1.2	420	2.0	530	8.0
030	0.6	231	1.4	421	2.5	531	11.0
100	0.2	240	1.4	422	3.0	532	14.0
101	0.4	300	0.8	430	2.5	533	17.5
102	0.6	301	1.1	431	3.0	534	20.0
103	0.8	302	1.4	432	4.0	535	25.0
110	0.4	310	1.1	440	3.5	540	13.0
111	0.6	311	1.4	441	4.0	541	17.0
112	0.8	312	1.7	450	4.0	542	25.0
120	0.6	313	2.0	451	5.0	543	30.0
121	0.8	320	1.4	500	2.5	544	35.0
122	1.0	321	1.7	501	3.0	545	45.0
130	0.8	322	2.0	502	4.0	550	25.0
131	1.0	330	1.7	503	6.0	551	35.0
140	1.1	331	2.0	504	7.5	552	60.0
200	0.5	340	2.0	510	3.5	553	90.0
201	0.7	341	2.5	511	4.5	554	160.0

donde: A = código de la lectura de tubos positivos
B = número de bacterias

4. PRUEBA DE ACTIVIDAD METANOGENA ESPECIFICA

A. PREPARACION DE LA SOLUCION PATRON DE LOS ACIDOS ACETICO, PROPIONICO Y N-BUTIRICO

Preparar una solución de 1000 mg/l de los ácidos acético, propiónico y n-butírico tomando en consideración los siguientes datos:

A C I D O	P.M (g/mol)	Densidad (g/cm ³)	% Pureza	Sol. (g/l)	stock mM
ÁCETICO	60.5	1.049	99.8	1	16.5
PROPIONICO	74.8	0.99	99.0	1	13.5
N-BUTIRICO	88.1	0.96	99.0	1	11.3

El cálculo de las moles contenidas en 1 litro de reactivo de las características anteriores, mostró los siguientes resultados:

Acético = 17.304 Mol/l

Propiónico = 13.23 Mol/l

Butírico = 10.787 Mol/l

1. Acido acético

De acuerdo a lo anterior el volumen de ácido acético será:

60.5 g-----1M

1 g ---- x

X= 0.016528 M

C1 V1 = C2 V2

(17.304)(x) = (0.016528)(1 L)

X = (0.016528 M)(1 L)/17.304 M = 0.95 ml

Tomar 0.95 ml de ácido acético y aforar a 1 l con agua destilada

2. Acido propiónico

$$74.08 \text{ g} \text{----} 1 \text{ M}$$

$$1.0 \text{ g} \text{----} x \quad X = 0.013498 \text{ M}$$

$$(13.23 \text{ M})(x) = (0.013498 \text{ M})(1 \text{ L})$$

$$X = (0.013498 \text{ M})(1 \text{ L})/13.23 \text{ M} = 1.0 \text{ ml}$$

Tomar 1.0 ml de ácido propiónico y aforar a 1 l con agua destilada

3. Acido butírico

$$88.11 \text{ g} \text{----} 1 \text{ M}$$

$$1.0 \text{ g} \text{-----} x \quad X = 0.0113494 \text{ M}$$

$$(10.787 \text{ M})(x) = (0.0113494 \text{ M})(1 \text{ L})$$

$$X = (0.0113494 \text{ M})(1 \text{ L})/10.787 \text{ M} = 1.0 \text{ ml}$$

Para preparar 30 ml de solución patrón a partir de las soluciones stock anteriores (1000 mg/l), conteniendo ácidos acético, propiónico y n-butírico en una proporción de 20:5:5 (v/v) se tiene que:

Ácido acético:

$$(1 \text{ mg/ml})(20 \text{ ml del stock}) = 20 \text{ mg} \quad 20 \text{ mg}/30 \text{ ml} = 666.6 \text{ mg/l}$$

Ácido propiónico:

$$(1 \text{ mg/ml})(5 \text{ ml del stock}) = 5 \text{ mg} \quad 5 \text{ mg}/30 \text{ ml} = 166.6 \text{ mg/l}$$

Ácido n-butírico:

$$(1 \text{ mg/ml})(5 \text{ ml del stock}) = 5 \text{ mg} \quad 5 \text{ mg}/30 \text{ ml} = 166.6 \text{ mg/l}$$

Por lo tanto, la solución estándar quedará con las siguientes concentraciones:

Ácido acético ---- 666.6 mg/l

Ácido propiónico---166.6 mg/l

Ácido butírico-----166.6 mg/l

que son las que se consideran para el cálculo de la muestra problema.

