

01177



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN INGENIERIA

EVALUACION Y SELECCION DE ALTERNATIVAS EN
PROCESOS DE TRATAMIENTO DE BIOSOLIDOS
PROVENIENTES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA AMBIENTAL

P R E S E N T A :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALVAREZ ECHEVERRIA

ASESORA: M.I. FRANCISCA IRENE SOLER ANGUIANO



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 esta 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.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Dedico el presente trabajo a una persona que siempre me tendió la mano en la Adversidad... Gracias.

M. en I Arnulfo Paz Sánchez (†)

ÍNDICE

Introducción	2
Capítulo 1	
1.1 Hipótesis	3
1.2 Objetivo general	3
1.3 Objetivos particulares	3
1.4 Alcances	4
Capítulo 2 Marco de Referencia	6
2.1 Pre-tratamientos	6
2.2 Espesado	7
2.3 Estabilización	8
2.4 Acondicionamiento	12
2.5 Deshidratación	13
2.6 Desinfección	15
2.7 Secado	15
2.8 Reducción térmica	16
2.9 Tratamiento último	17
2.10 Disposición final	18
2.11 Marco normativo	19
Capítulo 3 Metodología	26
3.1 Identificación y manejo de variables	26
3.2 Metodología para la elaboración de gráficas	27
3.3 Programación lineal dinámica y toma de decisiones	30
Capítulo 4 Aplicación	38
4.1 Antecedentes de la ciudad de estudio para el ejemplo de aplicación	38
4.2 Evaluación de costos de operación y mantenimiento	42
4.3 Ecuaciones básicas de diseño	49
4.3.1 Ecuaciones básicas de diseño para digestores aerobios	49
4.3.2 Ecuaciones básicas de diseño para espesadores (gravedad)	51
4.3.3 Ecuaciones básicas de diseño para filtros prensa	52
4.3.4 Ecuaciones básicas de diseño para filtros banda	52
4.3.5 Ecuaciones básicas de diseño para lechos de secado	53
4.4 Desarrollo del método	55
Capítulo 5 Conclusiones	62
Bibliografía	64
Anexo A	67
Anexo B	117
Anexo C	141

ÍNDICE TABLAS

Tabla 2.1 Compatibilidad del equipo de deshidratación con el tamaño de planta	13
Tabla 2.2 Compatibilidad del proceso de deshidratación	14
Tabla 2.3 Datos de biosólidos provenientes de varias operaciones y procesos	19
Tabla 2.4 Criterios microbiológicos para biosólidos Clase A	21
Tabla 2.5 Criterios microbiológicos para biosólidos Clase B	22
Tabla 2.6 Límites de compuestos químicos establecidos por la EPA para Biosólidos que se apliquen al suelo. (EPA, 1996)	22
Tabla 2.7 Criterios microbiológicos para catalogar a un biosólido sin restricción.	22
Tabla 2.8 Tasas de aplicación de biosólidos.	23
Tabla 2.9 Límites máximos permisibles para azolves y lodos en función del contenido de patógenos y parásitos.	24
Tabla 2.10 Límites permisibles para azolves y lodos en función el contenido de metales pesados y sus tasas acumulativas máximas permitidas (anteproyecto de NOM-004-ECOL-)	24
Tabla 4.1 Ríos más importantes de la ciudad de Zihuatanejo	39
Tabla 4.2 Datos de población	40
Tabla 4.2.1 Características de los lodos provenientes de Planta La Marina, Modulo I	41
Tabla 4.2.2 Características de los lodos provenientes de Planta La Marina, Modulo II	41
Tabla 4.2.3 Características de los lodos provenientes de Planta El Deportivo, Modulo I	42
Tabla 4.2.4 Características de los lodos provenientes de Planta El Deportivo, Modulo II	42
Tabla 4.3 Factores de reducción	44
Tabla 4.4 Tiempo de evaporación requerido para lechos de secado	54
Tabla 4.5 Matriz de proyectos	55
Tabla 4.6 Cantidad de biosólidos producidos por proyecto	58
Tabla 4.7 Monto requerido para el manejo de biosólidos por proyecto Costo por operación y mantenimiento por proyecto	59
Tabla 4.8 Costo por operación y mantenimiento por proyecto	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama esquemático de un espesador por gravedad	8
Figura 2.2 Diagrama esquemático de un digestor anaerobio	10
Figura 2.3 Diagrama esquemático de un sistema de composteo	12
Figura 2.4 Diagrama esquemático de un filtro prensa	14
Figura 2.4 Diagrama esquemático de un filtro banda	15
Figura 2.4 Diagrama esquemático de un incinerador de piso múltiples	16
Figura 2.4 Diagrama esquemático de un sistema de pasteurización	18
Figura 4.1 Total de horas de operación y mantenimiento por año para espesadores por gravedad	46
Figura 4.2 Total de horas de operación y mantenimiento por año para lechos de secado de lodo	46
Figura 4.3 Total de horas de operación y mantenimiento por año para lechos de secado de lodo	47
Figura 4.4 Total de horas de operación y mantenimiento por año para filtros banda	47
Figura 4.5 Total de horas de operación y mantenimiento por año para filtros prensa	48
Figura 4.6 Total de horas de consumo de energía eléctrica para filtros prensa	48
Figura 4.7 Manejo de parámetros	54

Espesado – estabilización aerobia – lechos de secado

Figura A1. Área requerida para espesadores por gravedad vs volumen a tratar	68
Figura A2. Diámetro requerido vs cantidad de biosólidos a tratar	68
Figura A3. Carga hidráulica y de sólidos vs caudal de biosólidos (utilizando una unidad)	69
Figura A4. Carga hidráulica y de sólidos vs caudal de biosólidos (utilizando dos unidades)	69
Figura A5. Torques recomendados para el diseño de espesadores (utilizando una unidad)	70
Figura A6. Torques recomendados para el diseño de espesadores (utilizando dos unidades)	70
Figura A7. Caudal de biosólidos a tratar en digestores vs. Metros cúbicos de biosólidos de salida	71
Figura A8. Caudal de biosólidos a tratar vs. Metros cúbicos de digestor	71
Figura A9. Oxígeno requerido (t min)	72
Figura A10. Oxígeno requerido (t max)	72
Figura A11. Potencia requerida (aireadores superficiales)	73

Figura A12. Potencia requerida (sopladores)	73
Figura A13. Requerimientos de oxígeno (sopladores)	74
Figura A14. Superficie requerida vs. Biosólidos a deshidratar	74
Espesado – estabilización aerobia – filtros banda	
Figura A15. Área requerida para espesadores por gravedad vs volumen a tratar	76
Figura A16. Diámetro requerido vs cantidad de biosólidos a tratar	77
Figura A17. Carga hidráulica y de sólidos vs caudal de biosólidos (utilizando una unidad)	77
Figura A18. Carga hidráulica y de sólidos vs caudal de biosólidos (utilizando dos unidades)	78
Figura A19. Torques recomendados para el diseño de espesadores (utilizando una unidad)	78
Figura A20. Torques recomendados para el diseño de espesadores (utilizando dos unidades)	79
Figura A21. Caudal de biosólidos a tratar en digestores vs. Metros cúbicos de biosólidos de salida	79
Figura A22. Caudal de biosólidos a tratar vs. Metros cúbicos de digestor	80
Figura A23. Oxígeno requerido (t min)	80
Figura A24. Oxígeno requerido (t max)	81
Figura A25. Potencia requerida (aireadores superficiales)	81
Figura 26. Potencia requerida (sopladores)	82
Figura A27. Requerimientos de oxígeno (sopladores)	82
Figura A28. M3 de biosólidos de entrada vs. Biosólidos de salida para filtros banda	83
Espesado – estabilización aerobia – filtros prensa	
Figura A30. Área requerida para espesadores por gravedad vs volumen a tratar	83
Figura A31. Diámetro requerido vs cantidad de biosólidos a tratar	84
Figura A32. Carga hidráulica y de sólidos vs caudal de biosólidos (una unidad)	84

Figura A33. Carga hidráulica y de sólidos vs caudal de biosólidos (utilizando dos unidades)	85
Figura A34. Torques recomendados para el diseño de espesadores (utilizando una unidad)	85
Figura A35. Torques recomendados para el diseño de espesadores (utilizando dos unidades)	86
Figura A36. Caudal de biosólidos a tratar en digestores vs. Metros cúbicos de biosólidos de salida	86
Figura A37. Caudal de biosólidos a tratar vs. Metros cúbicos de digestor	87
Figura A38. Oxígeno requerido (t min)	87
Figura A39. Oxígeno requerido (t max)	88
Figura A40. Potencia requerida (aireadores superficiales)	88
Figura A41. Potencia requerida (sopladores)	89
Figura A42. Requerimientos de oxígeno (sopladores)	89
Figura A43 dimensionamiento filtros prensa	90
Lechos de secado de biosólidos	
Figura A44. Caudal de biosólidos a tratar vs superficie requerida	90
Espesado - lechos de secado de biosólidos	
Figura A45. Área requerida para espesadores por gravedad vs volumen a tratar	91
Figura A46. Diámetro requerido vs cantidad de biosólidos a tratar	91
Figura A47. Carga hidráulica y de sólidos vs caudal de biosólidos (utilizando una unidad)	92
Figura A 48. Carga hidráulica y de sólidos vs caudal de biosólidos (utilizando dos unidades)	92
Figura A49. Torques recomendados para el diseño de espesadores (utilizando una unidad)	93
Figura A50. Torques recomendados para el diseño de espesadores (utilizando dos unidades)	93
Figura A51. Superficie requerida en lechos de secado de biosólidos vs. Vol de biosólidos a tratar	94

Espesado – estabilización química (cal)

Figura A52. Área requerida para espesadores por gravedad vs volumen a tratar	96
Figura A53. Diámetro requerido vs cantidad de biosólidos a tratar	96
Figura A54. Carga hidráulica y de sólidos vs caudal de biosólidos (utilizando una unidad)	97
Figura A55. Carga hidráulica y de sólidos vs caudal de biosólidos (utilizando dos unidades)	97
Figura A56. Torques recomendados para el diseño de espesadores (utilizando una unidad)	98
Figura A57. Torques recomendados para el diseño de espesadores (utilizando dos unidades)	98
Figura A58. Estabilización química (cal)	99

Estabilización aerobia – deshidratación mecánica (filtros banda)

Figura A59. Caudal de biosólidos a tratar vs. Metros cúbicos de biosólidos de salida	101
Figura A60. Caudal de biosólidos a tratar vs. Metros cúbicos de digestor	101
Figura A61. Oxígeno requerido (t min)	102
Figura A62. Oxígeno requerido (t max)	102
Figura A63. Potencia requerida (aireadores superficiales)	103
Figura A64. Potencia requerida (sopladores)	103
Figura A65. Querimientos de oxígeno (sopladores)	104
Figura A66. M3 a tratar vs. M3 de salida	104
Figura A67. Biosólidos a deshidratar vs. Ancho de banda	105
Figura A68. Caudal de biosólidos a tratar vs. Metros cúbicos de biosólidos de salida	107
Figura A69. Caudal de biosólidos a tratar vs. Metros cúbicos de digestor	107
Figura A70. Oxígeno requerido (t min)	108
Figura A71. Oxígeno requerido (t max)	108

Figura A72. Potencia requerida (aireadores superficiales)	109
Figura A73. Potencia requerida (sopladores)	109
Figura A74. Requerimientos de oxígeno (sopladores)	110
Figura A75. Filtros prensa	110

Estabilización aerobia – lechos de secado de biosólidos

Figura A76. Caudal de biosólidos a tratar vs. Metros cúbicos de biosólidos de salida	111
Figura A77. Caudal de biosólidos a tratar vs. Metros cúbicos de digestor	111
Figura A78. Oxígeno requerido (t min)	112
Figura A79. Oxígeno requerido (t max)	112
Figura A80. Potencia requerida (aireadores superficiales)	113
Figura A81. Potencia requerida (sopladores)	113
Figura A82. Requerimientos de oxígeno (sopladores)	114
Figura A83. Superficie requerida (m ²) vs biosólidos a tratar	114

CAPITULO 1

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el tratamiento de las aguas residuales, ha tomado mucha importancia debido a la toma de conciencia por parte de las autoridades y sobre todo por los convenios y tratados internacionales que norman dicho ámbito, como es la contaminación en cuerpos de agua y sus efectos derivativos.

La generación de biosólidos es inevitable en las plantas de tratamiento de aguas residuales. El tipo y características de estos sólidos producidos esta en función de la calidad del agua residual, proceso o tipo de planta y forma de operación, entre otros factores y condicionantes. Es por ello que los residuos producidos por las plantas de tratamiento de aguas residuales deben de tratarse de una forma adecuada, para su posterior disposición, de tal forma que no se ponga en riesgo la salud humana ni el equilibrio ecológico.

En la actualidad resulta de suma importancia identificar y seleccionar el proceso más adecuado y económico para realizar el tratamiento de los biosólidos (lodos) generados, lo que conlleva a un análisis de factibilidad técnica y económica de las diferentes opciones que se encuentran en el mercado para llevar a cabo tal fin.

Para la selección de alternativas, del tratamiento y disposición final de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales, es de suma importancia evaluar todas las variables que influyen en el proceso de selección y evaluación de alternativas en cualquier tipo de proyecto, teniendo en cuenta algunas variables entre las cuales se encuentran:

1. Inversión inicial.
2. Tipo de capital (privado o estatal)
3. Obra civil.
4. Costo del equipamiento.
5. Costos de mantenimiento.
6. Costos de operación.
7. Requerimientos de personal (personal altamente especializado, especialización básica o sin especialización).
8. Eficiencia y confiabilidad del proceso.

Todos estos factores deben evaluarse en el costo-beneficio de la instalación a proyectarse, ya que de ellos depende la viabilidad de la implementación del sistema, por ello es importante hacer un balance entre la factibilidad técnica y económica que cumpla con las expectativas del tratamiento y disposición de los residuos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Las operaciones y procesos unitarios empleados en el tratamiento, dan como resultado la generación de biosólidos con ciertas características que dependen, además de la edad del lodo, de las propiedades de los residuos líquidos tratados y de los procesos mediante los cuales

fueron generados. Debido a estas condicionantes, los sólidos producidos por las plantas de tratamiento de aguas residuales deben de tratarse de una forma adecuada para su posterior disposición, de tal forma que no se ponga en riesgo la salud humana ni el equilibrio ecológico.

Muchos de los constituyentes químicos, incluyendo los nutrientes, son de gran importancia a la hora de considerar la disposición final del lodo, así como el tratamiento del líquido extraído del lodo durante el proceso de tratamiento. Las características del lodo que afectan su aptitud para la aplicación a suelos y usos benéficos que incluyen el contenido de materia orgánica, nutrientes, patógenos, metales y compuestos orgánicos tóxicos. El valor del biosólido como fertilizante se basa principalmente en su contenido de nitrógeno, fósforo y potasio.

Los elementos trazas contenidos en el suelo son aquellos compuestos químicos inorgánicos, que en pequeñas cantidades, pueden ser esenciales o perjudiciales tanto para las plantas como para los animales. El término de metales pesados se utiliza para hacer referencia a varios de los elementos traza presentes en el lodo. Las concentraciones de metales pesados pueden variar ampliamente y además de limitar la tasa de aplicación a suelos en donde se ve involucrada la vida útil del terreno de aplicación.

1.1 Hipótesis

El desarrollo de una metodología de prediseño y estimación de costos de inversión y operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, que represente una herramienta importante para la toma de decisiones en la selección de alternativas, principalmente en regiones en donde no se posee la disponibilidad de información a nivel municipal.

1.2 Objetivo general

Basándose en información ya existente, proponer una metodología que permita llevar a cabo una selección adecuada para un conjunto de condiciones dadas, y poder así determinar cada una de las variables que participan en el proceso de evaluación, selección y decisión para diferentes trenes de tratamiento de los lodos generados por las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.

1.3 Objetivos particulares.

1. En base a información existente, proponer una metodología adecuada, además de los criterios básicos, para la selección de alternativas viables, en las operaciones y procesos de tratamientos de biosólidos generados, en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.
2. Elaboración de curvas comparativas de: costos de construcción, operación mantenimiento y equipamiento, entre los procesos elegidos, para el tratamiento de biosólidos.

1.4 Alcances

1. Evaluación de los procesos y operaciones unitarias, en el tratamiento de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en México, mediante procesos de selección basados en la eficiencia de los procesos y costos operativos en la selección de alternativas.
2. Facilitar la labor del proyectista mediante gráficas para diferentes volúmenes de biosólidos generados, observando de esta forma las variaciones que se puedan dar con el tiempo, en los parámetros de diseño del tren propuesto, hasta alcanzar su carga de diseño.
3. El presente trabajo es la proposición de una metodología de selección y evaluación de alternativas basándose en datos bibliográficos, debido a que no se cuentan con datos propios en México por parte de los organismos Operadores en el tratamiento de lodos producidos en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.
4. para el desarrollo de la metodología propuesta no se tomó en cuenta los condicionantes normativos en la calidad final de los biosólidos, más bien se consideraron solamente:
 - Costo de construcción (sin instalación de piezas especiales)
 - Costo del mantenimiento
 - Costo de operación
 - Eficiencia y confiabilidad del tratamiento

CAPITULO 2

CAPÍTULO 2

Tratamiento de lodos residuales

2. Procesos y operaciones unitarias en el tratamiento de lodos

A continuación se describen brevemente algunos procesos y/o operaciones unitarias con el fin de hacer una breve reseña del tema, y no con el afán de desarrollarlos extensamente, ni de explicar y/o trazar las bases de diseño que rigen a los mismos.

Existen en la actualidad varios métodos y procesos, que son utilizados en muchas plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en México (CNA, 2000) son:

1. Pre-tratamientos
2. Espesamiento
3. Estabilización
4. Acondicionamiento
5. Deshidratación
6. Desinfección
7. Secado
8. Reducción térmica
9. Tratamiento último
10. Disposición final

2.1 Pre-tratamientos

Como pre-tratamiento se entiende todas aquellas acciones tendientes a el acondicionamiento de los biosólidos, con el fin de facilitar su manejo y disposición en las operaciones unitarias que el proceso requiera.

El fin último de las operaciones de pre-tratamiento es homogeneizar el caudal de lodos a tratar mediante operaciones de dilaceración y mezclado.

La dilaceración del lodo consiste en desmenuzar los sólidos de gran tamaño en partículas más pequeñas para evitar obstrucciones y daños posteriores en los equipos de bombeo y también para fomentar que el lodo tenga mayor superficie de contacto.

La conformación del lodo que se genera depende de los procesos de tratamiento del cual provenga (primario, secundario y avanzado) como lodo primario se entiende todo aquel sólido sedimentable existentes en el agua residual cruda. El lodo secundario está formado por sólidos biológicos y cantidades adicionales de sólidos sedimentables. El lodo generado de tratamientos avanzados está formado por sólidos biológicos y sólidos de origen químico.

Para conseguir una alimentación adecuada de lodos en los subsiguientes etapas en los procesos de tratamiento se debe mezclar el lodo para conseguir un material uniforme, esta uniformidad es de gran importancia en los sistemas de tratamiento con un tiempo de retención corto, como es el caso de deshidratación del lodo, tratamiento térmico o incineración.

2.2 Espesado (concentración)

El espesado es un procedimiento que se emplea para aumentar el contenido de sólidos en el lodo (concentración de sólidos), por eliminación de la fracción líquida del mismo. El aumentar la concentración de sólidos en el lodo resulta beneficiosa para los procesos como son: digestión, deshidratación e incineración (*Dewatering Municipal Wastewater Sludge" Design Manual, 1979*). Existen diferentes métodos de espesado:

- a. Espesado por gravedad
- b. Espesado por flotación
- c. Espesado por centrifugación
- d. Espesadores de tambor rotativo o rotatorio

a. Espesado por gravedad

El espesamiento por gravedad, consiste en introducir el efluente de lodos, dentro de una unidad espesadora de rastras o utilizar una laguna de almacenamiento de lodos y permitir que los sólidos sedimenten por su propio peso y el sobrenadante (agua) pueda ser extraído, así como se muestra en la **figura 2.1**.

En el primer caso la composición bacteriológica del lodo no se modifica, ya que dicho proceso, por los tiempos de residencia que suelen ser bajos, no permite la formación de algas y bacterias, por lo cual se produce un lodo de alta concentración y bajo contenido de algas. En el caso de lagunas o de enlagueamiento, que resulta ser una opción económica, restringida por la disponibilidad de área, puede haber la posibilidad de resolver los problemas de bacterias y coliformes, dados los tiempos de retención relativamente largos, aunque se favorece la producción de algas.

b. Espesado por flotación

Existen tres variantes básicas del proceso de espesado por flotación: por aire disuelto, flotación al vacío y flotación por dispersión. La forma más común de aplica este método consiste en crear una cámara de lodos por medio de aire de tal manera que el lodo flotante pueda ser recogido de la cámara con una mayor concentración. Este proceso es el mismo que se emplea para la concentración de minerales, en la industria minera, sin embargo se usa utilizando un agente tenso activo, con el objetivo de incrementar la superficie de contacto con lodos.

c. Espesado por centrifugación

El espesado por centrifugación implica la sedimentación de las partículas del lodo bajo influencia de fuerzas centrifugas. El costo de mantenimiento y operación es bastante grande y costoso solamente en plantas con grandes producciones de lodos.

d. Espesadores de tambor rotatorio

En esta variante, el espesado de lodos se lleva a cabo mediante tambores rotatorios revestidos. Este sistema consiste en un acondicionamiento del lodo activado con polímeros y a continuación los sólidos floculados son separados por medio de unos tamices rotativos. El lodo sale por un extremo de los tambores, mientras que el agua separada se filtra a través de los tamices.

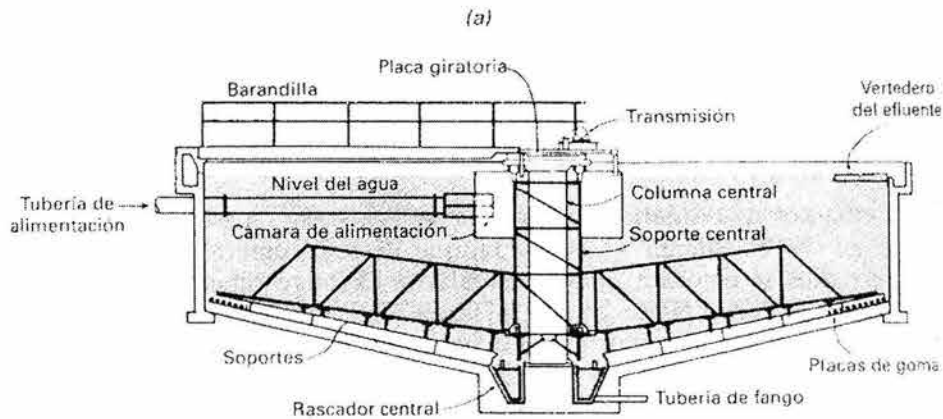


Figura 2.1 Diagrama esquemático de un espesador por gravedad.

2.3 Estabilización

La estabilización de lodo se lleva a cabo para reducir la presencia de patógenos, la eliminación de olores desagradables y reducir la putrefacción del mismo. Hay diferentes medios para llevar a cabo el propósito anterior, como son: 1) la reducción biológica del contenido de materia volátil; 2) la oxidación química de la materia volátil; 3) la adición de productos químicos para impedir la proliferación de microorganismos patógenos; y 4) la aplicación de calor para esterilizar o desinfectar el lodo, entre otras (*Dewatering Municipal Wastewater Sludge" Design Manual*).

Existen diferentes formas para lograr la estabilización del lodo producido:

- estabilización con cal;
- tratamiento térmico;
- digestión anaerobia
- digestión aerobia
- compostaje.

Estabilización con cal

En el proceso de estabilización con cal se le añade suficiente cal al lodo para obtener una mezcla alcalina $pH > 12$, para evitar la proliferación de agentes patógenos, la generación de olores desagradables al ser humano.

La adición de cal puede hacerse de dos formas: la primera es la adición de cal antes del tratamiento, y la segunda después del tratamiento, en algunos casos la cal se ha sustituido por polvo de hornos de cemento y carburo cálcico.

Tratamiento térmico

El tratamiento térmico es un proceso en que el lodo se calienta a presión, hasta temperaturas de 760 °C y presiones grandes durante un tiempo aproximado de 30 minutos (Metcalf & Eddy, 1991). En estas condiciones se libera el agua ligada a los sólidos permitiendo la coagulación de estos, produciéndose a la vez una hidrólisis lo cual provoca la destrucción celular y la liberación de compuestos orgánicos solubles y nitrógeno amoniacal.

Digestión anaerobia

Existen dos tipos de digestión anaerobia, la termofílica y la mesofílica. La digestión anaerobia termofílica se lleva a cabo entre 45° y 65° C, la mesofílica se produce en temperaturas situadas entre 20° y 40° C (Metcalf & Eddy, 1991), que proporciona las condiciones adecuadas para la actividad de las bacterias termofílicas. A estas temperaturas la velocidad de las reacciones bioquímicas aumenta con la temperatura, produciéndose una duplicación de la velocidad de reacción con cada aumento de temperatura de 10° C hasta alcanzar una temperatura límite. En la **figura 2.2** se muestra un esquema típico de digestores anaerobios.

Digestión anaerobia convencional

El proceso de digestión anaerobia convencional se suele llevar a cabo en una única fase. Las funciones de digestión y espesado de lodos, así como la formación de natas se llevan a cabo en forma simultánea. Desde el punto de vista operativo, en un proceso de fase única, el lodo crudo se introduce en una zona donde éste está siendo digerido y a la vez liberando gas. El lodo se calienta por medio de un intercambiador de calor externo. Conforme el gas asciende hacia la superficie, arrastra partículas de lodo y otros componentes como pueden ser grasas y aceites, formando estos una capa de natas.

Como resultado de la digestión, el lodo se estratifica formando una capa de sobrenadante sobre el lodo digerido, y experimenta un aumento de la mineralización (Metcalf & Eddy, 1991).

Digestión anaerobia de una fase y alta carga

Este proceso difiere del sistema convencional de una fase, ya que la carga de sólidos es mucho mayor. En el proceso, el lodo se mezcla mediante recirculación del gas, mezcladores mecánicos, bombeo, etc. (no se produce separación de sobrenadante y espumas). El lodo es calentado para conseguir una velocidad de digestión mucho mayor. El bombeo de lodo al digestor se puede llevar a cabo de forma continua o en forma discontinua. El lodo que entra, desplaza al lodo digerido hasta el tanque de almacenamiento. En este tipo de digestores no se produce la separación de sobrenadante y natas los sólidos. La reducción de sólidos es alrededor del 45 al 50 %, y el lodo tiene concentraciones del orden de la mitad del lodo crudo. En este tipo de digestores es importante el diseño del sistema de recolección de gas (Metcalf & Eddy, 1991).

Digestión anaerobia en dos fases

En ocasiones, los digestores de alta carga se combinan en serie con un segundo digestor. En este proceso el primer digestor se utiliza para la digestión propiamente dicha y se equipa con

dispositivos de mezclado, el segundo se utiliza para el almacenamiento y concentración de lodo digerido y para la formación de un sobrenadante ligeramente clarificado.

Digestores anaerobios independientes

La mayor parte de las plantas de tratamiento de aguas residuales que emplea la digestión anaerobia utiliza tanques convencionales para la digestión anaerobia de lodos primarios y lodos provenientes de tratamientos biológicos, lo que puede provocar algunos problemas en el proceso por lo que es recomendable la utilización de digestores independientes. Una de las ventajas de la utilización de digestores independientes son:

- Se mantienen buenas características de deshidratación en el lodo primario digerido.
- El proceso de digestión se diseña específicamente para un tipo de lodo.
- Se facilitan las condiciones de operación de los digestores.

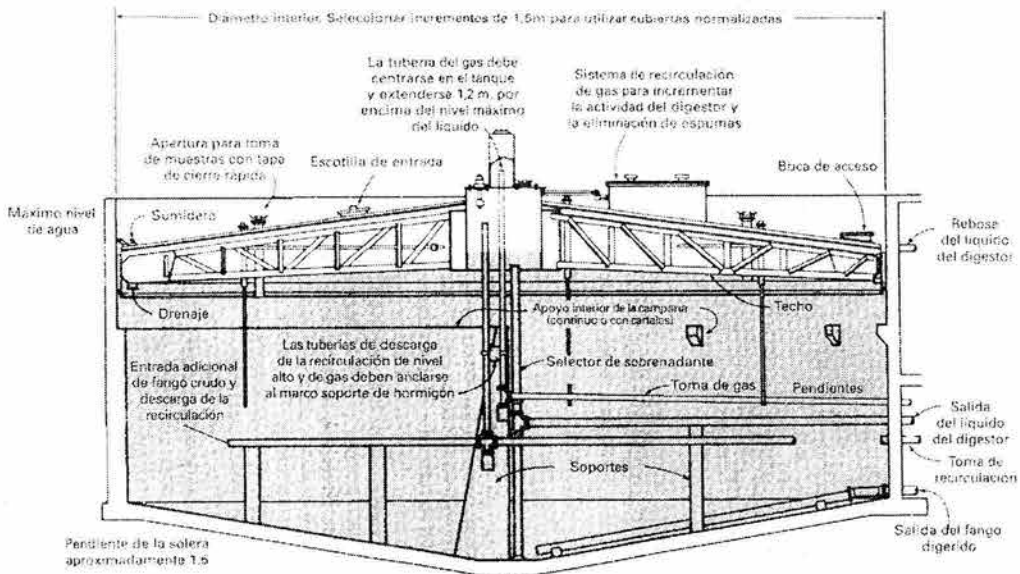


Figura 2.2 Diagrama esquemático de un digestor anaerobio.

Digestión aerobia

En la digestión aerobia podemos encontrar también digestión aerobia termofílica y mesofílica. Existen dos tipos de digestión aerobia, la termofílica y la mesofílica. La digestión aerobia termofílica se lleva a cabo entre 45° y 65° C, la mesofílica se produce en temperaturas situadas entre 20° y 40° C (Metcalf & Eddy, 1991), que proporciona las condiciones adecuadas para la actividad de las bacterias termofílicas. A estas temperaturas la velocidad de las reacciones bioquímicas aumenta con la temperatura, produciéndose una duplicación de la

velocidad de reacción con cada aumento de temperatura de 10° C hasta alcanzar una temperatura límite.

La digestión aerobia es similar al proceso de lodos activados. Conforme se agota la cantidad de sustrato los microorganismos empiezan a consumir su propio protoplasma (fase endógena) para obtener la energía necesaria para su subsistencia.

Digestión aerobia convencional

Hay ciertos factores que se deben de tomar en cuenta para la utilización de digestores aerobios como son: la temperatura la reducción de sólidos, el volumen del digestor (tiempo de retención) y las necesidades de oxígeno del sistema. La digestión aerobia se utiliza para el tratamiento de los lodos producidos por el proceso de lodos activados convencional, lodos activados mezcla completa, filtros percoladores con lodos primarios, lodos activados aireación extendida y sistemas de lodos primarios sin sedimentación primaria.

Es importante mencionar que en la digestión aerobia la reducción de sólidos es similar a la de la digestión anaerobia, además de conseguirse menores concentraciones de DBO en el sobrenadante, pero el costo de la energía requerida para la operación es relativamente alto.

Digestión aerobia con oxígeno puro

La digestión aerobia con oxígeno puro es una modificación del proceso de digestión aerobia convencional, en la que se utiliza oxígeno puro en vez de aire. El lodo producido es de similares características que el producido en el sistema convencional, este tipo de aireación esta indicada específicamente para climas fríos, debido a su relativa inestabilidad a los cambios de temperatura en el ambiente.

Compostaje o Composteo

El compostaje es un proceso en el que la materia orgánica sufre una degradación biológica hasta alcanzar un producto final estable. Este lodo compostado adecuadamente es un material tipo humus, higiénico y libre de características desagradables. Aproximadamente entre el 20% y 30% de los sólidos volátiles se convierten en dióxido de carbono y agua. Conforme se descompone la materia orgánica la composta se calienta hasta alcanzar temperaturas en el intervalo de pasteurización (50 a 70°C), lo cual permite la destrucción de patógenos entéricos.

Consiste en lograr una termogénesis aerobia, mediante la inyección de aire e incorporación de desechos de celulosa, con el objetivo de darle cuerpo al lodo y permitir que el aire de los sopladores, pase hacia la pila o en caso de no usarse este tipo de equipo, también se puede emplear palas mecánicas para voltear y airear la composta. La técnica más empleada en el composteo, es la técnica de la pila estática, sin embargo, el reactor continuo con glucosa y técnicas de descomposición anaerobia e incorporación de cal, son también técnicas de composteo cuyo uso es para sistemas de tratamiento pequeños (**ver figura 2.3**).

Si el lodo se encuentra bien compostado se puede emplear como acondicionador de suelos agrícolas y hortícolas o ser enviados a sitios de disposición, siempre y cuando cumpla con las

disposiciones requeridas en las normas ecológicas vigentes, aunque esto último no es recomendable, debido al costo que representa el valor agregado.

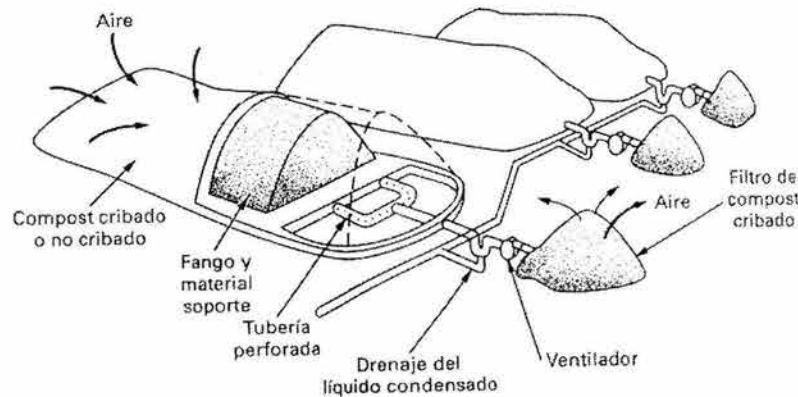


Figura 2.3 Diagrama esquemático de un sistema de composteo.

2.4 Acondicionamiento

El acondicionamiento consiste en mejorar las propiedades mecánicas del lodo, mediante procesos físicos ó físico-químicos, por lo anterior el acondicionamiento será de tres tipos:

- a) Acondicionamiento físico
- b) Acondicionamiento químico

a. Acondicionamiento físico (Congelamiento)

El único tipo de acondicionamiento físico reportado es el congelamiento. Este efectivo para lodos de hidróxidos metálicos tales como lodos de aluminio y hierro. El efecto que presenta es destruir por completo la estructura gelatinosa del lodo, transformándolo en pequeños granos del tamaño de la arena o de un grano de café. El proceso es irreversible y por consiguiente mejora las propiedades mecánicas del lodo, desafortunadamente las eficiencias del equipo para congelamiento son bajas.

Este tipo de proceso esta condicionado a lodos con alto contenido de hidróxidos de aluminio y de magnesio, de tal manera que efectuar un acondicionamiento de lodos biológicos por este método, puede no dar resultado si el contenido de hidróxidos no es alto.

b. Acondicionamiento químico

El uso de reactivos químicos para lograr el acondicionamiento químico consiste en utilizar algún reactivo químico con el objetivo de disminuir la resistencia de la torta de lodo a la filtración,

incrementando la fracción de huecos. Sin embargo el acondicionamiento químico, esta en función del tipo de deshidratación que se elija, junto con la dosis y el tipo de ayudante de floculación. En el cuadro siguiente se presentan los acondicionamientos recomendados en función del tipo de proceso de deshidratación que ha de utilizarse, así como las dosis de reactivos químicos que se decida emplear.

2.5 Deshidratación

Para realizar la deshidratación de los lodos es común en México seleccionar procesos de tipo natural, como son los lechos de secado y las lagunas de evaporación y procesos de tipo mecánico. El proceso de deshidratación es uno de los más empleados en el mundo, y últimamente se han patentado dispositivos, para la deshidratación tiempos más cortos, dichos dispositivos son falsos fondos de plástico, y tienen por objeto disminuir el tiempo de secado de lodos. Se pueden utilizar dichos falsos fondos tanto en lechos de desecado como adaptarse a las lagunas de evaporación de lodos (Qasim, 1994).

Para efectuar la deshidratación mecánica existen diferentes tipos de equipo, sin embargo, el empleo de cada uno de los diferentes tipos esta en función de las estrategias de manejo de sólidos de acuerdo a cada proyectista, dicho en otras palabras, el tipo de deshidratadora mecánica, ya sean: filtros prensa (ver **figura 2.4**), filtros banda (ver **figura 2.5**), filtro de vacío, centrífuga, etc. O del sistema de deshidratación empleado como pueden ser lechos de secado, eras de secado, etc

Aunque básicamente todos los tipos de deshidratación mecánica darán unos sólidos de características similares, el equipo debe de escogerse de acuerdo con las recomendaciones de EPA, si se quiere minimizar el costo de operación y de capital invertido (ver **tabla 2.1**)

Tabla 2.1 Compatibilidad del equipo de deshidratación con el tamaño de planta

TAMAÑO.	MENOS DE 0.04 m ³ /s	DE 0.04 A 0.44 m ³ /s	MÁS DE 0.44 m ³ /s
Centrifuga de canasta		x	x
Centrifuga de flecha sólida.		x	x
Filtro banda.	x	x	x
Filtro de vacío.		x	x
Filtro prensa.		x	x
Lechos de secado.	x	x	
Lagunas de lodos.	x	x	

Fuente: 1979, "Dewatering Municipal Wastewater Sludge" Design Manual.

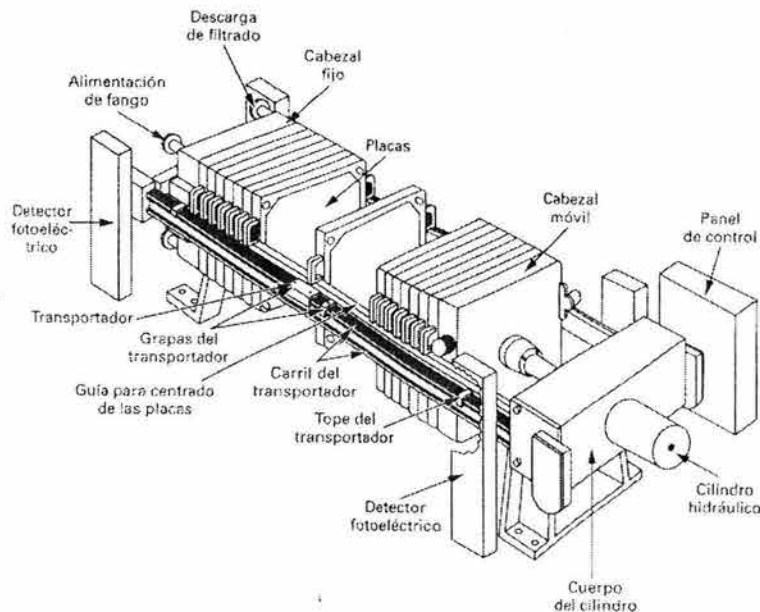


Figura 2.4 Diagrama esquemático de un filtro prensa.

Un aspecto importante a considerar en la elección del proceso y equipo de deshidratación es la forma o técnica que se vaya a emplear en la disposición final de los lodos, ya que hay procesos que tienen una menor o mayor compatibilidad con la forma de disposición final, sobre todo si el lodo será utilizado para procesos de composteo o incineración. Para ver la compatibilidad del proceso de deshidratación con respecto a los subsecuentes procesos o técnicas de disposición últimas, se puede observar en la **tabla 2.2**.

Tabla 2.2 Compatibilidad del proceso de deshidratación

PROCESO DE DESHIDRATACIÓN	INCINERACIÓN	COMPOSTEO	APLICACIÓN DE TIERRA A LA AGRICULTURA	RELLENO SANITARIO
Centrífuga de canasta			X	X
Centrífuga de flecha sólida	X	X	X	X
Filtro banda	X	X	X	X
Filtro de vacío	X	X	X	X
Filtro prensa	X	X	X	X
Lechos de secado		X	X	X
Lagunas de lodos			X	X

Fuente: 1979, "Dewatering Municipal Wastewater Sludge" Design Manual

Otro punto importante a considerar en la selección de equipos es la concentración final de los sólidos que se obtiene, la cual es función del tipo de equipo empleado en la deshidratación y del tipo de acondicionamiento químico empleado.

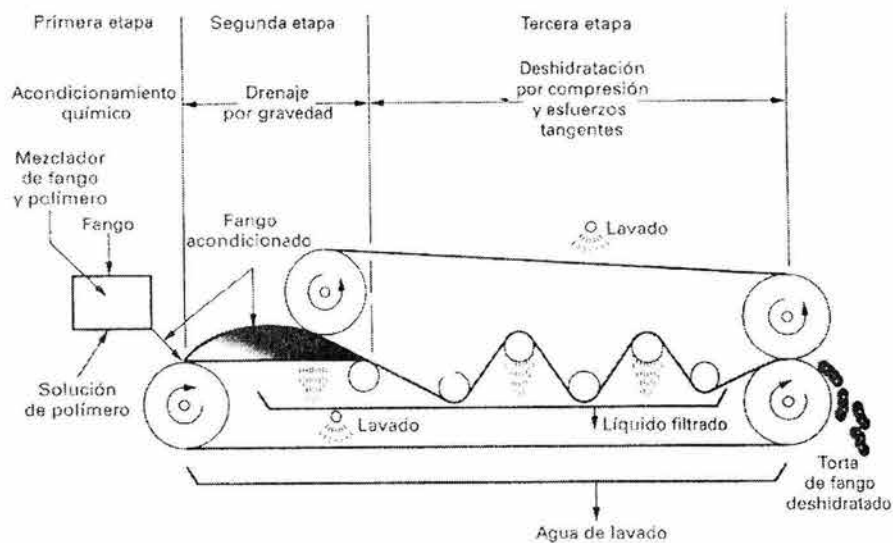


Figura 2.5 Diagrama esquemático un filtro banda.

2.6 Desinfección

La desinfección del lodo producido por las plantas de tratamiento de aguas residuales está tomando cierta importancia en algunos países, debido a la calidad del lodo, para responder a las normas restrictivas aplicables a la reutilización del lodo, por la calidad obtenida en los procesos de tratamiento. Los métodos que se indican a continuación, se han empleado para conseguir una reducción de patógenos superior a las conseguidas por medio de procesos de estabilización (Metcalf & Eddy, 1991):

- Pasteurización
- Otros procesos térmicos, como el acondicionamiento térmico, incineración, y combustión.
- Tratamiento con pH elevado (adición de cal)
- Almacenamiento a largo plazo del lodo líquido digerido
- Compostaje completo a temperaturas superiores a 55°C y maduración en pilas por más de 30 días.
- Adición de cloro para la desinfección y estabilización del lodo
- Desinfección con otros productos químicos
- Desinfección por radiación de alta energía.

2.7 Secado

El secado se considera igual a la deshidratación, sin embargo, la incineración es un punto aparte que se suele incluir en este apartado. Para efectuar la incineración existen varias tecnologías o métodos entre las que se cuenta la incineración en hornos de cal.

2.8 Reducción térmica

La reducción térmica es normalmente utilizada para plantas de tratamiento muy grandes que tienen pocas y limitadas opciones para la disposición final de sus residuos sólidos, en la **figura 2.6** se muestra un esquema del proceso de incineración.

La reducción térmica de lodo involucra los siguientes puntos:

- la conversión total o parcial de sólidos orgánicos para oxidar productos finales, principalmente dióxido de carbono y agua, mediante la incineración o la oxidación de aire húmedo o
- la oxidación parcial y volatilización de sólidos orgánicos por medio de la pirólisis o combustión con aire enrarecido para obtener productos con contenido energético.

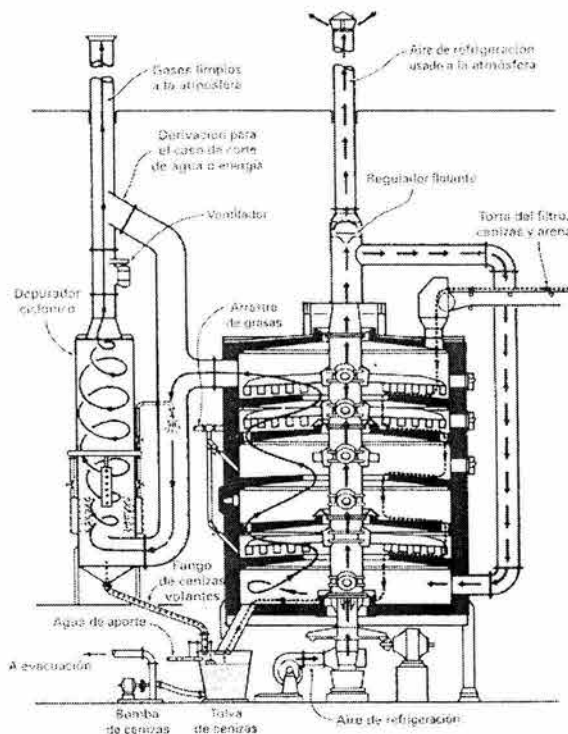


Figura 2.6 Diagrama esquemático de un incinerador de piso múltiples.

Ventajas

- Máxima reducción de volumen que conduce a una disminución de los requerimientos de disposición.
- Destrucción de patógenos y componentes tóxicos.
- Recuperación de potencial energético.

Desventajas

- Alto costo de inversión y operación requiere de personal calificado para operación y mantenimiento.
- Los residuos que se producen (emisiones de gases y cenizas) pueden tener efectos ambientales adversos.
- La disposición de residuos, que pueden clasificarse como peligrosos, puede ser incierta y cara.

2.9 Tratamiento último

El objeto de las operaciones unitarias aplicadas al tratamiento de lodos es el cumplimiento de la normalización ambiental vigente y básicamente consiste en lograr que las condiciones del lodo sean tales, que cumplan de forma cabal con los parámetros establecidos por las autoridades sanitarias, en este caso con las normas aplicables en la Norma Oficial Mexicana.

Algunos autores clasifican como tratamiento último algunas técnicas cuyo objeto principal es proporcionar al lodo un valor agregado, con la finalidad de utilizarlo como abono orgánico, esto se lleva a cabo comprobando que no llegue a presentar alguna de las características *CRETIB* (corrosivo, reactivo, explosivo, tóxico, inflamable y biológico infeccioso), para ser dispuesto en una disposición final (*Metcalf & Eddy, 1991*).

Las técnicas utilizables son:

- Composteo.
- Desinfección mediante microondas.
- Ionización mediante pilas de cobalto 90
- Pasteurización

El Composteo

Ver sección de composteo en *estabilización*.

Ionización y microondas

El empleo de ionización y microondas tiene por objeto esterilizar el lodo y en el caso de la ionización, se logra descomponer sustancias no biodegradables por ruptura de anillos bencénicos. Estas técnicas no son usadas en la práctica mexicana debido al alto costo de los equipos que se requieren.

Pasteurización

Este proceso se realiza a una temperatura de 70° C durante 30 minutos provocando la inactivación de los cistos y huevos de Helminthos entre otros. Para tal fin se contemplan se contemplan dos métodos diferentes, los cuales son: (1) La inyección directa de vapor, (2) intercambio indirecto de vapor, cabe hacer notar que para la pasteurización del lodo también se

puede utilizar o emplear la digestión aerobia termofílica (Metcalf & Eddy) en combinación con la digestión anaerobia (de dos fases, **figura 2.7**).

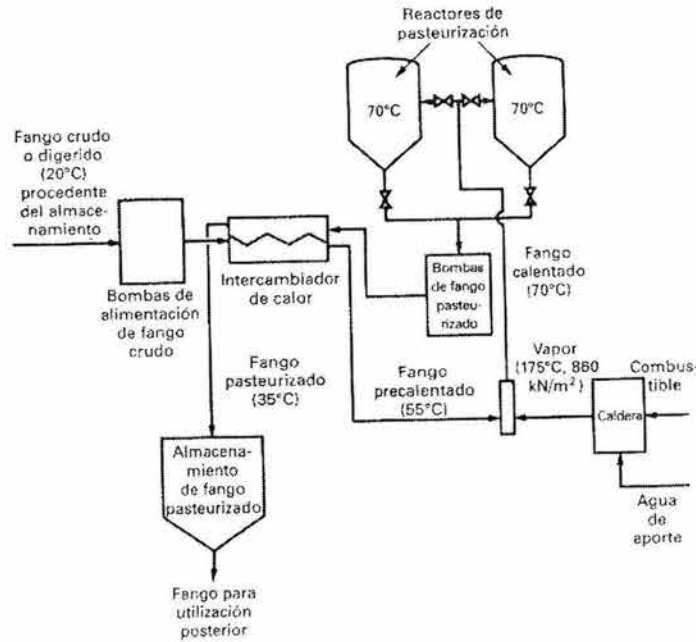


Figura 2.7 Diagrama esquemático de un sistema de pasteurización.

2.10 Disposición final

Los usos benéficos del lodo aplicado al suelo, están recibiendo una atención creciente como consecuencia de la dificultad para efectuar la disposición final en rellenos sanitarios y los altos costos de inversión y operación que representan, sin obtener un mayor beneficio que el de la protección ecológica. A lo anterior se agrega el interés por aprovechar las propiedades nutritivas y como acondicionador de suelos, así como para la reestructuración de suelos.