B. PREPARACION DE LAS BOTELLAS

1. Colocar 16 ml de medio general sin sulfatos en frascos de tipo antibiótico dentro de la cámara anaerobia, tapar con septo de hule.
2. La prueba para acético se corre individualmente; para propiónico y butírico se usa la misma botella.
3. Fuera de la cámara anaerobia colocar sellos de aluminio.
4. Hacer cambio de atmósfera con una mezcla de N_2 - CO_2 durante 2 minutos.
5. Esterilizar a 15 lb/pulg² durante 15 min.

C. PROCEDIMIENTO DE ANALISIS

1. Dejar la muestra de lodo durante 24 h al vacío en la precámara para agotar los sustratos residuales.
2. Fuera de la cámara anaerobia, quitar el sello de aluminio a las botellas, adicionar 0.4 ml de Na_2S , purgando la jeringa con N_2 y etiquetar.
3. Dentro de la cámara adicionar 4 ml de lodo homogéneo a cada botella.
4. Sacar y volver a colocar los sellos de aluminio.
5. Con agujas estériles, purgar la botellas con N_2 durante 2 minutos. Después tomar 0.4 ml de N_2 con jeringa y reemplazarlos por 0.4 ml del sustrato correspondiente, adicionarlos a la botella y mezclar.
6. Inmediatamente después de la adición de los sustratos, con otra aguja estéril tomar 0.5 ml de N_2 y cambiar por 0.5 ml de muestra.
9. En tubos Eppendorf conteniendo 10 μ l de ácido clorhídrico al 50%, adicionar los 0.5 ml de muestra.

10. Centrifugar 10 min. a 13000 rpm.

11. Decantar en otro tubo Eppendorf el sobrenadante, para cuantificar el sustrato residual por cromatografía de gases.

Seguir la cinética de ésta forma tomando cada 30 min durante 6 h.

Se recomienda analizar las muestras a la mayor brevedad posible, con el propósito de establecer el intervalo de tiempo adecuado de muestreo ya que la cinética de consumo es diferente en cada lodo.

En caso de no poder analizar las muestras deben guardarse en tubos eppendorf previamente etiquetados y con ácido clorhídrico en la cantidad indicada, y congelarlos hasta el momento del análisis.

D. DETERMINACION DE ACIDOS GRASOS VOLATILES POR CROMATOGRAFIA DE GASES

Procedimiento

1. Se utiliza un cromatógrafo de gases con un detector de ionización de flama (FID) SRI 1800, con una columna de sílice fundido de tipo superox-FA, con las siguientes condiciones de operación:

Temperatura del inyector	120°C
Temperatura de la columna	120°C
Detector	120°
Atenuador	16
Presión de gas:	
Nitrógeno	30 psi
Hidrógeno	28 psi
Aire	10 psi

1. Inyectar al cromatógrafo 0.15 µl de la solución patrón de ácidos acético, propiónico y butírico hasta obtener lecturas repetitivas, registrando área y tiempo de retención.

2. La concentración de la muestra problema, se obtiene al relacionar el área de los picos de la solución patrón y su concentración, con los de la muestra problema a los tiempos de retención

correspondientes.

Ejemplo:

Los resultados de inyectar 0.15 μ l de la solución estándar de los ácidos acético, propiónico y n-butírico así como de la muestra problema al cromatógrafo se obtuvieron los siguientes resultados:

	ESTANDAR		
	Acético	Propiónico	Butírico
Tiempo de retención (min)	1.25	1.56	2.21
Área	62	26	28
Concentración (mg/l)	667	167	167
	MUESTRA PROBLEMA		
	Acético	Propiónico	Butírico
Tiempo de retención (min)	1.25	1.56	2.21
Área	50	25	20
Concentración (mg/l)	538	161	119

Para calcular la concentración del ácido acético de la muestra problema se hace lo siguiente:

De la solución patrón de ácidos: 62 ----- 667 mg/l
Para la muestra problema: 50 ----- X mg/l

$X = 537.9$ mg/l de ácido acético

Calcular de la misma forma la concentración del ácido propiónico y butírico.

Nota. Las concentraciones de AGV's en el estándar, han mostrado ser útiles para la concentración de AGV's de la mayoría de las muestras problema en nuestro laboratorio. Sin embargo, en caso de que las concentraciones de la muestra problema sean superiores, deberá prepararse otro estándar con concentraciones similares a las esperadas.

Ejemplo para calcular la actividad metanógena específica:

Al inyectar 0.15 µl de la solución patrón conteniendo ácidos acético, propiónico y n-butírico al cromatógrafo se obtuvieron los siguientes resultados:

	A C I D O S		
	Acético	Propiónico	Butírico
Tiempo de retención (min)	1.25	1.56	2.21
Area	62	26	28
Concentración (mg/l)	667	167	167

Al hacer la medición de la actividad específica de un lodo sobre ácido acético durante 5 días se tuvieron las siguientes concentraciones:

DIAS	AREA	CONCENTRACION	
		mg/l	mmol/l
T ₀	288	622	10.3
T ₁	317	685	11.4
T ₂	246	488	8.2
T ₃	165	327	5.4
T ₄	74	147	2.4
T ₅	23	49	.81

La actividad específica se calcula a partir de la expresión:

$$Asp = - \frac{V_{\text{máxima}}}{SSV \text{ en botella}}$$

donde:

$V_{\text{máx}}$ = corresponde a la pendiente que se obtiene al graficar mmol/l contra tiempo (días) considerando los puntos donde su valor es máximo, sus unidades son mmol/l·d

SSV en botella = concentración de SSV en la botella, expresado en mg/l.

Para el ejemplo:

La concentración de SSV en el lod ofue de 3.815 g/l. Se agregaron 4 ml de lodo que corresponden a 15.26 g de SSV en la botella, al dividir entre el volumen total contenido en la botella (20 ml) da una concentración de 0.763 g/l.

Sustituyendo:

$$\text{Asp} = \frac{- 2.68 \text{ mmol/l}\cdot\text{d}}{763 \text{ mg/l}} = - 0.0035$$

Para expresarla en términos de DQO-CH₄, se multiplica por 4 y por 16 y se tiene:

$$\text{Asp} = - 0.2255 \text{ mg DQO-CH}_4/\text{mg SSV}\cdot\text{d}$$

5. PREPARACION DE GRANOS Y FLOCULOS ANAEROBIOS PARA SU OBSERVACION AL MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIDO

A. SOLUCIONES

- | | |
|-------------------------------------|-------------------------|
| 1. Glutaraldehido al 3% | 5. Placas excavadas |
| 2. Osmio al 1% | 6. Jeringas desechables |
| 3. KH_2PO_4 (M/15) | |
| 4. Na_2HPO_4 (0.1M) | |

Cálculos para la preparación de soluciones de fosfatos

Na_2HPO_4 141.96g

KH_2PO_4136.1g

0.1M.....14.196 g/l

M/15.....9.073 g/l

1.4196 g/100 ml

0.9073 g/100 ml

Solución de Glutaraldehído al 3%

Esta solución se prepara en una solución tampon que contiene 50 % de las soluciones 3 y 4.

Solución de Tetraóxido de Osmio al 1%

Se prepara dentro de un tampon de fosfato de sodio (0.1M) a pH 7.3 (ajustar el pH con H_2SO_4 o HCl).

B. FIJACION DE MUESTRAS

1. Lavar la muestra con buffer de fosfatos.

2. Aspirar con jeringa la solución, cuidar de no deteriorar los granos.
3. Fijar la muestra con la solución de glutaraldehído al 3% durante 2 horas a 4°C, en un volumen 10 veces mayor que el volumen que ocupe la muestra. Al finalizar proceder como en 2.
4. Lavar por 30 minutos, en tres cambios de agua destilada.
5. Proceder a una segunda fijación durante 3 horas, con la solución de osmio al 1% a temperatura ambiente.
6. Lavar con agua destilada tres veces.

C. DESHIDRATAACION DE MUESTRAS

1. Lavar las muestras con solución de etanol en agua, al 30%, 50%, 70%, 80%, 90% y 100%, 2 veces durante 15 minutos cada una.
2. En seguida, con soluciones de acetona en etanol al 30%, 50%, 70%, 80%, 90% y 100%, 2 veces por 15 minutos cada vez.
3. Conservar la muestra en acetona al 100%.

D. SECADO DE MUESTRAS A PUNTO CRITICO

Empleando un secador de punto crítico Balzer-Union CPF 010, se procede de la siguiente manera:

1. Abrir el gas (CO₂)
2. Enfriar, colocando el pre-enfriador a 5°C, con nitrógeno líquido hasta 60 atmósferas
3. Agitar por 5 minutos
4. Abrir la válvula del CO₂
5. Volver a llenar la cámara y hacer cambios hasta que no se perciba olor a acetona de la muestra (5 veces en promedio)

E. SOMBREADO DE MUESTRAS

El sombreado consiste en recubrir con una micropelícula de oro, plata o aluminio las muestras a observar. En el Instituto de Ingeniería, UNAM; se utiliza aluminio vaporizado. La función de la micropelícula es adherirse a la muestra por fuerzas electrostáticas para que al ser barrida la muestra por el microscopio, los electrones "reboten" y surja así la imagen.