A continuación se enlistan algunos de los destinos finales para el lodo tratado proveniente de plantas de tratamiento de aguas:

- Disposición en Tiraderos a cielo abierto
- Incorporación a tierras de cultivo
- Recuperación de zonas erosionadas y deforestadas
- Disposición en rellenos sanitarios
- Aplicación en zonas verdes y viveros municipales

A continuación, en la **tabla 2.3**, se presenta una tabla comparativa de algunos procesos y/o operaciones unitarias de concentraciones esperadas

TABLA 2.3
DATOS DE BIOSÓLIDOS PROVENIENTES DE VARIAS OPERACIONES Y PROCESOS

TIPO DE BIOSÓLIDOS	CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS DEL INFLUENTE %	CONCENTRACIÓN ESPERADA DEL EFLUENTE %	CARGA DE SÓLIDOS RECOMENDADA kg/hr/m ²
Biosólidos separados			
Primarios	2.0 – 7.0	5.0 – 10.0	4.06 – 6.10
Filtros percoladores	1.0 – 4.0	3.0 – 6.0	0.79 – 2.0
Biodiscos	1.0 – 3.5	2.0 – 5.0	1.42 – 2.0
Lodos Activados			
L.A. aire	0.5 – 1.5	2.0 – 3.0	0.81 – 1.62
L.A. oxígeno	0.5 – 1.5	2.0 – 3.0	1.0 – 1.62
L.A. aireación extendida	0.2 – 1.0	2.0 – 3.0	1.0 – 1.62
Digestión anaerobia (provenientes de un digestor primario)	8.0	12.0	4.87
Acondicionamiento térmico			
Primario	3.0 – 6.0	12.0 – 15.0	8.13– 10.17
Primario y lodos activados	3.0 – 6.0	8.0 – 15.0	6.10 – 8.13
Lodos activados solamente	0.5 – 1.5	6.0 – 10.0	4.06 – 6.10
Lodos terciarios			
Adición de dosis bajas de cal	3.0 – 4.5	12.0 – 15.0	4.87 – 12.40
Adición de dosis altas de cal	3.0 – 4.5	10.0 – 12.0	2.03 – 6.10
Adición de hierro	0.5 – 1.5	3.0 – 4.0	0.37 – 2.03
Otros			
Primario y lodos activados	0.5 – 1.5	4.0 – 6.0	1.0 – 2.84
	2.5 – 4.0	6.5 – 8.5	
Primario y filtros percoladores	2.0 – 6.0	5.0 – 9.0	2.43 – 4.06
Primario y biodiscos	2.0 – 6.0	5.0 – 9.0	2.43 – 4.06
Primario + hierro	2.0	4.0	1.21
Primario + (L.A. + hierro)	1.5	3.0	1.21
Primario +(L.A. + aluminio)	0.2 – 0.4	4.5 – 6.5	2.43 – 3.25
Primario + dosis bajas de cal	5.0	7.0	4.06
Primario + dosis altas de cal	7.5	12.0	4.87
(Pri + hierro) + filtro percolador	0.4 – 6.0	6.5 – 8.5	2.84 – 4.06
(Pri + hierro) + lodos activados	1.8	3.6	1.21
L.A. + filtros percoladores	0.5 – 2.5	2.0 – 4.0	0.81 – 1.62
Digestión anaerobia			
Primario y lodos activados	4.0	8.0	2.84
Digestión anaerobia + (L.A. + hierro)	4.0	6.0	2.84

PRI = biosólidos primarios. L.A. = lodos activados
Adaptado parcialmente de Process Desing Manual for sludge Treatment and Disposal

2.11 Marco normativo

El tratamiento de las aguas residuales implica también el manejo de los subproductos generados en el proceso, como la basura retenida en rejillas y cribas, las arenas y principalmente los lodos que son producidos durante la sedimentación primaria y secundaria.

En México existen ciertas regulaciones oficiales que establecen los parámetros ambientales a los cuales deben sujetarse los generadores de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales para su vertido y disposición final.

Estas regulaciones son las Normas Oficiales Mexicanas, como son:
NOM-001-ECOL-1996 Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

NOM-002-ECOL-1996 Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

NOM-003-ECOL-1997 Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reutilicen en los servicios al público.

En México ha surgido la necesidad de desarrollar la infraestructura necesaria para el tratamiento de dichas aguas, lo cual en pocos años aumentará los sistemas de tratamiento y por consiguiente la cantidad de lodo producido. Lo anterior ha obligado a los organismos encargados del manejo de l agua residual a resolver los problemas relacionados con el manejo de lodos de desecho, generados en plantas de tratamiento de aguas residuales, ya que actualmente ante la ausencia de una normatividad que regule esta situación la gran mayoría de lodos son dispuestos sin tratamiento previo a tiraderos a cielo abierto, rellenos sanitarios y en el sistema de alcantarillado, lo que representa un impacto ambiental adverso y un riesgo para la salud.

Para lograr la reutilización del lodo y su introducción al mercado es necesario que se establezca normas y criterios que reduzcan los riesgos potenciales de contaminación. Concretamente en México es necesario que las normas restrinjan la disposición de los lodos sin un tratamiento adecuado para lo cual se deben desarrollar nuevas tecnologías orientadas hacia su aprovechamiento.

La Agencia de Protección al ambiente (*Environmental Protection Agency, EPA, 1996^a*) regula los parámetros que deben cumplir los Biosólidos para que puedan utilizarse como mejoradores de suelo, confinarse en un sitio para su disposición o ser incinerados.

La EPA en su apartado 503 de acuerdo a su contenido de agentes patógenos clasifica a los Biosólidos en clase A y B.

Para el caso de los Biosólidos clase A, los requerimientos de eliminación de patógenos pueden ser logrados por cualquiera de los siguientes opciones:

- Tratamiento térmico de biosólidos

- Tratamiento de Biosólidos por medio de proceso con pH elevado, altas temperaturas y secado con aire.
- Tratamiento de Biosólidos por medio de procesos para la reducción adicional de patógenos (*Procesos to Futre Reduce Pathogens, PFRP*)
- Tratamiento de Biosólidos producidos en procesos equivalentes a un *PFRP* bajo el permiso de la autoridad correspondiente.
- Tratamiento de los Biosólidos producidos con otros procesos, previa demostración de que adicionalmente a los límites establecidos para los coliformes fecales y para *Salmonella sp.*, los virus entéricos son reducidos a menos de una unidad formadora por cuatro gramos de sólidos totales en peso seco.
- Biosólidos producidos por medio de procesos desconocidos o bajo condiciones de operación menos estrictas. En este caso, la determinación de coliformes fecales, *Salmonella sp.*, virus entéricos y huevos de helminto deberá hacerse al momento de la disposición final o de la reutilización observado los requerimientos establecidos en la opción anterior.
- Actualmente los procesos aceptados para la producción de Biosólidos Clase A son: composteo, sacado con calor, tratamiento con calor, digestión aerobia termofilia, irradiación con rayos beta y gamma y pasterización.

Por otro caso de los Biosólidos clase B los niveles de patógeno requeridos pueden ser alcanzados mediante cualquiera de las siguientes opciones:

- Tratamiento de Biosólidos por medio de procesos de reducción significativa de patógenos (*Procesos to Significantly Reduce Pathogens, PSRP*)
- Tratamiento de Biosólidos mediante procesos equivalentes a un *PSRP*, bajo la aprobación de la autoridad correspondiente.
- Para el caso de los Biosólidos clase b, los procesos aceptados son: digestión aerobia, secados con aire, digestión aerobia, composteo sin un estricto control de temperatura y la estabilización con cal.

Adicionalmente se establece las restricciones para la aplicación de Biosólidos clase B en suelo destinados a la agricultura, dependiendo del tipo de cultivo o de la exposición pública que haya en el sitio, el tiempo permitido para la cosecha o el acceso público a terrenos en donde se hayan aplicado estos Biosólidos varía de 30 días a dos años

Los lineamientos del apartado 503 de la *EPA* con la modificación de los criterios microbiológicos se pueden observar en las **tablas 2.4 y tablas 2.5**

Tabla 2.4 Criterios microbiológicos para biosólidos Clase A

PARÁMETRO	CONCENTRACIÓN
Coliformes fecales	<1000 NMP/g ST
Huevos de Helmintos	1<HE viable/ 4 g ST
Salmonella sp	3<NMP/ 4g ST

Tabla 2.5 Criterios microbiológicos para biosólidos Clase B

PARÁMETRO	CONCENTRACIÓN
Coliformes fecales	Media Geométrica de 7 muestras < o igual a 2×10^6 NMP o UFC/g

NMP: número más probable
 UFC: unidades formadoras de colonias
 ST: sólidos totales

Los límites máximos permisibles para lodos en función del contenido de metales pesados y sus tasa acumulativas establecidas por la *US EPA* se muestran en las **tablas 2.6 y 2.7**.

Tabla 2.6 Límites de compuestos químicos establecidos por la EPA para Biosólidos que se apliquen al suelo. (EPA, 1996)

Parámetro	mg/kg (BASE SECA)
Arsénico	75
Cadmio	85
Cobre	4,300
Mercurio	57
Molibdeno	75
Níquel	420
Plomo	840
Selenio	100
Zinc	7,500

Tabla 2.7 Tasas de aplicación de biosólidos

OPCIÓN DE DISPOSICIÓN	PERÍODO DE DISPOSICIÓN	TASA DE APLICACIÓN (Ton/ha)
Uso agrícola	Anual	2 a 60
Forestal	Una vez o de 3 a 5 años	8 a 200
Restauración de suelos	Una vez	6 a 400
Exclusivamente disposición final	Anual	200 a 800

Actualmente la Norma Oficial Mexicana que regulará el manejo y disposición final de los lodos de desechos en nuestro país (*NOM-004-SEMARNAT-2002*) la cual establece que las personas físicas o morales responsables de generar lodos provenientes de desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal ; de las plantas potabilizadoras y del tratamiento de las aguas residuales así como el personal que preste el servicio de recolección, manejo, y estabilización de azolves y lodos dispongan o aproveche de estos residuos de manera adecuada sin que represente peligro alguno para, la salud humana, flora y fauna y de los bienes y aguas nacionales.

Los sitios para disposición final o aprovechamiento de los azolves y lodos que se señalan en el anteproyecto *NOM-004-SEMARNAT-2002* son los siguientes:

- Rellenos sanitarios municipales
- Rellenos sanitarios destinados a esta acción.
- Lagunas de estabilización
- Minas fuera de operación

Aprovechamiento:

- Jardines y macetas de casa habitación y edificios públicos y privados, áreas verdes para recreación pública y privadas con contacto, viveros y campos deportivos.
- Camellones urbanos y en vías de comunicación panteones y bosques
- Terrenos con fines agrícolas y regeneración de suelos
- Restauración de paisajes

Los límites máximos permisibles para azolves y lodos en función del contenido de patógenos y parásitos propuestos, se muestran en la **tabla 2.8**

Tabla 2.8 Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos

CLASE	INDICADOR BACTERIOLÓGICO DE LA CONTAMINACIÓN	PATÓGENOS	PARÁSITOS
		Coliformes fecales NMP/ base seca	Salmonella ssp NMP/g en base seca
A	Menor de 1,000	Menor de 3	Menor de 1 (viable)
B	Menor de 1,000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 200,000	Menor de 300	Menor de 35

En el anteproyecto de norma *NOM-004-SEMARNAT-2002* también se especifican los límites permisibles para azolves y lodos en función del contenido de metales (**Tabla 2.8**) y la clasificación de los diferentes tipos de biosólidos y sus aprovechamientos (**Tabla 2.9**).

Tabla 2.9 Límites permisibles para azolves y lodos en función del contenido de metales pesados

CONTAMINANTE (Determinaciones en forma total)	TIPO EXCELENTE (mg/kg EN BASE SECA)	TIPO BUENO (mg/kg EN BASE SECA)
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1200	3000
Cobre	1500	4300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2800	7500

Tabla 2.10 Aprovechamiento de biosólidos

TIPO	CLASE	APROVECHAMIENTO
Excelente	A	<ul style="list-style-type: none"> • Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación. • Usos establecido para la clase A y B.
Excelente o bueno	B	<ul style="list-style-type: none"> • Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación. • Usos establecidos en la clase C.
Excelente o bueno	C	<ul style="list-style-type: none"> • Usos forestales. • Mejoramiento de suelos. • Usos agrícolas.

Cabe señalar que se establece una filosofía en cuanto al tratamiento integral del agua y lodo, así como al reuso de ambos. Indudablemente con la nueva normatividad mexicana en materia del manejo y disposición de los lodos de desechos, esta norma fomentará la creación de la infraestructura necesaria para su tratamiento y promoverá su reutilización con fines agrícolas solucionando así un problema de contaminación con implicaciones atractivas en el ámbito económico.

CAPITULO 3

CAPITULO 3

Metodología

3.1 Identificación y manejo de variables

Existen en la actualidad varios métodos y procesos para el tratamiento de lodos, siendo de suma importancia identificar y seleccionar el proceso más adecuado y económico para realizar el tratamiento de los lodos generados por las plantas de tratamiento de aguas residuales, lo que conlleva a realizar estudios de factibilidad técnica y económica de toda la gama de opciones que se dispongan para realizar el proyecto.

Por lo anterior se deben de tomar en cuenta ciertos aspectos que afectan en forma directa la eficiencia, funcionalidad, e implementación de los procesos de tratamiento y disposición final de los residuos producidos en plantas de tratamiento de aguas residuales.

Algunos de los aspectos que influyen en el proceso de selección de alternativas son los siguientes:

1. Características de los lodos tratados
2. La forma y costo asociado a la conducción de lodos
3. Selección del tren de tratamiento
4. Costo de inversión
5. Costo de operación y mantenimiento
6. Complejidad en la operación
7. Eficiencia en el tratamiento
8. Disposición final
9. Superficie disponible para la selección del tratamiento
10. Impacto social
11. Impacto ambiental

Todos estos aspectos rigen o influyen de alguna forma, la selección de los procesos y operaciones más adecuadas y factibles para cada caso en particular. Es por ello que se hace necesario tener una base o una metodología dada, para llevar a cabo dicha labor con el fin de optimizar los recursos, además de permitir obtener nuevas soluciones a través del tiempo en procesos de selección similares.

En este trabajo se tomó en cuenta algunas de estas variables, debido a que algunas de ellas dependen de cada proyecto en particular y escapan del alcance de las posibilidades de este trabajo. Entre las variables que se consideraron fueron las siguientes:

- Costo de construcción (sin instalación de piezas especiales).
- Costo del mantenimiento.
- Costo de operación.
- Eficiencia del tratamiento.

Para la selección de las diferentes operaciones unitarias, se tomó en cuenta los procesos más comúnmente empleados en el tratamiento de lodos (*de acuerdo al inventario de plantas de CNA, 2000*), debido a su frecuencia de utilización en el tratamiento de biosólidos producidos por plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (no se tomaron en cuenta los sistemas de lagunaje debido a que la superficie requerida para este tipo de tratamientos es por lo general considerablemente grande) :

1. Espesado
2. Estabilización
3. Acondicionamiento
4. Deshidratación

3.2 Metodología para elaboración de gráficas

La selección de los trenes de tratamiento seleccionados en el presente trabajo se eligió basándose en:

- 1) Los procesos comúnmente utilizados para el tratamiento de aguas residuales municipales en La República Mexicana (*Inventario de Plantas CNA, 2000*).
- 2) Complejidad en la operación y mantenimiento de las operaciones y procesos.

Es importante mencionar que los parámetros de diseño que se utilizaron para el desarrollo de las memorias de cálculo, que permitieron la elaboración de las gráficas correspondientes a cada tren propuesto, se utilizaron los parámetros de diseño de la bibliografía consultada, debido a que no se contaban con caracterizaciones propias del proyecto (las tablas de los parámetros utilizados, se encuentran en las memorias de cálculo que se anexan en el disco que acompaña al presente trabajo). Es importante hacer notar que los parámetros que se utilizaron para el desarrollo de las memorias de cálculo, fueron valores de frontera que se encuentran especificados en las tablas de diseño. Es decir el valor superior o el inferior, ya que la utilización de un valor medio obligaría a la realización de una interpolación la cual no sería del todo exacta debido a que no se conoce la distribución de los datos.

- 3) Agrupamiento de operaciones:

- Estabilización aerobia
- Estabilización con cal
- Lechos de secado
- Espesamiento por gravedad
- Deshidratación mediante filtros banda
- Deshidratación mediante filtros prensa

Formación de las memorias de cálculo para los posibles trenes de tratamiento, considerando las operaciones y procesos del punto anterior, obteniendo los siguientes arreglos:

- Espesado - estabilización aerobia - lecho de secado
- Espesado - estabilización aerobia - filtro banda
- Espesado - estabilización aerobia - filtro prensa
- Espesado - estabilización con cal
- Espesado - lecho de secado
- Estabilización aerobia - lecho de secado
- Estabilización aerobia - filtro banda
- Estabilización aerobia - filtro prensa
- Lecho de secados de lodos

5) Aplicación del método: la aplicación de este método se realizó en una ciudad. Esto fue con la finalidad de mostrar la aplicabilidad del método a cualquier localidad sin tener en mente alguna de ellas en específico. Se debe de tener en cuenta que la mayoría de las plantas de tratamiento construidas a nivel nacional, no cuenta con un manejo apropiados de biosólidos, lo que hace susceptible el análisis y aplicación de la metodología propuesta para tal fin. En base a ello se escogieron 20 posibles ciudades en La República Mexicana con la intención de aplicar en una de ellas la metodología propuesta, sin embargo solamente en una de ellas se obtuvo la información básica necesaria para llevar a cabo dicho proyecto (Zihuatanejo), a continuación se enlistan las ciudades propuestas:

1. Toluca
2. Acapulco
3. Monterrey
4. Cancún
5. Guadalajara
6. Puerto Vallarta
7. Matamoros
8. Xalapa
9. Zihuatanejo
10. Villahermosa
11. Chihuahua
12. Torreón
13. Puebla
14. Morelia
15. Tepic
16. Puerto Escondido
17. La Paz
18. Cuernavaca
19. Mérida
20. Hermosillo

6) Una vez identificadas las características del proceso de tratamiento, se seleccionaron diferentes volúmenes de biosólidos entre los 15 m³ hasta los 200 m³ (arbitrario) con la finalidad de observar el comportamiento del tren de tratamiento antes de alcanzar el gasto máximo de diseño, facilitando con esto la cuantificación de reactivos y consumos energéticos durante un intervalo de tiempo determinado.

7) Se grafican los resultados correspondientes a cada tren de tratamiento, haciendo uso de las memorias de cálculo elaboradas (las cuales se encuentran en el disco anexo), se obtuvieron gráficas de:

- Volúmenes de operación
- Potencia requerida de los equipos
- Cantidad de biosólidos a la entrada de cada operación unitaria y a la salida de cada tren de tratamiento
- Superficies requerida
- Cantidad de reactivos utilizados en los acondicionamientos (cuando es requerido).
- Necesidades y requerimientos de aire por metro cúbico de biosólidos a tratar (aireadores mecánicos y difusores de aire).
- Dimensionamiento de equipos.
- Volúmenes efectivos de estructuras.

Es importante señalar que algunos de los parámetros utilizados para el diseño de los diferentes trenes de tratamientos para biosólidos provenientes de aguas residuales municipales, se obtuvieron a partir de información bibliográfica (que se encuentran dentro de las memorias de cálculo) debido a que actualmente no se cuenta con una base de datos a nivel Nacional de la calidad y características de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en La República Mexicana.

Para las gráficas de mantenimiento y operación de los procesos y operaciones de tratamiento de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales se obtuvieron mediante información reportada en manuales de diseño y operación de diferentes entidades, presentadas en el Anexo B.

El desarrollo de las gráficas de costos constructivos se hicieron tomando en cuenta conceptos básicos presentados en el *Anexo B*, los cuales a su vez tomaron como base los volúmenes de obra y cantidad de reactivos e insumos, calculados en las memorias exhibidas en el *Anexo A* de c sin tomar en cuenta sistemas de conducción, instalación eléctrica y piezas especiales.

Para el ejemplo de aplicación se tomaron en cuenta 3 trenes escogidos para su análisis que involucraran el equipo y/o operaciones unitarias de uso frecuente en el tratamiento de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, los cuales fueron:

1. Espesado – estabilización aerobia – lechos de secado de biosólidos
2. Espesado – estabilización aerobia – deshidratación mecánica (filtros banda)
3. Espesado – estabilización química (cal)

Las gráficas para los respectivos trenes de tratamiento se encuentran en el anexo A del presente trabajo.

3.3 Programación lineal dinámica y toma de decisiones

El proceso de selección de alternativas se hará mediante un proceso de programación dinámica (de etapas múltiples). Es un procedimiento matemático diseñado para mejorar las eficiencias de cálculo en los problemas de programación matemática seleccionados, descomponiéndolos en sub-problemas de menor tamaño y, por consiguiente, más fáciles de calcular. La programación dinámica generalmente se resuelve por etapas, en donde cada etapa interviene exactamente una variable de optimización. Los cálculos de las diferentes etapas se enlazan a su vez mediante cálculos recursivos de manera que se genere una solución óptima factible a todo el problema.

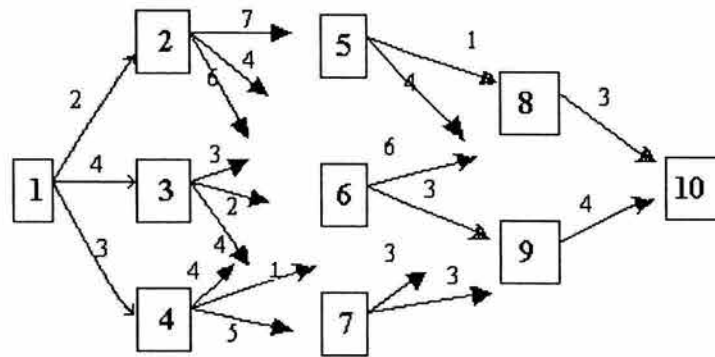
El nombre de programación dinámica evolucionó debido a su uso con aplicaciones donde interviene en la toma de decisiones relacionada con el tiempo (inventarios). Sin embargo, con la programación dinámica también se resuelven adecuadamente otras situaciones donde el tiempo no es un factor importante. Por ese motivo un nombre más adecuado puede ser programación de etapas múltiples ya que el procedimiento determina comúnmente determina la solución en etapas. La teoría unificadora fundamental de la programación dinámica es el principio de optimidad. Este nos dice básicamente como se puede resolver un problema adecuadamente descompuesto en etapas utilizando cálculos recursivos pudiendo resumir esta técnica de la siguiente forma:

- La PD es una técnica matemática que proporciona un procedimiento sistemático para determinar la combinación de decisiones que maximiza la efectividad total.
- No cuenta con una formulación matemática estándar para "el" problema de PD, como ocurre en la Programación Lineal.
- La PD es un enfoque de tipo general para la solución de problemas con algunas características bien precisas, y las ecuaciones en un problema específico que se usan se deben desarrollar para que representen un problema en particular; por ello se requiere de creatividad y de conocimiento de la estructura general de los problemas de PD para reconocer cuándo un problema se puede resolver por medio de estos procedimientos de la PD y cómo se puede llevar a cabo.

Ejemplo prototipo de la PD

Se tiene que llegar de un estado inicial 1 a un estado final 10 pasando por algunos de los estados intermedios posibles ubicados en forma vertical, de tal forma que la suma de los valores asociados a los arcos sea mínima.

Este problema tiene 4 decisiones que hay que determinar, siendo la primera ir a 2, ir a 3 o bien ir a 4. De algunos de estos estados el problema ahora es ir a 5, ir a 6 o ir a 7, y luego el problema es ir a 8 o ir a 9, para finalmente ir a 10. La última decisión, la 4, es fácil, y es ir 10.



Terminología

Estados : son 10. Son cada uno de los posibles puntos por donde se pudiese pasar.

Arco y valor asociado a ese arco: Al ir de un estado a otro hay un valor asociado.

Estado inicial: es el estado 1 .

Estado final: es el estado 10 .

Etapas : son 4 etapas. (La primera es ir de 1 a 2 , 3 o 4).

Decisión: Indicada por x_1, x_2, x_3, x_4 es decidir a que estado ir en cada una de las etapas.

Política: (En el sentido de forma de hacer las cosas). La política de decisión es a qué estado ir cuando se está en un determinado estado, para optimizar la función objetivo.

El procedimiento de elegir en cada etapa el camino más barato no conduce a una decisión óptima global).

El total de rutas posibles de 1 a 10, en este caso son: $3 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1 = 18$ rutas posibles.

Solución.

La PD parte con una pequeña porción del problema original y encuentra la solución óptima ahí. Luego agranda gradualmente el problema y encuentra la solución óptima actual a partir de la que le precede, hasta resolver el problema original completo. Y el problema original que toma es el de la última etapa, cuya decisión normalmente es la mas fácil. En este ejemplo la decisión es ir a k estado 10.

Sean x_n (con $n=1, 2, 3, 4$) las variables de decisión que representan el destino inmediato de la etapa n ; entonces la ruta seleccionada es: $1 \rightarrow x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_3 \rightarrow x_4$; con $x_4=10$. Sea $f_n(\mathbf{s}, x_n)$ el costo total de la mejor política global para las etapas restantes, dado que se

está en el estado s listo para iniciar la etapa n y elige x_n como destino inmediato. Dados s y n , indicaremos por:

- x_n^* el valor de x_n que hace mínimo los valores de $f_n(s, x_n)$,
- $f_n^*(s)$ el valor mínimo que toman todos los $f_n(s, x_n)$,

Es decir: $F_N^*(S) = \text{MIN } F_N(S, X_N) = F_N(S, X_N^*)$

Así, se tiene que $f_n(s, x_n) = Cs, xn + f_{n+1}^*(x_n)$ = costo inmediato + mínimo costo futuro.

Como el destino final es 10, en la siguiente etapa tendremos, en este caso: $f_5^*(10) = 0$. (Este valor cero es el *valor al horizonte*).

El objetivo final del problema planteado es encontrar $f_1^*(1)$, y su ruta (o rutas) asociada(s) correspondiente. La PD encuentra $f_1^*(1)$ encontrando primero $f_4^*(s)$, luego $f_3^*(s)$, luego $f_2^*(s)$, y finalmente $f_1^*(s)$, y como el único estado inicial s es 1, se obtiene el valor de $f_1^*(1)$. Como $f_4^*(s) = f_4(s, 10)$, y la solución para $n = 4$ es:

Las etapas recursivas son las siguientes:

<u>N = 4</u>	S \ X ₄	10	F*	X ₃ *	
	8	3	3	10	
	9	4	4	10	
		$f_3(s, x_3) = Cs_{,x3} + f_4^*(x_3)$			
<u>N = 3</u>	s \ x ₃	8	9	f ₃ *(s)	x ₃ *
	5	1 + 3 = 4	4 + 4 = 8	4	8
	6	6 + 3 = 9	3 + 4 = 7	7	9
	7	3 + 3 = 6	3 + 4 = 7	6	8
		$f_2(s, x_2) = Cs_{,x2} + f_3^*(x_2)$			

$N = 2$	$s \setminus x_2$	s	6	7	$f_2^*(s)$	x_2^*
	2	$7 + 4 = 11$	$4 + 7 = 11$	$6 + 6 = 12$	11	5 ó 6
	3	$3 + 4 = 7$	$2 + 7 = 9$	$4 + 6 = 10$	7	5
	4	$4 + 4 = 8$	$1 + 7 = 8$	$5 + 6 = 11$	8	5 ó 6
$f_1(s, x_1) = Cs_{,x_1} + f_2^*(x_1)$						
$N = 1$	S / x_1	2	3	4	$f_1^*(s)$	x_1^*
	1	$2 + 11 = 13$	$4 + 7 = 11$	$3 + 8 = 11$	11	3 ó 4

Respuesta:

Mínimo = 11; (óptimo)

Solución óptima: Hay 3 soluciones óptimas, y son:

- i) $x_1 = 3$, $x_2 = 5$, $x_3 = 8$, $x_4 = 10$.
- ii) $x_1 = 4$, $x_2 = 5$, $x_3 = 8$, $x_4 = 10$.
- iii) $x_1 = 4$, $x_2 = 6$, $x_3 = 9$, $x_4 = 10$.

Siendo las *rutras óptimas asociadas*, que minimizan el costo del recorrido, cuyo valor es 11, son:

1	4	3	3	5	1	8	3	10
1	3	4	4	5	1	8	3	10
1	3	4	1	6	3	9	4	10

Características de los problemas de PD.

Para reconocer que una situación dada se pueda formular como un problema de PD se indica a continuación las principales características de estos problemas:

El problema se puede dividir en etapas que requieren de una política de decisión en cada una de ellas.

Cada etapa tiene un cierto número de estados asociados a ella. (Estados, son las distintas condiciones posibles en las que se puede encontrar el sistema en cada etapa del problema. El número de estados puede ser finito o infinito).

El efecto de la política de decisión en cada etapa es transformar el estado actual en un estado asociado en la siguiente etapa; (También podrá ser de acuerdo a una función de distribución de probabilidad).

Los problemas de PD se pueden interpretar en términos de redes, donde cada nodo corresponde a un estado y la red estará formada por columnas de nodos, en donde cada columna corresponde a una etapa. El flujo que sale de un nodo sólo puede ir a un nodo a su derecha, y que esta en la siguiente columna (estado). El valor asignado a cada rama que une 2 nodos se puede interpretar como la contribución a la función objetivo que se obtiene al pasar por esos estados. Y el problema es encontrar la ruta con el valor asociado *Mínimo*, o bien con el valor asociado *Máximo*.

El procedimiento de solución está diseñado para encontrar una política óptima para el problema completo, es decir, una receta para las decisiones de la política óptima en cada etapa para cada uno de los estados posibles. (Las tablas con los cálculos de cada etapa son útiles para casos en se tiene un estado dado que no está en la ruta, óptima y se desea la ruta óptima desde ese estado donde se está).

Dado el estado actual, una política óptima para las etapas restantes es independiente de la política adoptada en etapas anteriores. (Propiedad Markoviana, o principio de optimalidad para la PD).

El procedimiento de solución se inicia al encontrar la política óptima para la última etapa. (Es común que sea trivial). El problema se va resolviendo de atrás hacia adelante.

Se dispone de una relación recursiva que identifica la política óptima para la etapa n , dada la política óptima para la etapa $n+1$. La forma precisa de la relación recursiva difiere de un problema a otro utilizando la siguiente terminología:

- Sea x_n : la variable de decisión en la etapa n .
- Sea $f_n(s, x_n)$: el valor de la F.O. dado que el sistema se encuentra en el estado s de la etapa n , y se toma la decisión x_n .
- Sea $f_n(s, x_n)$: el valor de la F.O. dado que el sistema se encuentra en el estado s de la etapa n , y se toma la decisión x_n .
- Sea $f_n^*(s)$: el valor óptimo de $f_n(s, x_n)$ sobre todas las x_n posibles.

Teniendo siempre en cuenta que la relación recursiva siempre tendrá la forma :

$$f_n^*(s) = \max \{ f_n(s, x_n) \} ; \text{máximo tomado sobre todas las } x_n$$

$$f_n^*(s) = \min \{ f_n(s, x_n) \} ; \text{mínimo tomado sobre todas las } x_n$$

Cuando se usa la relación recursiva, el procedimiento de solución se mueve hacia atrás etapa por etapa.

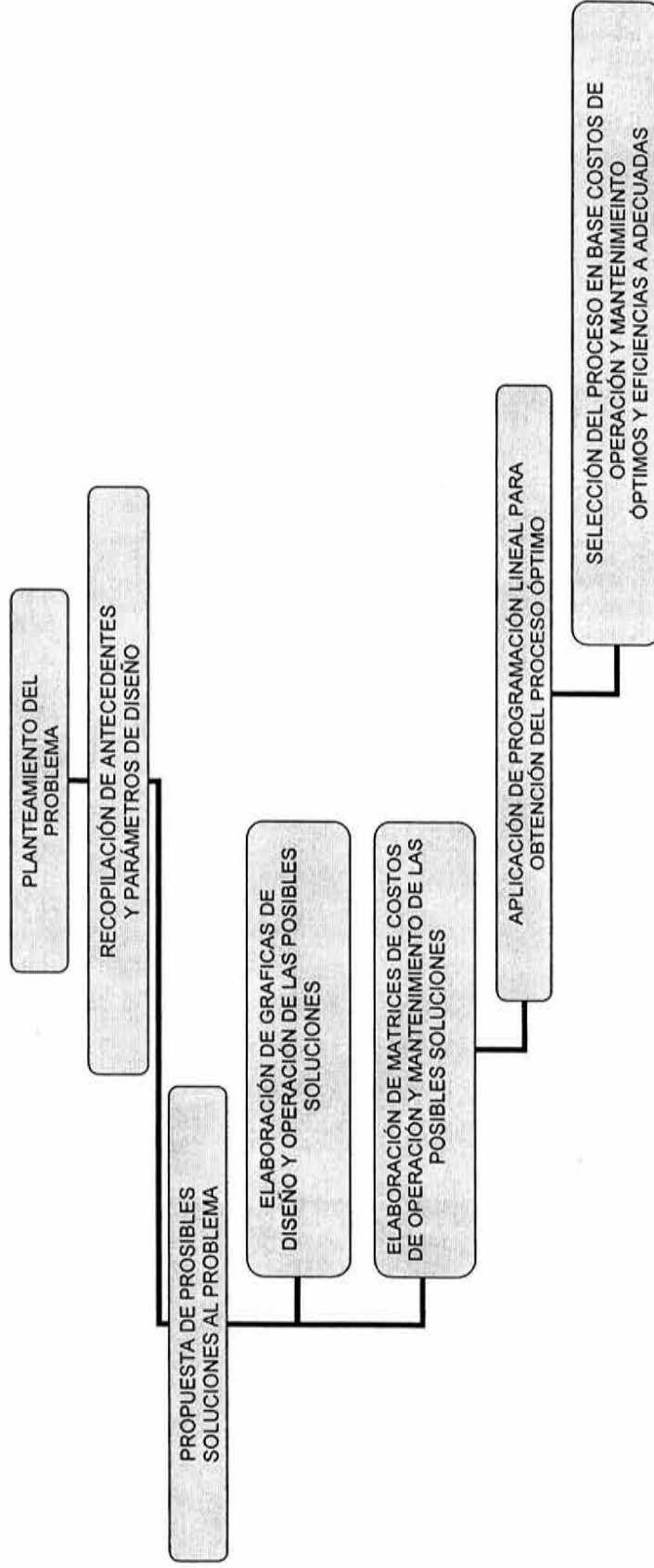
En resumen la metodología puede resumirse de la manera siguiente:

1. El problema se divide por etapas, en las cuales se requiere que exista una política de decisión (por cada etapa).
2. Cada etapa posee un número de estados asociados con la etapa inicial, el número de estados puede ser infinito o finitos.
3. El efecto de la política de decisión en cada etapa es la transformación del estado actual a un estado asociado con el principio de la siguiente etapa.
4. El procedimiento recursivo de cálculo esta diseñado para encontrar la solución óptima del problema en cuestión.
5. Dado el estado actual, la política óptima de decisión par las etapas remanentes, son independientes de las políticas previas adoptadas en las etapas anteriores.
6. El procedimiento de solución empieza encontrándola política de selección para la última etapa.
7. La programación lineal dinámica es una relación recursiva que identifica la solución óptima para la etapa n dada por la etapa $n + 1$.

Cuando se ha terminado de encontrar la solución óptima de la última etapa con sus estados, el método retrocede desde el final hacia el principio guiándose por las soluciones óptimas encontradas en cada etapa, encontrando la solución óptima al trazar este recorrido.

Como se deja entrever, el método en si puede encontrar un valor óptimo, aunque en este caso el manejo de variables se hará tomando en cuenta solamente el factor económico (mantenimiento y operación de los trenes propuestos), que si bien es cierto es uno de los factores más importantes, hay que discernir otros factores que pueden tener peso en la toma de una decisión, ya que la opción más costosa no necesariamente implica que sea la mejor alternativa.

PROCESO DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS



CAPITULO 4

CAPITULO 4

APLICACIÓN

4.1 Antecedentes de la ciudad de estudio para el ejemplo de aplicación

Los datos que a continuación se presentan deben de ser tomados en cuenta no sólo para el diseño de plantas de tratamiento sino también para los procesos derivados de las mismas (tratamiento de lodos). Los parámetros poblacionales son utilizados para la proyección del crecimiento de la población, así mismo son utilizados para la estimación de caudales futuros en la planeación de obras sanitarias.

Localización Geográfica

La Ciudad de Zihuatanejo pertenece al municipio de José Azueta, en el Estado de Guerrero. Este municipio se localiza al noroeste del Estado, colindando al norte con los municipios de La Unión de Isidoro Montes de Oca, Coahuayutla de José María Izazaga y Coyuca de Catalán; al este con los municipios de Coyuca de Catalán y Petatlán; al sur con el municipio de Petatlán y el Océano Pacífico; al oeste con el Océano Pacífico y el municipio de La Unión de Isidoro de Montes de Oca. Sus coordenadas geográficas extremas son 18° 03', al sur 17°33' de latitud norte; al este 101° 12'; al oeste 107° 43' de longitud oeste. Su extensión territorial es de 1,467 kilómetros cuadrados que representan el 2.3 %, de la superficie total del estado.

El municipio incluye 143 localidades, siendo las más importantes: la cabecera municipal Zihuatanejo, San José Iztapa, Vallecitos de Zaragoza, Pantla, Ixtapa Zihuatanejo y Cohuacoyul. La población del municipio, según resultados preliminares del censo de 2000, correspondió a 95,448 habitantes.

La cabecera municipal de José Azueta es Zihuatanejo y se localiza geográficamente entre las coordenadas 17°28" de latitud norte y 101°33' de longitud al oeste de Greenwich; tiene una elevación media de 20 M.S.N.M. y presenta un área urbana de aproximadamente 934.34 hectáreas, para una densidad media bruta de 64 habitantes por hectárea.

Clima

El clima de la localidad de Zihuatanejo se caracteriza mediante la información de la estación climatológica denominada con el mismo nombre, con un período de registro de 1967-1984, y que corresponde a: cálido subhúmedo, con lluvias en verano de menor humedad, con clave A(w0). El promedio de precipitación total anual es de 1193.8 mm, siendo el promedio de precipitación media mensual de 99.5 mm.

Por otra parte, la temperatura media anual es de 26.4°C, mientras que la temperatura media del mes más frío es de 24.8°C. Los meses más calurosos son junio, julio y agosto y los más fríos diciembre, enero y febrero.

Hidrología

a) Aguas Superficiales.

El área de estudio se localiza dentro de la región hidrológica No. 19, denominada Costa Grande de Oaxaca y Guerrero, que abarca todos los ríos de la vertiente del Pacífico desde el río Balsas hasta el río Papagayo. Esta región está dividida en varias cuencas, de las que las más importantes son las de los ríos Coyuca, Atoyac, La Sabana y Tecpan. Entre estas cuencas se tiene la del río Ixtapa, dentro de la que se localizan los ríos Ixtapa, Pantla y Arroyo Grande.

Los ríos de la región hidrológica No. 19 corresponden a las corrientes de la vertiente del Pacífico y todos tienen su origen en la Sierra Madre del Sur a una altitud promedio de 2400 msnm y, en forma más o menos directa, bajan hacia el Océano Pacífico.

Tabla 4.1 Ríos más importantes de la ciudad de Zihuatanejo

RIO	LONGITUD	ELEVACION DE ORIGEN	PENDIENTE
	Km	m.s.n.m.	
SANDIAL	15	700	0.0290
PANTLA	35	1,400	0.0392
IXTAPA	61	2,400	0.0393

b) Aguas Subterráneas.

Con respecto a las aguas subterráneas, la región de estudio se localiza en su mayor parte dentro de materiales consolidados de baja permeabilidad y una porción menor sobre materiales consolidados de alta permeabilidad, sobre todo en la parte alta de la Sierra Madre del sur. La cuenca del río Ixtapa no está considerada como acuífero siendo el acuífero más cercano el de San Jeronimito considerado como un acuífero de tipo libre, que se encuentra sub-explotado actualmente y que está formado por aluvión, cuyos componentes son arena gruesa, arcilla, y grava, a las que subyacen rocas ígneas intrusivas ácidas. Las diferentes unidades de roca consideradas como materiales consolidados y sedimentos sueltos no consolidados que afloran en la zona debido a su característica de origen, grado de fracturamiento, fenómenos tectónicos y erosivos que las han afectado, manifiestan una porosidad y permeabilidad determinada. De acuerdo con la capacidad de los materiales de permitir el flujo y almacenamiento de agua, se les asigna una permeabilidad determinada.

Servicios

a) Agua Potable

La fuente de abastecimiento de las localidades que se localizan en el entorno de la ciudad de Zihuatanejo, como son Ixtapa, San José Ixtapa, Pantla, Barrio Nuevo, Barrio Viejo y El Posquelite es la zona de planicie costera de los ríos Ixtapa y Pantla, considerada como un acuífero de tipo libre y posibilidades reducidas.

b) Alcantarillado

El sistema de alcantarillado en la ciudad de Zihuatanejo es del tipo separado, por lo que debería conducir únicamente las aguas negras que se generan (sanitario), sin embargo, existen varias conexiones del drenaje pluvial que incrementan los gastos de aguas negras. La cobertura del servicio es del 88%.

Demografía

a) Población total

Con base en la recopilación de información de los Censos Nacionales de Población y Vivienda, realizados por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) en el periodo 1970 – 2000, el crecimiento poblacional de la localidad de Zihuatanejo, Gro., es el siguiente:

Tabla 4.2 Datos de población.

CENSO (AÑO)	POBLACION (HAB)	
	MUNICIPAL	ZIHUATANEJO
1970	17,873	4,879
1980	25,751	6,887
1990	63,366	37,328
1995	87,161	54,537
2000	95,448	59,722*

Población estimada a partir de la población municipal de 2000 con la proporción de 1995

Según el censo que presenta resultados a nivel localidad y que corresponde al Conteo de 1995, la localidad de Zihuatanejo tuvo en ese año una población de 54,537 habitantes y registró una tasa de crecimiento media anual, en el período 1990 – 1995, del 7.88%. Con respecto a las densidades de población, la del municipio resultó de 65 habitantes por kilómetro cuadrado, mientras que la de la localidad correspondió a 64 habitantes por hectárea, a partir de la población actual estimada para 2000, de aproximadamente 59,722 habitantes (*Fuente: Cuaderno municipal de Zihuatanejo, 1997*).

b) Plantas de tratamiento

Planta de tratamiento El Deportivo

La planta del Deportivo esta formada por dos módulos denominados módulo I, con capacidad nominal de 40 l/s, y el módulo II con capacidad nominal de 30 l/s, para un gasto total de 70 l/s, aunque actualmente reciben 16 l/s y 18 l/s respectivamente, según datos del organismo operador.

Planta de tratamiento La Marina

La planta La Marina esta formada también por dos módulos denominados módulo I con capacidad nominal de 80 l/s y el módulo II con capacidad nominal de 100 l/s, para un gasto total de 180 l/s, aunque actualmente reciben 60 l/s cada uno de los módulos.

Planta de tratamiento La Ropa

La planta La Ropa está formada por un sólo módulo con capacidad nominal de 20 l/s; que actualmente recibe un gasto promedio de 8 l/s.

A continuación se muestran algunos de los parámetros utilizados en las memorias de cálculo, dichos parámetros fueron el resultado del análisis realizado a muestras compuestas en cada una de las plantas de tratamiento, a excepción de la PTAR la Ropa. El volumen total a tratar de lodos se encuentra aproximadamente entre 125 y 130 m³ según los operadores de dichas instalaciones.

Tabla 4.2.1 Características de los lodos provenientes de Planta La Marina, Modulo I

PARÁMETROS (UNIDADES)	RESULTADOS	METODO: NMX-AA
pH	7.00	08-1980
Sólidos totales; mg/L	50,304	34-1981
Sólidos Totales Volátiles; mg/L	25,852	34-1981
Sólidos Totales Fijos; mg/L	24,452	34-1981
Sólidos Suspendidos Totales; mg/L	49,100	34-1981
Nitrógeno Total Kjeidhal; mg/L	2,492	26-1980
Fósforo Total; mg/L	67.7	29-1980
Potasio; mg/L	288.6	51-1981
% de humedad	94.97	34-1981
Peso específico; mg/L	1.03	

Tabla 4.2.2 Características de los lodos provenientes de Planta La Marina, Modulo II

PARÁMETROS (UNIDADES)	RESULTADOS	METODO: NMX-AA
pH	7.00	08-1980
Sólidos totales; mg/L	16,488	34-1981
Sólidos Totales Volátiles; mg/L	8,600	34-1981
Sólidos Totales Fijos; mg/L	7,888	34-1981
Sólidos Suspendidos Totales; mg/L	14,400	34-1981
Nitrógeno Total Kjeidhal; mg/L	742	26-1980
Fósforo Total; mg/L	38.9	29-1980
Potasio; mg/L	88.4	51-1981
% de humedad	98.35	34-1981
Peso específico; mg/L	1.011	

Tabla 4.2.3 Características de los lodos provenientes de Planta El Deportivo, Modulo I

PARAMETROS (UNIDADES)	RESULTADOS	METODO: NMX-AA
pH	7.00	08-1980
Sólidos totales; mg/L	13,840	34-1981
Sólidos Totales Volátiles; mg/L	6,492	34-1981
Sólidos Totales Fijos; mg/L	7,346	34-1981
Sólidos Suspendidos Totales; mg/L	13,050	34-1981
Nitrógeno Total Kjeidhal; mg/L	347.20	26-1980
Fósforo Total; mg/L	41.50	29-1980
Potasio; mg/L	51.50	51-1981
% de humedad	98.62	34-1981
Peso específico; mg/L	1.01	

Tabla 4.2.4 Características de los lodos provenientes de Planta El Deportivo, Modulo I

PARAMETROS (UNIDADES)	RESULTADOS	METODO: NMX-AA
pH	7.00	08-1980
Sólidos totales; mg/L	8,204	34-1981
Sólidos Totales Volátiles; mg/L	4,010	34-1981
Sólidos Totales Fijos; mg/L	4,194	34-1981
Sólidos Suspendidos Totales; mg/L	6,300	34-1981
Nitrógeno Total Kjeidhal; mg/L	358.40	26-1980
Fósforo Total; mg/L	75.40	29-1980
Potasio; mg/L	60.75	51-1981
% de humedad	99.18	34-1981
Peso específico; mg/L	1.009	

4.2 Evaluación de los costos de operación y mantenimiento.

El análisis de alternativas se hará en función, no de la inversión inicial, sino en relación con los costos a largo y mediano plazo, como son la operación y el mantenimiento que incluye los siguientes rubros:

1. Consumo energético en un año de operación.
2. Consumo de reactivos por año de operación.
3. Costo de operación (horas-hombre)
4. Costos de mantenimiento (horas-hombre).

5. Transporte y disposición de los biosólidos.

A continuación se definen algunos conceptos necesarios para el cálculo del costo debido al consumo eléctrico en la operación de las instalaciones.

Para el *consumo energético* se debe de tomar en cuenta varios factores y rubros como son el importe mínimo mensual, la demanda contratada, los periodos de punta, intermedio y base además de la demanda facturable.

Mínimo mensual

El importe que resulta de aplicar el cargo por kilowatt de demanda facturable al 10% de la demanda contratada

Demanda contratada

La demanda contratada la fijará inicialmente el usuario; su valor no será menor del 60% de la carga total conectada, ni menor de 100 kilowatts o la capacidad del mayor motor o aparato instalado.

En el caso de que el 60% de la carga total conectada exceda la capacidad de la subestación del usuario sólo se tomará como demanda contratada la capacidad de dicha subestación a un factor de 90%.

Horario

Para los efectos de la aplicación de esta tarifa, se utilizarán los horarios locales oficialmente establecidos. Por días festivos se entenderán aquellos de descanso obligatorio, establecidos en el artículo 74 de la Ley Federal del Trabajo, a excepción de la fracción IX, así como los que se establezcan por Acuerdo Presidencial.

Periodos de punta, intermedio y base

Estos periodos se definen en cada una de las regiones tarifarias para distintas temporadas del año, como se describe a continuación.

Demanda facturable

La demanda facturable se define como se establece a continuación:

$$DF = DP + FRI \times \max (DI - DP, 0) + FRB \times \max (DB - DPI, 0)$$

Donde:

DP es la demanda máxima medida en el periodo de punta

DI es la demanda máxima medida en el periodo intermedio

DB es la demanda máxima medida en el periodo de base

DPI es la demanda máxima medida en los periodos de punta e intermedio

FRI y FRB son factores de reducción que tendrán los siguientes valores, dependiendo de la región tarifaria:

TABLA 4.3 FACTORES DE REDUCCIÓN

Región	FRI	FRB
Baja California	0.141	0.070
Baja California Sur	0.195	0.097
Central	0.300	0.150
Noreste	0.300	0.150
Noroeste	0.162	0.081
Norte	0.300	0.150
Peninsular	0.300	0.150
Sur	0.300	0.150

Fuente: CFE

En las fórmulas que definen las demandas facturables, el símbolo "max" significa máximo, es decir, que cuando la diferencia de demandas entre paréntesis sea negativa, ésta tomará el valor cero.

Las demandas máximas medidas en los distintos periodos se determinarán mensualmente por medio de instrumentos de medición, que indican la demanda media en kilowatts, durante cualquier intervalo de 15 minutos del periodo en el cual el consumo de energía eléctrica sea mayor que en cualquier otro intervalo de 15 minutos en el periodo correspondiente.

Para las regiones Baja California, Baja California Sur y Noroeste, DP tomará el valor cero durante la temporada que no tiene periodo de punta.

Cualquier fracción de kilowatt de demanda facturable se tomará como kilowatt completo.

Cuando el usuario mantenga durante 12 meses consecutivos valores de DP, DI y DB inferiores a 100 kilowatts, podrá solicitar al suministrador su incorporación a la tarifa O-M.

Energía de punta, intermedia y de base

Energía de punta es la energía consumida durante el periodo de punta.

Energía intermedia es la energía consumida durante el periodo intermedio.

Energía de base es la energía consumida durante el periodo de base.

Depósito de garantía

Será de 2 veces el importe que resulte de aplicar el cargo por demanda facturable a la demanda contratada.