Nota. La preparación del osmio debe hacerse bajo una campana de extracción y procurando en lo posible no tener contacto directo.

6. ANALISIS GRANULOMETRICO
(Mahoney et. al. 1987)

A. PROCEDIMIENTO

1. Disolver agar bacteriológico como lo recomienda el fabricante, no requiere esterilización.
2. En 5 cajas de Petri, colocar 1 ml de lodo en el centro.
3. Enseguida verter agar tibio, procurando que la película de agar sea lo más delgada posible.
4. Distribuir la muestra en el agar de manera uniforme, con movimientos circulares de la caja petri hacia la derecha y los mismos hacia la izquierda, formando ochos.
5. Esperar a que solidifique.
6. Observar al microscopio óptico empleando un ocular de Whipple.

Debido a que esta prueba tiene como objetivo la cuantificación del incremento del grano resultante del proceso de granulación, se recomienda lo siguiente para uniformar los resultados.

- ubicar granos bien definidos y compactos,
- medir al azar el diámetro de 100 granos,
- medir la porción más compacta del cuerpo granular,
- en granos no esféricos, medir el diámetro mayor.

B. CALCULOS

Dependiendo del objetivo empleado durante la medición, aplicar las equivalencias siguientes:

- a. 10X-----745 mm
- b. 20X-----375 mm
- c. 40X-----189 mm
- d. 100X-----73 mm

Es decir, un cuadro del ocular de Whipple, observado en 10X, equivale a 74.5 micras.

7. DETERMINACION DE PROTEINA CON COOMASSIE G 250 **(J.J. Sedmak et al., 1977)**

Esta técnica depende de la conversión del color café-anaranjado de la forma ácida diluida del colorante azul brillante del coomassie G 250 a un color azul intenso, cuando las proteínas contenidas en una muestra reaccionan con el reactivo. La absorbancia a 620 nm es una función de la cantidad de proteína y pueden determinarse proteínas y polipéptidos con un peso molecular mayor a 3000 daltons.

A. SOLUCIONES

Solución de NaCl 0.15 M: Pesar 7.27 g de NaCl y aforar a 1 l con agua destilada.

Solución de seroalbúmina bovina: Pesar 0.050 g de seroalbúmina bovina y aforar a 1 l con la solución de NaCl 0.15 M.

Solución de ácido perclórico al 3%: Con pipeta volumétrica tomar 3 ml de ácido nítrico al 100% y aforar a 100 ml con agua destilada.

Solución de azul de Coomassie: Pesar 0.06 g de azul de Coomassie y aforar a 100 ml con la solución NaCl 0.15 M.

B. PROCEDIMIENTO

1. Tomar un ml de lodo en un tubo Eppendorf, centrifugar a 13000 rpm durante 10 minutos.
2. Decantar el sobrenadante.
3. Resuspender el precipitado con agua destilada, homogenizar y aforar a 50 ml.

4. Centrifugar 3 ml de muestra y trabajar con el sobrenadante.
5. Tanto a las muestras como a los tubos de la curva estándar adicionar 2 ml del reactivo de azul de coomassie G 250.
6. Agitar bien los tubos y leerlos antes de una hora, a 620 nm.
7. Para obtener las concentraciones compararlos con la curva estándar.

		CURVA ESTANDAR DE PROTEINAS									
TUBO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ml. de solución estándar (100 µg/2 ml)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
sol. buffer de fosfatos	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2	0.0
Concentración (µg/2 ml)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

C. EJEMPLO DE CALCULO

Se obtuvo una absorbancia de 0.204 a 620 nm del análisis de proteína para el nivel 2 de la corrida 7A a los 17 días.

Este valor leído directamente en curva representa una concentración de 44.54 mg/2 ml

$$44.54 \text{ mg/2 ml} = 22.27 \text{ mg/ml}$$

Multiplicado por la dilución

$$22.27 \text{ mg/ml} \cdot (50) = 113.5 \text{ mg/ml}$$

$$\frac{113.5 \text{ mg} / \text{ml}}{5.790 \text{ mg SSV}} = 0.1923 \text{ mg proteína/mg SSV}$$

8. CALCULO PARA ALIMENTACION DE SUSTRATO EXTERNO (MEZCLA DE VINAZA-MELAZA)

A continuación se describe la forma de calcular la glucosa alimentada a las corridas suplementadas con ésta.