El consumo mínimo mensual es el importe que resulta de aplicar el cargo por kilowatt de demanda facturable, siendo el 10% de la demanda contratada. *La demanda contratada* la fijara inicialmente el usuario; su valor no será menor al 60% de la carga total conectada, ni menor de 100 kilowatts. *Los periodos de punta, intermedio y base*, estos periodos se definen en cada una de las regiones tarifarias para distintas temporadas del año, como se describe a continuación:

Del 1° de Mayo al sábado anterior al último domingo de octubre para la región sur:

DÍA DE LA SEMANA	BASE	INTERMEDIO	PUNTA
Lunes a viernes	0:00 – 17:00 22:00 – 24:00	0:00 – 12:00 18:00 – 24:00	12:00 – 18:00
Sábado	0:00 – 18:00 21:00 – 24:00	0:00 – 24:00	
Domingo y festivo		0:00 – 24:00	

Del último domingo de octubre al 30 de abril para la región sur:

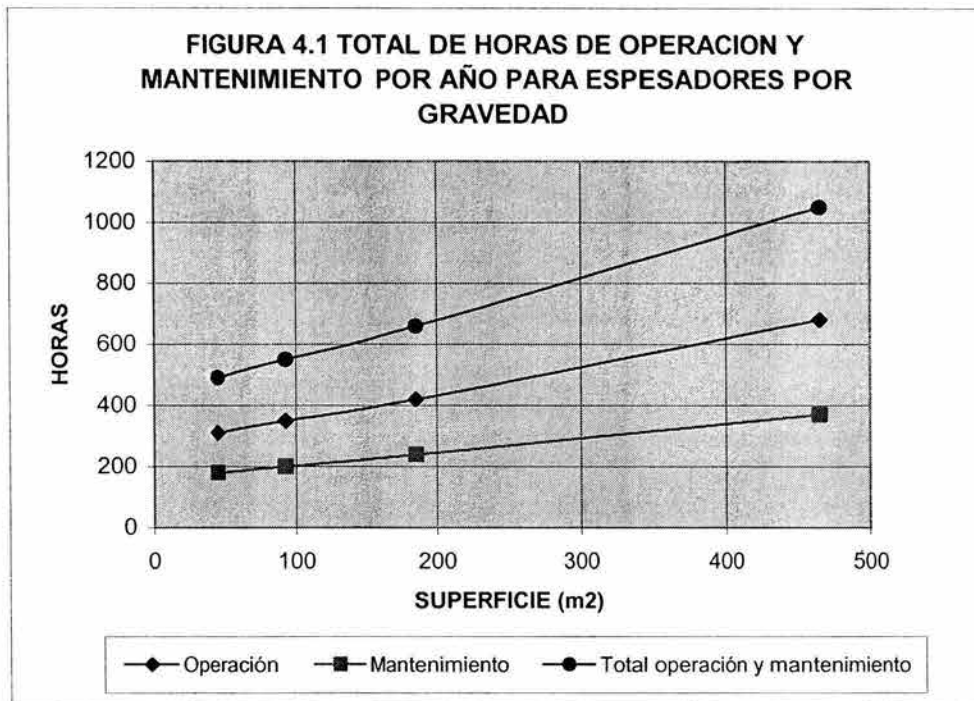
DÍA DE LA SEMANA	BASE	INTERMEDIO	PUNTA
Lunes a viernes	0:00 – 17:00 22:00 – 24:00	17:00 – 22:00	12:00 – 18:00
Sábado	0:00 – 18:00 21:00 – 24:00	18:00 – 21:00	
Domingo y festivo		0:00 – 24:00	

Con estos valores se hace la curva de consumo horaria por categoría (energía base, energía intermedia, energía punta), se multiplica por el costo asociado a cada una ellas y se obtiene el costo total de operación en un año (*Fuente: CFE*).

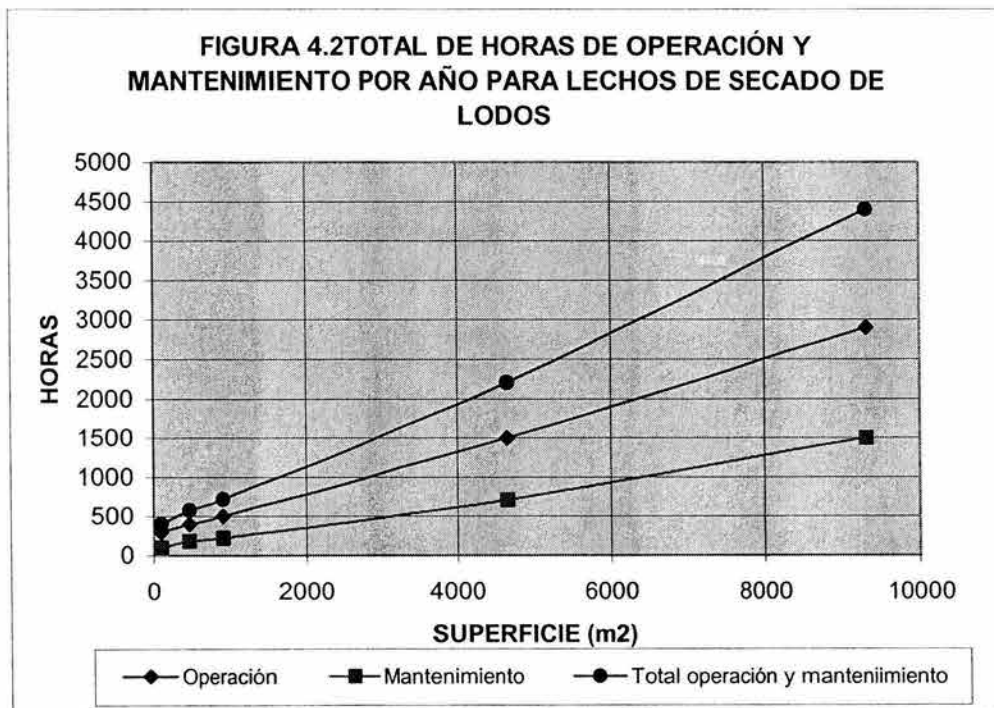
Los reactivos consumidos en la operación, resultan ser factores de gran importancia para la operación de algunos de los equipos y procesos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ya que de ellos depende en alguna medida la eficiencia de dicha operación unitaria, por lo que es de vital importancia, tener en cuenta las cantidades de operación, para los efectos de logística. Se recomienda tener por lo menos una reserva para 15 o 30 días de operación, esas cantidades consumibles operativos fueron calculados en las memorias de cálculo que acompañan al presente trabajo y los costos de los mismos fueron cotizados en empresas dedicadas al suministro de éstos.

En el tratamiento de aguas residuales, es necesario tener en cuenta algunos costos de recuperación de los equipos, con el fin de la adquisición de nuevos modelos cuando el tiempo de servicio, proyectado o especificado por el fabricante, de los equipos actuales caduque, existen otro tipo de costos que se deben de considerar, que para efectos prácticos. No se han considerado en el presente trabajo, como son: los costos de arranque de la planta o de los procesos utilizados, los costos de personal, equipo y material de laboratorio, para el monitoreo de la planta de tratamiento.

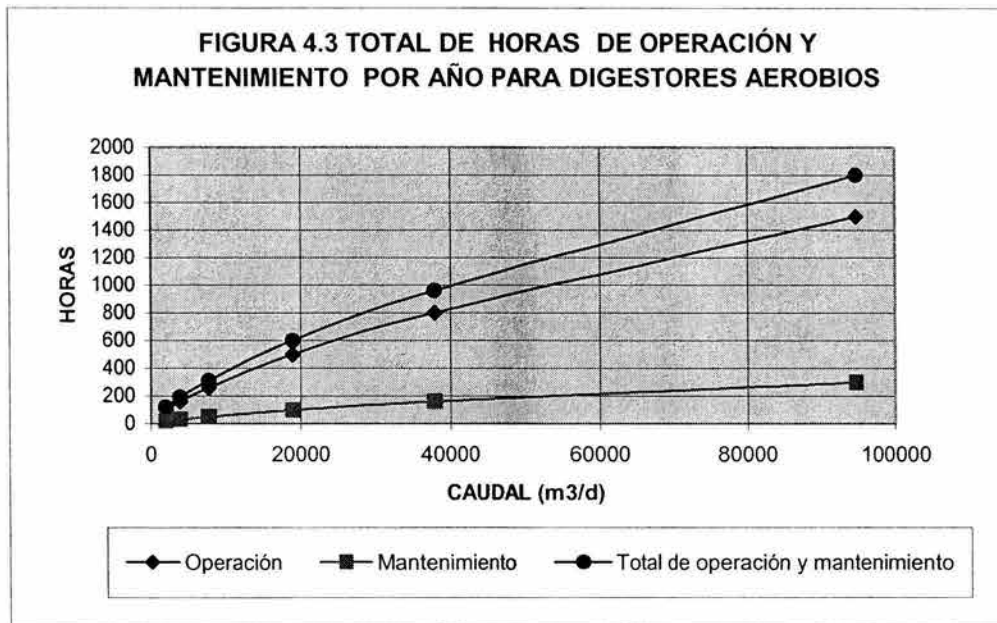
Las horas-hombre requeridas para el mantenimiento y operación de las plantas de tratamiento de aguas residuales y de los procesos asociados a ellas, es crucial para la determinación de la factibilidad de la implementación de alternativas, lo que deriva de lo sofisticado del equipo empleado, y la complejidad que éste presente en la operación del proceso. Para este caso de estudio se utilizaron las gráficas que se presentan a continuación. Las gráficas deben de emplearse sólo en caso de que no se tengan las especificaciones de operación del fabricante.



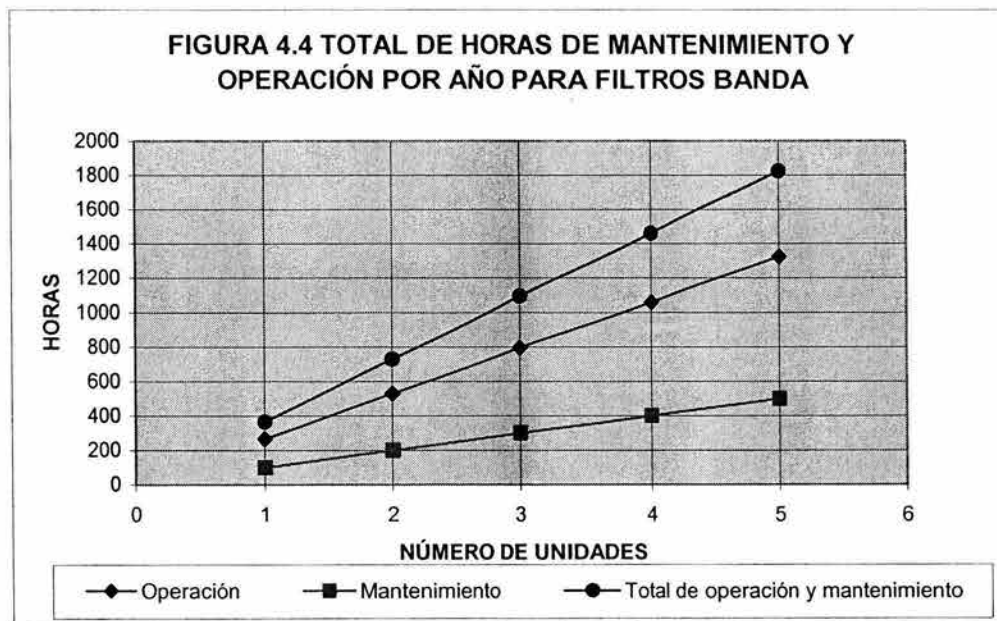
FUENTE: ADAPTADO MANUAL OF PRACTICE OM-8, WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION



FUENTE: ADAPTADO MANUAL OF PRACTICE OM-8, WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION.

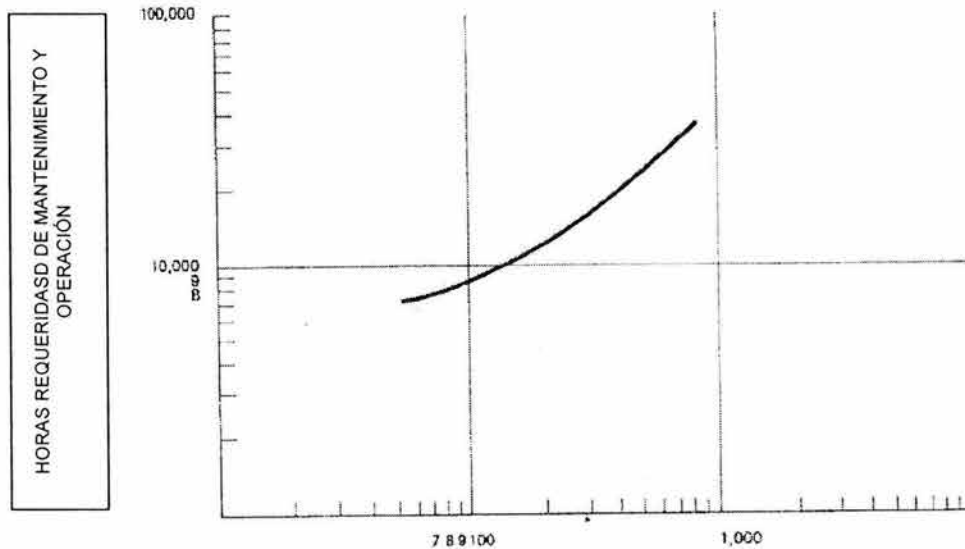


FUENTE: ADAPTADO DE SLUDGE TREATMENT AND DISPOSAL, EPA.



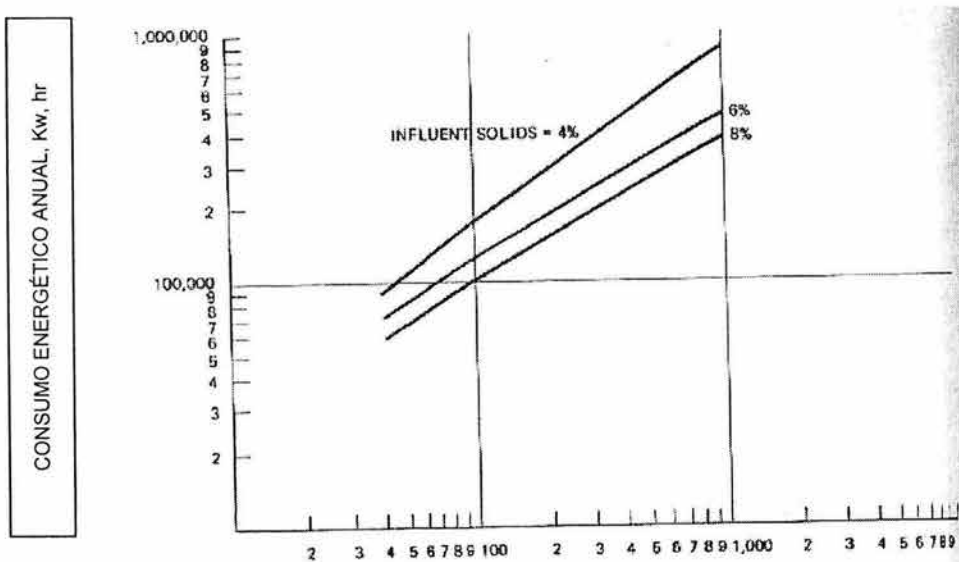
FUENTE: ADAPTADO DE SLUDGE TREATMENT AND DISPOSAL, EPA.

FIGURA 4.5 HORAS ANUALES REQUERIDAS PARA MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN PARA FILTROS PRENSA



PORCENTAJE DE VOLUMEN EN USO DEL FILTRO PRENSA, PIES³
 FUENTE: ADAPTADO DE SLUDGE TREATMENT AND DISPOSAL, EPA.

FIGURA 4.6 CONSUMO ANUAL DE ENERGÍA PARA FILTROS PRENSA



PORCENTAJE DE VOLUMEN EN USO DEL FILTRO PRENSA, PIES³
 FUENTE: ADAPTADO DE SLUDGE TREATMENT AND DISPOSAL, EPA.

Uno de los grandes problemas que se presentan en la actualidad, es el del manejo y disposición última de los biosólidos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, ya que en la actualidad, son pocas las plantas en el país que cuentan con un tratamiento integral de los contaminantes generados de las plantas de tratamiento. En algunos casos los biosólidos producidos en el tratamiento de las aguas residuales, son vertidos al drenaje, sin ningún tratamiento previo y en el mejor de los casos, son estabilizados y llevados a rellenos sanitarios para su disposición. Cabe hacer notar que existen algunos tratamiento alternos para la reutilización de estos biosólidos, alternativas que no son tema de este trabajo, alternativas que generan dividendos para los organismos operadores, que se pueden invertir en la mejora de la planta o en el pago de la inversión de la misma. Tener conciencia de ello, nos lleva a comprender que mientras más cantidades de biosólidos obtengamos, como producto final, los costos de disposición y manejo de éstos serán directamente proporcional a la cantidad producida en el proceso final del tren de tratamiento, por lo que es de vital importancia en la evolución de alternativas, el costo de la reducción en la generación de biosólidos o la de la reutilización del producto, siendo que actualmente la disposición de una tonelada de biosólidos estabilizados tiene un costo de alrededor de \$60.00 pesos más el costo de la renta o inversión en el camión de volteo.

4.3 Ecuaciones básicas de diseño

Para el desarrollo de las memorias de cálculo (disco anexo) se utilizaron las ecuaciones de diseño contenidas en la bibliografía, utilizando los parámetros contenidos en las tablas de diseño adjuntas en el **Anexo C**. Es necesario aclarar que algunas memorias además de contener los algoritmos y formulas requeridas para el cálculo, contienen algunas adiciones para el computo de otras variables (cálculo cantidad de reactivos en un periodo de tiempo determinado, cálculo equipo secundario requerido, etc). A continuación se enlistan algunas de las ecuaciones (básicas utilizadas en la metodología propuesta:

4.3.1 Ecuaciones básicas de diseño para digestores aerobios

$$\text{Días requeridos para la reducción de sólidos volátiles (asumida)} = \frac{\text{grados-días}}{\text{grados}}$$

$$\text{Sólidos volátiles reducidos por día} = \frac{SV(\text{kg}) \times \text{reducción de SV}(\%)}{\text{día}}$$

$$\text{SV reducidos en verano} = \frac{SV(\text{kg}) \times \text{reducción de SV}(\% \text{ reducción en verano})}{\text{día}}$$

$$\text{Requerimientos de oxígeno} = SV \text{ reducidos por día} \times \frac{\text{kg } O_2}{\text{kg VS dest.}}$$

$$\text{Edad del lodo} = \frac{\text{kg totales de SS en el digestor}}{\text{kg SS perdidos del reactor}}$$

Fracción retenida en el reactor, $F =$

$$\frac{\text{Concentración de SS del inf luyente}}{\text{concentración de SS dentro del reactor}} \times \text{fracción de sólidos no destruidos}$$

Volumen del tanque =

$$\frac{(\text{días de retención calculados} \times \text{concentración de SS}(1 - F) + \text{concentración esperada de sólidos estabilizados} \times F \times Q)}{\text{Concentración promedio de sólidos en el reactor}}$$

$$\text{Tiempo de retención hidráulico} = \frac{\text{Volumen del tan que}}{\text{Caudal de salida}}$$

$$\text{SOR (requerimientos estándar de oxígeno)} = \frac{N}{\left[\left(\frac{C'_{sw} \beta F_a - C}{C_{sw}} \right) \alpha (1.024)^{T-20} \right]}$$

$N =$ Oxígeno teórico requerido kg/d

$C_{sw} =$ Solubilidad del oxígeno en la superficie del agua a CNTyP mg/l

$C'_{sw} =$ Solubilidad el oxígeno en la superficie a temperatura de campo mg/l

$C =$ Oxígeno disuelto mínimo requerido para la operación en el reactor mg/l

$\beta =$ Factor de salinidad de la tensión superficial

$\alpha =$ Factor de corrección de transferencia de oxígeno

$F_a =$ Factor de corrección de solubilidad

$T =$ temperatura promedio en condiciones normales de operación

$$F_a = \left(1 - \frac{\text{altitud (m)}}{9450} \right)$$

$$T = \frac{AfT_a + QT_i}{Af + Q}$$

$A =$ Área superficial, m^2 .

$T =$ Temperatura promedio en condiciones normales de operación

T_a = Temperatura promedio del aire en el ambiente

f = factor de proporcionalidad

Q = gasto (m^3/d)

$$\text{Número total de difusores} = \frac{\text{Volumen de aire requerido } (m^3 / \text{min})}{\text{Descarga de aire por difusor } (m^3 / \text{min})}$$

4.3.2 Ecuaciones básicas de diseño para espesadores por gravedad

Torque de operación = WR^2 .

W = Carga uniforme

R = Radio del tanque

$$\text{Área superficial para el espesador } (A_s) = \frac{\text{volumen de sólidos } (kg / d)}{\text{carag de sólidos } (kg / m^2 \times d)}$$

$$\text{Carga hidráulica } (CH) = \frac{\text{volumen de lodos / día } (m^3 / d)}{A_s (m^2)}$$

Flujo total en el espesador = $CH \times A_s (m^3/d)$

$$\text{Diámetro del espesador} = \sqrt{\frac{4 \times A_s}{\pi}}$$

Una vez calculado el área de el (los) espesador (es) deberá revisarse nuevamente la carga de sólidos y la carga hidráulica.

$$h = \frac{\text{Sólidos totales a tratar } (kd / d)}{A_s \times \text{Concentración } (g / g)}$$

4.3.3 Ecuaciones básicas de diseño para filtros prensa

Sólidos totales a deshidratar (STD) = lodos + aditivos (polímeros, cal, etc.)

$$\text{Sólidos a tratar} = \frac{\text{Sólidos totales (kg / d)} \times 7 \text{ (d / semana)}}{5 \text{ (d / semana, operación)}}$$

Para sólidos finales a tratar se debe de considerar los aditivos o acondicionadores que se agreguen a los lodos, para facilitar su deshidratación.

Sólidos a tratar por hora

$$\text{Considerando acondicionamiento} = \frac{\text{Sólidos totales}}{8 \text{ (h / d)}}$$

$$\text{Área de filtro} = \frac{\text{Sólidos a tratar (kg / h)}}{\text{Tasa de filtrado (kg / m}^2 \times \text{h)}}$$

4.3.4 Ecuaciones básicas de diseño para filtros banda

Cálculo de la producción media de lodo =

$$Q \text{ (m}^3 \text{ / d)} \times (1.000 \text{ kg / m}^3) \times (\text{peso específico del lodo}) \times (7 \text{ d / semana})$$

Sólidos secos = Producción media de lodo x fracción de sólidos

Tasa diaria = Sólidos secos (kg / semana) x (5d / semanal)

Tasa horaria (kg / h) = tasa diaria / 8

$$\text{Ancho de la banda} = \frac{\text{Tasa horaria (kg / h)}}{C \text{ arga de la banda (kg / m} \cdot \text{h)}}$$

Sólidos del lodo alimentado = sólidos en la torta + sólidos en el líquido

Q de lodo + Q de agua de lavado a contracorriente = Q del líquido filtrado + Q de la torta de lodo

Q = Caudal

$$\text{Captura de sólidos} = \frac{\text{Sólidos en la alimentación} - \text{sólidos en el líquido filtrado}}{\text{sólidos en la alimentación}}$$

4.3.5 Ecuaciones básicas de diseño para lechos de secado

- 1) Los pasos del 1 al 5 deberán realizarse en el caso que se tenga la información suficiente para ello, de lo contrario deberán asumirse los valores más se ajusten a l caso de diseño de acuerdo a la experiencia del proyectista.
- 2) Para el diseño de lecho de secado de lodos se deberan tener en cuenta los siguientes paso para el diseño de éstos.
- 3) Llenar una probeta de vidrio (25 – 50 mm) conteniendo una base de arena con lodo a ensayar hasta un espesor de 200 a 300 mm (prevista a la unidad a diseñar).
- 4) Conseguir un drenaje completo del agua contenida en el lodo. Esto requiere de 1 a 3 días dependiendo de las características del lodo y de su humedad inicial (fase correspondiente a la percolación entre los mecanismos de secado).
- 5) Una vez terminado el drenado, se debe de quitar la torta de lodo de la probeta. Utilizar dicha parte para conocer su humedad (secada en el horno y pesada antes y después).
- 6) Colocar la torta de lodo en un recipiente abierto que permita la evaporación. Comprobar la muestra periódicamente hasta que se alcance el estado de secado deseado (cuando la torta se puede levantar).
- 7) La diferencia entre los peso del agua (humedad) al final del paso 3 y 4, que corresponde al agua que hay que evaporar (fase de evaporación del mecanismo de secado). El agua a evaporar se expresa en mm evaporados.
- 8) Obtener los datos meteorológicos de la zona (histórico de por lo menos 10 años) para lluvia (mm) y evaporación (mm), tabulados por meses.
- 9) Preparar una tabla con los datos de precipitación multiplicados por 0.57 para cada mes. Basándose en datos experimentales según los cuales el 43% de la lluvia pasa a la torta quedando un 57% a evaporar. Esta fracción varía, de hecho, con la intensidad de las lluvias y variación. En las zonas donde las lluvias son intensas y de corta duración, pueden esperarse valores inferiores al 57%. Preparar también en forma de tabla los datos de mm de evaporación multiplicados por 0.75 para cada mes. Basándonos en la evidencia que la evaporación media del lodo húmedo es un 75% la del agua libre.
- 10) Calcular la velocidad de evaporación media (mm/d) para cada mes.
- 11) En base a los valores del paso 8, determinar el tiempo requerido para evaporar los mm de agua calculados de lluvia (días) para cada mes.
- 12) Obtener para cada mes el tiempo total para la evaporación del agua, es decir, la del lodo, calculado en el paso 9, más la de la lluvia calculada en el paso 10. Tomar el tiempo más largo de los obtenidos en el paso 11 como dato de diseño y calcular los m² requeridos.

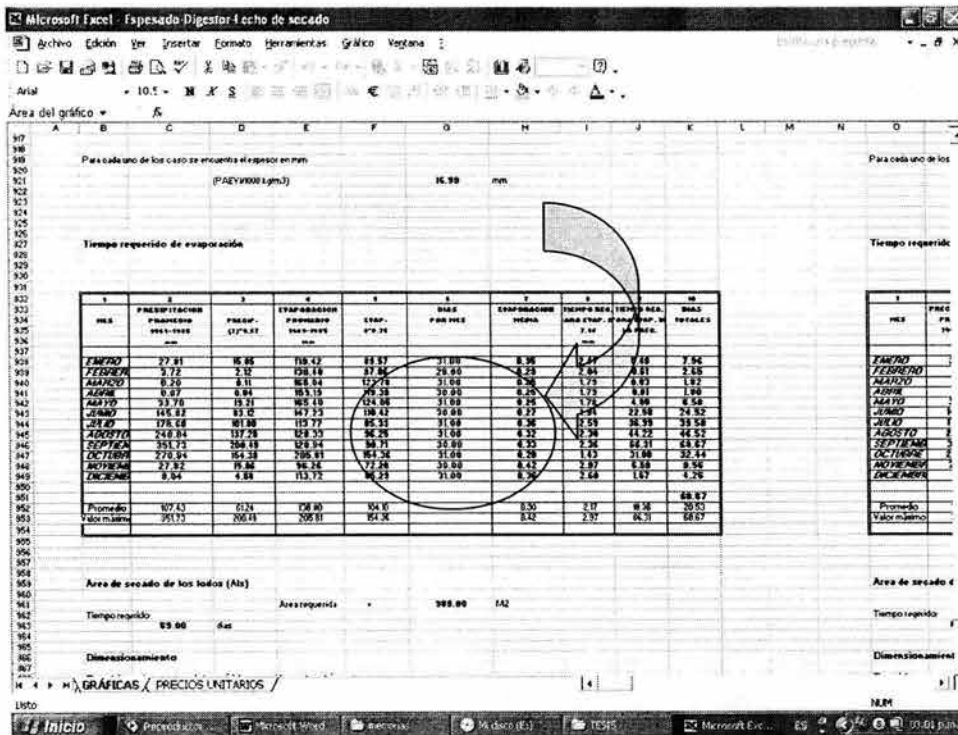
$$\text{Área} = \frac{\text{kg de lodo seco} \times 28d}{\text{kg de agua} / \text{m}^2}$$

TABLA 4.4 TIEMPO DE EVAPORACIÓN REQUERIDO PARA LECHOS DE SECADO.

(1) mes	(2) Precipitación (mm)	(3) col (2) x 0.57	(4) Evaporación (mm)	(5) col (4) x 0.75	(6) Días por mes	(7) Evap media Col (6) / (5) (mm/d)	(8) Tiempo req. para evap. 12.5 mm 12.5 x col (7)	(9) t req. Para evap precip. col (3) x (7)	Días Totales Col (8) + col (9)
1									
2									

En el desarrollo de las memorias de cálculo anexas, es primordial señalar que se integraron todas las operaciones (para cada proyecto) y con diferentes volúmenes de diseño, los parámetros utilizados fueron aquellos valores frontera (inferior o superiores), esto fue con el objeto de utilizar la interpolación y evitar así especulaciones en los datos correspondientes. En las memorias, las celdas en las que los números o valores se encuentren en rojo (ver figura 4.7), son aquellos parámetros requeridos para el diseño los cuales se pueden modificar, los números en negritas son resultantes del algoritmo (S) empleado (s).

FIGURA 4.7 MANEJO DE PARÁMETROS



4.4 Desarrollo del método.

En la programación dinámica, los datos se presentan en una matriz, colocando las emisiones de productos finales de cada proceso, fijando ya sea la cantidad total de inversión o la cantidad de contaminantes a emitir, en nuestro caso se fijará la cantidad de biosólidos a producir como producto final.

TABLA 4.5 MATRIZ DE PROYECTOS

OPERACIÓN UNITARIA EMISIÓN		PROYECTO 1 EMISIÓN TOTAL AL AÑO (M ³ /AÑO)	PROYECTO 2 EMISIÓN TOTAL AL AÑO (M ³ /AÑO)	PROYECTO 3 EMISIÓN TOTAL AL AÑO (M ³ /AÑO)
Proceso de tratamiento	Eficiencia	Costo (en \$/ tonelada o Kg. producido)		
Espesado	%	Costo 1	Costo 7	Costo 13
Estabilización	%	Costo 2	Costo 8	Costo 14
Acondicionamiento	%	Costo 3	Costo 9	Costo 15
Deshidratación	%	Costo 4	Costo 10	Costo 16
Desinfección	%	Costo 5	Costo 11	Costo 17
Reducción térmica	%	Costo 6	Costo 12	Costo 18

En la parte derecha de la matriz (**Tabla 4.5**), se colocan los procesos o tratamientos seleccionados, la segunda columna es utilizada para fijar la eficiencia del proceso o tratamiento en cuestión. Una vez definidos los valores de las primeras dos columnas, se colocan los proyectos seleccionados colocando en sus partes aplicables los valores correspondientes.

Si se fija el costo de la inversión inicial, el recurso debe de distribuirse de una forma óptima de manera secuencial entre los procesos que se piense implementar del proyecto cuidando de no sobrepasar el valor máximo de emisión, previamente fijado por el proyectista.

Cada uno de las operaciones ($t = 1, 2$ emitirá un parte de la emisión o eficiencia fijada en el sistema y el óptimo será el que presente menor costo en dicha etapa.

Es necesario comentar la que la eficiencia del proceso se basa en la cantidad de residuos por emitir, siendo $100 - \text{la eficiencia}$, ya que de este modo se cuantificará la cantidad de producto que falta por emitir o volumen a disponer en el proceso siguiente, hasta encontrar el óptimo (mínimo) más viable en el proceso de selección de alternativas

X_t = Emisión de biosólidos por la fuente t (en m^3 / por año)

Así los valores de x_1 , x_2 y x_3 son:

<u>Proyecto 1</u>		<u>X₁</u>	
1. Espesado (proyecto1)	(% de reducción) x emisión total		X _{1,1}
2. Espesado (proyecto 2)	(% de reducción) x emisión total		X _{2,1}
3. espesado (proyecto 3)	(% de reducción) x emisión total		X _{3,1}
.	.	.	.
.	.	.	.
n	(% de reducción) x emisión total		X _{n,1}

De igual forma se hace para los otros dos proyectos a evaluar.

Por lo tanto si $\Omega_1 = X_1 \{x_{1,1}, x_{2,1}, x_{3,1}\}$, de igual forma para Ω_2, Ω_3 por lo que:

Los costos involucrados, Ct (Xt) con las variables de decisión Xt son:

<u>X₁</u>	<u>C₁ Costo1(X₁)</u>
X _{1,1}	Costo1(x _{1,1})
X _{2,1}	Costo1(x _{2,1})
X _{3,1}	Costo1(x _{3,1})
.	.
.	.
.	.
n	Costo1(x _{n,1})

Anteriormente se deben de definirse que procesos debe de incluirse en cada proyecto, para encontrar los costos asociados al todo el tratamiento. Puesto que se deben de asignar de forma óptima los valores de X₁, para la fuente o etapa 1 de X₂, de igual manera para la etapa tres del tren de tratamiento óptimo, considerando que el costo debe de ser mínimo, la variable de estado "St" se define de manera adecuada en términos de la cantidad de recurso disponible cuando se tiene un presupuesto asignado, después de considerada la etapa t es decir:

St = Cantidad de m³ (en kg/año) que falta por emitirse después de la emisión por las fuentes (etapas) de la 1 a la t.

Entonces,

S₁ = Cantidad de biosólidos que falta por emitirse después de la emisión en la etapa 1.

S₂ = Cantidad de biosólidos que falta por emitirse después de la emisión en la etapa 1 y 2.

S₃ = Cantidad de biosólidos que falta por emitirse después de la emisión en la etapa 1,2 y 3 = 0.

S₀ = Cantidad de de biosólidos que falta por emitirse después de la emisión por ninguna de las fuentes consideradas (a lo que debe de llegar a emitirse después de todos los proceso), la cual fijamos de acuerdo a la eficiencia que se quiera alcanzar).

Por lo que el método de optimización conlleva, a la minimización de los costos con la menor cantidad de biosólidos producidos al final del proceso esto es:

$$\begin{aligned} \text{MIN } Z &= \sum_{t=1}^n C_t(X_t) \\ S_0 &\leq \text{Emisión fijada} \\ S_1 - S_0 + X_1 &= 0 \\ S_2 + S_1 + X_2 &= 0 \\ S_3 &= 0 \\ X_t &\in \Omega_t \end{aligned}$$

De la función anterior se desprende que la función de costo óptimo es:

$F_t(S_t)$ = Costo mínimo (en \$/ año), por las primeras t etapas (fuentes), faltando por emitirse S_t por lo cual para la etapa 1:

$$\begin{aligned} f_1 s_1 \quad Z &= \text{MIN } C_1 X_1 \\ S_0 &\leq \text{Emisión fijada} \\ X_1 &\in \Omega_1 \\ X_1 &\leq S_0 - S_1 \end{aligned}$$

La función óptima para la etapa dos queda:

$$\begin{aligned} f_2 s_2 \quad Z &= \text{MIN} [C_2 X_2 + \text{MIN}(C_1 X_1)] \\ X_2 &\in \Omega_2, X_1 \in \Omega_1 \\ f_2 s_2 \quad Z &= \text{MIN} [C_2 X_2 + f_1(S_2 X_2)] \\ X_2 &\in \Omega_2, X_1 \in \Omega_1 \end{aligned}$$

Quedando para la tercera etapa la ecuación

$$\begin{aligned} f_3 s_3 \quad Z &= \text{MIN} [C_3 X_3 + \text{MIN}(C_2 X_2)] \\ X_3 &\in \Omega_3 \\ S_3 &= 0 \end{aligned}$$

Siendo la ecuación general:

$$\begin{aligned} f_t s_t \quad Z &= \text{MIN} [C_t X_t + f_{t-1}(S_t X_t)] \\ X_t &\in \Omega_t \end{aligned}$$

En cada una de las etapas se deberán utilizar los datos obtenidos en las memorias de cálculo (cantidad de biosólidos producidos en cada operación), para desarrollar cada uno de los estados involucrados.

En cada etapa se busca el valor más bajo que aparezca la mayor cantidad de veces, empezando de la última fase hasta la fase inicial, para encontrar el tratamiento más viable para el proyecto en cuestión.

Para el ejemplo que se ha estado manejado se harán algunas consideraciones, ya que no se cuenta con algún presupuesto asignado para tal fin, (construcción de tren de tratamiento de biosólidos para las plantas de tratamiento de aguas residuales en estudio), por lo que nos basaremos en las emisiones de biosólidos emitidas por cada operación unitaria, involucrada en el tren de tratamiento, los costos de operación y mantenimiento, que en muchas ocasiones, a largo plazo, pueden sobrepasar los costos de inversión inicial (dichos datos se encuentran en el **Anexo C**).

Tabla 4.6 CANTIDAD DE BIOSÓLIDOS PRODUCIDOS POR PROYECTO

OPERACIÓN UNITARIA EMISIÓN		PROYECTO 1 EMISIÓN TOTAL AL AÑO 42,625 (M ³ /AÑO)	PROYECTO 2 EMISIÓN TOTAL AL AÑO 42,625 (M ³ /AÑO)	PROYECTO 3 EMISIÓN TOTAL AL AÑO 42,625 (M ³ /AÑO)
Proceso de tratamiento	Eficiencia Del proceso	Cantidades de biosólidos producidos por cada operación unitaria		
Espesado	30 %	29,141.00	29,141.00	29,141.00
Estabilización	25 %	20523.95	29,141.00	20523.95
Deshidratación	35 %	3,650.00	-	2,328.70
Eficiencia total	90 %			

Proyecto 1 = Espesado, estabilización aerobia, deshidratación mecánica (filtro banda)

Proyecto 2 = Espesado, estabilización química

Proyecto 3 = Espesado, estabilización aerobia, deshidratación mecánica (filtro banda)

Una vez sacados los costos de operación por cada metro cúbico de cada proceso se procede al cálculo de las alternativas.

Las emisiones de biosólidos son multiplicadas por la eficiencia, ya que de este modo se cuantificará la cantidad de producto que falta por emitir o volumen a disponer en el proceso siguiente, hasta encontrar el óptimo (mínimo) más viable en el proceso de selección de alternativas.

TABLA 4.7 MONTO REQUERIDO EN EL MANEJO DE BIOSÓLIDOS PRODUCIDOS POR PROYECTO

PROYECTO	ESPEADO	ESTABILIZADO	DESHIDRATACIÓN
<i>Proyecto 1</i>	32,825.76 ←	1,118,078.88	1,296,457.20
<i>Proyecto 2</i>	32,825.76	4,320,110.40	
<i>Proyecto 3</i>	32,825.76 ←	1,118,078.88 ←	1,045,239.60

En la **tabla 4.7** se observa que una vez que se han terminado los cálculos etapa por etapa. En esta aplicación la primera etapa dio como resultado un valor igual para el proceso de espesado, en la segunda etapa se repiten dos valores en estabilizado y finalmente se encuentra el valor más viable en la tercera etapa. Generalmente en las evaluaciones dentro de la programación lineal dinámica, se busca encontrar el valor monetario más bajo que se repita el mayor número de veces, encontrando el tratamiento óptimo (dependiendo de las alternativas propuestas), yendo de atrás hacia delante hasta encontrar la combinación adecuada que minimice los gastos de operación y maximice los recursos disponibles para tal fin. En este caso resulta sencillo, una vez que se ha visualizado la tabla para la determinación del tren de tratamiento que más se adecue a la situación, sin embargo algunas veces no resultará tan sencillo el proceso de selección mediante una apreciación rápida de los datos, más bien, esto dependerá del número de operaciones unitarias involucradas y/o del número de proyectos en cuestión que necesiten evaluarse.

TABLA 4.8 COSTO POR OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO POR PROYECTO

OPERACIÓN UNITARIA	PROYECTO 1 EMISIÓN TOTAL AL AÑO 42,625 (M ³ /AÑO)	PROYECTO 2 EMISIÓN TOTAL AL AÑO 42,625 (M ³ /AÑO)	PROYECTO 3 EMISIÓN TOTAL AL AÑO 42,625 (M ³ /AÑO)
	Costo por operación y mantenimiento de cada operación unitaria (considerando gastos de administración e imprevistos)		
Espesado	32,825.76	32,825.76	32,825.76
Estabilización	1,118,078.88	4,320,110.40 (incluye manejo y disposición de biosólidos)	1,118,078.88
Deshidratación (incluye manejo y disposición de biosólidos)	1,296,457.20	-	1,045,239.60
Costo total (\$/año)	2,447,361.84	4,352,936.16	2,196,144.24

En los resultados de la tabla (**Tabla 4.8**) anterior se puede inferir que el tren de tratamiento, que menos inversión requiere para el procesamiento de los biosólidos, es el proyecto 3, siempre y cuando exista disponibilidad en cuanto a la superficie requerida, de lo contrario, el proyecto 1 le sigue en el orden de viabilidad.

CAPITULO 5

CAPITULO 5

CONCLUSIONES

- 1) Los procesos de tratamiento de lodos provenientes de plantas de tratamiento para aguas residuales son muy variados y es necesario tomar evaluar la eficiencia de las operaciones unitarias en los procesos asociados, para tener una visión completa de cada una de las alternativas elegibles, aunque en este trabajo solamente se tomaron en cuenta: el costo de construcción (sin instalación de piezas especiales), costo del mantenimiento, costo de operación, eficiencia y confiabilidad del tratamiento sin involucrar la calidad final requerida por la normatividad correspondiente. Se puede observar en los datos precedentes (presentados en el **Anexo C**) que las diferencias entre los costos de construcción y operación y mantenimiento si se toman por separado podrían sesgar la elección de una u otra forma, ya que si bien es cierto la inversión inicial contribuye en gran medida a la elección del proyecto debiéndose tomar en cuenta los recursos que se deberán utilizar para el correcto funcionamiento de la planta, en el caso del tren de tratamiento compuesto por el espesado y estabilización mediante cal, resulta muy atractivo en aspectos constructivos pero no así en costos operativos como se observa en los datos siguientes:

Tren de tratamiento	Costos por operación	Costos de construcción
Espesado - digestión - lecho	\$ 2,196,144	\$ 12,134,655
Espesado - digestión - filtro banda	\$ 2,447,361	\$ 5,420,753
Espesado - estabilizado con cal	\$ 4,352,936	\$ 1,103,592

- 2) En el presente trabajo el proyecto con menores costos operativos, resultó ser el tren compuesto por las operaciones unitarias de espesado - digestión – lechos de secado (siempre y cuando exista el espacio suficiente para su construcción), aunque al realizarse una revisión de costos operativos, el tren compuesto por las operaciones de espesado - digestión - filtro banda, resultaría ser la opción más atractiva en el proceso de selección debido a los costos asociados con dicho proyecto, ya que en un período de 15 años (al menos) resultaría más rentable en los aspectos evaluados anteriormente.

RECOMENDACIONES

- 1) Es necesario realizar pruebas de tratabilidad y caracterización de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, antes de utilizar los datos bibliográficos debido a que en México estos no son confiables debido a que la gran mayoría de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, no cuentan con un sistema integral de tratamiento de los contaminantes generados.
- 2) Es necesario en la selección de alternativas utilizar métodos multivariantes que midan el impacto social y ambiental en el lugar donde se implantará dicho proceso. Siendo necesario considerar otros métodos de disposición de los lodos tratados provenientes de plantas de tratamiento, en la evaluación de alternativas como la utilización como mejoradores de suelo para la agricultura.
- 3) Para el manejo de datos bibliográficos se requiere de mucha cautela, ya que estos son valores reportados por experiencias anteriores, pero de ningún modo representan valores esperados, ya que las condiciones y características de las aguas residuales cambian de un lugar a otro. El tomar estos valores como valores esperados puede conllevar cometer algunas equivocaciones sino se tienen en cuenta algunos criterios en el diseño y operación de plantas de tratamientos de aguas residuales municipales.
- 4) Para la utilización de cualquier método multivariable en la optimización de sistemas ambientales, es necesario tener presente que lo primordial, es la identificación de las funciones objetivas y de las variables de estado asociadas en la técnica empleada, ya que de eso depende la justificación de la evaluación y selección de alternativas.
- 5) El método debería considerar los factores ambientales como la calidad sanitaria y agronómica para tener una perspectiva mejor en la selección de alternativas.
- 6) Cabe mencionar que las cantidades de biosólidos variables, esto debido a que, generalmente cuando se implementa una alternativa de tratamiento, las plantas no suelen operar con el caudal de proyecto, sino que van operando con volúmenes que varían de acuerdo al crecimiento de la población, hasta que llegan a el caudal de proyecto. Lo que significa que se puede observar el comportamiento de diferentes factores, a diferentes volúmenes, como son: potencia instalada y potencia requerida, consumo de reactivos, cantidades y manejo de biosólidos (costos), lo que resulta de gran importancia para la estimación y proyección de costos a corto, mediano y largo plazo.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFÍA

1. **Dharmappa H, Hassia A. y Hagare P.** (1997) Water Treatment Plant Residuals Management, Wat. Sci. Tech., Vol 35 No. 8, pp 45-46, UK.
2. **Hall Jeremy y Zmyslowska Anna** (1997) Development of Sludge Treatment and Disposal Strategies for Large Conurbations: Case Study – Warsaw, Water Science Tech., Vol., 36 No. 11 pp. 291-298, UK.
3. **CNA** (2000) Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento.
4. **Leschber R y Spinosa Ludovico** (1998) Developments in sludge Characterization in Europe, Wat. Sci. Tech., Vol 38 No. 2, pp 1-7, UK.
5. **Metcalf & Eddy**, (1991) Wastewater Engineering, Treatment, disposal and reuse, McGraw Hill, Singapore.
6. **Mossakowska A., Hellström B. y Hultman B.** (1998) Strategies For Sludge Handling in the Stockholm Region, Wat. Sci. Tech., Vol 38 No. 2, pp 111-118, UK.
7. **Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993.** Que sustituye a la NOM-CRP-001-ECOL/1993 a partir del 29 de noviembre de 1994. “La cual establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
8. **Norma Oficial Mexicana NOM-053-ECOL-1993.** Que sustituye a la NOM-CRP-002-ECOL/1993 a partir del 29 de noviembre de 1994. “Establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al medio ambiente”.
9. **Norma Oficial Mexicana NOM-054-ECOL-1993.** Que sustituye a la NOM-CRP-003-ECOL/1993 a partir del 29 de noviembre de 1994. “Establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos por la Norma”
10. **Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996** “Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales”.
11. **Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996** “Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal”.
12. **Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1996** “Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales”.
13. **Norma Oficial Mexicana NOM-055-ECOL-1993.** Que sustituye a la NOM-CRP-004-ECOL/1993 a partir del 29 de noviembre de 1994. “Establece los requisitos que debe

de reunir los sitios destinados al confinamiento controlado de residuos peligrosos, exceptuando los radiactivos”.

14. **Norma Oficial Mexicana NOM-058-ECOL-1993.** “Que establecen los requisitos para la operación de un confinamiento controlado de residuos peligrosos”.
15. **Norma Oficial Mexicana NOM-083-ECOL-1996.** “Que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales”.
16. **Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002,** “Protección ambiental lodos y biosólidos.-especificaciones y límites máximos permisibles de Contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.
17. **Strauss M., Larmie S. Y Heinss U.** (1997) Treatment of Sludges From On-Site Sanitation –Low Cost- Options. Wat. Sci. Tech., Vol 35 No. 6, pp 129-136, UK.
18. **Qasim S.R.** Waste Water Treatment Plants. Planning, Design, Operations, Holt, Rinehart And Winston, 1992
19. **Research Centre for Eco-Enviromental Sciences, Chinese, Academy of Sciences** (1997) Land Aplication Of Sewage sludge in China, The Science of the Total Enviroment, 197, pp 149-160, China.
20. **U.S. Enviromental Protection Agency,** Proces Design Manual for SludgeTreatment and Disponsal, 1979.
21. **Water Control Pollution Federation,** Operation and Maintenance of Sludge Dewatering Systems, 1985.
22. **Water Control Pollution Federation,** Manual of Practice No.16, Second Edition, 1991..
23. **Water Control Pollution Federation,** Plant Maintenance Program, Manual of Practice OM-3, 1988..
24. **Water Enviromental Federation,** Desing of Municipal Waste Water Treatment Plants, Manual of Practice MOP 8, 1991.
25. **Water Enviromental Federation,** Operation of Municipal Waste Water Treatment Plants, Manual of Practice MOP 11, Fifth edition, 1991.
26. **Hamdy A. Taha,** Investigación de Operaciones, Grupo Editor Alfaomega, 1991.
27. **Augusto Villareal,** Apuntes de Programación Lineal, 1995.
28. **Environmental Protection Agency,** EPA Part 503 Biosolids Rule, 1996^a.
29. **Francis Soler Anguiano,** Apuntes de clase de estadística, 1998.

ANEXO A

FIGURA A1. ÁREA REQUERIDA PARA ESPESADORES POR GRAVEDAD VS VOLUMEN A TRATAR

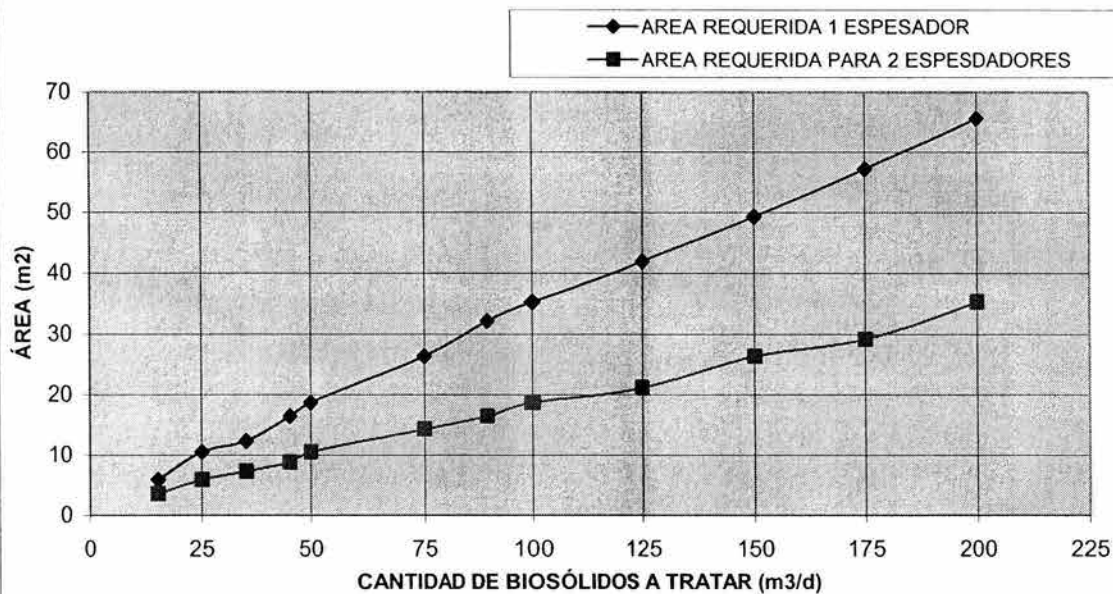
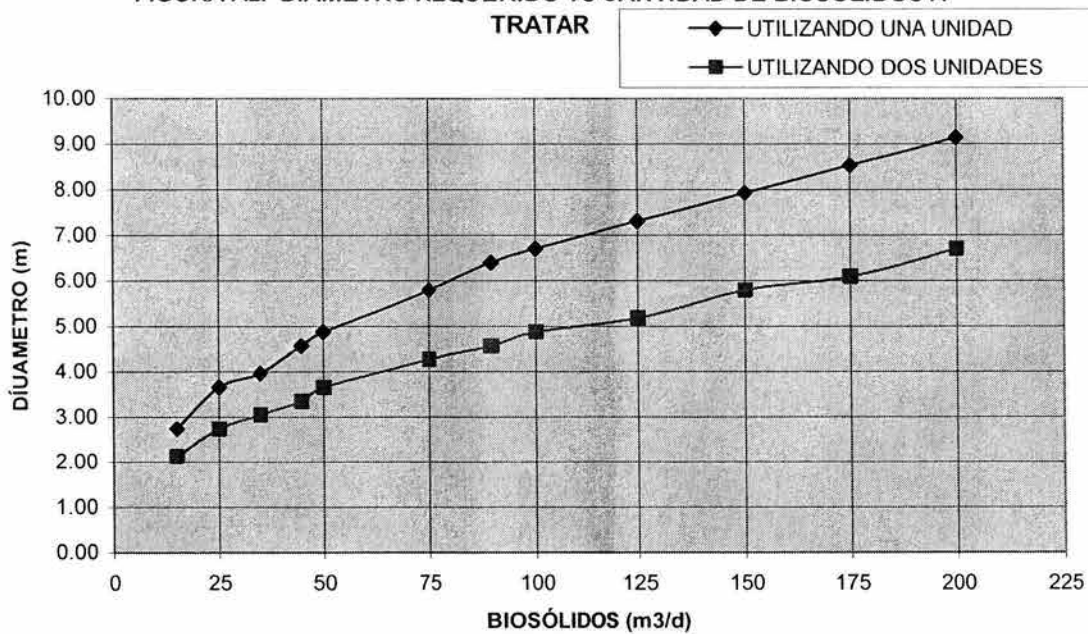
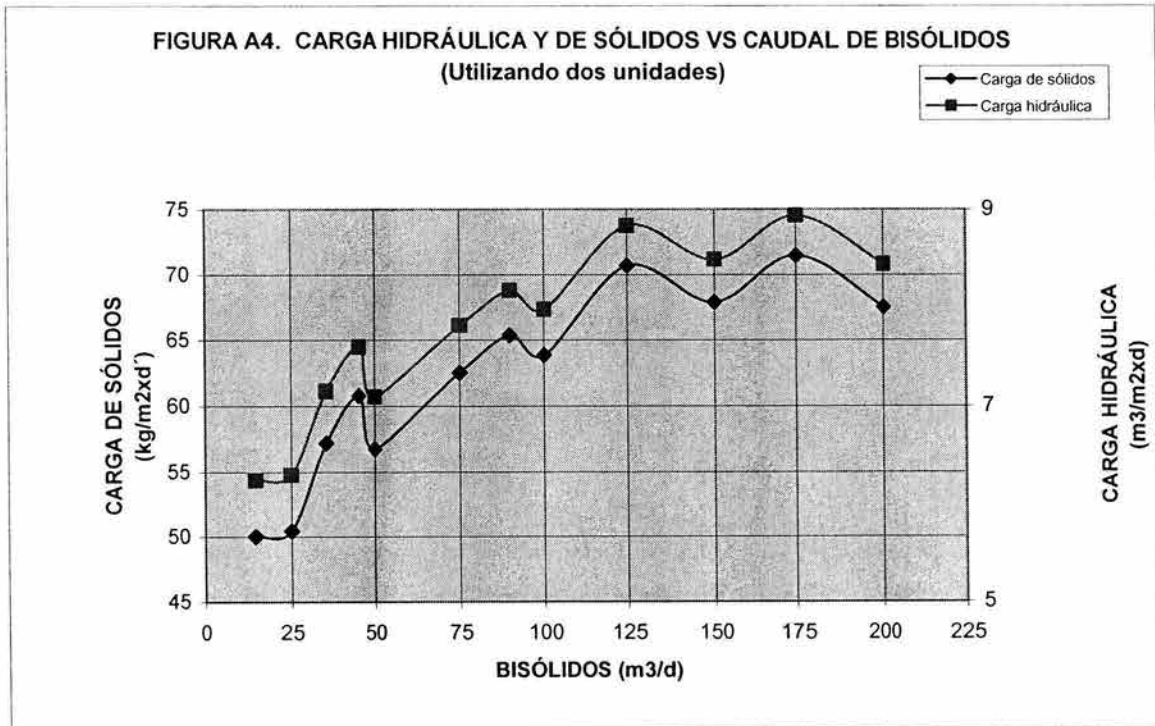
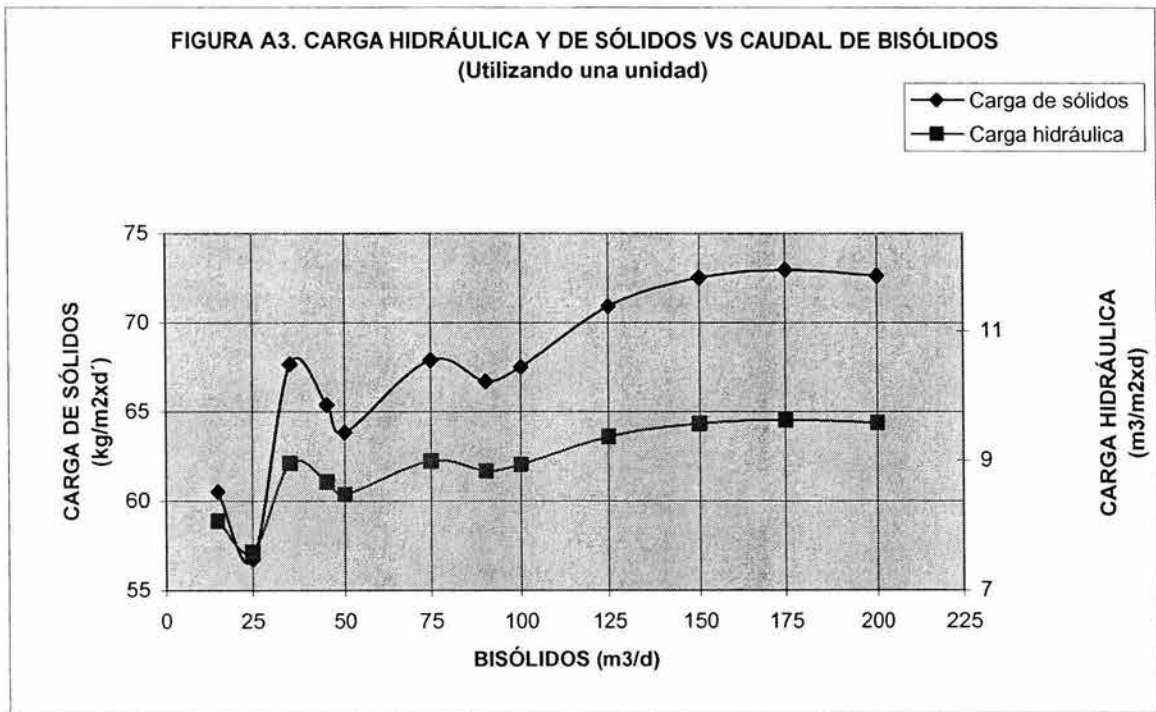
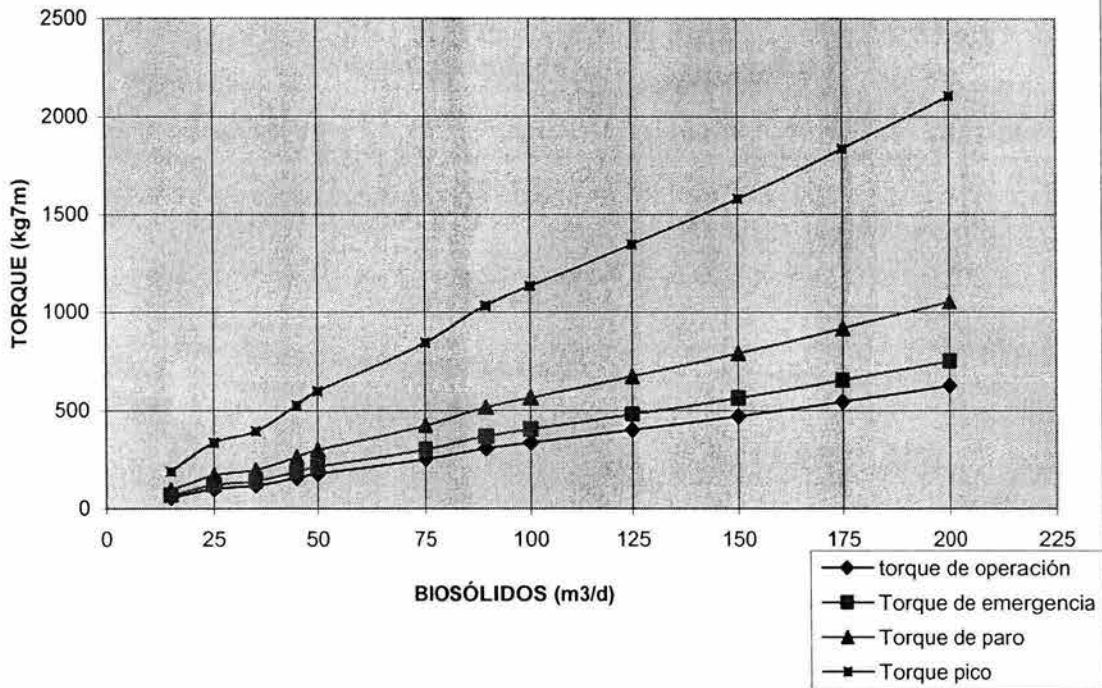


FIGURA A2. DIÁMETRO REQUERIDO VS CANTIDAD DE BIOSÓLIDOS A TRATAR





**FIGURA A5. TORQUES RECOMENDADOS PARA EL DISEÑO DE ESPESADORES
(Utilizando una unidad)**



**FIGURA A6. TORQUES RECOMENDADOS PARA EL DISEÑO DE ESPESADORES
(Utilizando dos unidades)**

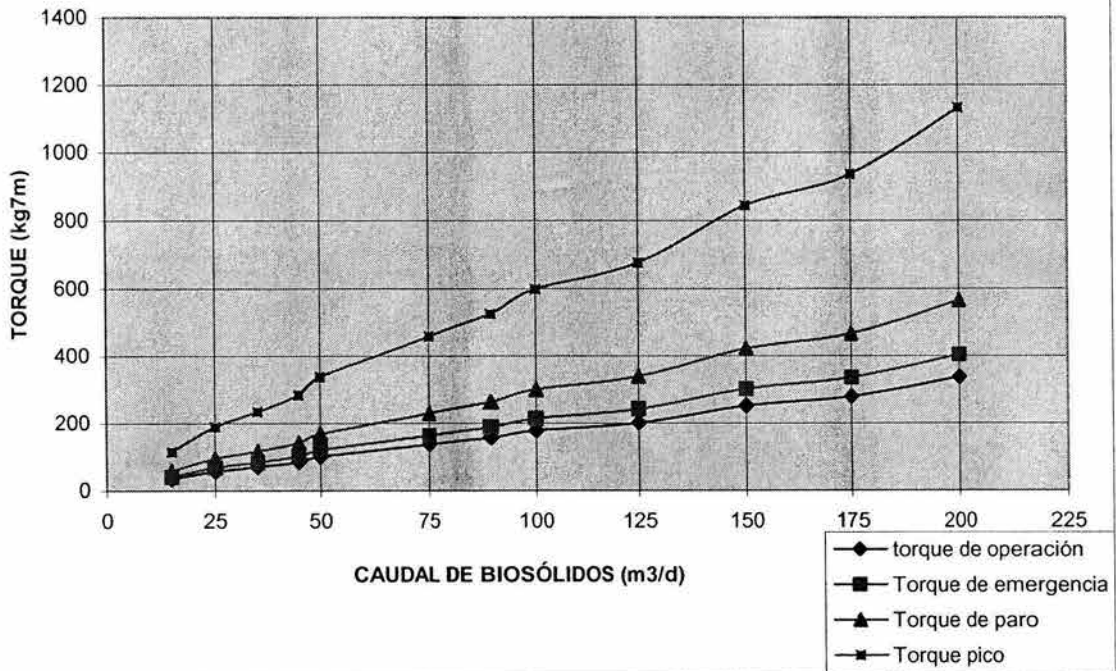


FIGURA A7. CAUDAL DE BIOSÓLIDOS A TRATAR EN DIGESTORES VS. METROS CÚBICOS DE BIOSÓLIDOS DE SALIDA

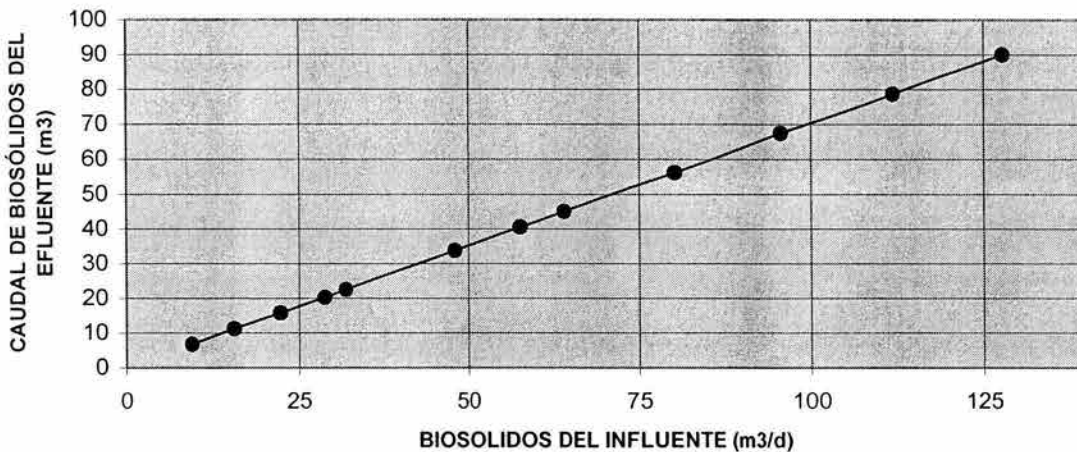
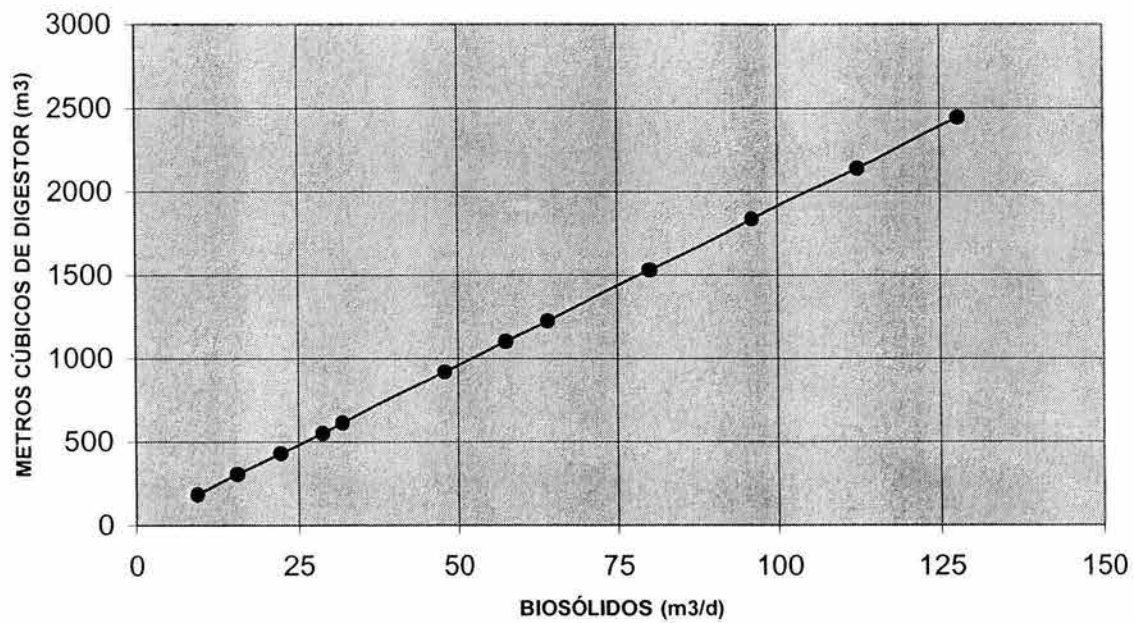
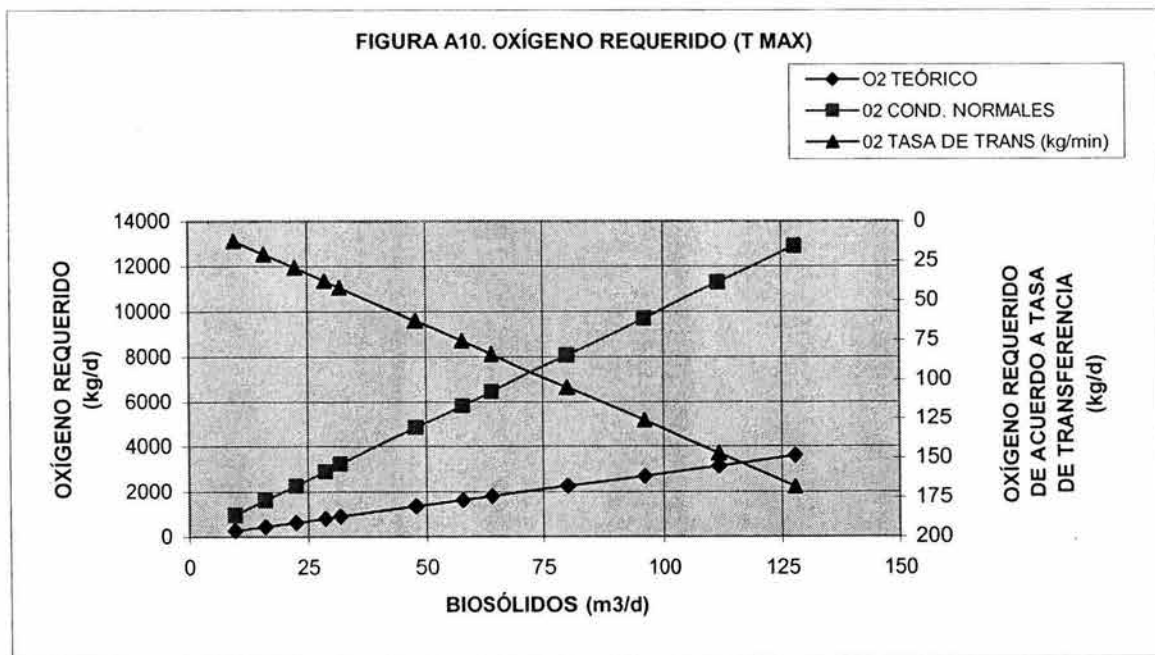
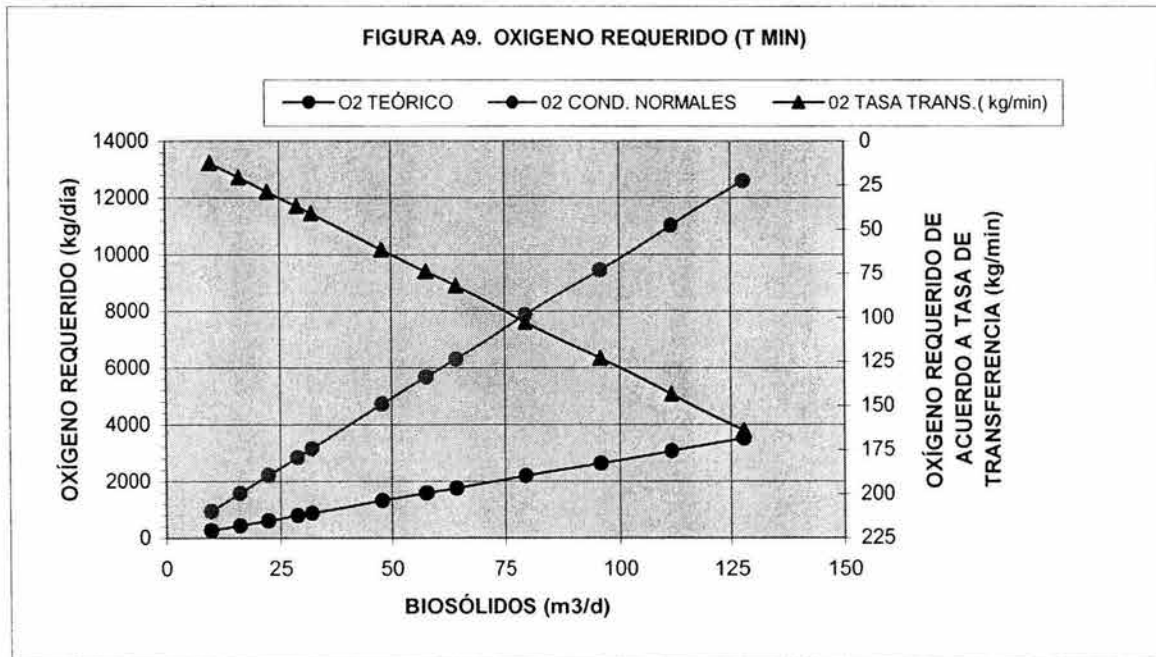
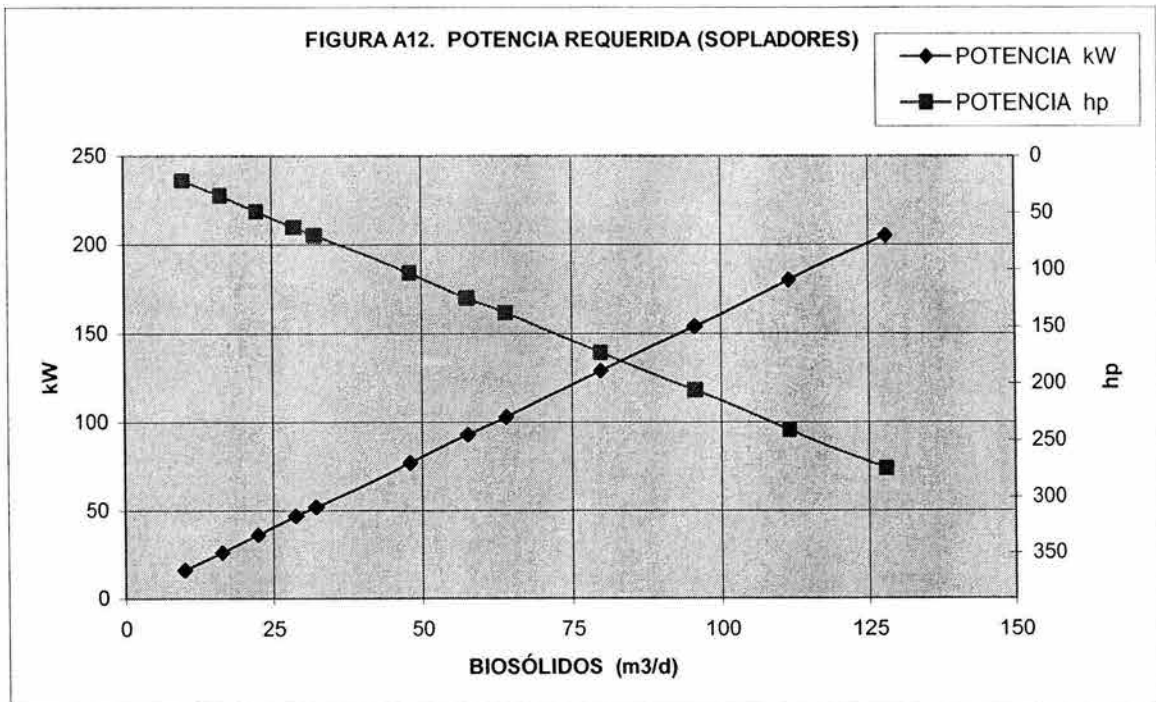
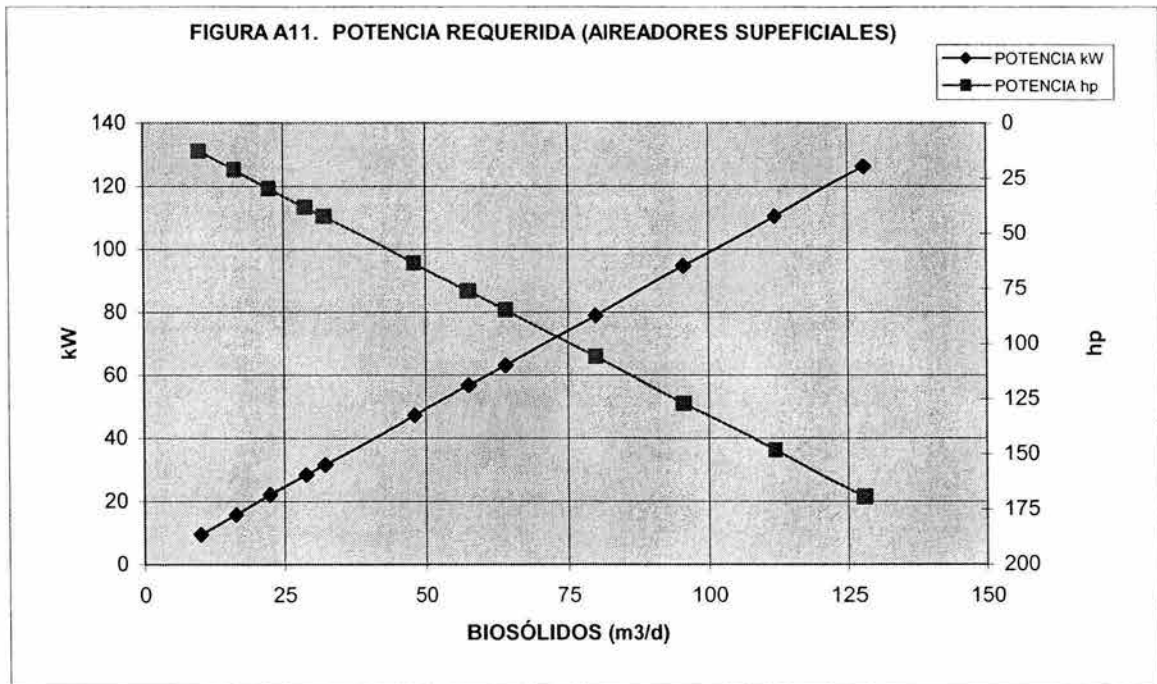
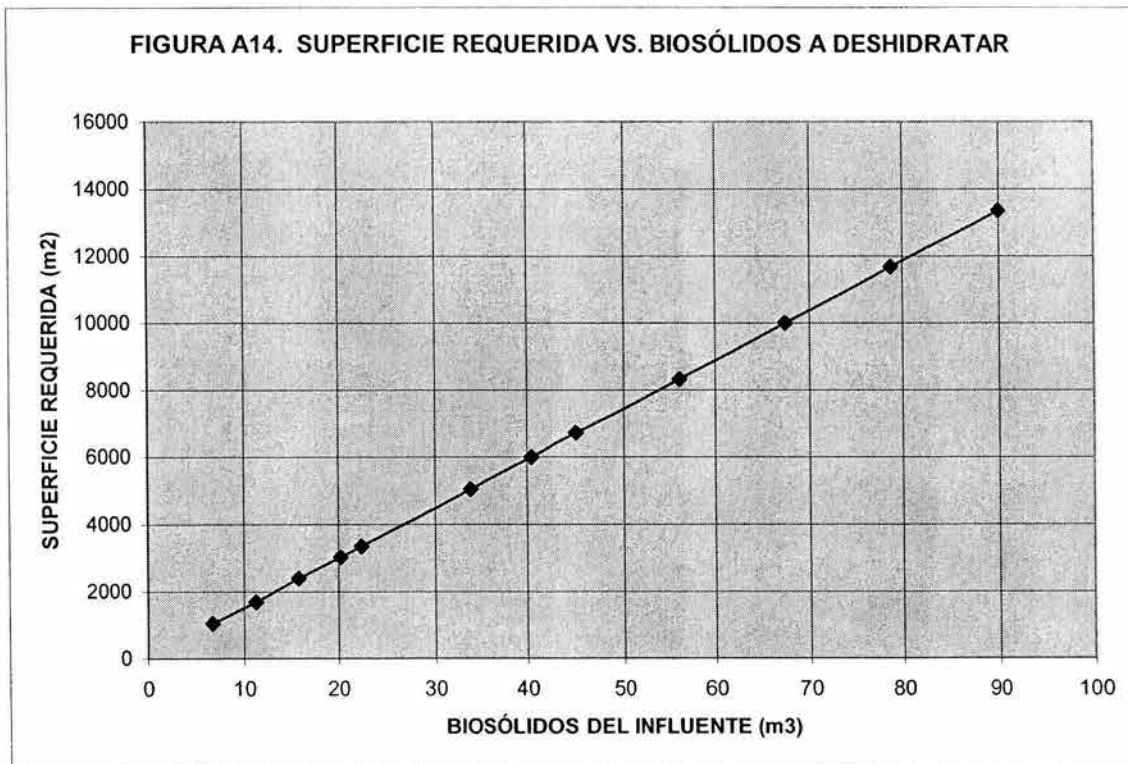
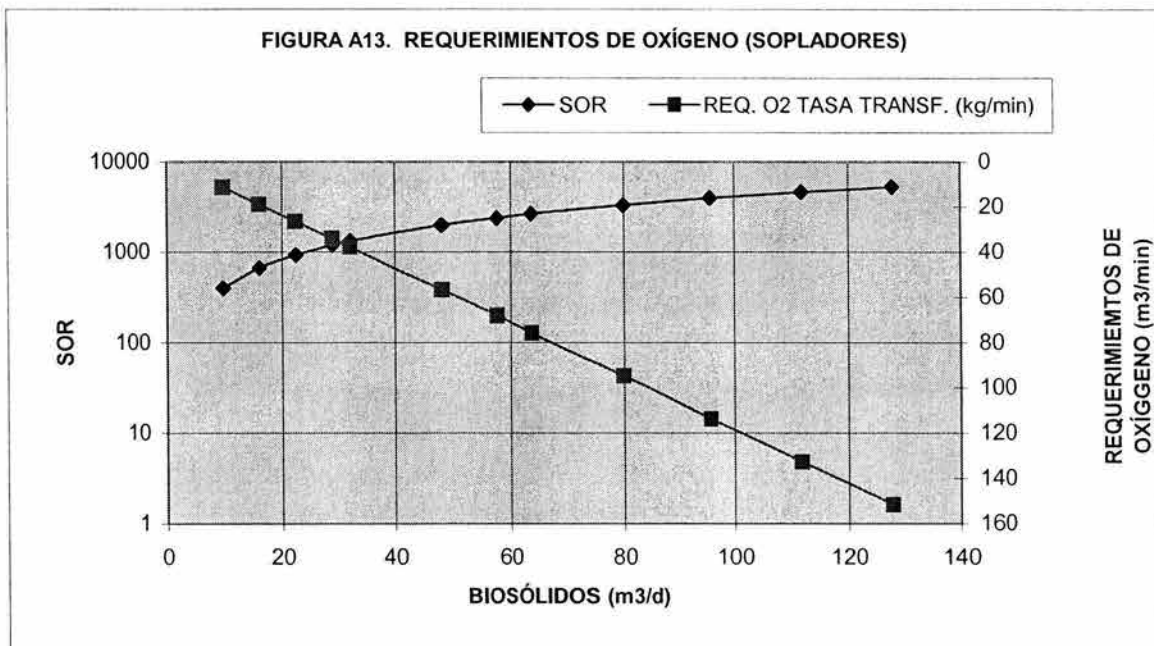


FIGURA A8. CAUDAL DE BIOSÓLIDOS A TRATAR VS. METROS CÚBICOS DE DIGESTOR

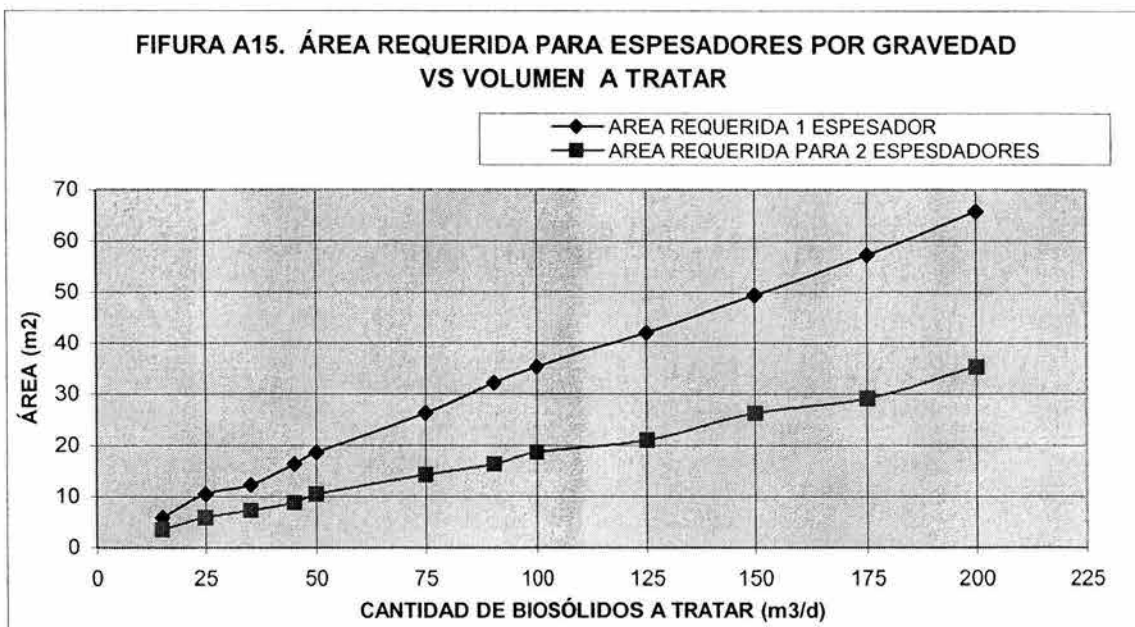








ESPESADO – ESTABILIZACIÓN AEROBIA – FILTROS BANDA



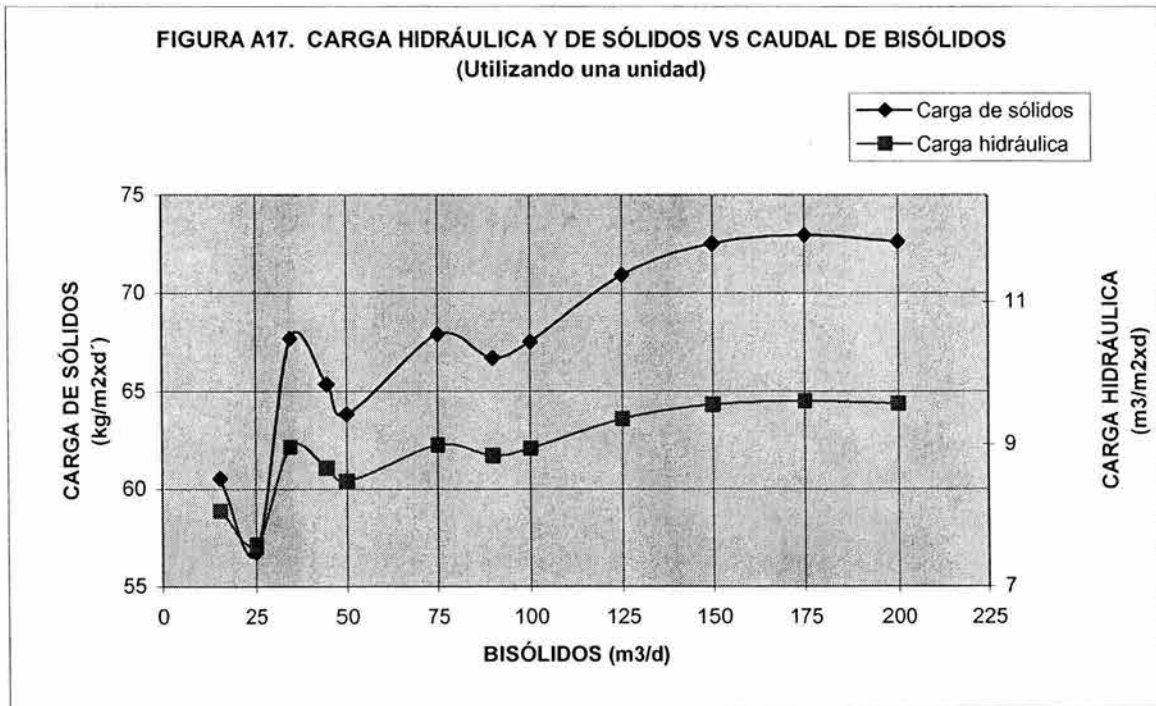
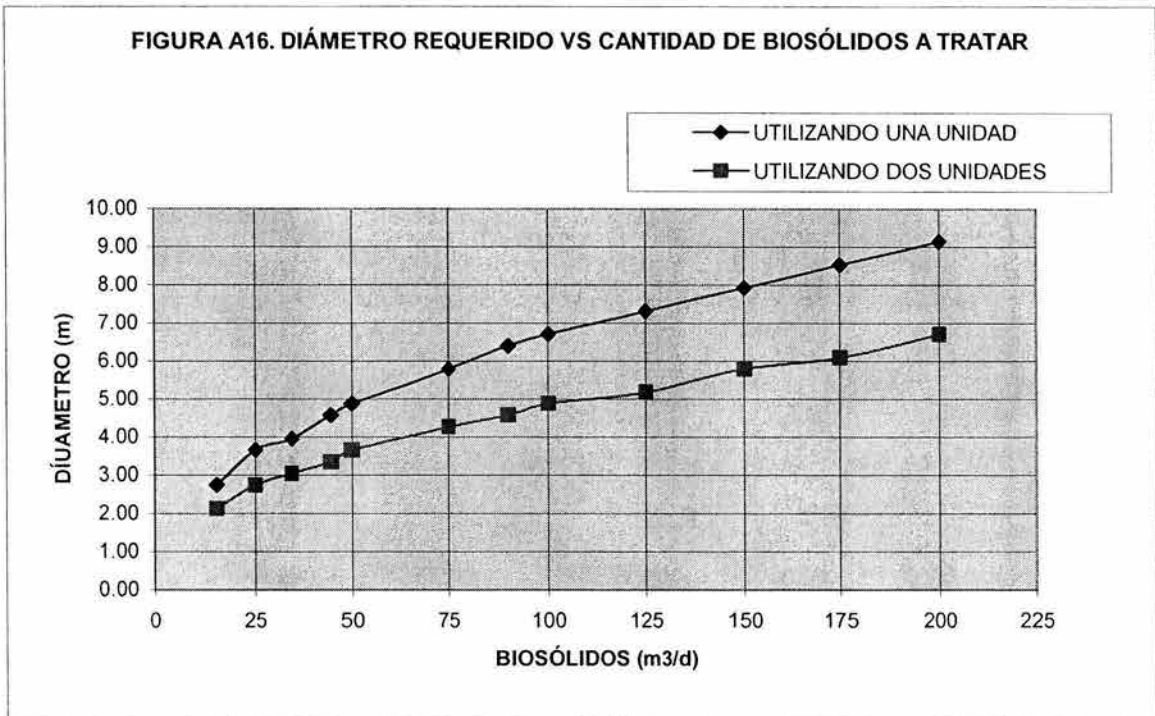


FIGURA A18. CARGA HIDRÁULICA Y DE SÓLIDOS VS CAUDAL DE BISÓLIDOS
(Utilizando dos unidades)

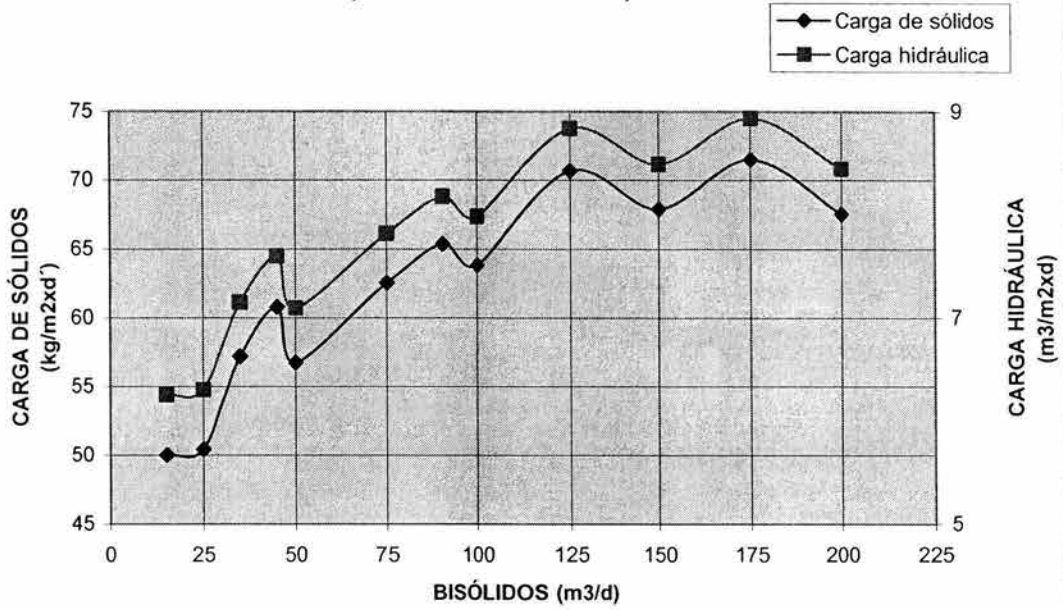


FIGURA A19. TORQUES RECOMENDADOS PARA EL DISEÑO DE ESPESADORES
(Utilizando una unidad)

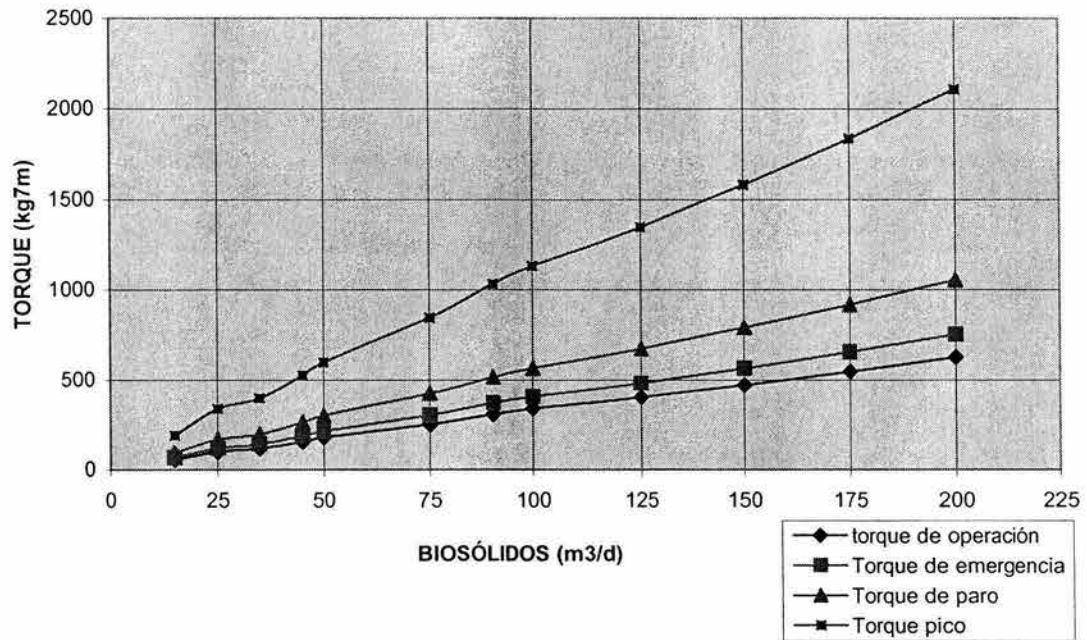


FIGURA A20. TORQUES RECOMENDADOS PARA EL DISEÑO DE ESPESADORES
(Utilizando dos unidades)

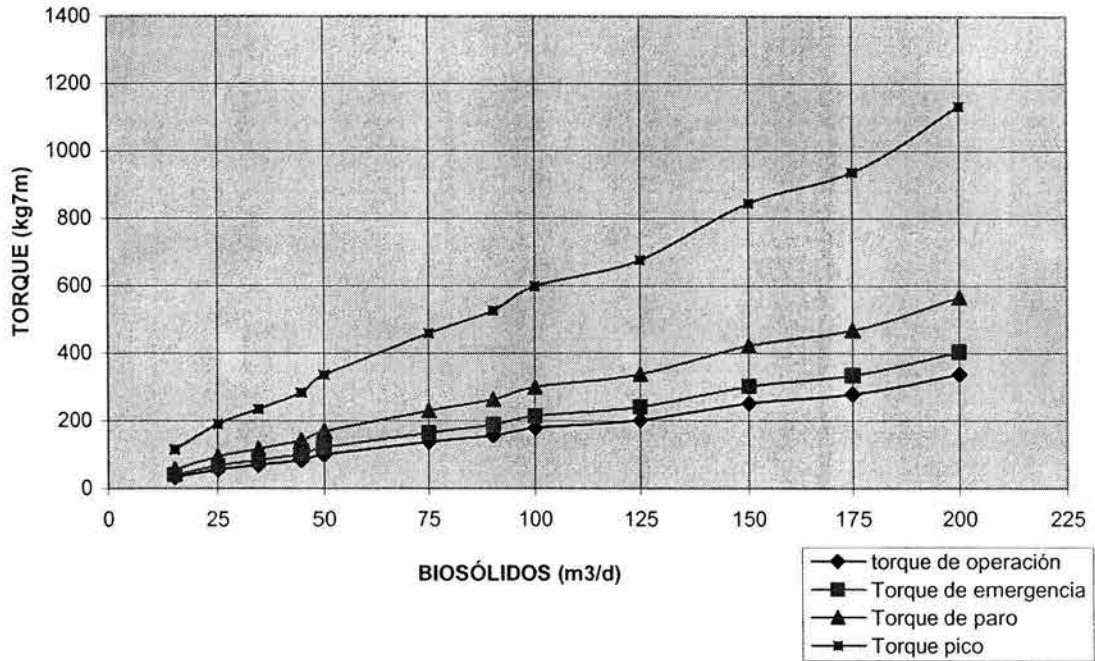
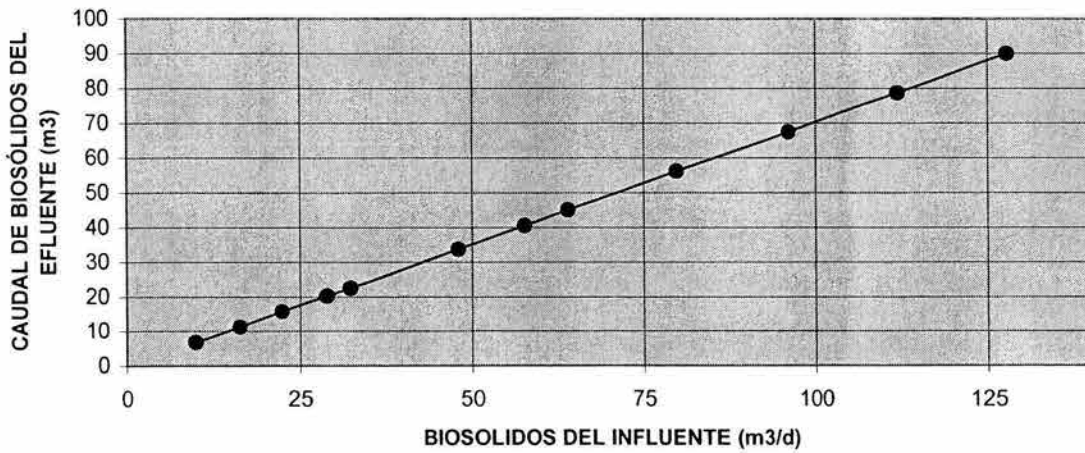