Se asumieron los siguientes parámetros:

Volumen del reactor = 4.5 l

Altura máxima de la cama de lodos cuando reactor lleno = 72 cm

Concentración de SSV en el lodo = 5.02 g SSV/l

Masa de SSV totales = 21.6 g

Qi sustrato = 800 ml/d

Carga orgánica (CO) = 0.5 g DQO/g SSV·d

De $CO = CO = (DQO/SSV) (V/Q)$

Sustituyendo:

$$DQO = (CO) (SSV) (V/Q) = (CO) (SSV) TRH$$

$$DQO = (0.5 \text{ g DQO/g SSV} \cdot \text{d}) (21.6 \text{ g SSV})$$

$$DQO = 10.8 \text{ g DQO/d cuando el reactor está lleno de biomasa}$$

Se tiene entonces que:

$$Qi \text{ sustrato} = 800 \text{ ml/d} = 10.8 \text{ g DQO/d}$$

Como factor de seguridad se prepara un litro de sustrato y se tiene que:

$$\text{Concentración de sustrato} = 13.5 \text{ g DQO/l}$$

Considerando que H' es la altura de la cama de lodos, expresada en cm en un tiempo X, la relación para el cálculo de sustrato es:

$$g \text{ DQO/l} = 13.5 g \text{ DQO/l} (H'/72)$$

Las soluciones de vinaza-melaza (100 g DQO/l) se preparó cada semana y se preservó a 4°C para evitar su contaminación.

Ejemplo:

Calcular la concentración de la solución de alimentación cuando la altura de la cama es de 10 cm.

$$\begin{aligned} \text{DQO sustrato} &= 13.5 g \text{ DQO/l} (10/72) \\ &= 1.87 \text{ DQO/l} \end{aligned}$$

Con la solución concentrada de vinaza melaza de 100 g DQO/l, se requerirán 18.7 ml por litro.

9. CALCULOS PARA LA ADICION DE GLUCOSA Y NITROGENO

La carga orgánica establecida para las corridas suplementadas con glucosa fue de 0.1 g DQO/g SSV·d.

$$\text{De} \quad \text{CO} = \text{CO} = (\text{DQO}/\text{SSV}) (V/Q)$$

Sustituyendo:

$$\text{DQO} = (\text{CO}) (\text{SSV}) (V/Q) = (\text{CO}) (\text{SSV}) \text{TRH}$$

$$\text{DQO} = (0.1 \text{ g DQO/g SSV}\cdot\text{d}) (21.6 \text{ g SSV})$$

$$\text{DQO} = 2.16 \text{ g DQO/d cuando el reactor está lleno de biomasa}$$

Se tiene entonces que:

$$Q_i \text{ sustrato} = 800 \text{ ml/d} = 2.16 \text{ g DQO/d}$$

Como factor de seguridad se prepara un litro de sustrato y se tiene que:

$$\text{Concentración de sustrato} = 3.25 \text{ g DQO/l}$$

Ejemplo

Calcular la DQO de alimentación a partir de una solución de 100 g DQO/l de glucosa, cuando la cama de lodos tiene 10 cm de altura, para mantener una carga de 0.1 g DQO/g SSV·d.

Sustituyendo en la relación anterior:

$$3.25 \text{ g DQO/l} (10 \text{ cm})/72 \text{ cm} = 0.4514 \text{ g DQO necesaria para 10 cm de cama de lodos}$$

Para calcular el volumen de solución de glucosa que equivalen a 0.4514 g DQO:

$$1.0 \text{ g DQO} \text{ ----- } 10 \text{ ml de solución}$$

$$0.4514 \text{ g/DQO} \text{ ---- } X$$

$$X = 4.51 \text{ ml de la solución de } 100 \text{ g DQO/l}$$

2. Calcular la cantidad de nitrógeno necesario para mantener una relación DQO/N de 20:5, a partir de NH_4Cl

Si sabemos que 10 cm de cama de lodos necesitan 0.4514 g DQO, el nitrógeno que se necesita para mantener una relación DQO/N de 20:5 es:

$$N = \frac{0.4514}{5} = 0.0903 \text{ g Nitrógeno}$$

y si sabemos que:

$$1 \text{ mol } \text{NH}_4\text{Cl} \text{ ----- } 53.5 \text{ ----- } 14 \text{ g N}$$

$$X \text{ ----- } 0.0903$$

$$X \text{ ----- } 0.3451 \text{ g } \text{NH}_4\text{Cl}$$

Para preparar la solución de alimentación, se mezclan 3.75 ml de solución de glucosa a una concentración de 100 g DQO/l y 0.3451 g de NH_4Cl , se afora a 1000 ml con agua destilada. Esta solución se prepara diariamente a partir de la altura de la cama de lodos en el reactor.