FIGURA A21. CAUDAL DE BIOSÓLIDOS A TRATAR EN DIGESTORES VS. METROS CÚBICOS DE BIOSÓLIDOS DE SALIDA



ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

FIGURA A22. CAUDAL DE BIOSÓLIDOS A TRATAR VS. METROS CÚBICOS DE DIGESTOR

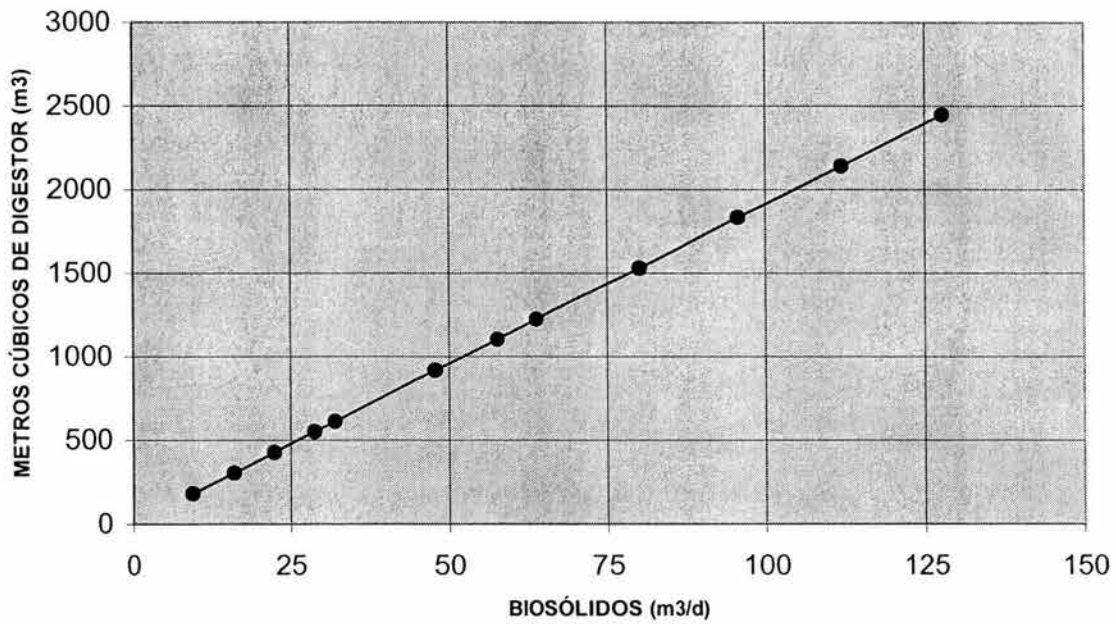
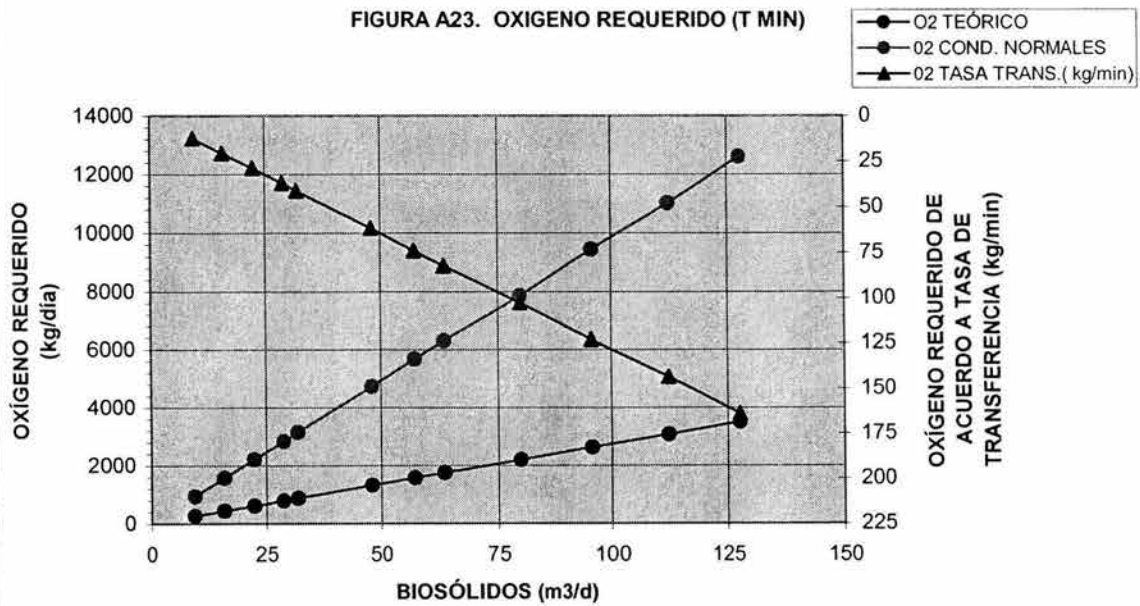
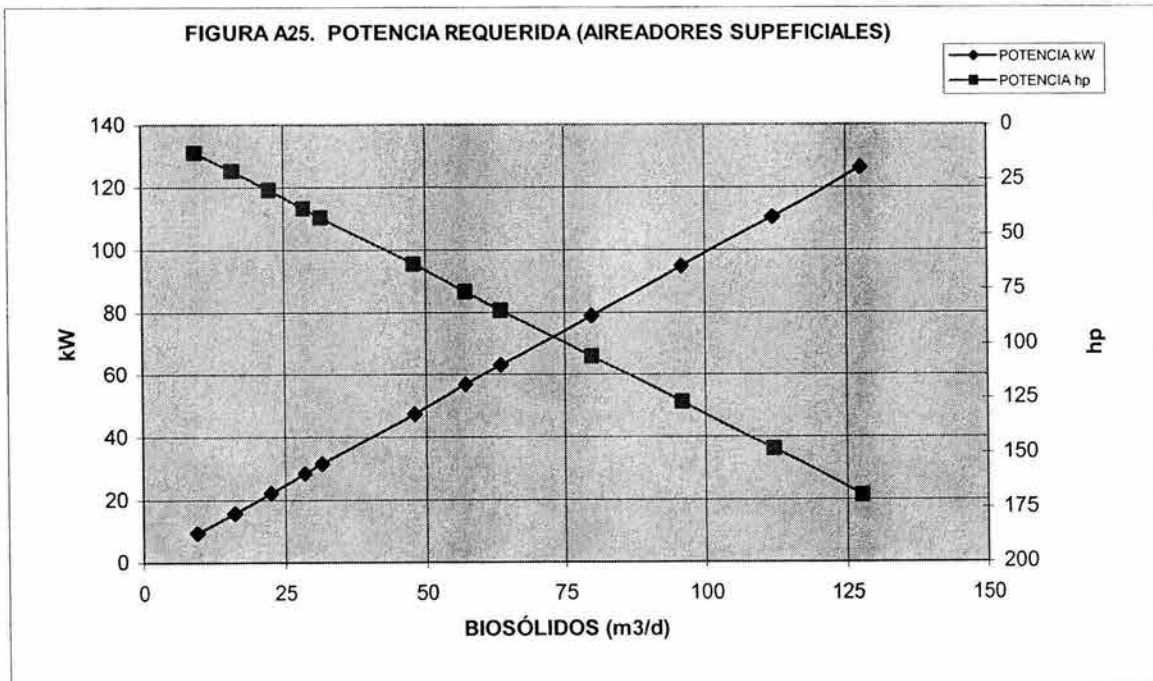
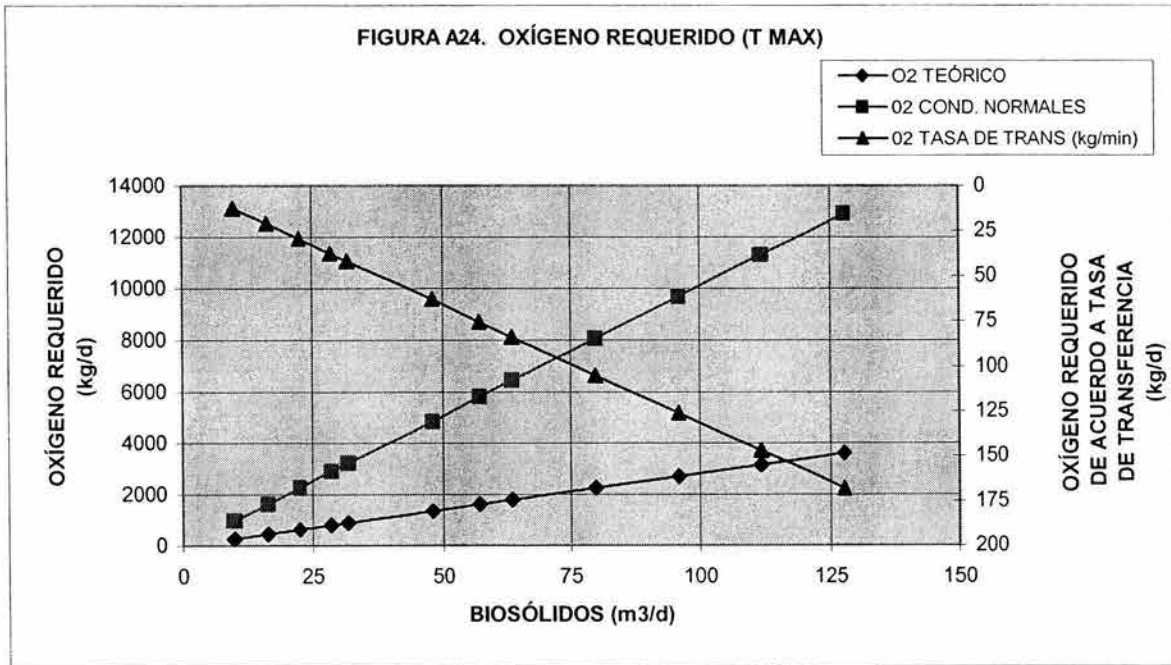


FIGURA A23. OXIGENO REQUERIDO (T MIN)





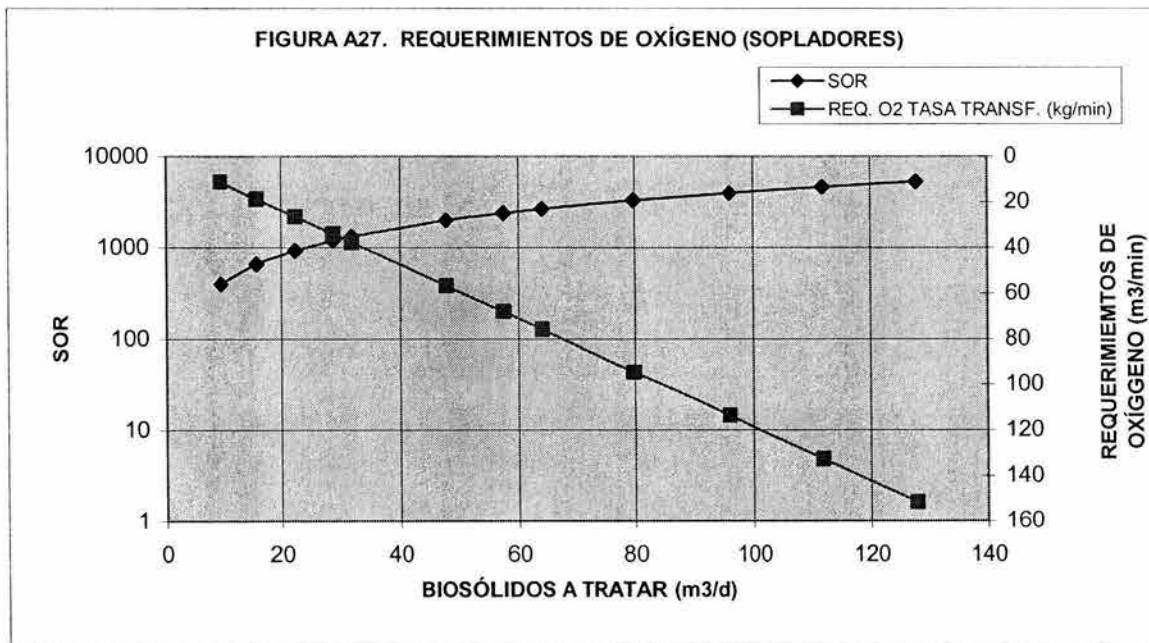
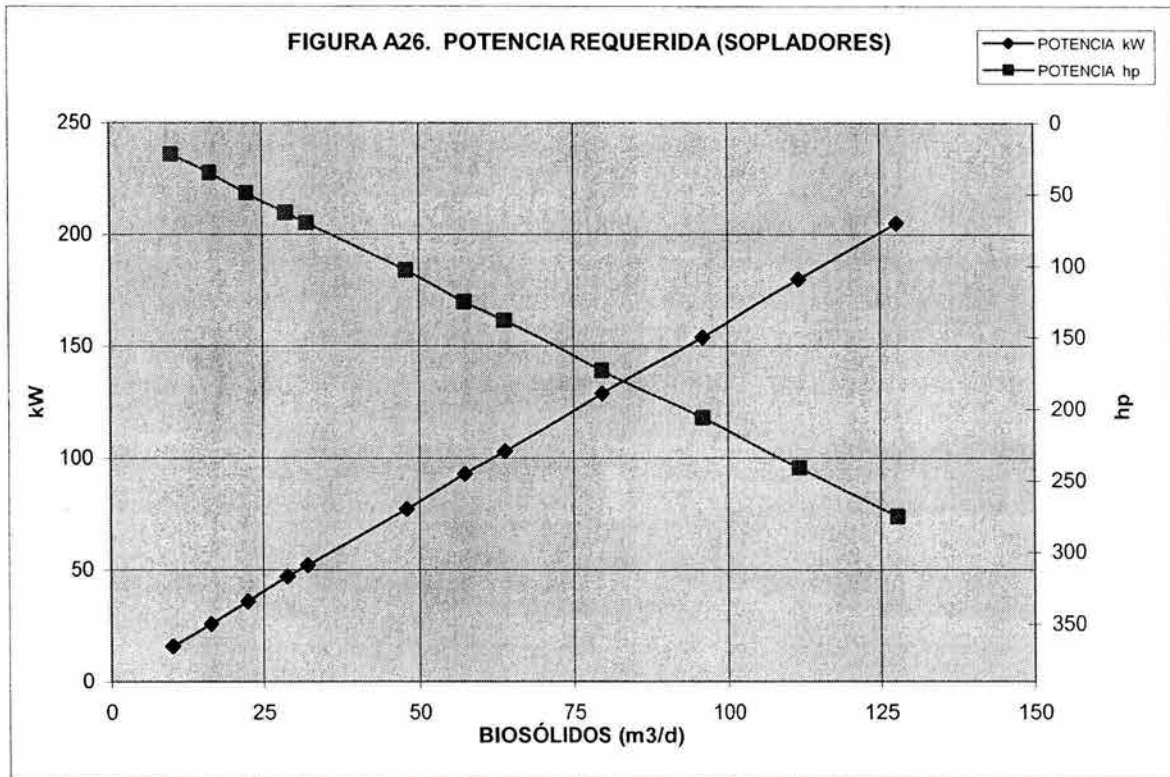


FIGURA A28. m³ DE BIOSÓLIDOS DE ENTRADA VS. BIOSÓLIDOS DE SALIDA PARA FILTROS BANDA

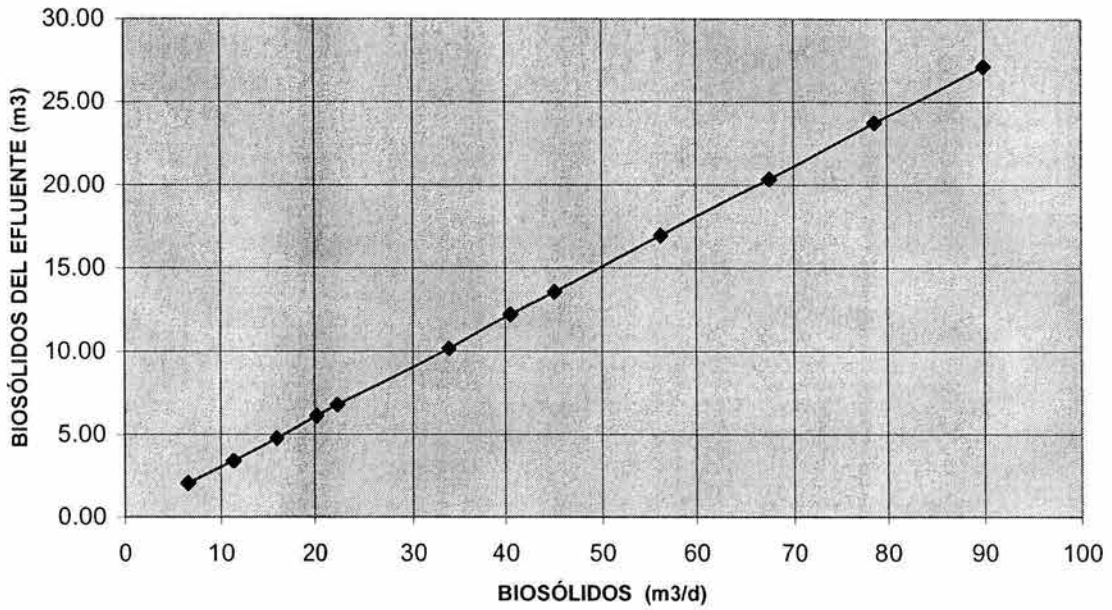
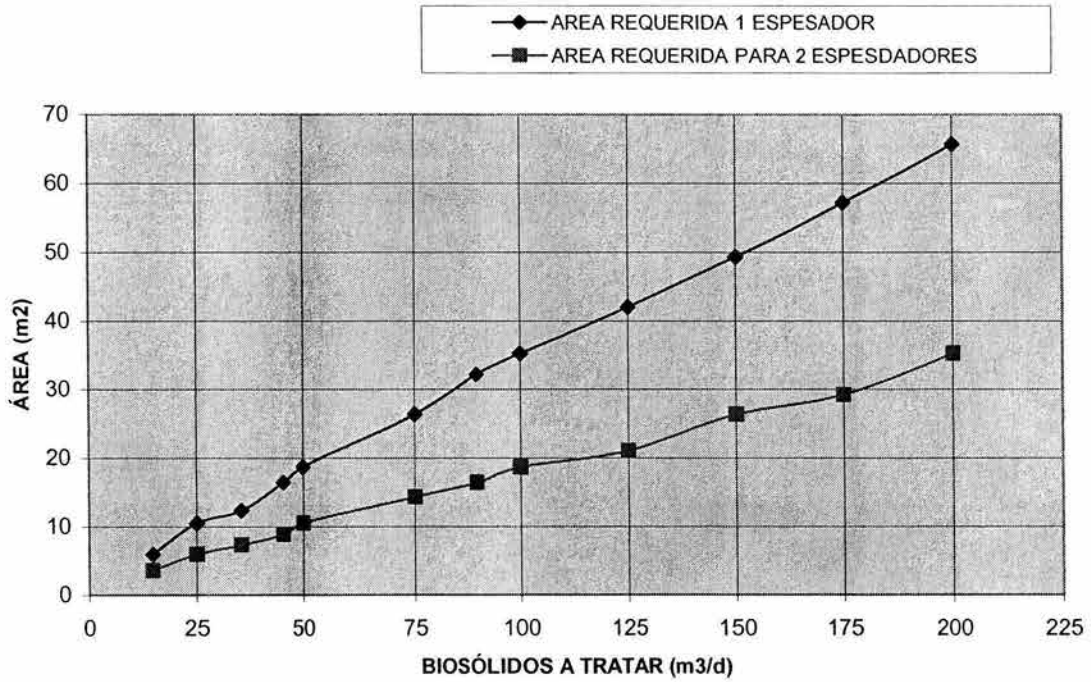


FIGURA A30. ÁREA REQUERIDA PARA ESPESADORES POR GRAVEDAD VS VOLUMEN A TRATAR



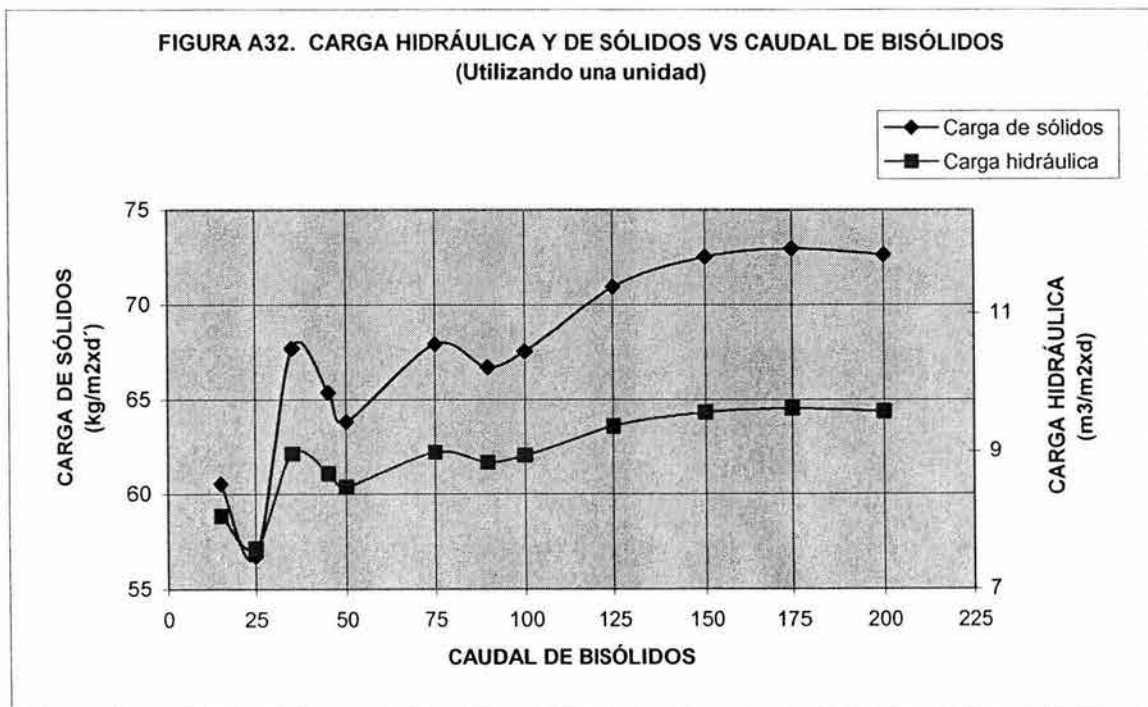
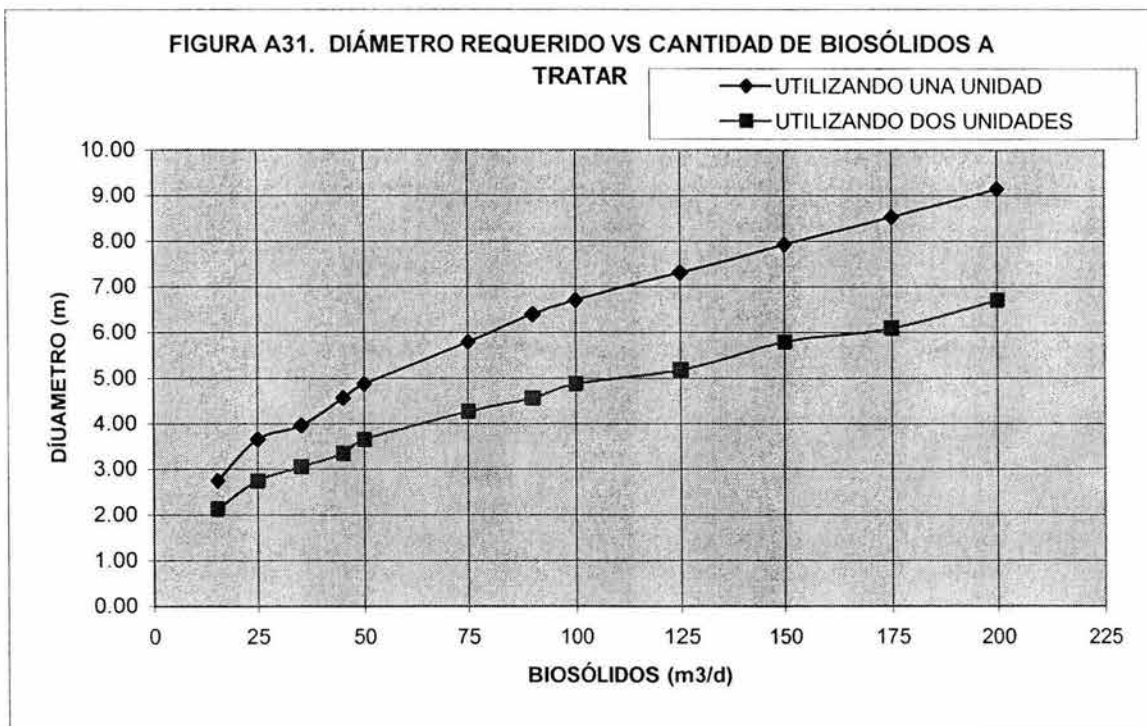


FIGURA A33. CARGA HIDRÁULICA Y DE SÓLIDOS VS CAUDAL DE BISÓLIDOS
(Utilizando dos unidades)

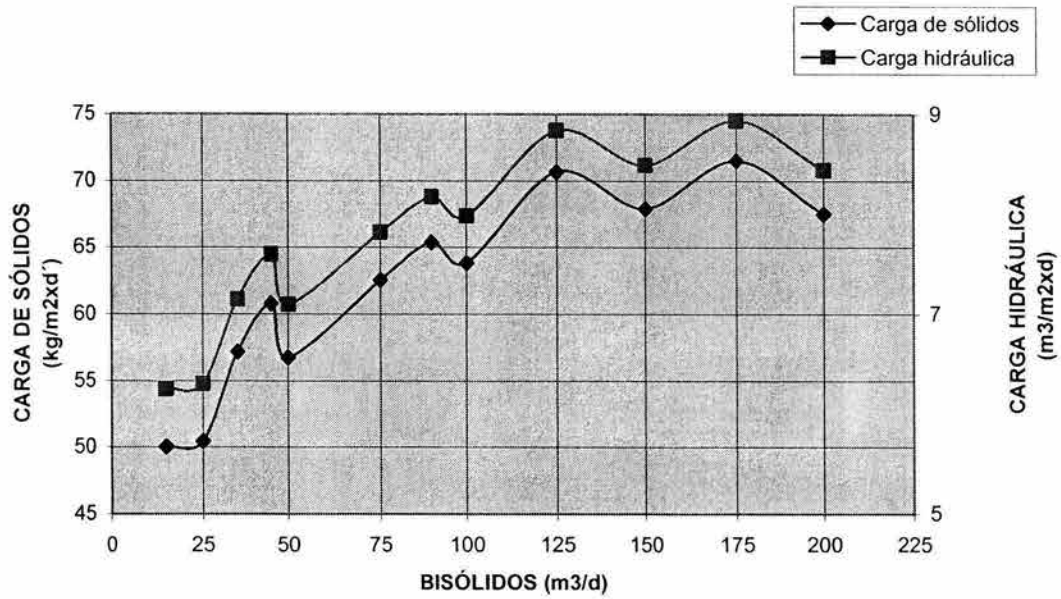


FIGURA 34. TORQUES RECOMENDADOS PARA EL DISEÑO DE ESPESADORES
(Utilizando una unidad)

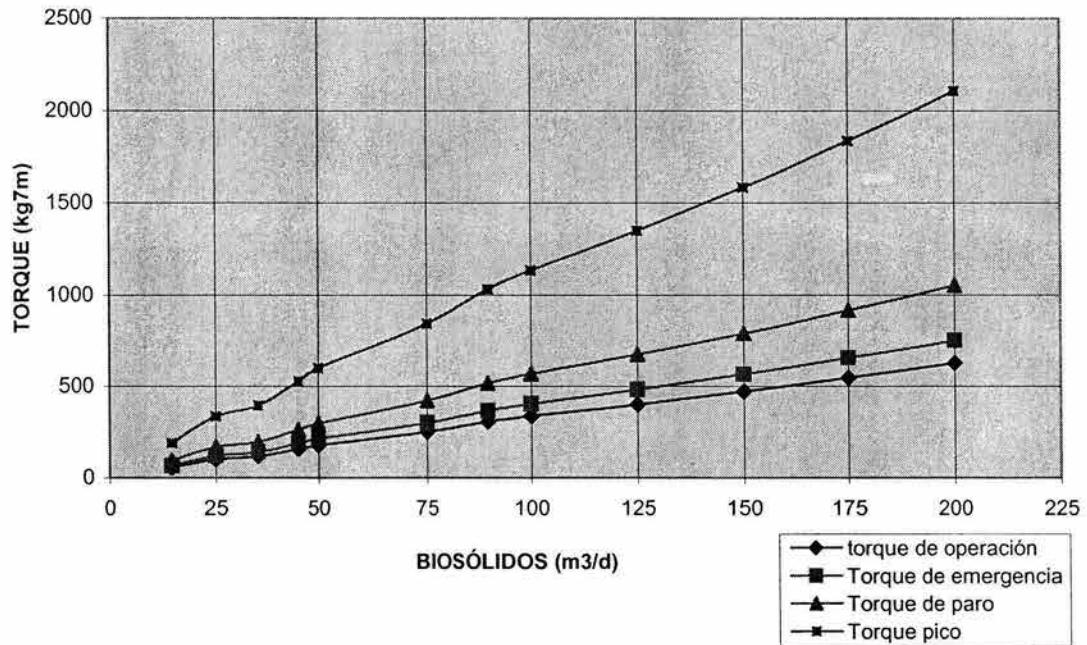


FIGURA 35. TORQUES RECOMENDADOS PARA EL DISEÑO DE ESPESADORES
(Utilizando dos unidades)

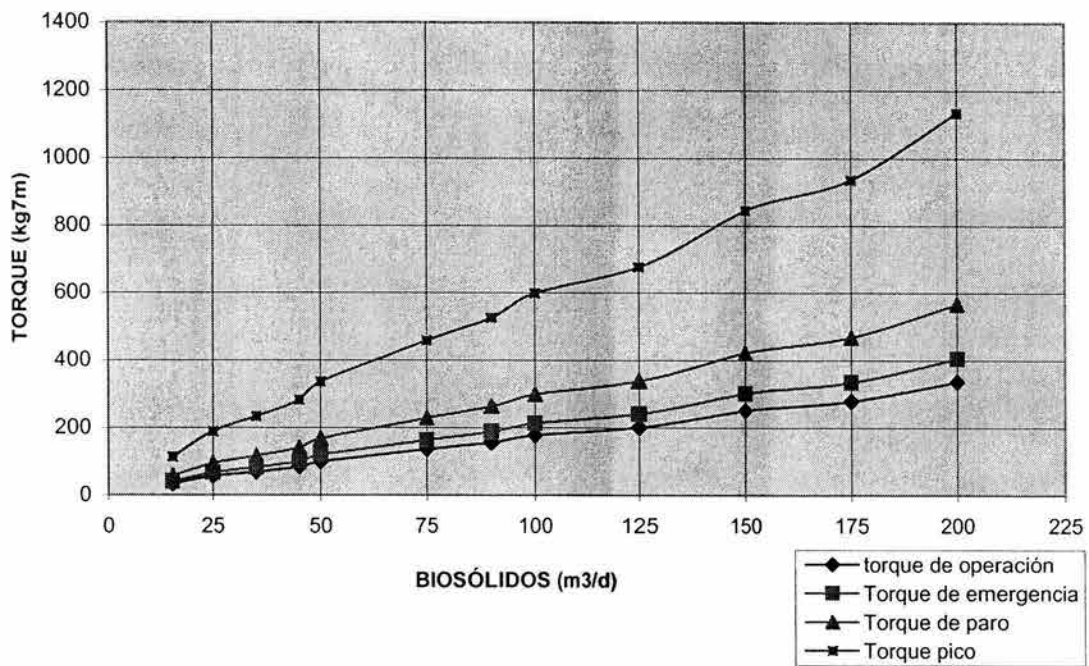


FIGURA A36. CAUDAL DE BIOSÓLIDOS A TRATAR EN DIGESTORES VS. METROS CÚBICOS DE BIOSÓLIDOS DE SALIDA

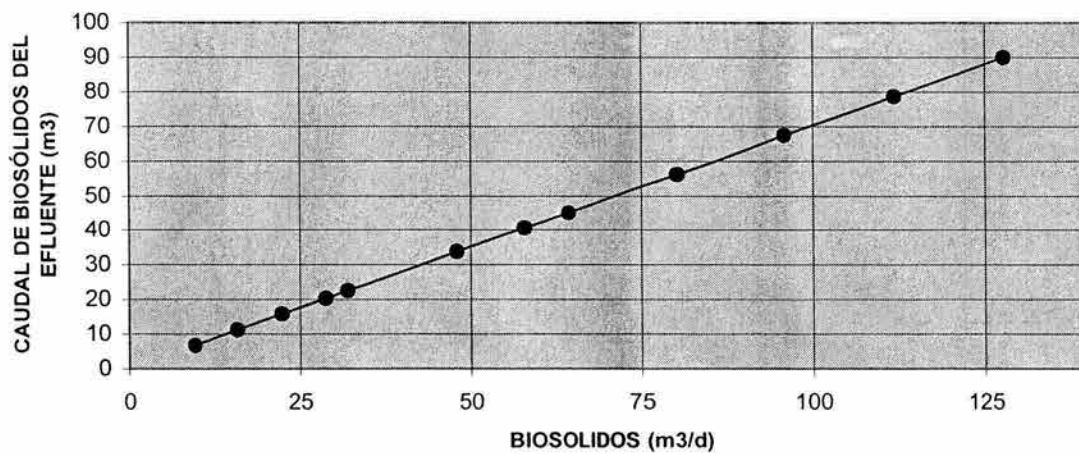


FIGURA A37. CAUDAL DE BIOSÓLIDOS A TRATAR VS. METROS CÚBICOS DE DIGESTOR

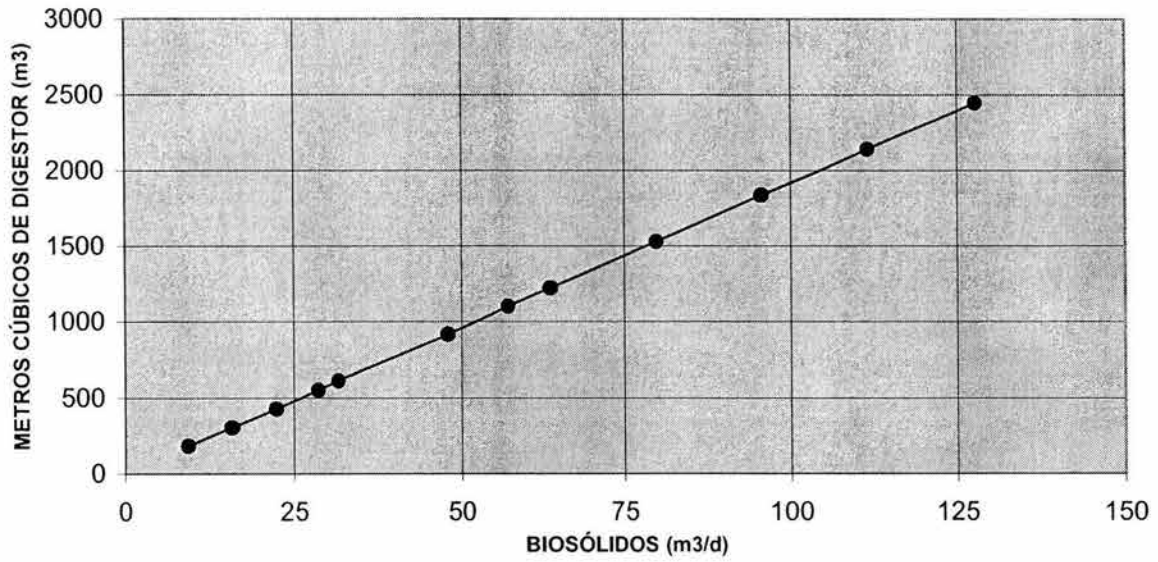
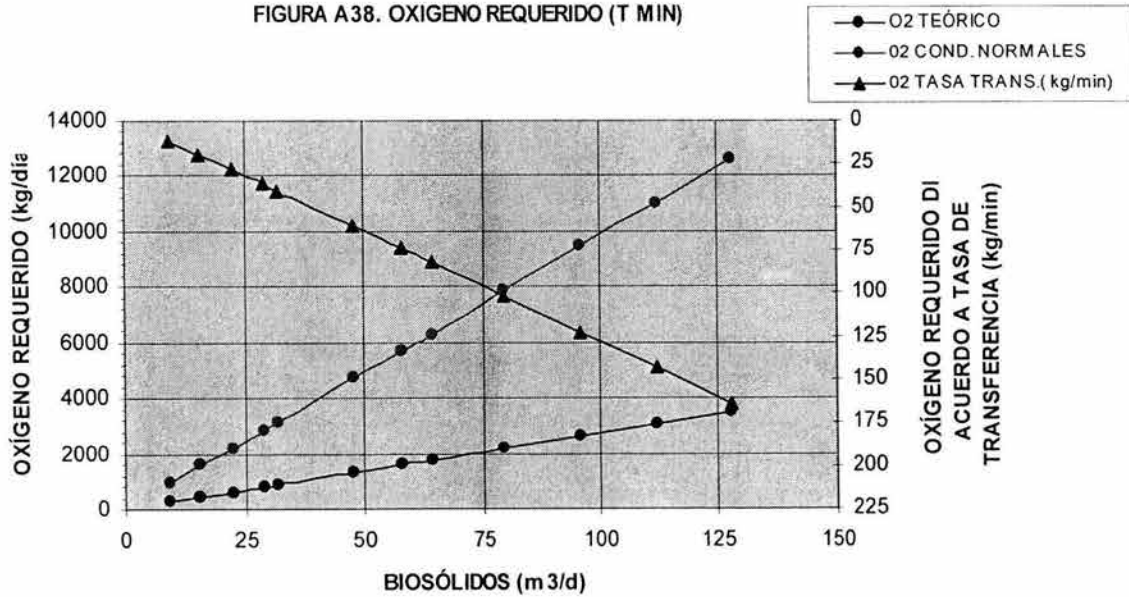
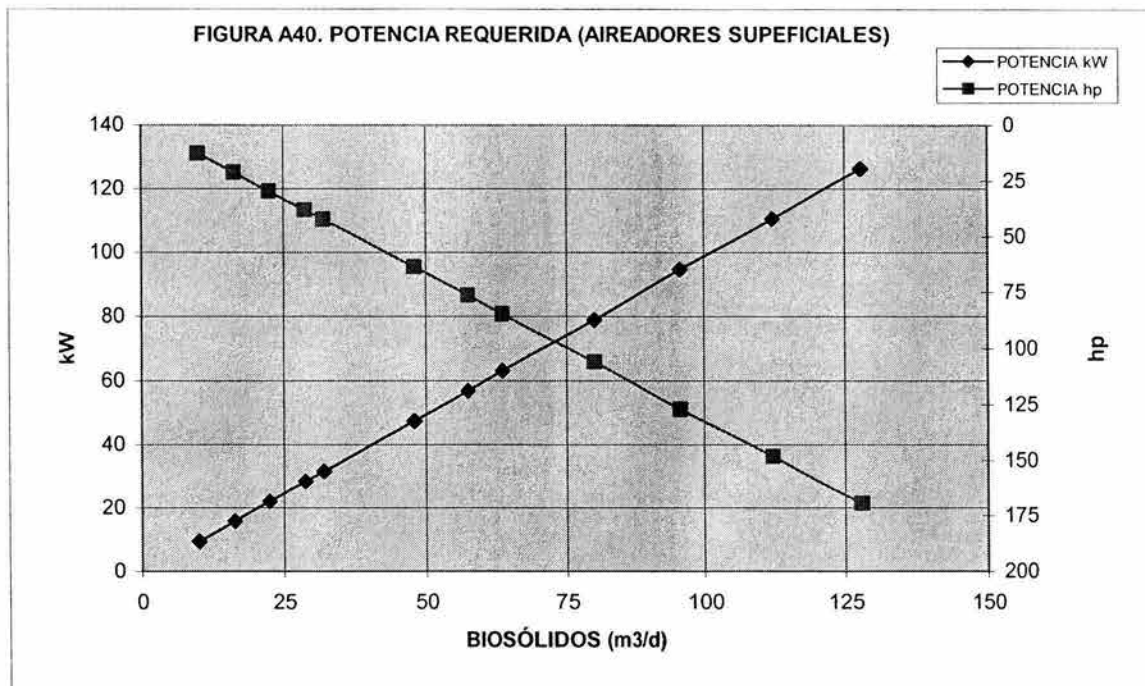
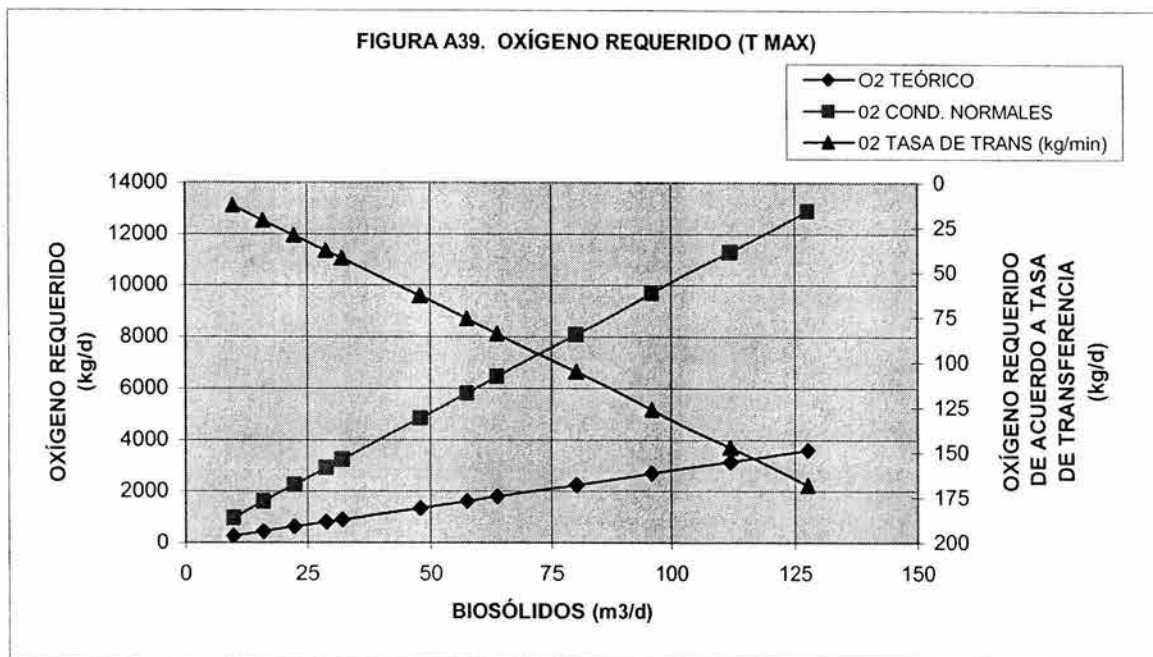
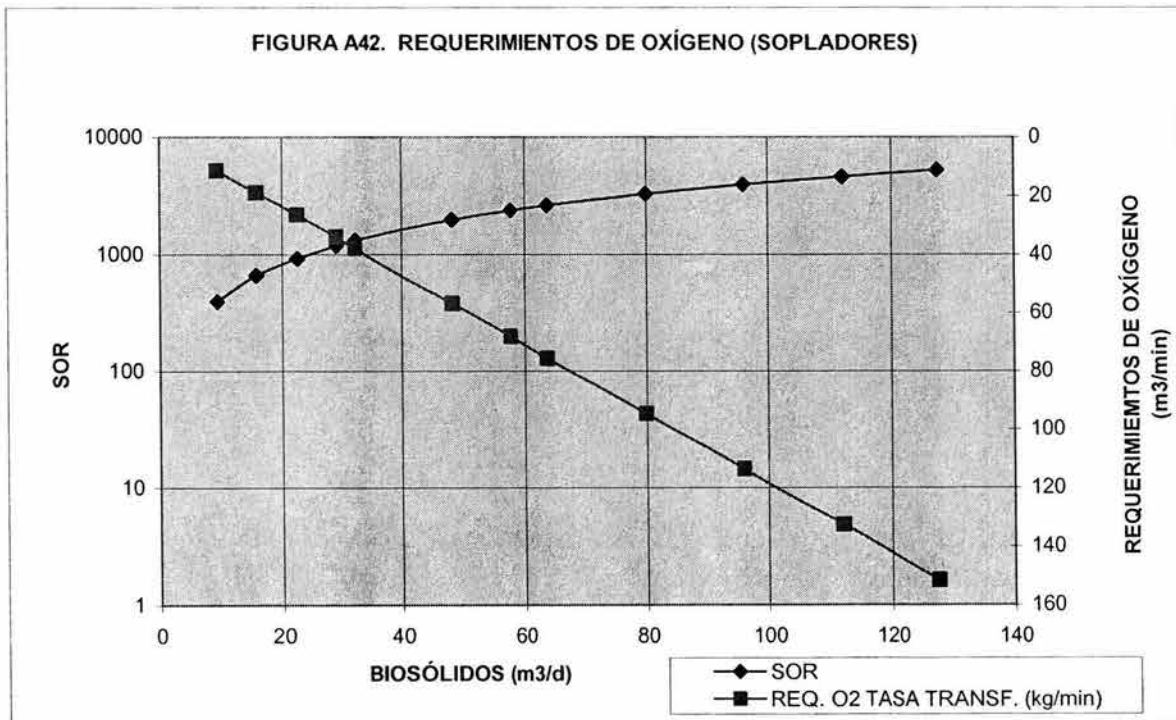
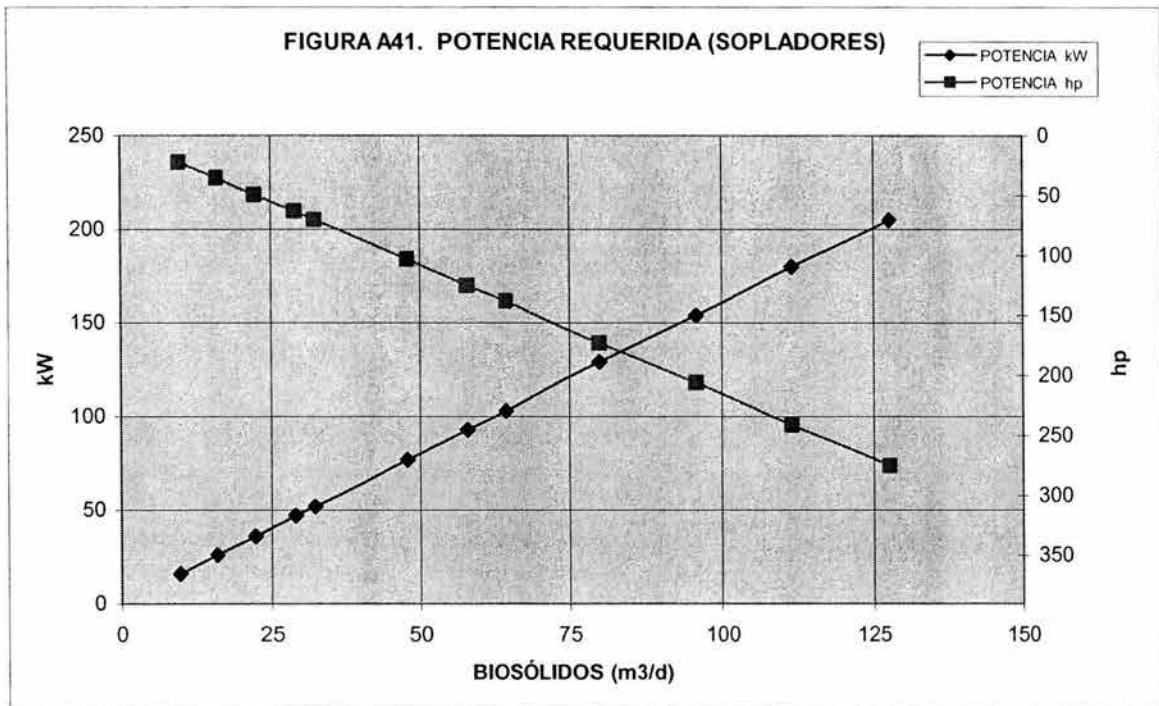


FIGURA A38. OXIGENO REQUERIDO (T MIN)







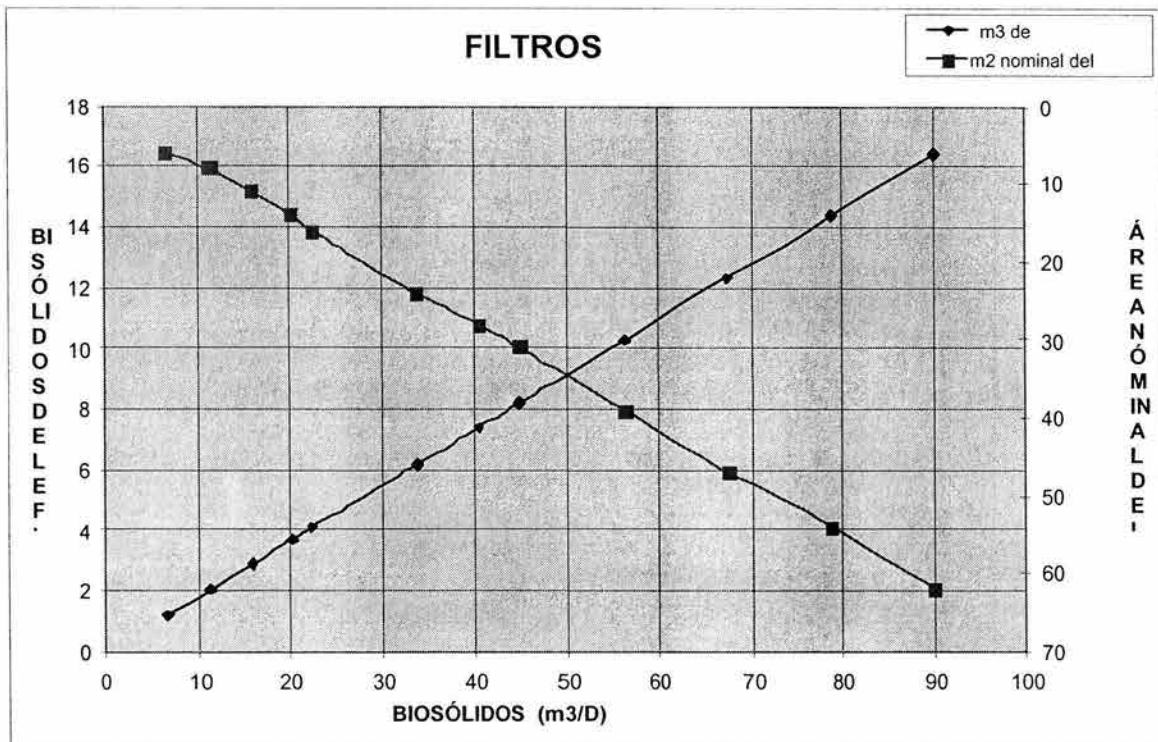


FIGURA A44. CAUDAL DE BIOSÓLIDOS A TRATAR VS SUPERFICIE REQUERIDA

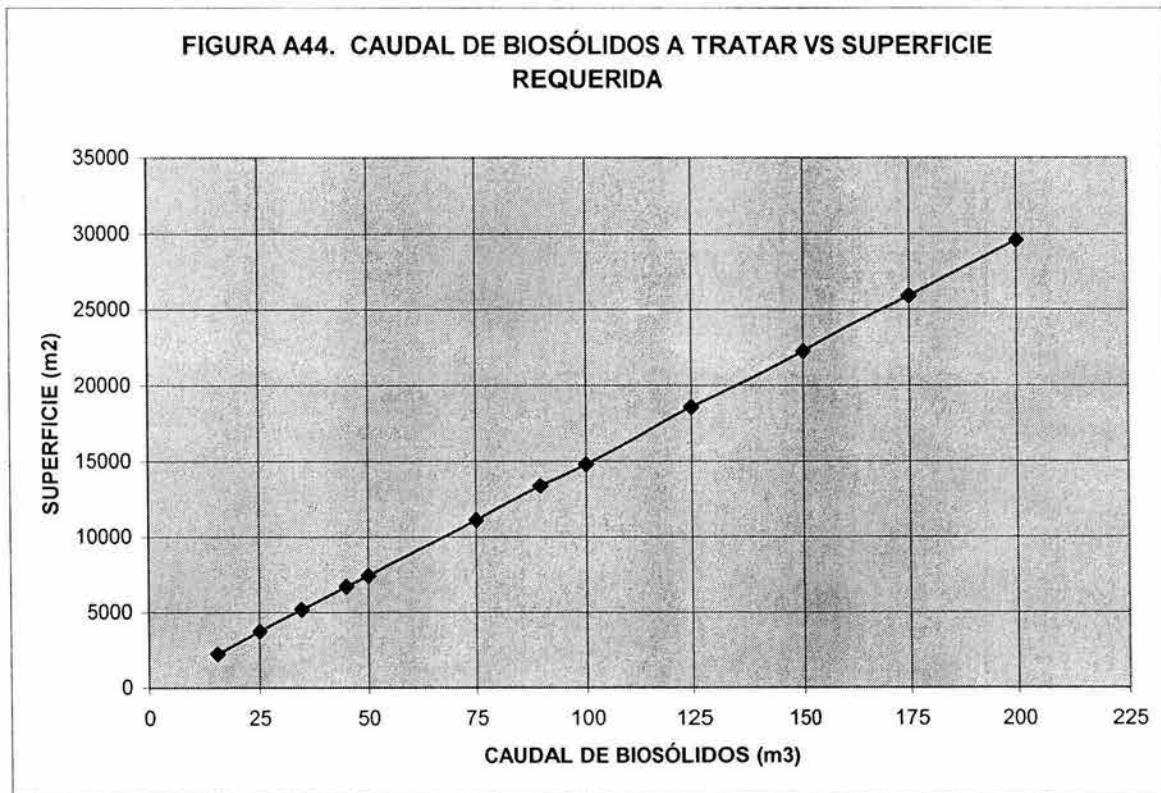


FIGURA A45. ÁREA REQUERIDA PARA ESPESADORES POR GRAVEDAD VS VOLUMEN A TRATAR

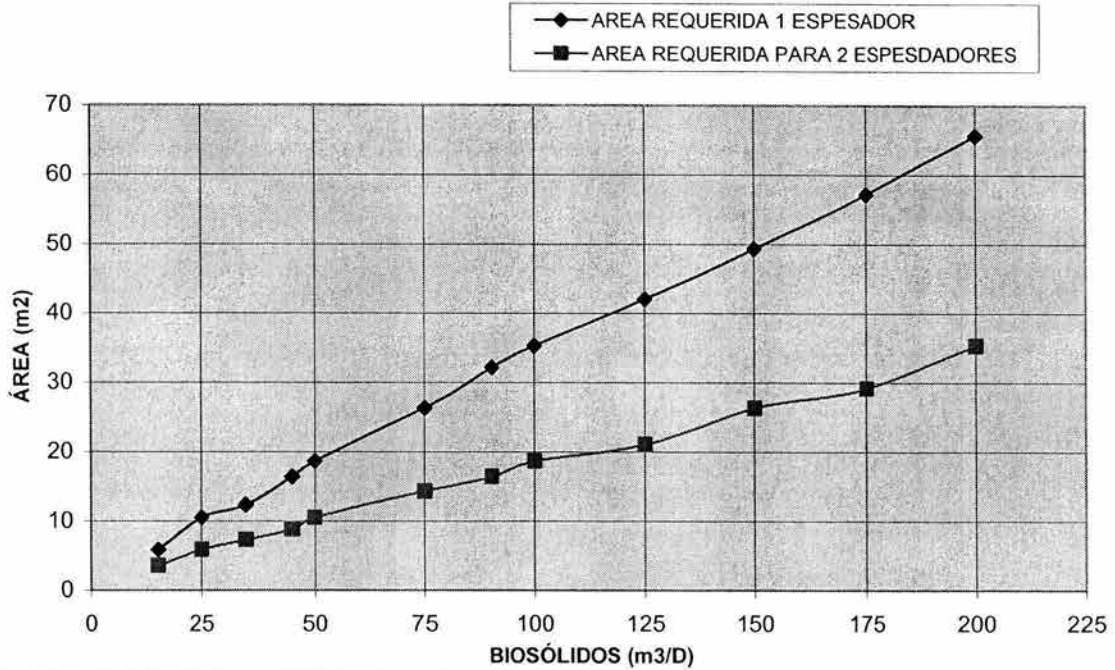
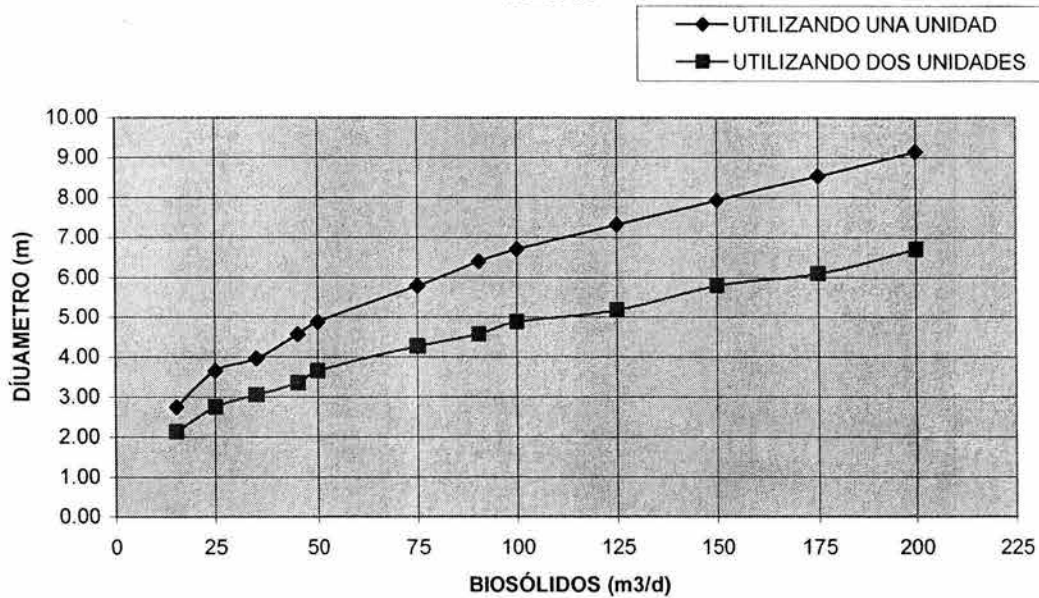
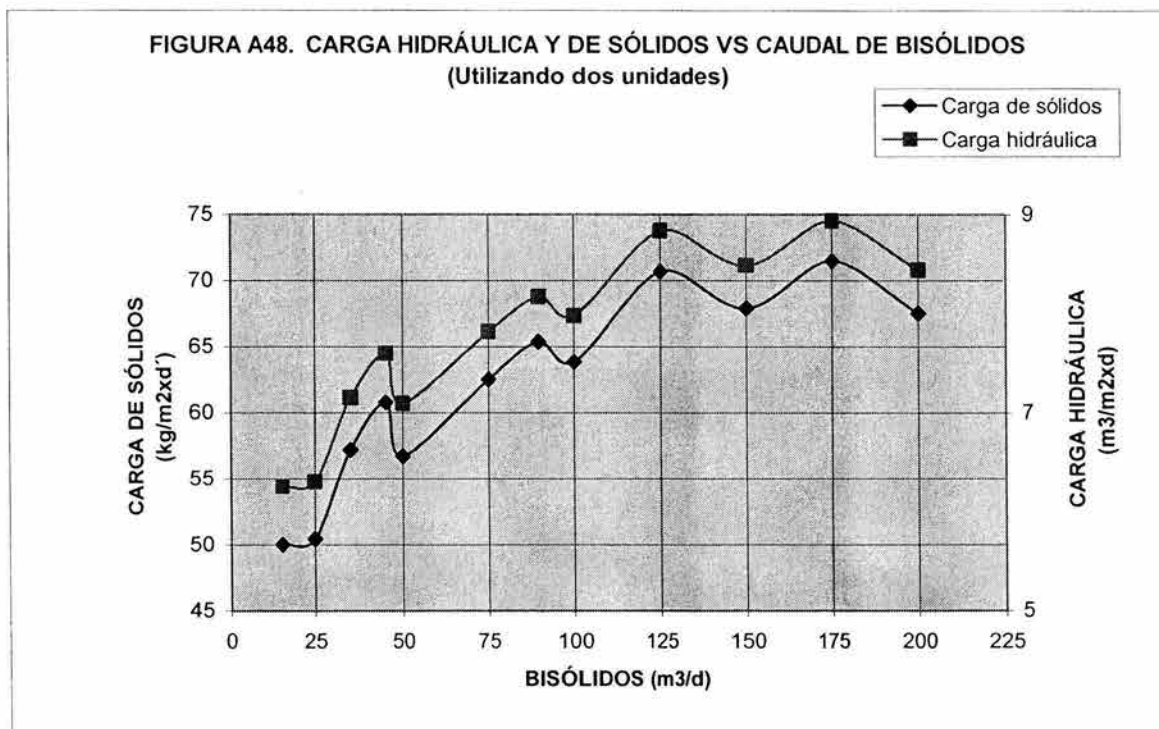
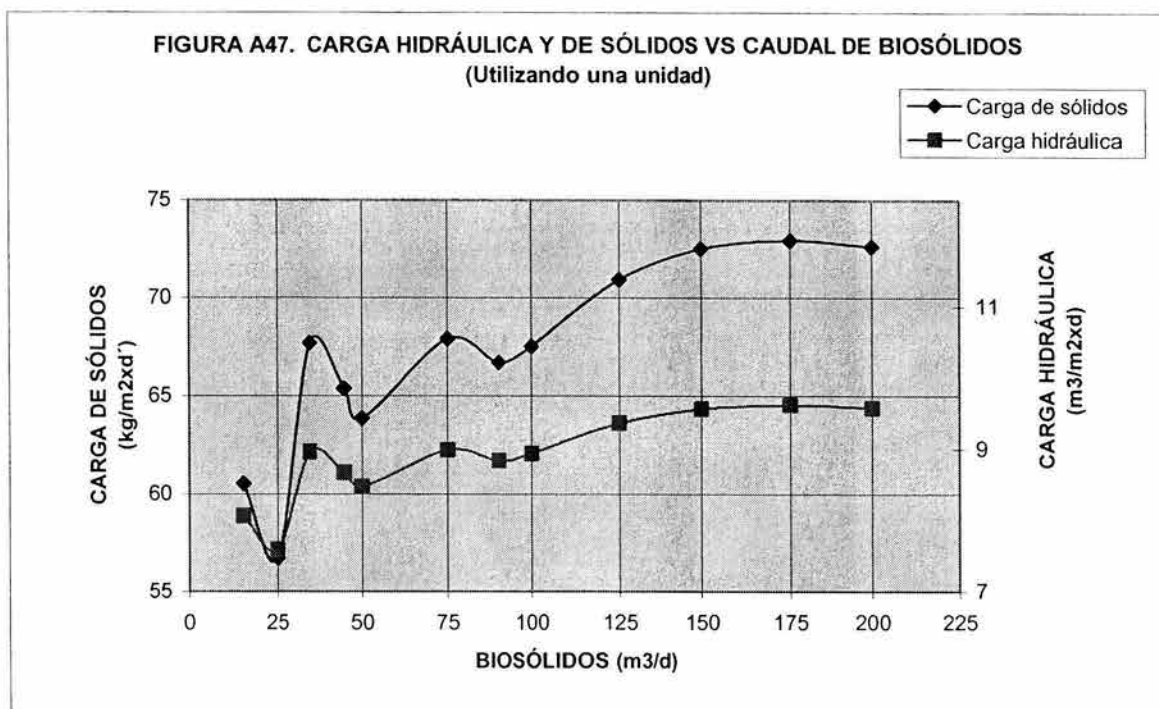
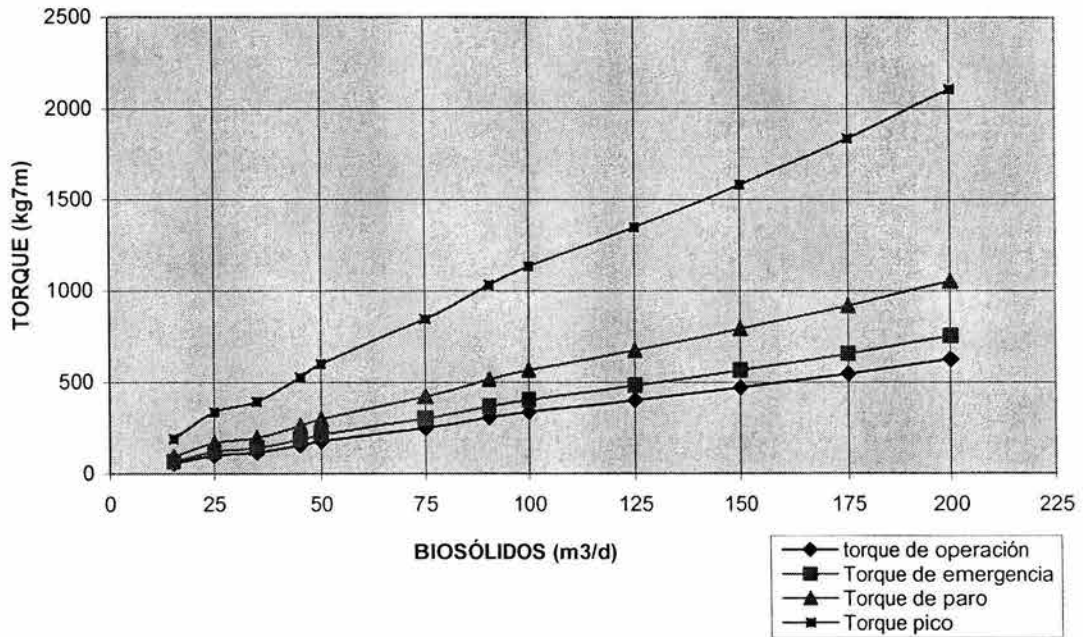


FIGURA A46. DIÁMETRO REQUERIDO VS CANTIDAD DE BIOSÓLIDOS A TRATAR





**FIGURA A49. TORQUES RECOMENDADOS PARA EL DISEÑO DE ESPESADORES
(Utilizando una unidad)**



**FIGURA A50. TORQUES RECOMENDADOS PARA EL DISEÑO DE ESPESADORES
(Utilizando dos unidades)**

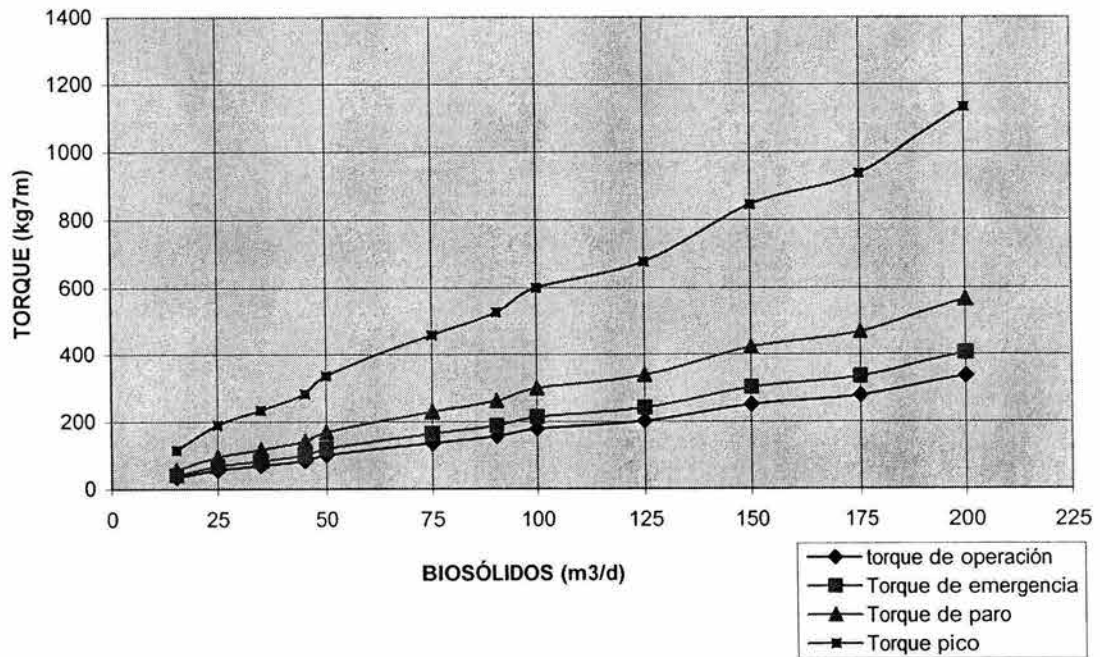
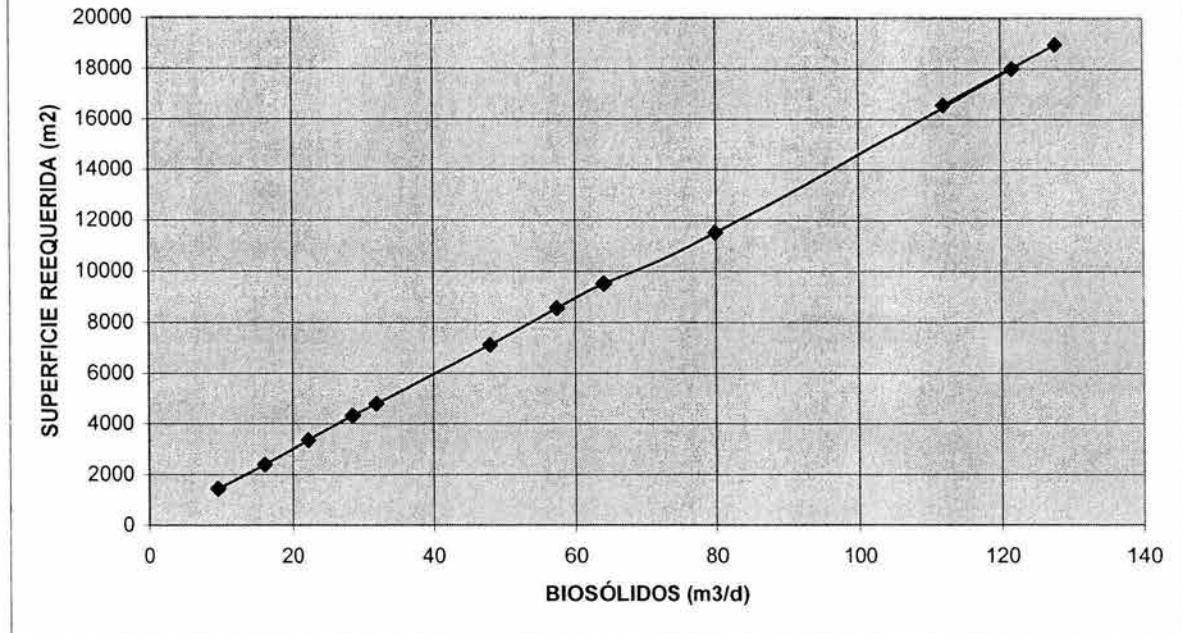


FIGURA A51. SUPERFICIE REQUERIDA EN LECHOS DE SECADO DE BIOSÓLIDOS VS. VOL DE BIOSÓLIDOS A TRATAR



ESPEADO – ESTABILIZACIÓN QUÍMICA (CAL)

FIGURA A52. ÁREA REQUERIDA PARA ESPESADORES POR GRAVEDAD VS VOLUMEN A TRATAR

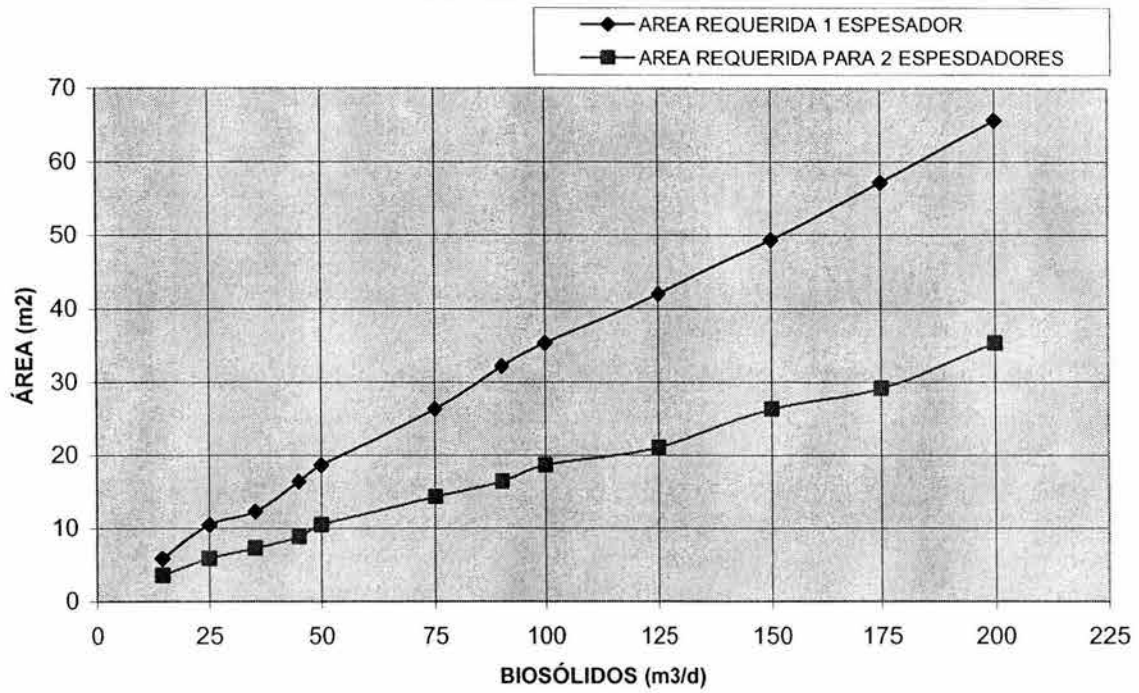


FIGURA A53. DIÁMETRO REQUERIDO VS CANTIDAD DE BIOSÓLIDOS A TRATAR

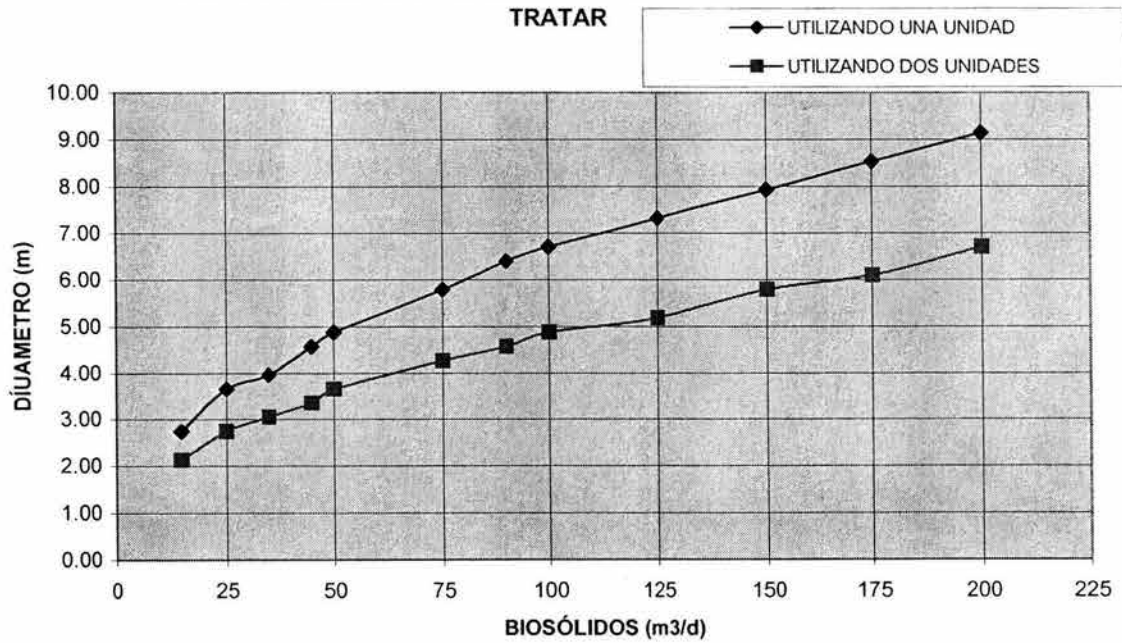


FIGURA A54. CARGA HIDRÁULICA Y DE SÓLIDOS VS CAUDAL DE BISÓLIDOS
(Utilizando una unidad)

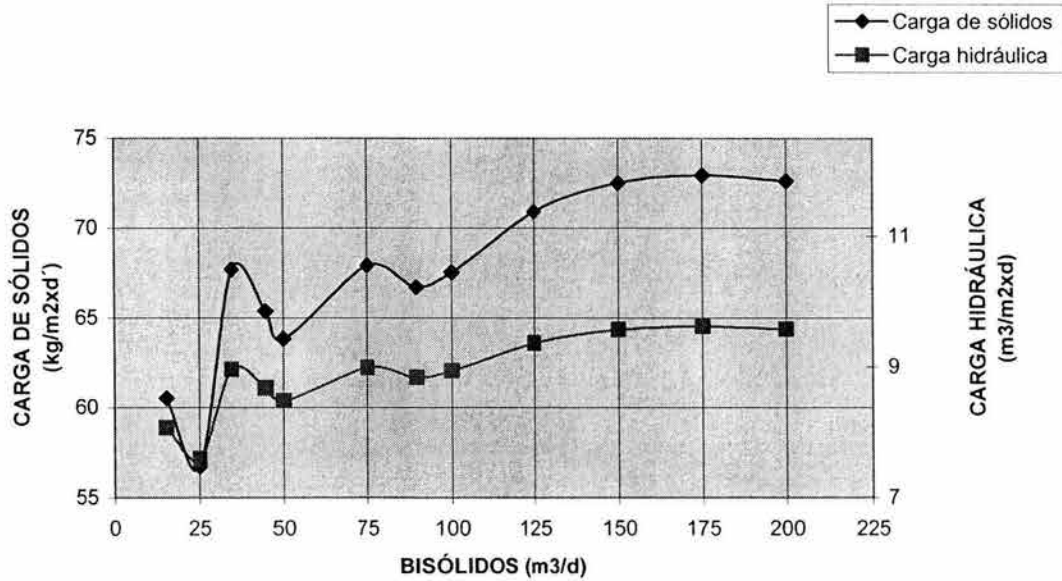


FIGURA A55. CARGA HIDRÁULICA Y DE SÓLIDOS VS CAUDAL DE BISÓLIDOS
(Utilizando dos unidades)

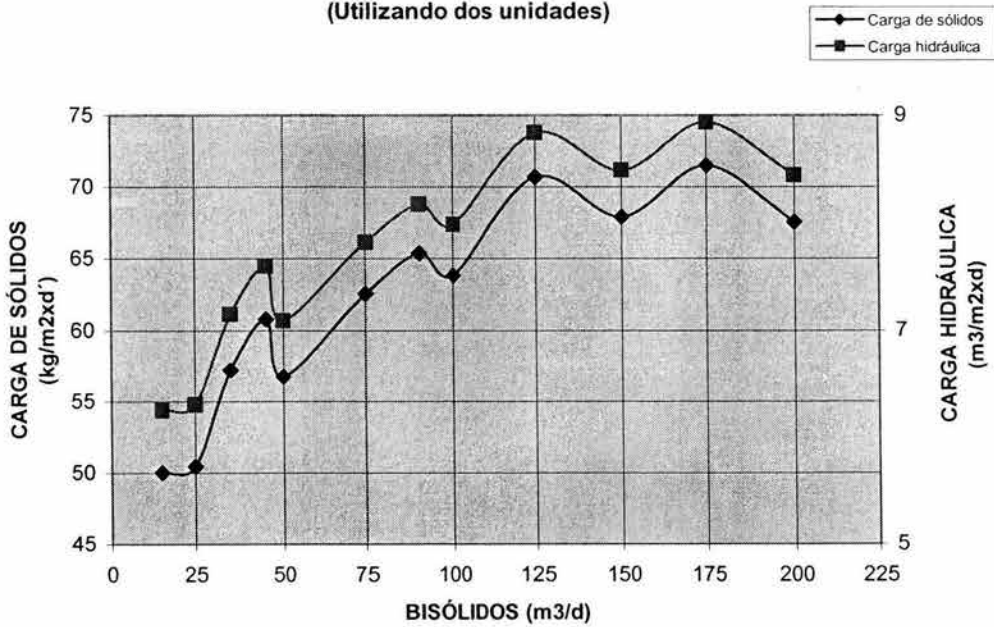


FIGURA A56. TORQUES RECOMENDADOS PARA EL DISEÑO DE ESPESADORES (Utilizando una unidad)

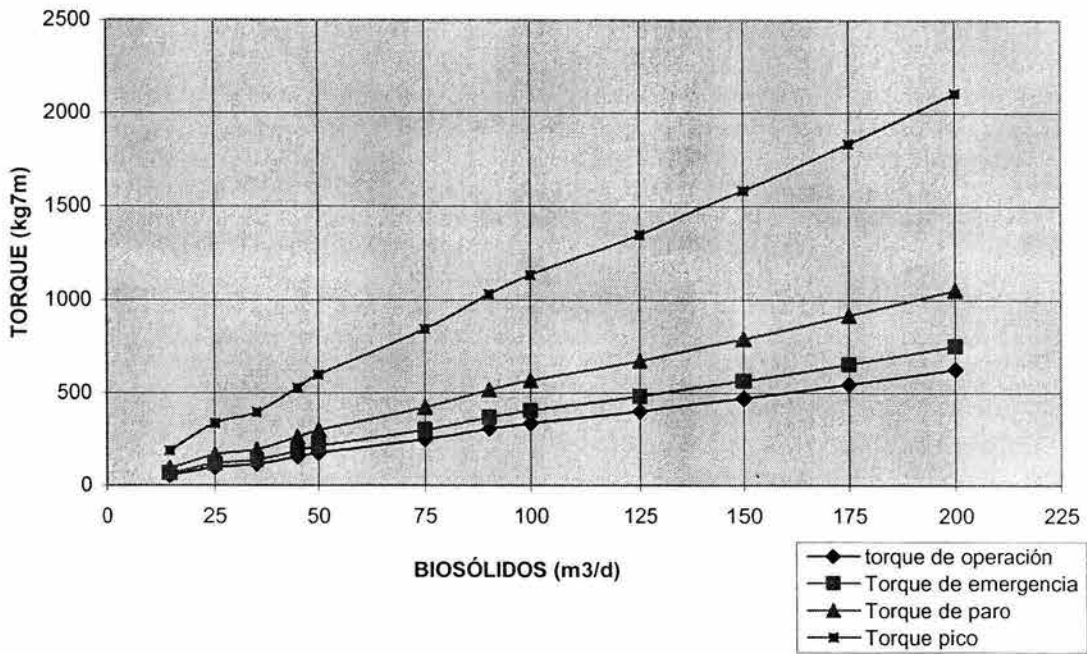


FIGURA A57. TORQUES RECOMENDADOS PARA EL DISEÑO DE ESPESADORES (Utilizando dos unidades)

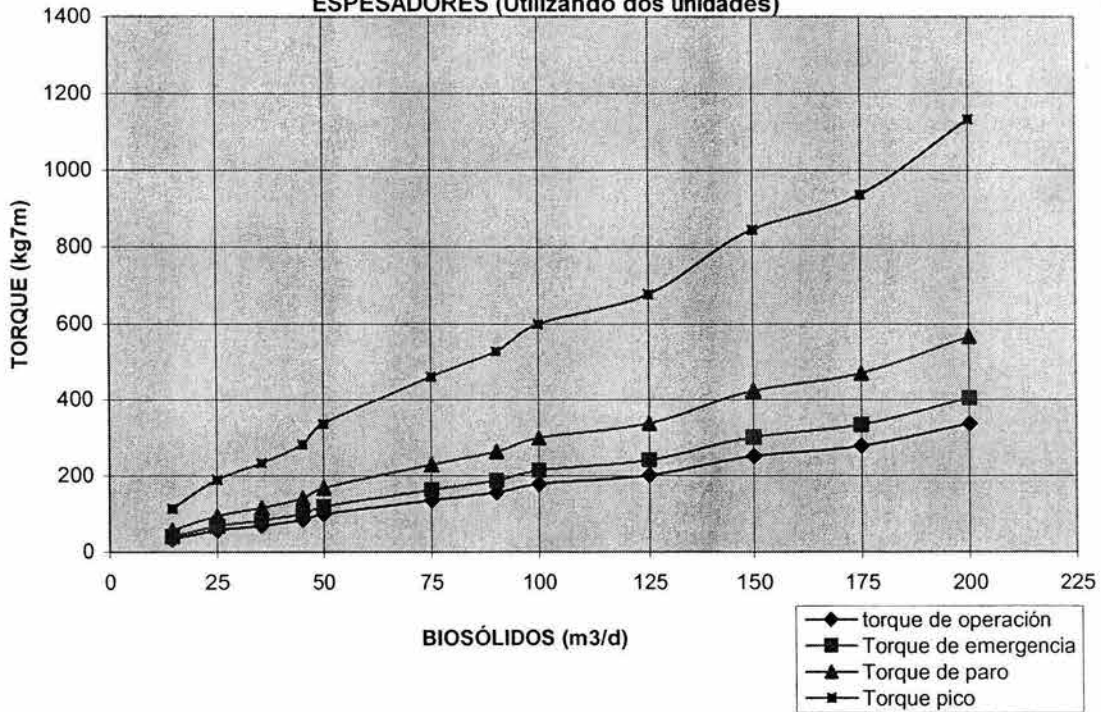
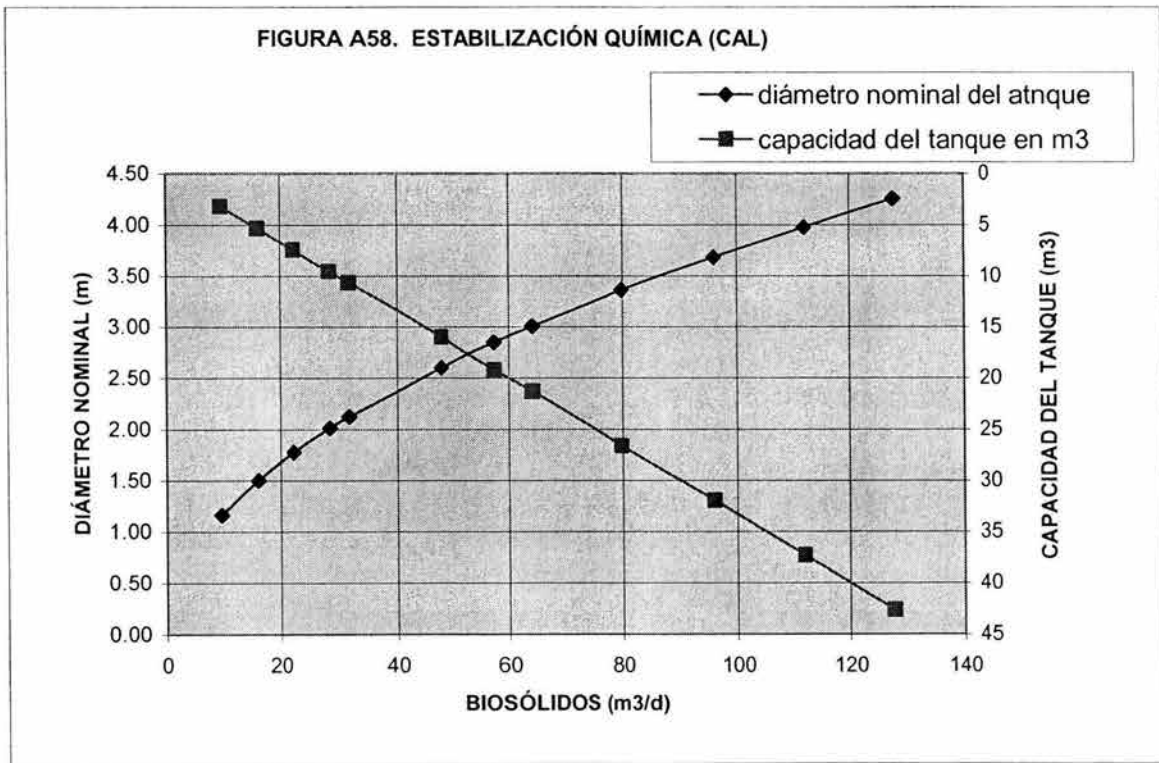


FIGURA A58. ESTABILIZACIÓN QUÍMICA (CAL)



**ESTABILIZACIÓN AEROBIA – DESHIDRATACIÓN MECÁNICA (FILTROS
BANDA)**

FIGURA A59. CAUDAL DE BIOSÓLIDOS A TRATAR VS. METROS CÚBICOS DE BIOSÓLIDOS DE SALIDA

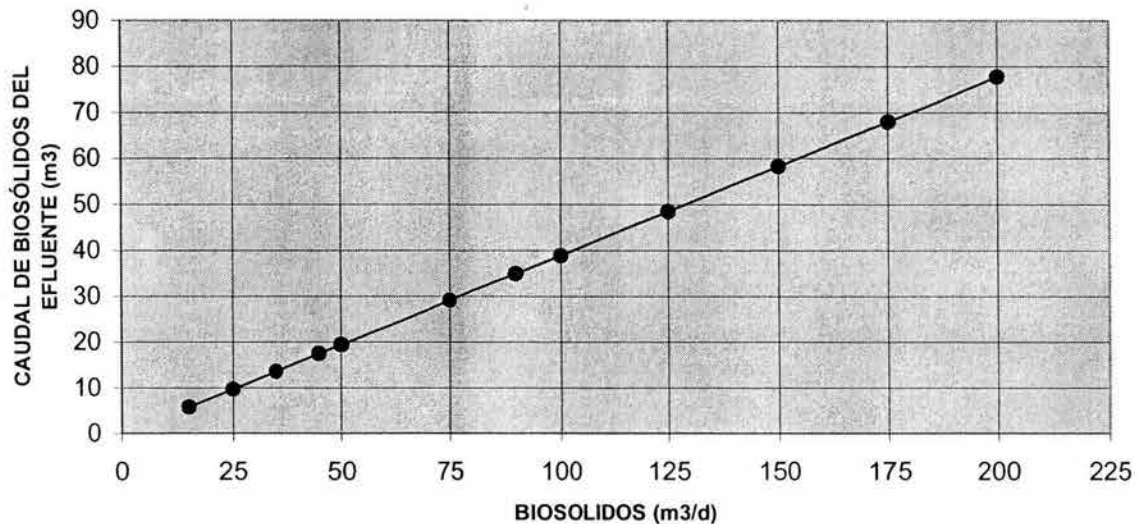


FIGURA A60. CAUDAL DE BIOSÓLIDOS A TRATAR VS. METROS CÚBICOS DE DIGESTOR

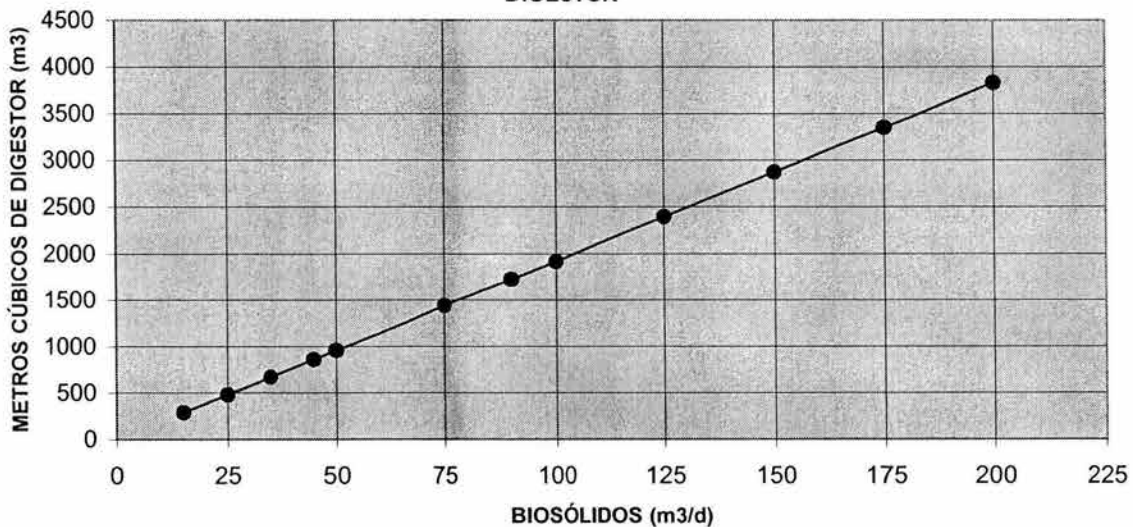


FIGURA A61. OXIGENO REQUERIDO (T MIN)

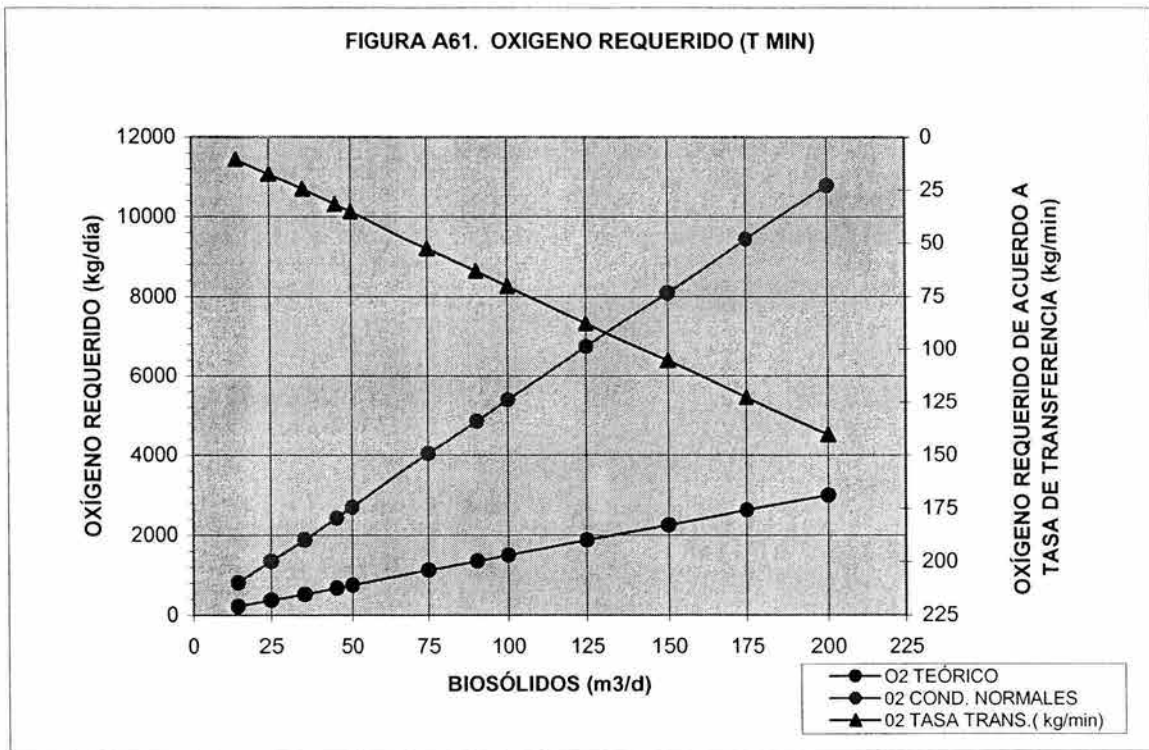
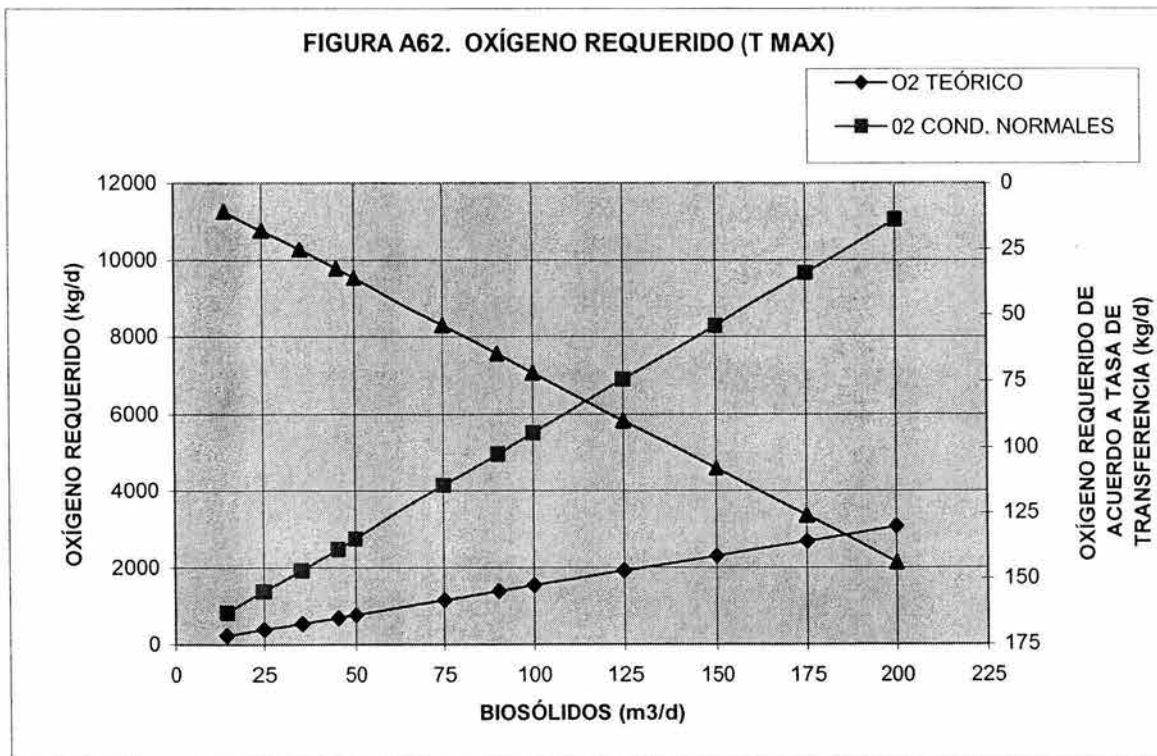
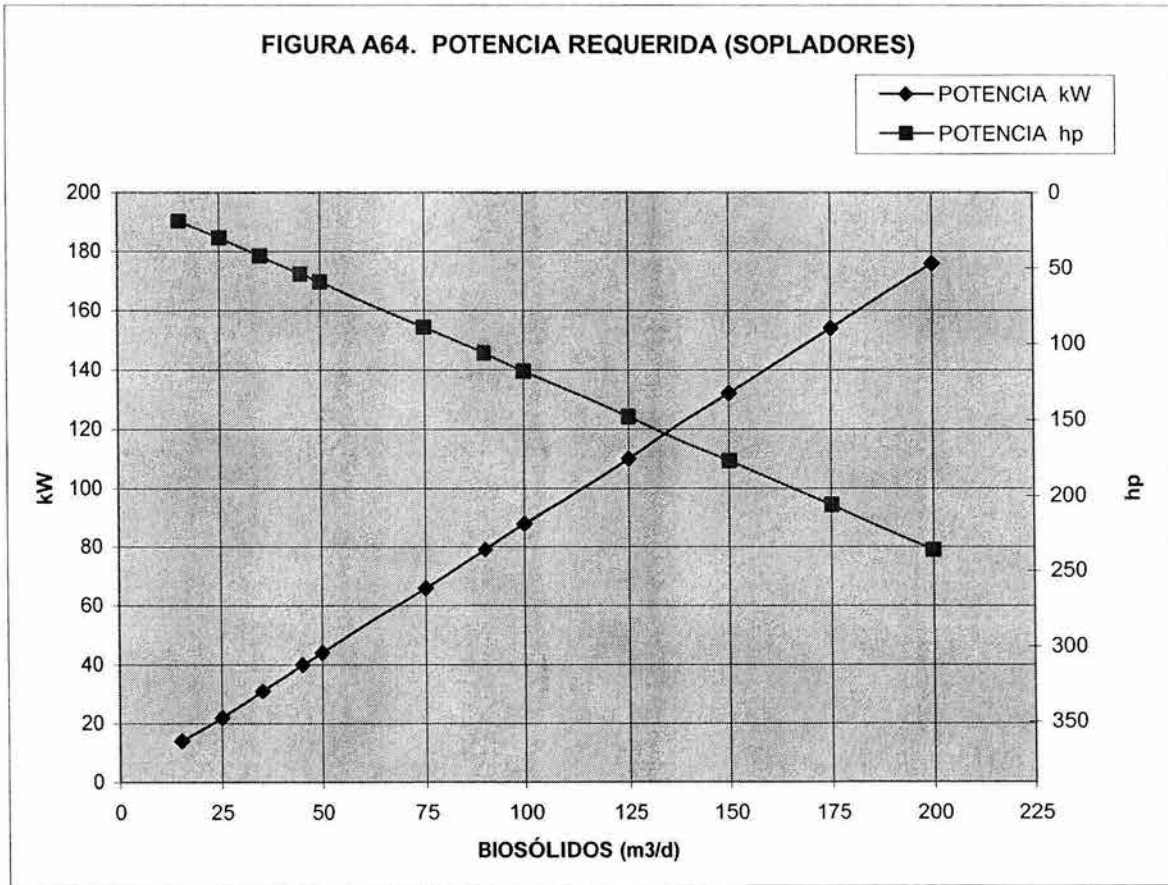
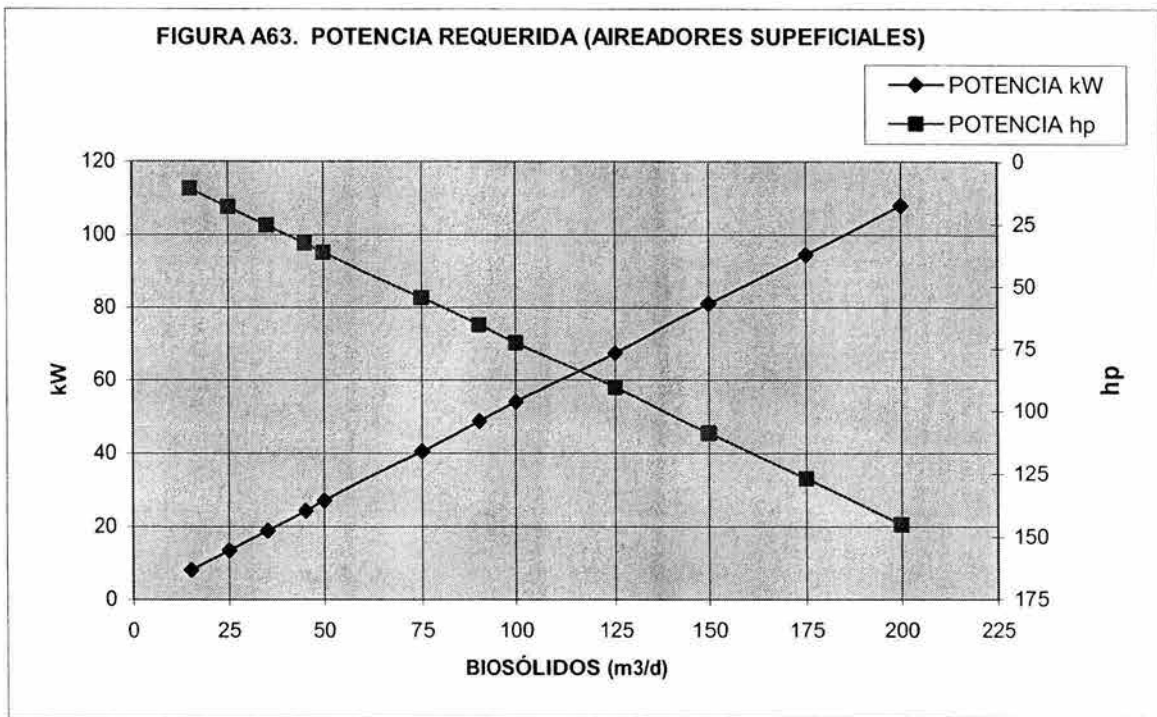
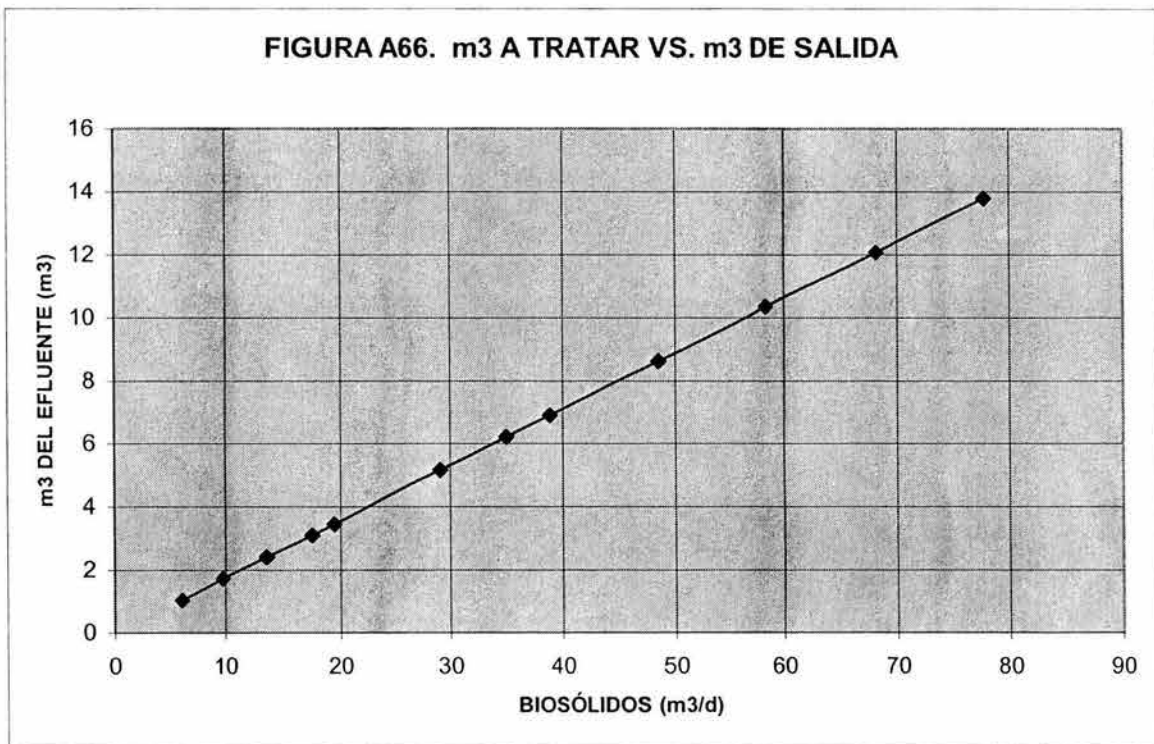
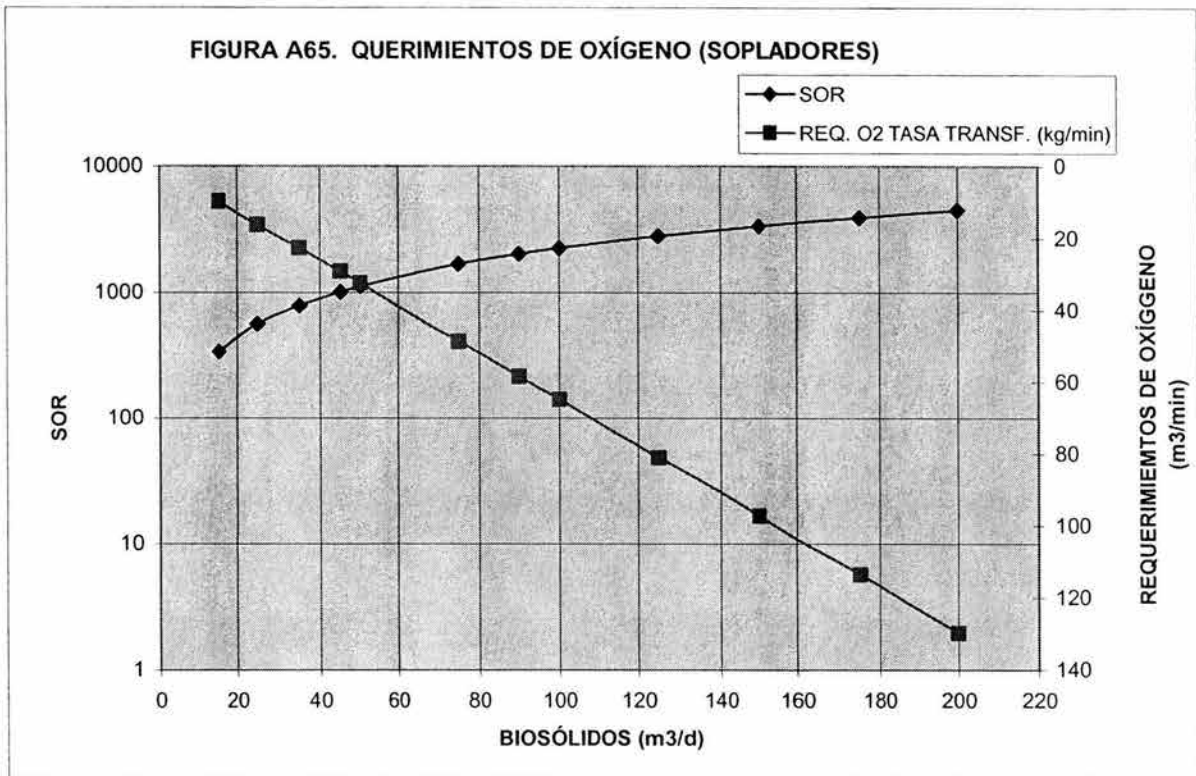
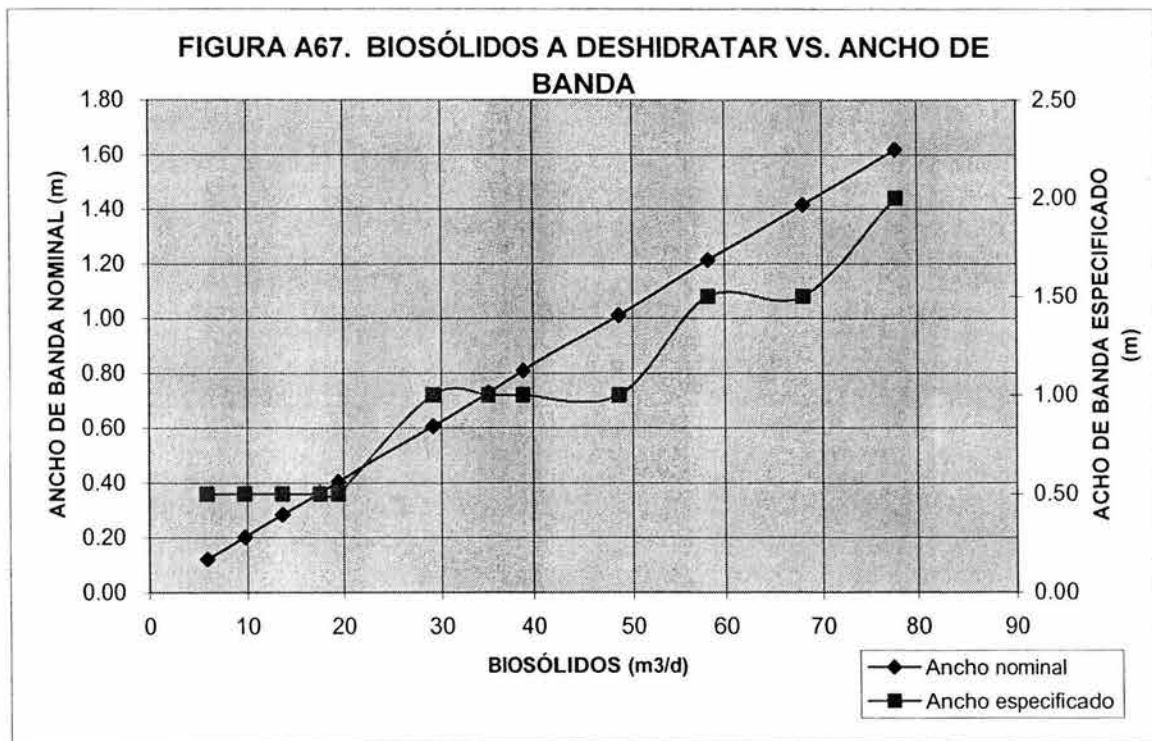


FIGURA A62. OXÍGENO REQUERIDO (T MAX)









**ESTABILIZACIÓN AEROBIA – DESHIDRATACIÓN MECÁNICA (FILTROS
PRENSA)**

FIGURA A68. CAUDAL DE BIOSÓLIDOS A TRATAR VS. METROS CÚBICOS DE BIOSÓLIDOS DE SALIDA

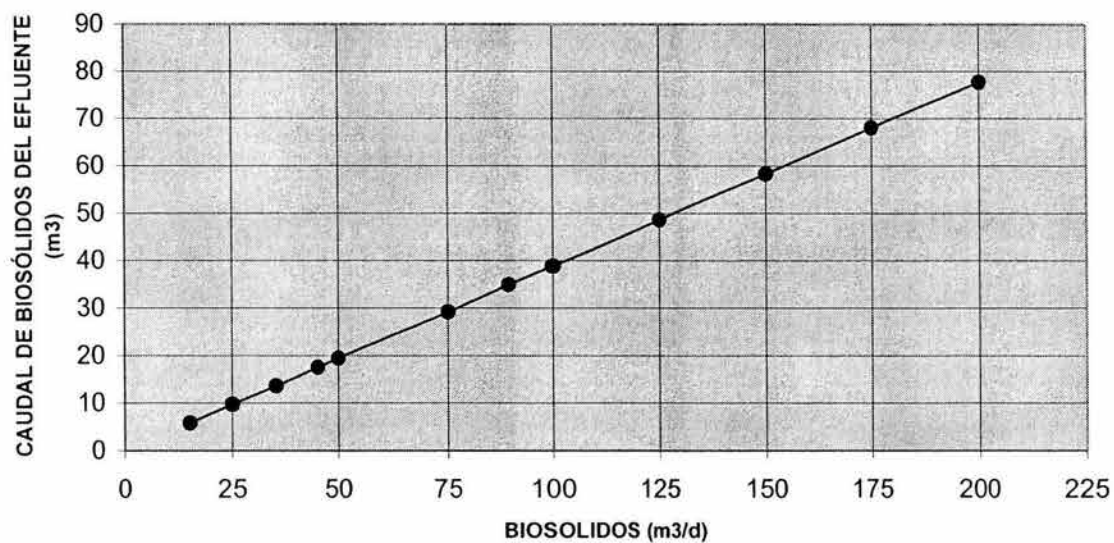
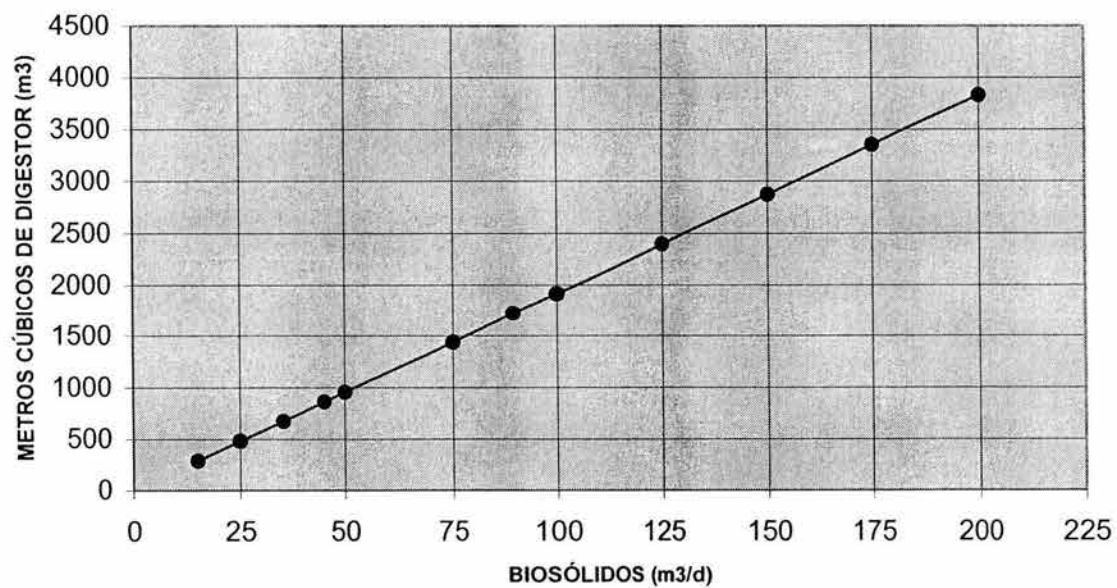


FIGURA A69. CAUDAL DE BIOSÓLIDOS A TRATAR VS. METROS CÚBICOS DE DIGESTOR



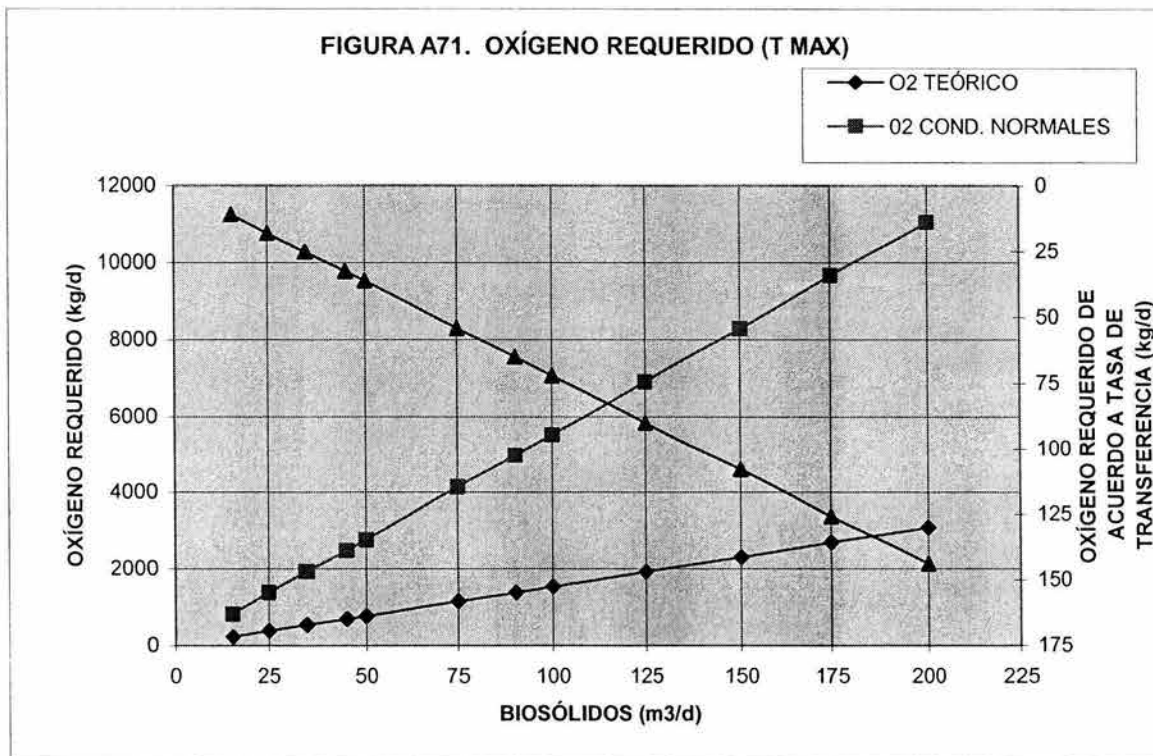
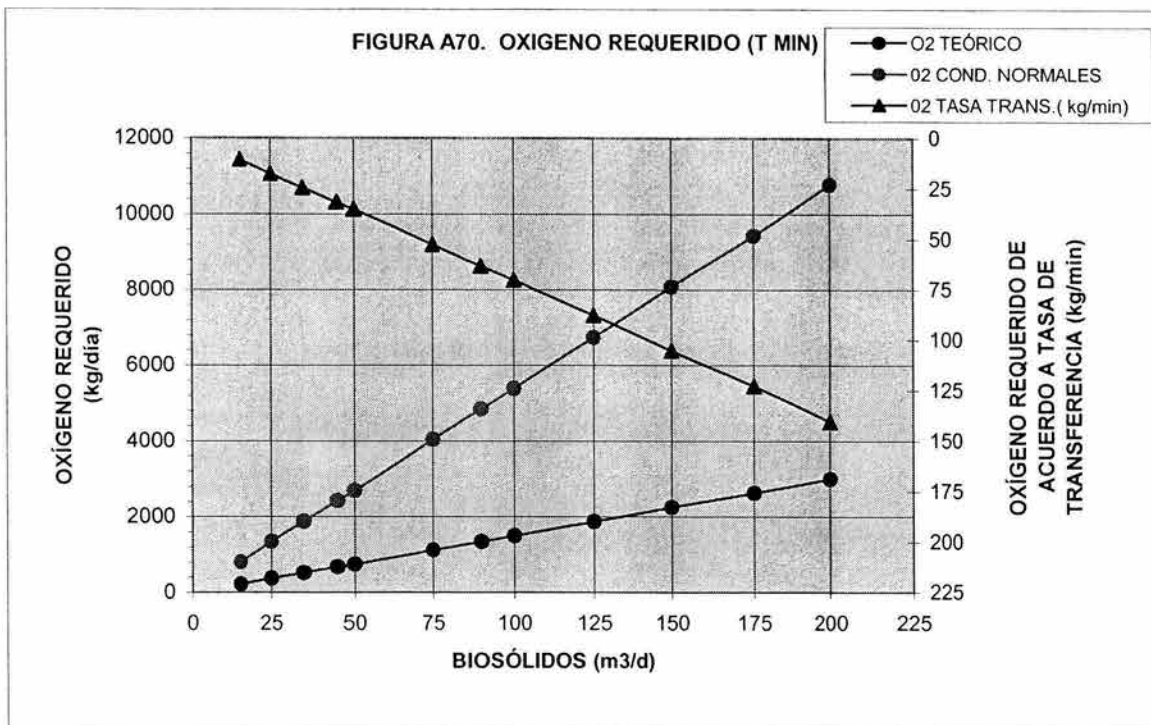


FIGURA A72. POTENCIA REQUERIDA (AIREADORES SUPEFICIALES)

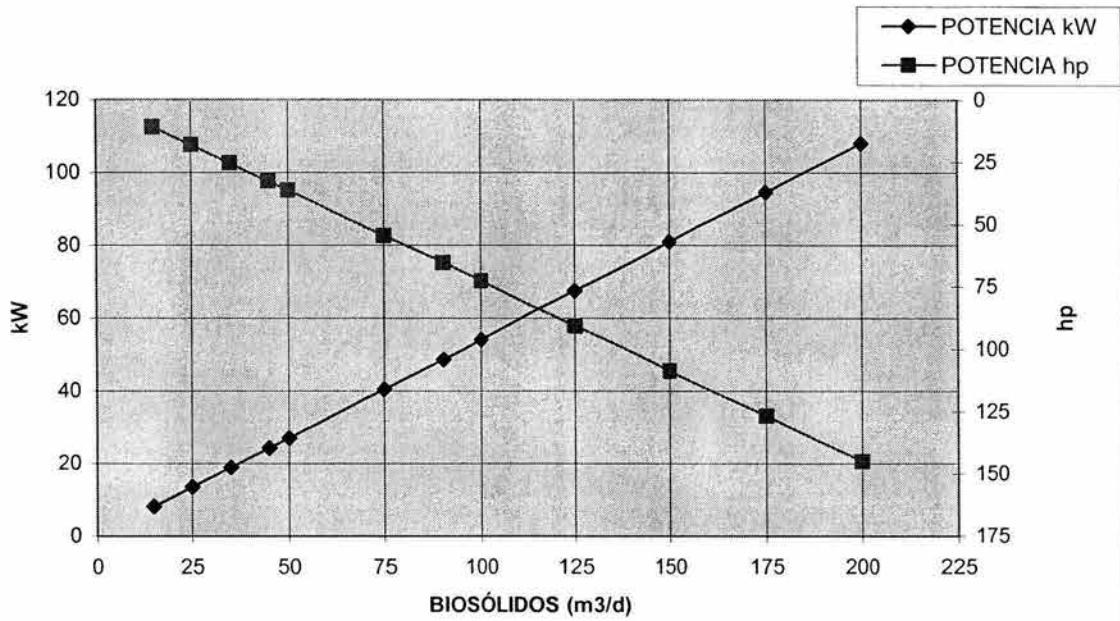
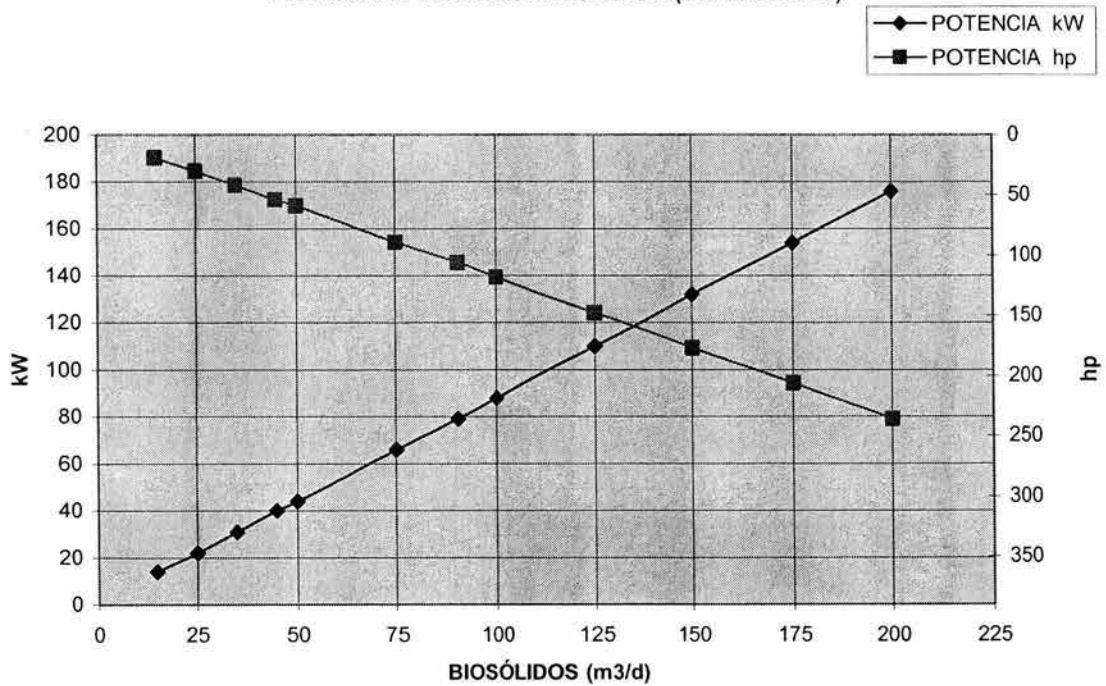


FIGURA A73. POTENCIA REQUERIDA (SOPLADORES)



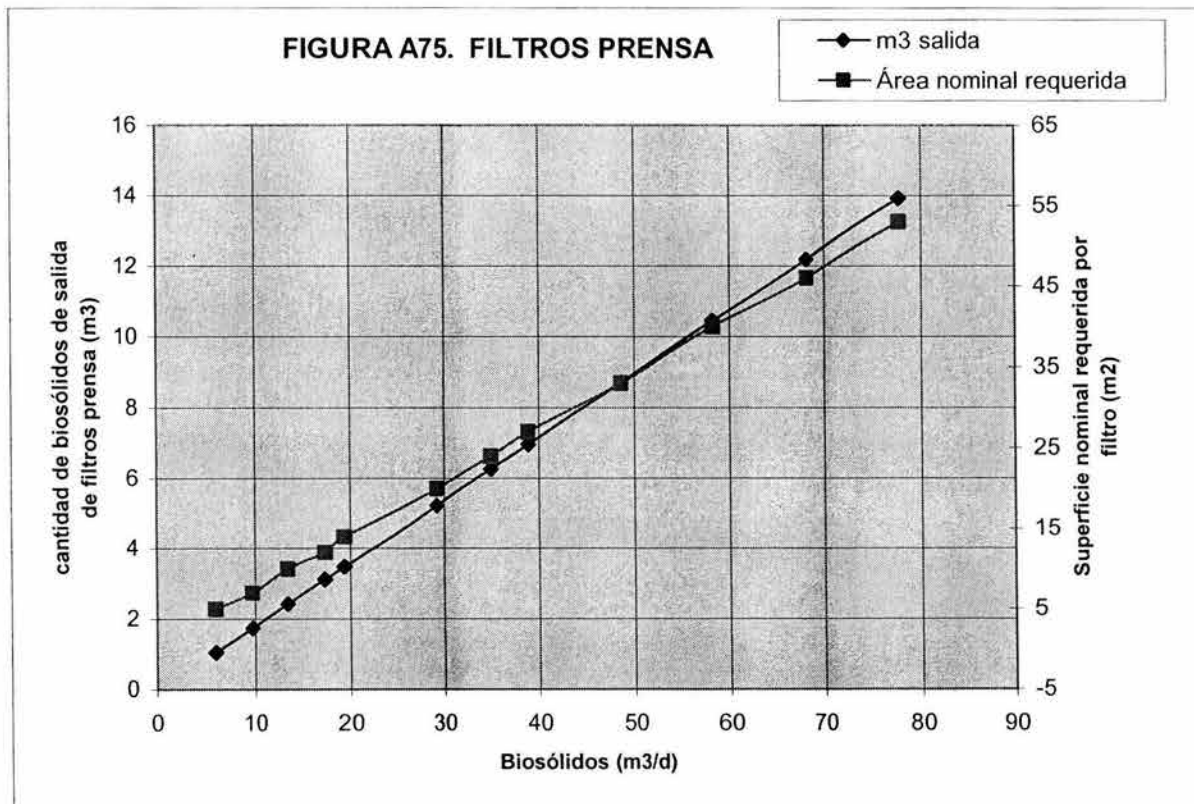
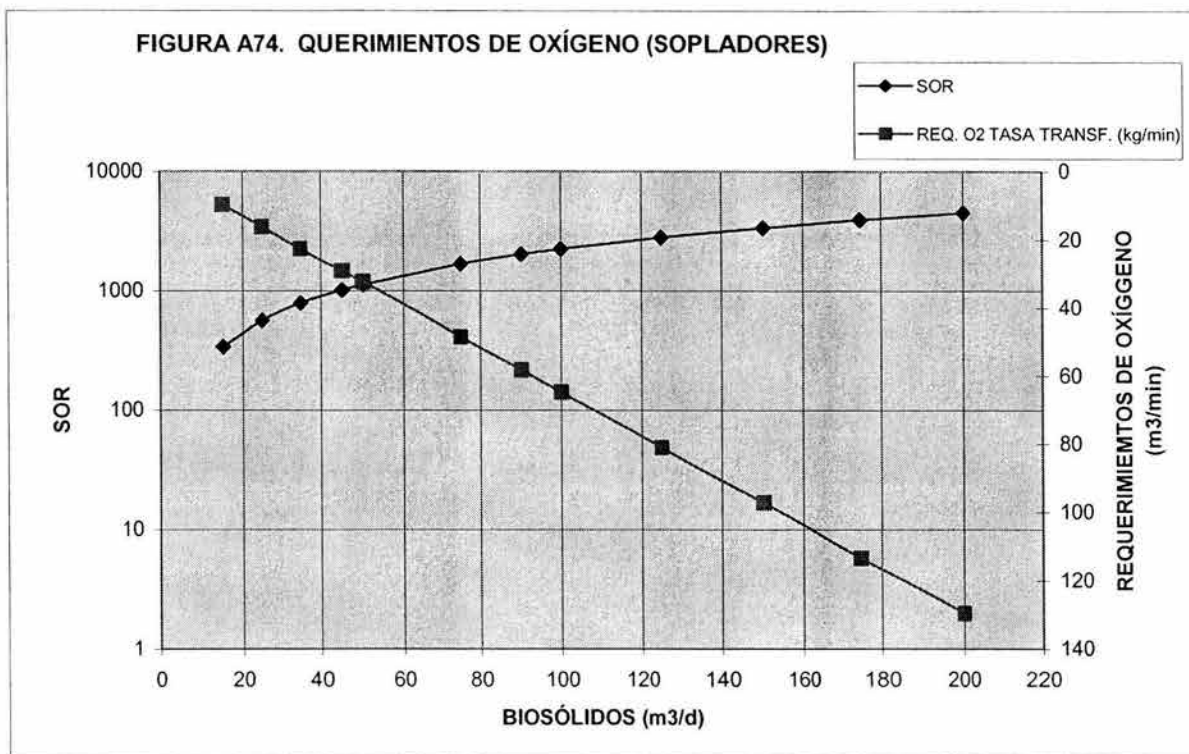


FIGURA A76. CAUDAL DE BIOSÓLIDOS A TRATAR VS. METROS CÚBICOS DE BIOSÓLIDOS DE SALIDA

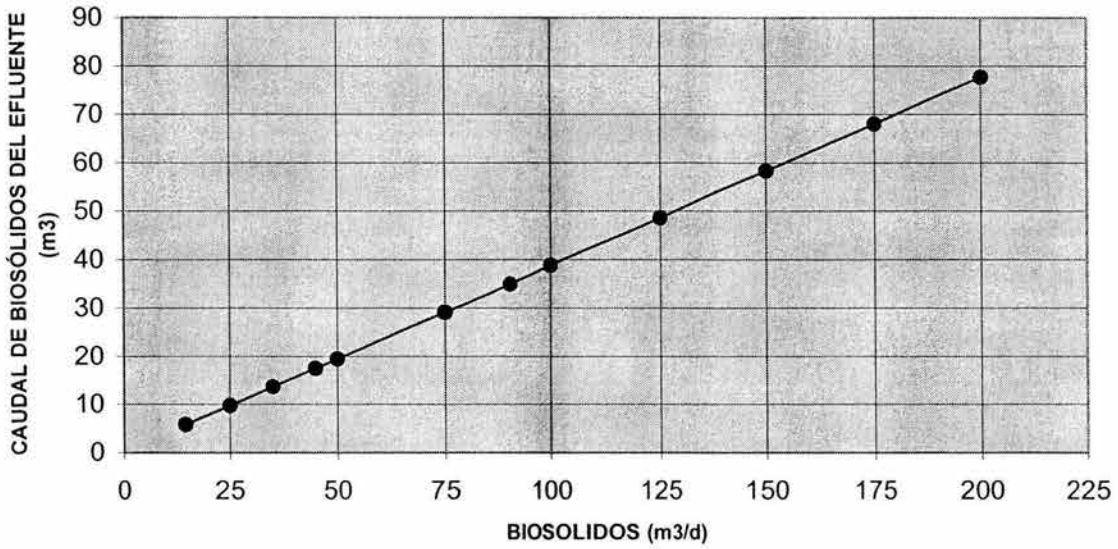
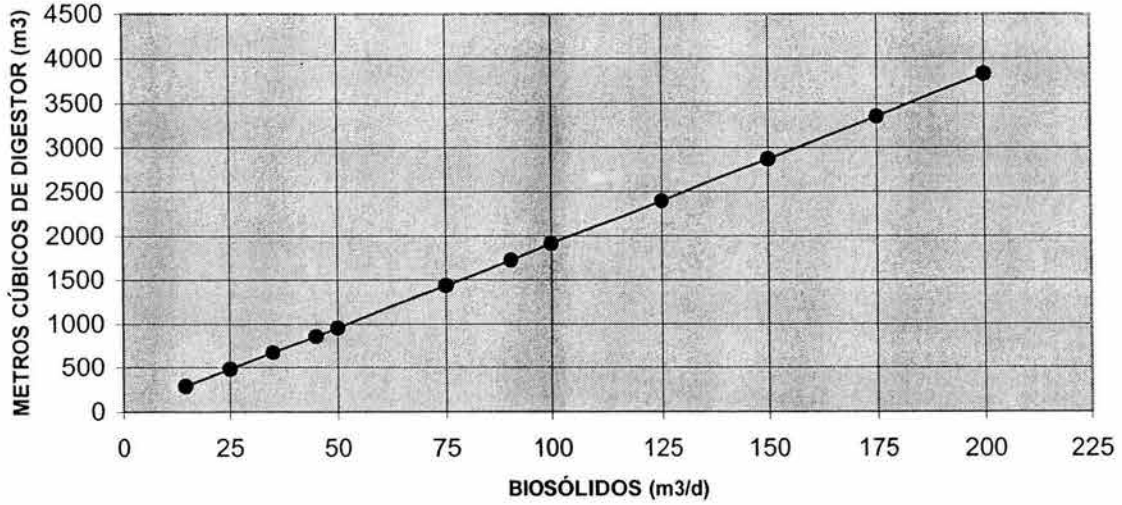
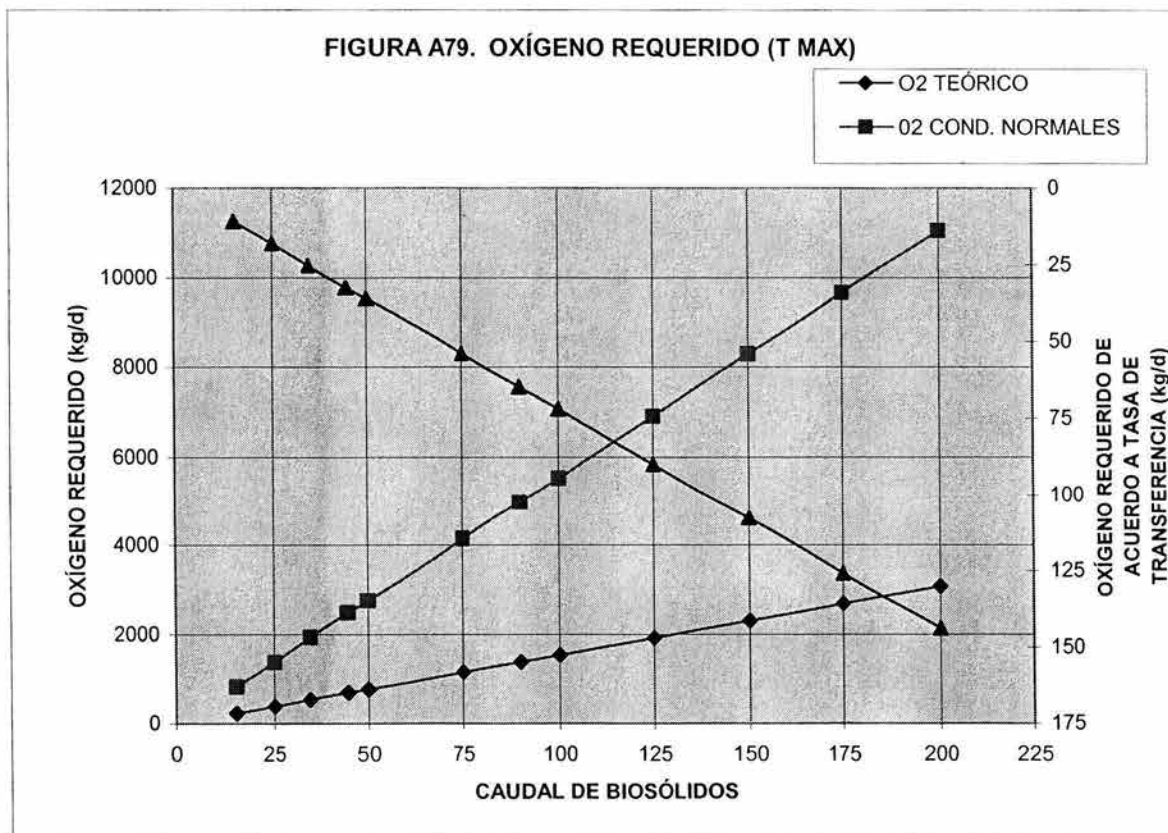
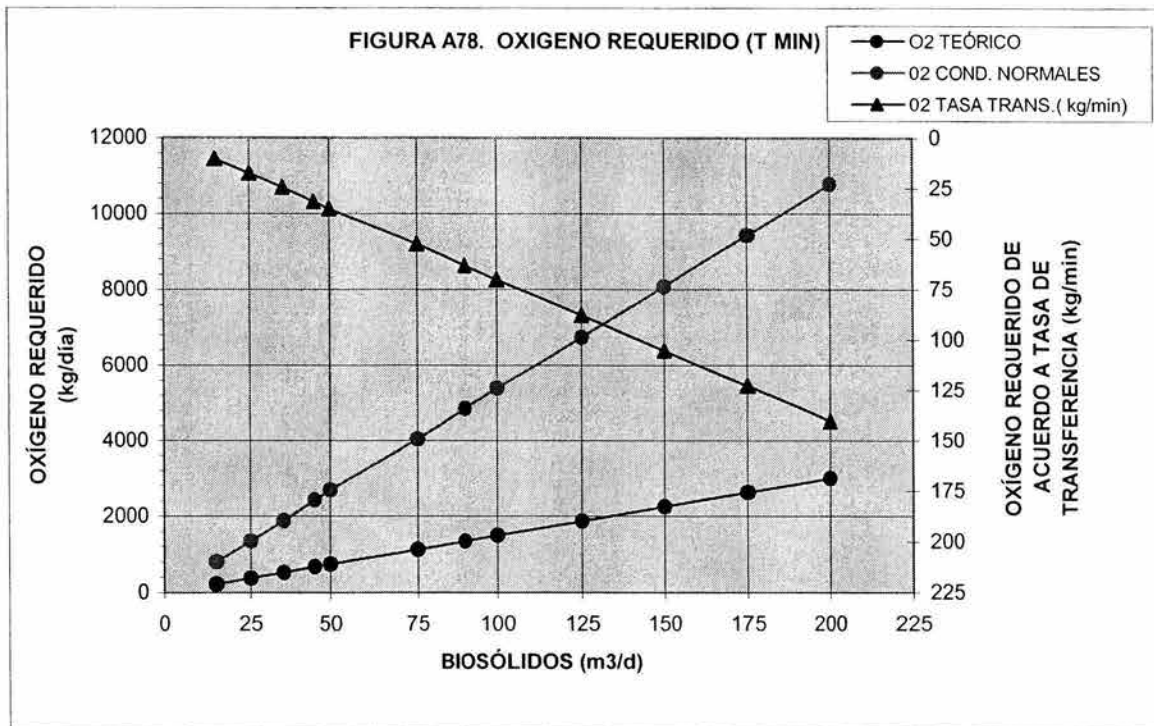
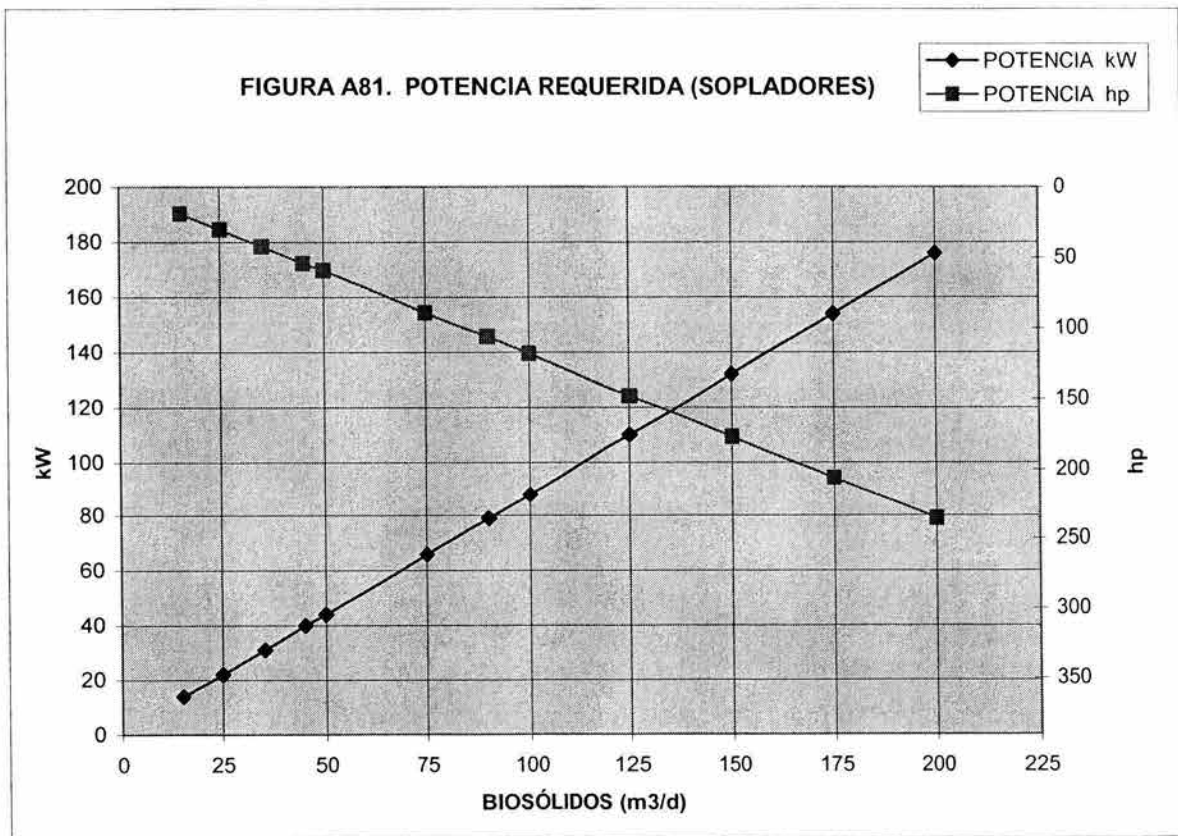
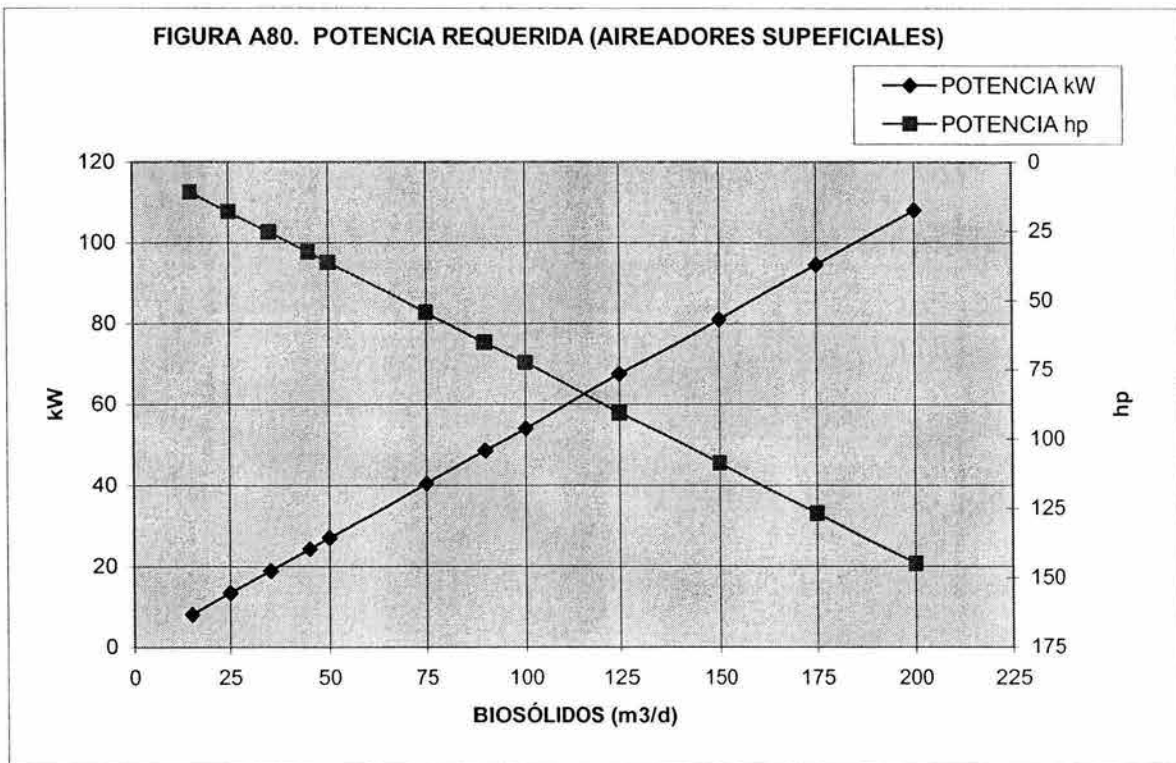
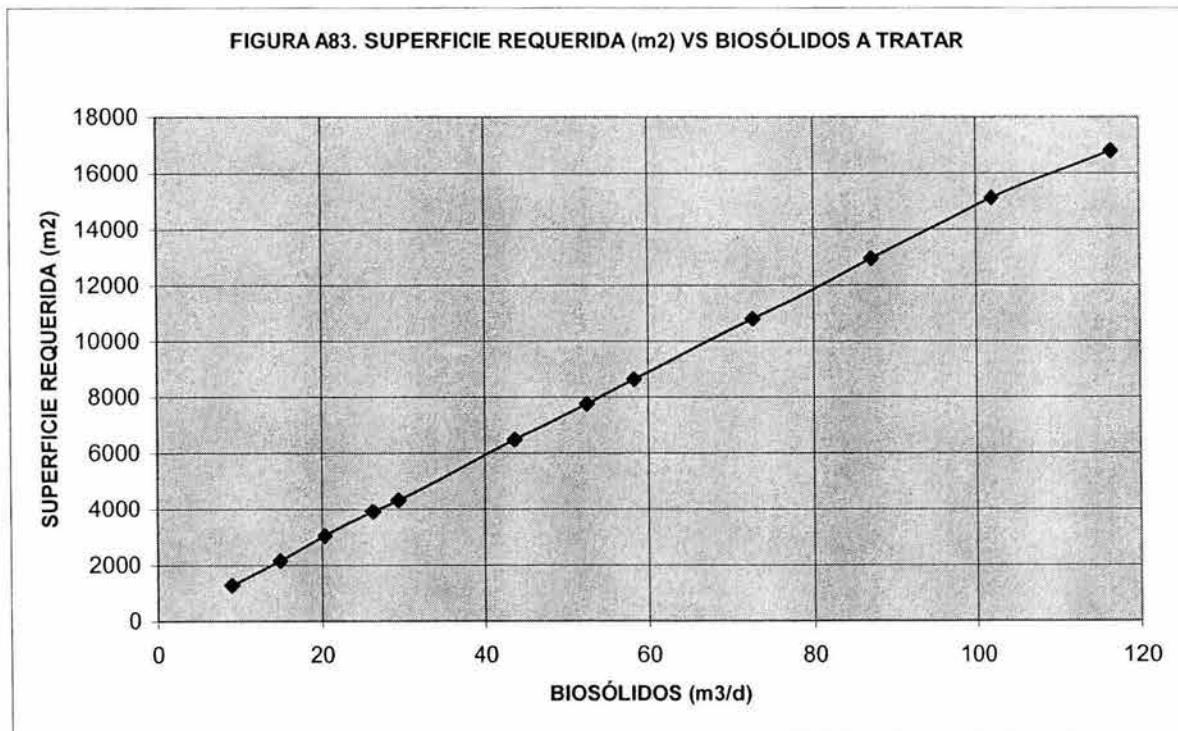
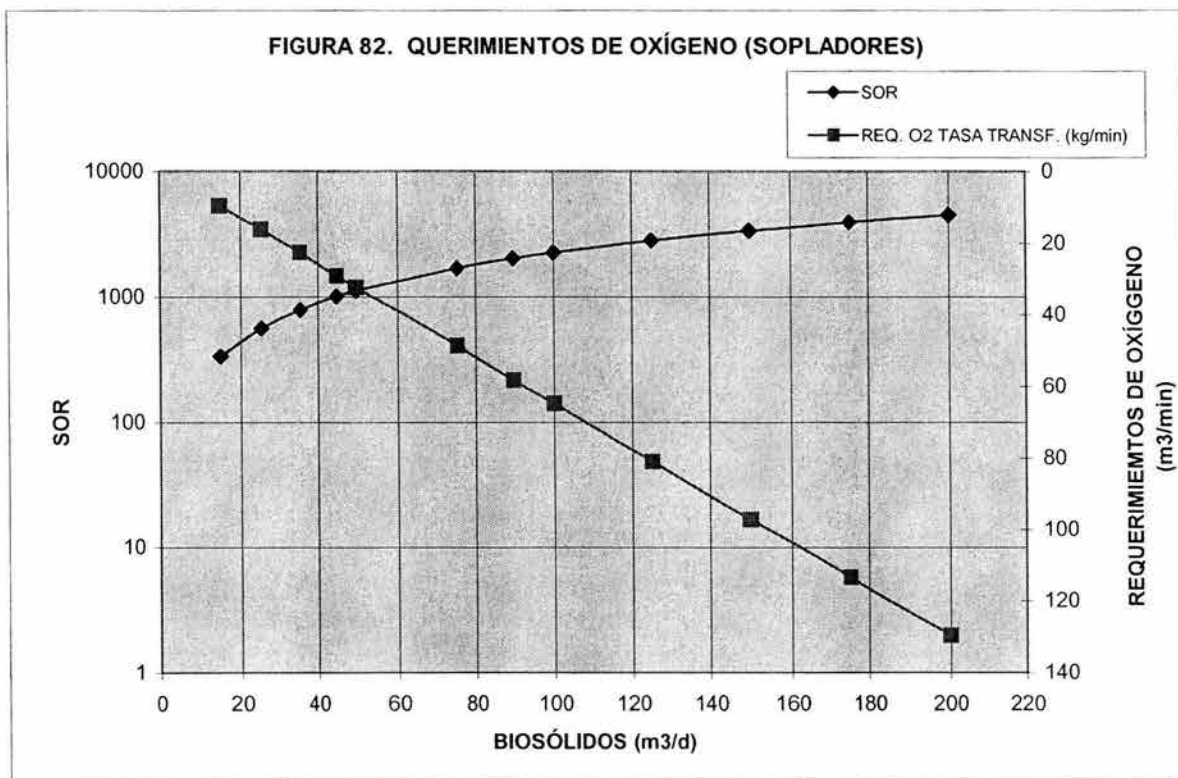


FIGURA A77. CAUDAL DE BIOSÓLIDOS A TRATAR VS. METROS CÚBICOS DE DIGESTOR









ANEXO B

Características físicas y cantidades de lodos esperadas a partir de varias operaciones y procesos de tratamiento de aguas residuales municipales

OPERACIONES O PROCESOS DE TRATAMIENTO	PESO ESPECÍFICO DE LOS SÓLIDOS DE LOS BIOSÓLIDOS	PESO ESPECÍFICO DE LOS BIOSÓLIDOS	SÓLIDOS SECOS kg. / 10 m³
Sedimentación primaria	1.4	1.02	108.4 – 150.6
Lodos activados	1.25	1.005	72.3 – 96.4
Filtros percoladores	1.45	1.0025	60.2 – 96.4
Aireación extendida	1.30	1.015	84.3 – 120.5
Lagunas aireadas	1.30	1.01	84.3 – 120.5
Filtración	1.20	1.005	12 – 24
Remoción de algas	1.20	1.005	12 – 24
Adición de químicos a sedimentadores primarios o remoción de fósforo (dosis de cal)			
350 – 500 mg/l	1.9	1.04	241 – 397.6
800 – 1,600 mg/l	2.2	1.05	602.4 – 1235.3
Lecho suspendido (nitrificación)	-	-	-
Lecho suspendido (desnitrificación)	1.20	1.005	12 – 30.1
Adaptado parcialmente de Metcalf & Eddy			

Concentraciones de biosólidos esperadas a partir de varias operaciones y procesos de tratamiento de aguas residuales municipales

OPERACIÓN O PROCESO	RANGO
Tanque de sedimentación primaria	
Biosólidos primarios	4.0 – 10.0
Primarios y lodos activados	3.0 – 8.0
Primarios y filtros percoladores	4.0 – 10.0
Primarios con adición de hierro para remoción de fósforo	0.5 – 3.0
Primarios con dosis bajas de cal para la remoción de fósforo	2.0 – 8.0
Primarios con dosis altas de cal para la remoción de fósforo	4.0 – 16.0
Espumas	3.0 – 10.0
Tanque de sedimentación secundaria	
<i>Lodos activados</i>	
Con sedimentación primaria	0.5 – 1.5
Sin sedimentación primaria	0.8 – 2.0
<i>Lodos activados con oxígeno puro</i>	
Con sedimentación primaria	1.3 – 3.0
Sin sedimentación primaria	1.4 – 4.0
Filtros percoladores	1.0 – 3.0
Biodiscos	1.0 – 3.0
Espesado por gravedad	
Primario solamente	5.0 – 10.0
Primario y lodos activados	2.0 – 8.0
Primario y filtros percoladores	4.0 – 9.0
DAF	
<i>Lodos activados solamente</i>	
Con adición de químicos	4.0 – 6.0
Sin adición de químicos	3.0 – 5.0
Espesado mediante centrifugación	
Lodos activados solamente	4.0 – 8.0
Espesado por gravedad mediante bandas	
Lodos activados con adición química	3.0 – 6.0
Digestión anaerobia	
Primarios solamente	5.0 – 10.0
Primarios y lodos activados	2.5 – 7.0
Primarios y filtros percoladores	3.0 – 8.0
Digestión aerobia	
Primarios solamente	2.5 – 7.0
Primarios y lodos activados	1.5 – 4.0
Lodos activados solamente	0.8 – 2.5
Adaptado parcialmente de Metcalf & Eddy	

Eficiencias de captura de sólidos para algunos procesos y operaciones de tratamiento de biosólidos

OPERACIÓN	CAPTURA DE SÓLIDOS %	CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS %
Espesado por gravedad	Rango	Rango
Biosólidos primarios solamente	85 – 92	4 – 10
Primarios con lodos activados	80 – 90	2 – 6
DAF		
Con adición química	90 – 98	3 – 6
Sin adición química	80 – 95	3 – 6
Espesado mediante centrifugas		
Con adición química	90 – 98	4 – 8
Sin adición química	80 – 90	3 – 6
Filtración al vacío		
Con adición química	90 – 98	15 – 30
Filtros banda		
Con adición química	85 – 98	15 – 30
Filtros prensa		
Con adición química	90 – 98	20 – 50
Centrifugación (desaguado)		
Con adición química	85 – 98	10 – 35
Sin adición química	55 – 90	10 – 30
Adaptado parcialmente de Metcalf & Eddy		

ESPESADORES POR GRAVEDAD

Datos de biosólidos provenientes de varias operaciones y procesos

TIPO DE BIOSÓLIDOS	CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS DEL INFLUENTE %	CONCENTRACIÓN ESPERADA DEL EFLUENTE %	CARGA DE SÓLIDOS RECOMENDADA KG/D/M ²
Biosólidos separados			
Primarios	0.1 – 6.0	5.0 – 10.0	97.6 – 146.4
Filtros percoladores	1.0 – 4.0	3.0 – 6.0	19 – 48.8
Biodiscos	1.0 – 3.5	2.0 – 5.0	34.1 – 48.8
Lodos Activados			
L.A. aire	0.5 – 1.5	2.0 – 3.0	19.5 – 39.0
L.A. oxígeno	0.5 – 1.5	2.0 – 3.0	24.1 – 39.0
L.A. aireación extendida	0.2 – 1.0	2.0 – 3.0	24.1 – 39.0
Digestión anaerobia (provenientes de un digestor primario)	8.0	12.0	117.1
Acondicionamiento térmico			
Primario	3.0 – 6.0	12.0 – 15.0	195.2 – 244.1
Primario y lodos activados	3.0 – 6.0	8.0 – 15.0	146.4 – 195.2
Lodos activados solamente	0.5 – 1.5	6.0 – 10.0	97.6 – 146.4
Lodos terciarios			
Adición de dosis bajas de cal	3.0 – 4.5	12.0 – 15.0	117.1 – 297.8
Adición de dosis altas de cal	3.0 – 4.5	10.0 – 12.0	48.8 – 146.4
Adición de hierro	0.5 – 1.5	3.0 – 4.0	9.7 – 48.8
Otros			
Primario y lodos activados	0.5 – 1.5	4.0 – 6.0	24.1 – 68.3
Primario y filtros percoladores	2.0 – 6.0	5.0 – 9.0	58.5 – 97.6
Primario y biodiscos	2.0 – 6.0	5.0 – 9.0	58.5 – 97.6
Primario + hierro	2.0	4.0	29.2
Primario + (L.A. + hierro)	1.5	3.0	29.2
Primario +(L.A. + aluminio)	0.2 – 0.4	4.5 – 6.5	58.5 – 78.1
Primario + dosis bajas de cal	5.0	7.0	97.6
Primario + dosis altas de cal	7.5	12.0	117.1
(Pri + hierro) + filtro percolador	0.4 – 6.0	6.5 – 8.5	68.3 – 97.6
(Pri + hierro) + lodos activados	1.8	3.6	29.2
L.A. + filtros percoladores	0.5 – 2.5	2.0 – 4.0	19.5 – 39.0
Digestión anaerobia			
Primario y lodos activados	4.0	8.0	68.3
Digestión anaerobia + (L.A. + hierro)	4.0	6.0	68.3
PRI = biosólidos primarios. L.A. = lodos activados			
Adaptado parcialmente de Manual of Practice MOP -11			

Datos de biosólidos provenientes de varias operaciones y procesos

TIPO DE BIOSÓLIDOS	CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS DEL INFLUENTE %	CONCENTRACIÓN ESPERADA DEL EFLUENTE %	CARGA DE SÓLIDOS RECOMENDADA kg/hr/m ²
Biosólidos separados			
Primarios	2.0 – 7.0	5.0 – 10.0	4.06 – 6.10
Filtros percoladores	1.0 – 4.0	3.0 – 6.0	0.79 – 2.0
Biodiscos	1.0 – 3.5	2.0 – 5.0	1.42 – 2.0
Lodos Activados			
L.A. aire	0.5 – 1.5	2.0 – 3.0	0.81 – 1.62
L.A. oxígeno	0.5 – 1.5	2.0 – 3.0	1.0 – 1.62
L.A. aireación extendida	0.2 – 1.0	2.0 – 3.0	1.0 – 1.62
Digestión anaerobia (provenientes de un digestor primario)	8.0	12.0	4.87
Acondicionamiento térmico			
Primario	3.0 – 6.0	12.0 – 15.0	8.13 – 10.17
Primario y lodos activados	3.0 – 6.0	8.0 – 15.0	6.10 – 8.13
Lodos activados solamente	0.5 – 1.5	6.0 – 10.0	4.06 – 6.10
Lodos terciarios			
Adición de dosis bajas de cal	3.0 – 4.5	12.0 – 15.0	4.87 – 12.40
Adición de dosis altas de cal	3.0 – 4.5	10.0 – 12.0	2.03 – 6.10
Adición de hierro	0.5 – 1.5	3.0 – 4.0	0.37 – 2.03
Otros			
Primario y lodos activados	0.5 – 1.5	4.0 – 6.0	1.0 – 2.84
	2.5 – 4.0	6.5 – 8.5	
Primario y filtros percoladores	2.0 – 6.0	5.0 – 9.0	2.43 – 4.06
Primario y biodiscos	2.0 – 6.0	5.0 – 9.0	2.43 – 4.06
Primario + hierro	2.0	4.0	1.21
Primario + (L.A. + hierro)	1.5	3.0	1.21
Primario +(L.A. + aluminio)	0.2 – 0.4	4.5 – 6.5	2.43 – 3.25
Primario + dosis bajas de cal	5.0	7.0	4.06
Primario + dosis altas de cal	7.5	12.0	4.87
(Pri + hierro) + filtro percolador	0.4 – 6.0	6.5 – 8.5	2.84 – 4.06
(Pri + hierro) + lodos activados	1.8	3.6	1.21
L.A. + filtros percoladores	0.5 – 2.5	2.0 – 4.0	0.81 – 1.62
Digestión anaerobia			
Primario y lodos activados	4.0	8.0	2.84
Digestión anaerobia + (L.A. + hierro)	4.0	6.0	2.84
PRI = biosólidos primarios. L.A. = lodos activados			
Adaptado parcialmente de Process Desing Manual for sludge Treatment and Disponsal			

Datos de biosólidos provenientes de varias operaciones y procesos

TIPO DE BIOSÓLIDOS	CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS DEL INFLUENTE %	CONCENTRACIÓN ESPERADA DEL EFLUENTE %	CARGA DE SÓLIDOS RECOMENDADA KG/D/M ²
Biosólidos separados			
Primarios	0.1 – 6.0	5.0 – 10.0	97.6 – 146.4
Filtros percoladores	1.0 – 4.0	3.0 – 6.0	19 – 48.8
Biodiscos	1.0 – 3.5	2.0 – 5.0	34.1 – 48.8
Lodos Activados			
L.A. aire	0.5 – 1.5	2.0 – 3.0	19.5 – 39.0
L.A. oxígeno	0.5 – 1.5	2.0 – 3.0	24.1 – 39.0
L.A. aireación extendida	0.2 – 1.0	2.0 – 3.0	24.1 – 39.0
Digestión anaerobia (provenientes de un digestor primario)	8.0	12.0	117.1
Acondicionamiento térmico			
Primario	3.0 – 6.0	12.0 – 15.0	195.2 – 244.1
Primario y lodos activados	3.0 – 6.0	8.0 – 15.0	146.4 – 195.2
Lodos activados solamente	0.5 – 1.5	6.0 – 10.0	97.6 – 146.4
Lodos terciarios			
Adición de dosis bajas de cal	3.0 – 4.5	12.0 – 15.0	117.1 – 297.8
Adición de dosis altas de cal	3.0 – 4.5	10.0 – 12.0	48.8 – 146.4
Adición de hierro	0.5 – 1.5	3.0 – 4.0	9.7 – 48.8
Otros			
Primario y lodos activados	0.5 – 1.5	4.0 – 6.0	24.1 – 68.3
Primario y filtros percoladores	2.0 – 6.0	5.0 – 9.0	58.5 – 97.6
Primario y biodiscos	2.0 – 6.0	5.0 – 9.0	58.5 – 97.6
Primario + hierro	2.0	4.0	29.2
Primario + (L.A. + hierro)	1.5	3.0	29.2
Primario +(L.A. + aluminio)	0.2 – 0.4	4.5 – 6.5	58.5 – 78.1
Primario + dosis bajas de cal	5.0	7.0	97.6
Primario + dosis altas de cal	7.5	12.0	117.1
(Pri + hierro) + filtro percolador	0.4 – 6.0	6.5 – 8.5	68.3 – 97.6
(Pri + hierro) + lodos activados	1.8	3.6	29.2
L.A. + filtros percoladores	0.5 – 2.5	2.0 – 4.0	19.5 – 39.0
Digestión anaerobia			
Primario y lodos activados	4.0	8.0	68.3
Digestión anaerobia + (L.A. + hierro)	4.0	6.0	68.3
PRI = biosólidos primarios. L.A. = lodos activados			
Adaptado parcialmente de Manual of Practice MOP - 8			

Concentraciones esperadas de biosólidos espesados y no espesados y cargas superficiales para el diseño de espesadores por gravedad

OPERACIÓN O PROCESO	CONCENTRACIÓN DE LOS BIOSÓLIDOS EN %		CARGA SUPERFICIAL
	Sin espesar	espesado	
Biosólidos primarios	2.0 – 7.0	5.0 – 10.0	87.8 – 136.7
Filtros percoladores	1.0 – 4.0	3.0 – 6.0	34.1 – 48.8
Biodiscos	1.0 – 3.5	2.0 – 5.0	34.1 – 48.8
Lodos activados (con aire)	0.5 – 1.5	2.0 – 3.0	12.2 – 34.1
Lodos activados (con oxígeno)	0.5 – 1.5	2.0 – 3.0	12.2 – 34.1
Lodos activados aireación extendida	0.2 – 1.0	2.0 – 3.0	24.4 – 34.1
Biosólidos primarios digeridos provenientes de digestores anaerobios primarios	8.0	12.0	122.0
Operaciones combinadas			
Primarios y filtros percoladores	2.0 – 6.0	4.0 – 9.0	58.6 – 97.6
Primarios y biodiscos	2.0 – 6.0	4.0 – 8.0	48.8 – 78.1
Primario y aireación modificada	3.0 – 4.0	5.0 – 10.0	58.6 – 97.6
Primarios y lodos activados (con aire)	2.0 – 5.0	2.0 – 8.0	39.0 – 78.1
Lodos activados y filtros percoladores	0.5 – 2.5	2.0 – 4.0	12.2 – 34.1
Lodos primarios digeridos anaerobiamente y lodos activados	4.0	8.0	68.3
Acondicionamiento térmico			
Primarios y lodos activados	3.0 – 6.0	8.0 – 15.0	136.7 – 195.3
Lodos activados	0.5 – 1.5	6.0 – 10.0	97.6 – 136.7
Adaptado parcialmente de Metcal & Eddy			

Criterios para el diseño de espesadores por gravedad

TIPO DE BIOSÓLIDOS	CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS EN EL INFLUENTE	CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS EN EL EFLUENTE	CARGA HIDRÁULICA (M ³ /M ² .D)	CARGA DE SÓLIDOS (KG/M ² .D)	CAPTURA DE SÓLIDOS EN %
Primarios	1.0 – 7.0	5.0 – 10.0	24 – 33	90 – 144	85 – 98
Filtros percoladores	1.0 – 4.0	2.0 – 6.0	2.0 – 6.0	35 – 50	80 – 92
Lodos activados	0.2 – 1.5	2.0 – 6.0	2.0 – 4.0	10 – 35	60 – 85
Primarios y lodos activados	0.5 – 2.0	4.0 – 6.0	4.0 – 10.0	25 – 80	85 – 92
Adaptado parcialmente de Syed Qasim					

Algunas dosis típicas de algunos productos químicos para el espesado de biosólidos

BIOSÓLIDOS	NATURALEZA DE LOS BIOSÓLIDOS / DOSIS DE QUÍMICOS			
	Crudo		Digestión anaerobia	
	FeCl ₃ (mg/l)	CaO (mg/l)	FeCl ₃ (mg/l)	CaO (mg/l)
Primarios	1 – 2	6 – 8	1.5 – 3.5	6 – 10
Primarios y filtros percoladores	2 – 3	6 – 8	1.5 – 3.5	6 – 10
Primario t lodos activados	1.5 – 2.5	7 – 9	1.5 – 4.0	6 – 10
Lodos activados	7 – 9	–	–	–

Adaptado parcialmente de Manual of Practice MOP – OM-8

Características de sólidos totales en algunos tipos de biosólidos

BIOSÓLIDOS	VISCOSIDAD BAJA (% SÓLIDOS TOTALES)	VISCOSIDAD ALTA (% SÓLIDOS TOTALES)
Lodos primarios crudos	< 6.0	6.0 – 12.0
Lodos crudos secundarios	< 2.0	2.0 – 6.0
Lodos crudos primarios y secundarios	< 3.0	3.0 – 8.0
Lodos digeridos	< 4.0	4.0 – 10.0
Lodos con adición química		
Terciarios		
Acondicionados con Cal	< 4.0	15.0 – 40.0
Acondicionados con hierro y aluminio	< 15.0	2.0 – 6.0

Adaptado parcialmente de Manual of Practice MOP – OM-8

Cargas uniformemente repartidas en rastras de espesadores pro gravedad para el tratamiento de biosólidos

TIPO DE BIOSÓLIDOS	CARGA UNIFORME, W (KG/M)
Primarios solamente (con pocas arenas)	44.7
Primarios solamente (con arenas)	59.6
Primarios + cal	59.6 – 89.4
Aire	29.8
Lodos activados	
Oxígeno	29.8
Filtros percoladores	29.8
Acondicionamiento térmico	119.2
Primario + lodos activados	29.8 – 44.7
Primarios + filtros percoladores	29.8 – 44.7
Las velocidades de las rastras varían entre 3 y 6 m/min	

Adaptado parcialmente de Process Desing Manual for sludge Treatment and Disponsal

DIGESTORES AEROBIOS

Parámetros de diseño para digestores aerobios

PARÁMETROS	RANGO
Tiempo de retención hidráulico a 20 ° C, d ^a	
Lodos activados solamente	10 – 15
Lodos activados sin sedimentación primaria	12 -18
Carga de sólidos, kg sólidos volátiles / m ³ .d	1.60 – 4.80
Requerimientos de oxígeno kg O₂ / kg de sólidos	
Tejido celular ^b	~ 2.3
Energía requerida para el mezclado	
Aireadores mecánicos kW / 10 ³ m ³	19.75 – 39.50
Mezclado requerido para difusores de aire m ³ / m ³ . min	0.2 – 0.4
Oxígeno disuelto residual en el efluente mg/l	
Reducción de sólidos volátiles, %	
40.0 – 50.0	
^a Para temperaturas arriba de 20 grados el valor de retención se incrementa	
^b Amonia producida durante la oxidación carbonácea	
<i>Adaptado parcialmente de Metcalf & Eddy</i>	

Parámetros de diseño para digestores aerobios

PARÁMETROS	RANGO
Tiempo de retención hidráulico a 20 ° C, d ^a	
Lodos activados solamente	10 – 15
Lodos activados sin sedimentación primaria	12 -18
Carga de sólidos, kg sólidos volátiles / m ³ .d	1.60 – 4.80
Requerimientos de oxígeno kg O₂ / kg de sólidos	
Tejido celular ^b	~ 2.3
Energía requerida para el mezclado	
Aireadores mecánicos kW / 10 ³ m ³	19.75 – 39.50
Mezclado requerido para difusores de aire m ³ / m ³ . min	0.2 – 0.4
Oxígeno disuelto residual en el efluente mg/l	
Reducción de sólidos volátiles, %	
40.0 – 50.0	
^a Para temperaturas arriba de 20 grados el valor de retención se incrementa	
^b Amonia producida durante la oxidación carbonácea	
<i>Adaptado parcialmente de MOP - 11</i>	

Parámetros de diseño para digestores aerobios

PARÁMETROS	RANGO DE VALORES	COMENTARIO
Tiempo de retención de los sólidos, d	10 – 15 ^a 15 – 20 ^b	Depende de la temperatura, mezclado, biosólidos, etc., el rango varía entre 10 y 40 días
Volumen (proporción)		
m ³ / per. cápita	0.085 – 0.113	Depende de la temperatura, mezclado, biosólidos, etc.
Carga de sólidos volátiles		Depende de la temperatura, mezclado, biosólidos, etc.
kg / m ³ .d	0.348 – 1.600	
Requerimientos de aire		Suficiente para mantener los sólidos en suspensión y mantener una concentración de OD entre 1 y 2 mg/l
<i>Difusores de aire</i>		
m ³ / m ³ . min.	20 – 35 ^a	
m ³ / m ³ . min.	< 0.6 ^b	
<i>Mezcladores de aire</i>		
kW / m ³	0.0263 – 0.0392	
OD disuelto mínimo, mg / l	1.0 – 2.0	
Temperatura, ° C	> 15	Si la temperatura de los biosólidos es menor de 15 ° C un tiempo adicional de detención debería de considerarse porque las reacciones cinéticas serán más lentas
Reducción en sólidos suspendidos volátiles (en %)	35 -50	
Energía requerida		
KW por cada 10,000 de población equivalente	6.0 – 7.5	
^a lodos activados solamente		
^a lodos primarios solamente		
Adaptado parcialmente de Waste Water Treatment Plants		

CRITERIOS DE DISEÑO PARA DIGESTORES AEROBIOS

	DÍAS	TEMPERATURA ° C
Tiempo de residencia de los sólidos para alcanzar un 40 % de reducción en los sólidos suspendidos volátiles	108	4.44
	31	15.55
	18	26.66
Tiempo de residencia de los sólidos para alcanzar un 50 % de reducción en los sólidos suspendidos volátiles	386	4.44
	109	15.55
	64	26.66
Oxígeno residual	1.0 mg / l en las condiciones más desfavorables de diseño	
Requerimientos de oxígeno	2.0 kg de O ₂ por kg de sólidos volátiles destruidos cuando la temperatura es igual o menor a 45° C	
	1.5 kg de O ₂ por kg de sólidos volátiles destruidos cuando la temperatura es mayor a 45° C	
Concentración máxima esperada (con decantación)	Del 1.5 al 3.5 % cuando no se han adicionado productos químicos a los biosólidos	
Potencia de mezclado	Se encuentra en función de la geometría del tanque y el sistema de mezclado que se pretenda utilizar. Valores heurísticos recomiendan entre 13.3 – 106.4 kW / 10 ³ m ³ del volumen del tanque.	
<i>Adaptado parcialmente de Process and Design Manual for Sludge Treatment and Disposal</i>		

PARÁMETROS DE DISEÑO PARA DIGESTORES AEROBIOS

PARÁMETRO	RANGO
Tiempo de retención hidráulico (días, a 20° C)	18 – 20
Lodo activado proveniente de bioadsorción o una estabilización (sin sedimentación primaria)	16 – 18
Lodos activados	12 – 16
<i>Tiempo mínimo de residencia celular θ_c, días</i>	
Primario + lodos activados	15 – 20
Lodos activados	10 – 15
<i>Tiempo máximo de residencia celular θ_c, días</i>	45- 60
Concentración de sólidos, mg/l	> 50,000
<i>Carga Orgánica</i>	
kg de SSV por m ³ / día	0.64 – 3.20
<i>Carga volumétrica</i>	
m ³ per cápita	0.042 – 0.113
Temperatura de operación	> 15
Destrucción de sólidos volátiles %	40 – 75
Destrucción de sólidos (debido a los SSV)	35 – 75
<i>Requerimientos de oxígeno</i>	
Solamente primarios (kg/kg)	1.9
Lodos activados (kg/kg)	2.0
Filtros percoladores	2.0
Oxígeno disuelto mínimo	2.0
<i>Requerimientos de mezclado</i>	
Difusión de aire para lodos primarios + lodos activados (m ³ /min-1000 m ³)	> 60
Difusores de aire para lodos activados solamente (m ³ /min-1000 m ³)	20 – 40
Aireación mecánica para lodos primarios + lodos activados (m ³ /min-1000 m ³)	19.8 – 39.5
<i>Adaptado parcialmente de Unit Operations and Process in Environmental Engineering</i>	

FILTROS PRENSA

Eficiencias esperadas en filtros prensa en el tratamiento de biosólidos en aguas residuales municipales

TIPO DE BIOSÓLIDOS	ACONDICIONAMIENTO	PORCENTAJE DE SÓLIDOS EN EL INFLUENTE	DURACIÓN DEL CICLO (EN HORAS)	PORCENTAJE DE SÓLIDOS EN LA TORTA
Primario solamente	5 % FeCl ₃ , 10 % cal, 100 % ash	5	2.0	45
			1.5	50
Primario + FeCl ₃	Polímero 10 % cal	4 – 8 4 *	4	45
				40
Primario + 2 etapas con adición de cal	–	7.5	1.5	50
Primario + lodos activados	5 % FeCl ₃ , 10 % cal 150 % ash Polímero	8 4 – 7	2.5	45
			2.0	50
				35
Primario + (lodos activados + FeCl ₃)	5 % FeCl ₃ , 10 % cal	8 *	3.0	45
(Primario + FeCl ₃) + lodos activados	10 % cal	3.5 *	4.0	40
Lodos activados solamente	7.5 FeCl ₃ , 15 % cal 250 % ash	5 *	2.5	45
			2.0	50
Lodos activados + FeCl ₃	5 % FeCl ₃ , 10 % cal	5	3.5	45
Primarios digeridos	6 % FeCl ₃ , 30 % cal	8	2.0	40
Primarios digeridos + lodos activados	5% FeCl ₃ , 10 % cal 100 % ash	6 – 8 *	2.0	45
			1.5	50
Primarios digeridos + (lodos activados + FeCl ₃)	5 % FeCl ₃ , 10 % cal	6 – 8 *	3.0	40
Terciarios + aluminio	100 % cal	4 *	6	35
Terciarios con dosis bajas de cal	–	8 *	1.5	55
Se recomienda un espesamiento para obtener estas concentraciones				
Adaptado parcialmente de Manual of Practice MOP – OM -8				

Eficiencias esperadas en filtros prensa en el tratamiento de biosólidos de aguas residuales municipales

TIPO DE BIOSÓLIDOS	SÓLIDOS EN EL INFLUENTE, EN %	DOSIS DE ACONDICIONAMIENTO KG/TON			TORTA ACONDICIONADA (% DE SÓLIDOS)	TORTA SIN ACONDICIONADO (% DE SÓLIDOS)	TIEMPO DEL CICLO (HORAS)
		FeCl ₃	CaO	Ash			
Primario crudo	5 – 10	100	200	2,000	45 50	39 25	2.0 1.5
Primario con menos del 50 % de lodos activados	3 – 6	100	200	3,000	45 50	39 20	2.5 2.0
Primario con más del 50 % de lodos activados	1 – 4	120	240	4,000	45 50	38 17	2.5 2.0
Lodos activados	1 – 5	150	300	5,000	45 50	35 14	2.5 2.0
Anaerobiamen te digerido							
primario con lodos activados (LA < del 50 %)	6 – 10	100	200	2,000	45 50	39 25	2.0 1.5
primario con lodos activados (LA > del 50 %)	2 - 6	150	300	4,000	45 50	37 17	2.5 1.5
Adaptado parcialmente de Process Design Manual for Sludge Treatment and Disposal							

**Eficiencias esperadas en filtros prensa en el tratamiento de biosólidos
provenientes de aguas residuales municipales**

TIPO DE BIOSÓLIDOS	CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS EN EL INFLUENTE (% SÓLIDOS)	DOSIS QUÍMICA (% EN MASA SECA)		SÓLIDOS EN LA TORTA (%)
		FeCl ₃	CaO	
Primario y secundario	4	5	15	40
Anaerobiamente digerido Primario y secundario	4	6	16	40
Acondicionado térmicamente Primario y secundario	14	0	0	60
Adaptado parcialmente de Waste Water Treatment Plants				

FILTROS BANDA

**Eficiencias típicas para filtros banda en el tratamiento de biosólidos
provenientes de plantas de tratamiento de agua residuales municipales**

TIPO DE BIOSÓLIDOS	INFLUENTE (SÓLIDOS %)	TORTA (SÓLIDOS, %)
Primarios solamente	3 – 7	28 – 44
Primarios + lodos activados	3 – 6	20 – 35
Primarios + filtros percoladores	3 – 6	20 – 35
Lodos activados	1 – 4	12 – 20
Digeridos anaerobiamente		
Primarios solamente	3 – 7	25 – 35
Primarios + lodos activados	3 – 6	20 – 25
Lodos activados solamente	3 – 4	12 – 20
Digeridos aeróbicamente		
Primarios + lodos activados	1 – 3 1 – 4	12 – 20 12 – 30
Acondicionados térmicamente		
Primarios y lodos activados	4 – 8	25 – 50
Las dosis están sobre la base de polímero de alto peso molecular		
Adaptado parcialmente de Metcalf & Eddy		

**Datos de diseño para filtros banda en el tratamiento de biosólidos
provenientes de plantas de tratamiento de agua residuales municipales**

TIPO DE BIOSÓLIDOS	INFLUENTE, SÓLIDOS SECOS, %	CARGA POR METRO POR ANCHO DE BANDA		POLÍMERO SECO, G/KG DE SÓLIDOS SECOS	SÓLIDOS DE LA TORTA %
		l/s	kg/h		
Primario crudo (Pri)	3 – 7	1.9 – 3.2	360 – 550	1 – 4	26 – 32
Lodos activados (LA)	1 – 4	0.6 – 2.5	45 – 180	3 – 10	12 – 20
Pri + LA (50 – 50)	3 – 6	1.3 – 3.2	180 – 320	2 – 8	20 – 28
Pri + LA (40 – 60)	3 – 6	1.3 – 3.2	180 – 320	2 – 10	18 – 25
Pri + filtro percolador (FP)	3 – 6	1.3 – 3.2	180 – 320	2 – 8	23 – 30
Anaerobiamente digeridos					
Pri	3 – 7	1.9 – 3.2	360 – 550	2 – 5	24 – 30
LA	3 – 4	0.6 – 2.5	45 – 135	4 – 10	12 – 20
Pri + LA	3 – 6	1.3 – 3.2	180 – 320	3 – 8	20 – 25
Aeróbicamente digeridos					
Pri + LA sin espesar	1 – 3	0.6 – 3.2	135 – 225	2 – 8	12 – 20
Pri + LA (50 – 50) espesado	4 – 8	0.6 – 3.2	135 – 225	2 – 8	12 – 25
Lodos activados					
Con oxígeno	1 – 3	0.6 – 2.5	90 – 180	4 – 10	15 – 23
Adaptado parcialmente de Manual of Practice MOP – 8					

**Datos de diseño para filtros banda en el tratamiento de biosólidos
provenientes de plantas de tratamiento de agua residuales municipales**

TIPO DE BIOSÓLIDOS	INFLUENTE (SÓLIDOS %)	TORTA (SÓLIDOS EN %)	POLÍMERO (KILOGRAMOS SECOS POR TONELADA DE MASA SECA, KG/TON)
Primario crudo	3 - 10	28 - 44	2 - 9
Lodos activados	1 - 3 0.5 - 1.5	16 - 32 12 - 28	2 - 4 4 - 12
Primario + lodos activados	3 - 6	20 - 35	2 - 10
Primario + filtros percoladores	3 - 6	20 - 40	3 - 10
Anaerobiamente digeridos			
Primarios	4 - 10	26 - 36	2 - 6
Lodos activados	3 - 4	18 - 22	4 - 8
Primarios + lodos activados	3 - 9	18 - 44	3 - 9
Aeróbicamente digeridos			
Primarios + lodos activados	1 - 3 6 - 8	12 - 18 20 - 30	4 - 8 3 - 9
Acondicionamiento térmico			
Primarios + lodos activados	4 - 8	38 - 50	-
Adaptado parcialmente de Process Design Manual of Sludge Treatment and Disposal			

Datos aproximados de diseño y eficiencias para filtros banda en el tratamiento de biosólidos provenientes de plantas de tratamiento de agua residuales municipales

	ANAEROBIAMENTE DIGERIDOS (50% PRI Y 50% LA EN PESO)	AERÓBICAMENTE DIGERIDOS (LODOS ACTIVADOS)	LODOS ACTIVADOS SOLAMENTE	LODO PRIMARIO CRUDO	PRIMARIO Y LODOS ACTIVADOS (60% PRI Y 40% LA EN PESO)
Sólidos en el influente (% ST)	3 – 5	1 – 2.5	0.5 – 1.3	4 – 6	3 – 5
Carga hidráulica (l/s/m)	6.4 – 15	7.3 – 23	10.4 – 23	11.4 – 23	9.1 – 23
Carga de sólidos (kg/h/m)	318 – 454	181 – 318	136 – 272	681 – 1,134	454 – 681
Sólidos en el efluente (% ST)	18 – 24	14 – 18	14 – 18	25	23 – 28
Captura de sólidos(%)	95	92 - 95	90 - 95	95	95
Adaptado parcialmente de Manual of Practice MOP – 11					

Dosis típicas de polímero para filtros banda en el tratamiento de biosólidos provenientes de plantas de tratamiento de agua residuales municipales

TIPO DE BIOSÓLIDOS	POLÍMERO BASE SECA KG/TON DE SOPLIDOS SECOS
	Rango
Primario solamente	1 – 4.5
Primario + filtros percoladores	1.5 – 7.5
Primario + lodos activados	1 – 10
Lodos activados solamente	1 – 10
Aeróbicamente digeridos	
Primarios + lodos activados	2 – 7.5
Anaerobiamente digeridos	
Primarios solamente	1 - 5
Primarios + lodos activados	1.5 – 7.5
Adaptado parcialmente de Manual of Practice MOP – 11	

ESTABILIZACIÓN CON CAL

Dosis típicas utilizadas en la estabilización de biosólidos con cal

TIPO DE LODO	CONCENTRACIÓN DE LOS SÓLIDOS %	DOSIS DE CAL KG $Ca(OH)_2$ / KG SECO
	Rango	Rango
Primario solamente	3.0 – 6.0	120 – 340
Lodos activados solamente	1 – 1.5	420 – 860
Aeróbicamente digerido (mezclado)	6.0 – 7.0	280 – 500
Séptico	1 – 4.5	180 – 1,020

Adaptado parcialmente de Metcalf & Eddy

Especificaciones mecánicas para mezcladores para estabilización química (cal)

CAPACIDAD DEL TANQUE, M ³	DIÁMETRO DEL TANQUE, M	CAPACIDAD DEL MOTOR, KW	VELOCIDAD DE LAS ASPAS, RPM	DIÁMETRO DE LA TURBINA, M
19	2.9	6	125	0.8
		4	84	1.0
		2	56	1.1
57	4.2	15	100	1.1
		11	68	1.3
		7	45	1.6
		6	37	1.7
114	5.2	30	84	1.5
		22	68	1.6
		19	56	2.0
		15	37	2.1
286	7.1	75	84	1.5
		56	68	1.6
		45	56	1.7
		37	37	2.1
380	7.8	93	84	1.8
		75	68	2.0
		56	45	2.4

Velocidad del fluido > 0.13 m/s. Numero de Reynolds del impulsor >. Configuración del tanque de meclado: profundidad del líquido igual al diámetro del tanque, deflectores con un ancho de 0.08 del diámetro situados a 90°

Adaptado parcialmente de Manual of Practice MOP – 8

Estudios piloto para la determinación de la dosis de cal requerida para mantener el pH arriba de 11 en un período de hasta 14 días

TIPO DE BIOSÓLIDOS	DOSIS DE CAL, KG CA(OH) ₂ /KG DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS
Primario solamente	0.10 – 0.15
Lodos activados solamente	0.360 – 0.50
Séptico	0.10 – 0.30

Adaptado parcialmente de Manual of Practice MOP – 8

LECHOS DE SECADO DE LODOS

Resumen de datos para establecer criterios de diseño para el dimensionamiento de lechos de secado de lodos Wedge – Wire, digeridos anaerobicamente sin acondicionamiento previo

BIOSÓLIDOS	LECHOS DE LODOS SIN CUBIERTA		SUPERFICIE PARA LECHOS CUBIERTOS M ² / PER CÁPITA
	Área m ² / per cápita	Carga de sólidos kg sólidos/ m ² /año	
Primarios	0.093 0.093 – 0.139	134.75	0.069 – 0.093
N° 45 latitud N	0.116		0.089
Entre 40° - 45° N	0.093		0.069
S 40° latitud N	0.069		0.052
Primarios acondicionados químicamente	0.186 0.186 – 0.209	107.80	0.093 – 0.116
N° 45 latitud N	0.232		0.173
Entre 40° - 45° N	0.186		0.139
S 40° latitud N	0.139		0.104
Primarios acondicionados químicamente con porcentaje bajo de lodos de filtros percoladores	0.148 0.116 – 0.162	107.80	0.093 – 0.116
N° 45 latitud N	0.173		0.145
Entre 40° - 45° N	0.139		0.116
S 40° latitud N	0.104		0.086
Primarios acondicionados químicamente con porcentaje bajo de lodos de lodos activados	0.279 0.162 – 0.232	73.50	0.116 – 0.139
N° 45 latitud N	0.202		0.156
Entre 40° - 45° N	0.162		0.125
S 40° latitud N	0.121		0.094

Adaptado parcialmente de Process Design Manual for Sludge Treatment and Disposal

Datos de diseño para lechos de secado de lodos Wedge - Wire

TIPO DE BIOSÓLIDOS	SÓLIDOS EN EL INFLUENTE, %	CONCENTRACIÓN DE LOS BIOSÓLIDOS, %	TIEMPO DE DESHIDRATACIÓN DÍAS	CAPTURA DE SÓLIDOS %
Primarios solamente	8.5	25	14	99
Filtros percoladores	2.9	8.8	0.83	85
Primarios digeridos + lodos activados	3.0	10.0	12	86
Lodos activados solamente	0.7	6.2	0.50	94
Lodos activados frescos	1.1	9.9	8	87
Lodos activados (espesados)	2.5	8.1	41	100
Adaptado parcialmente de Process Design Manual for Sludge Treatment and Disposal				

Resumen de datos para establecer criterios de diseño para el dimensionamiento de lechos de secado de lodos, digeridos anaerobicamente sin acondicionamiento previo

BIOSÓLIDOS	LECHOS DE LODOS A CIELO ABIERTO		SUPERFICIE PARA LECHOS CUBIERTOS M ² / PER CÁPITA
	Área m ² / per cápita	Carga de sólidos kg sólidos/ m ² /año	
Primarios	0.09 0.09 – 0.14	134	0.069 – 0.093
N° 45 latitud N	0.12		0.09
Entre 40° - 45° N	0.1		
S 40° latitud N	0.07		0.05
Primarios acondicionados químicamente	0.2 0.18 – 0.21	110	0.09 – 0.12
N° 45 latitud N	0.23		0.173
Entre 40° - 45° N	0.18		0.139
S 40° latitud N	0.14		0.104
Primarios acondicionados químicamente con porcentaje bajo de lodos de filtros percoladores	0.15 0.116 – 0.162	110	0.09 – 0.12
N° 45 latitud N	0.173		0.145
Entre 40° - 45° N	0.139		0.116
S 40° latitud N	0.104		0.086
Primarios acondicionados químicamente con porcentaje bajo de lodos de lodos activados	0.28 0.162 – 0.232 0.32 – 0.51	73 35 - 39	0.12 – 0.14
N° 45 latitud N	0.202		0.156
Entre 40° - 45° N	0.162		0.125
S 40° latitud N	0.121		0.094
Adaptado parcialmente de Manual of Practice MOP – 8			

Efecto de la digestión sobre los lechos de secado de lodos

MÉTODO DE REMOCIÓN	LODO CRUDO REMOVIDO %	LODO DIGERIDO REMOVIDO	
		Mal drenaje	Buen drenaje
Drenado	48 – 52	28	72
Decantación	4 – 9	22	2
Evaporación	43 - 44	50	27
Adaptado parcialmente de Manual of Practice MOP – 8			

Agua total drenada a partir de biosólidos aeróbicamente digeridos aplicados a lechos de secado de lodos

CONCENTRACIÓN DE LOS LODOS G/L	PÉRDIDA DE AGUA DEBIDO A LA PROFUNDIDAD DE APLICACIÓN %		
	100 mm	150 mm	200 mm
7.55			85.7
14.6	77.6		79.3
17.3	86.4	99.2	79.4
18.6	85.4	85.5	80.3
19.5	85.5		74.5
20.45	80.0	85.0	78.0
21.3			73.6
24.1	78.3		71.0
25.2	74.0		72.0
25.4	72.8	77.8	71.0
28.75	77.7	80.0	73.4
28.8	86.3	85.0	70.5
29.2	78.7	82.1	70.5
29.7	77.5	70.7	70.3
34.0			76.3
38.0	69	71.8	67.2
Promedio	79.2	80.0	73.4
Adaptado parcialmente de Manual of Practice MOP – 8			

Requerimientos de superficie para lechos de secado de lodos a cielo abierto

TIPO DE LODOS	ÁREA M²/PER CÁPITA	CARGA DE SÓLIDOS KG/M²/AÑO
Primarios digeridos	0.093 – 0.135	122.05 – 146.45
Primarios + filtros percoladores digeridos	0.116 – 0.162	87.87 – 122.05
Primarios + lodos activados digeridos	0.162 – 0.235	58.58 – 97.64
Primarios + lodos químicamente precipitados digeridos	0.186 – 0.235	97.64 – 161.10

Adaptado parcialmente de Metcalf & Eddy

ANEXO C

ESPESADO DIGESTIÓN LECHOS DE SECADO

CONCEPTO	UNIDAD	P.U	CANTIDAD	IMPORTE
Trazo y nivelación del terreno para desplante de estructuras, con aparatos de precisión, incluye: dejar referencias, equipo y mano de obra	m2	3.91	43.00	168.13
Excavación con máquina en material tipo II de 0.00 a 4.00 metros de profundidad en seco para estructuras.	m3	33.56	129.00	4,329.24
afine manual de fondo de la excavación realizada a máquina para dar niveles de desplante, incluye herramienta y mano de obra	m2	7.87	43.00	338.41
Relleno de estructuras con material de excavación compactado al 85% proctor en capas de 20 cm de espesor, incluye herramientas, mano de obra y equipo.	m3	27.72	43.00	1,191.96
Carga mecánica y acarreo en camión en 1er. Kilómetro del material del producto de excavación de estructuras	m3	6.18	129.00	797.22
Acarreo km subsecuente al primero del producto de cortes en terracerías y despalmes.	m3-km	3.23	129.00	2,083.35
Plantilla de concreto simple f'c 150 kg/cm2 de 5 cm de espesor, incluye fabricación, colado y desperdicio	m2	63.96	43.00	2,750.28
Acero de refuerzo fy = 4,200 kg/cm2 incluye suministro, habilitado, desperdicios, ganchos traslapes y colocación	ton	7342.10	4.20	30,836.82
Cimbra común en cimentaciones, incluye materiales, habilitado con bastidor metálico, mano de obra, desmoldante, colocación y descimbra	m2	77.08	4.60	354.57
Cimbra de madera acabado aparente en muros hasta h = 6.00 metros, incluye material, habilitado, descimbra, bastidor metálico colocación, desmoldante y descimbrado.	m2	94.85	46.00	4,363.10
Cimbra de madera en canales, incluye suministro de materiales, habilitado con bastidor metálico, colocación desmoldante y descimbrado.	m2	96.81	288.00	27,881.28
Concreto en cimentación y losa de fondo f'c = 250 kg/cm2, premezclado, incluye suministro, colado, vibrado y curado, desperdicios, pruebas, herramientas y mano de obra.	m3	1482.03	17.30	25,639.12
Concreto en muros f'c = 250 kg/cm2 premezclado bombeado hasta 6.00 metros, impermeabilizante integral, incluye colado vibrado, curado pruebas, herramientas y mano de obra.	m3	1557.24	34.30	53,413.33
limpieza final de la obra incluye	m2	3.66	43.00	157.38

herramientas, mano de obra retiros de escombros en camión				
Acabado de losa de fondo de espesadores de concreto con concreto de 250 f'c = 250 kg/cm ² de 0.5 cm de espesor, acabado pulido	m ²	77.03	43.00	3,312.29
Junta de construcción tipo c-2 con banda de PVC de 6" de ancho, incluye materiales, corte, desperdicios, acarreo y mano de obra	ml	110.56	12.00	1,326.72
Precio de rastras para espesado, no incluye: mano de obra, colocación y nivelación.				300,000.00
Costo de mantenimiento y operación al año				
			TOTAL	458,943.20

CONCEPTO	UNIDAD	P.U	CANTIDAD	IMPORTE
Trazo y nivelación del terreno para desplante de estructuras, con aparatos de precisión, incluye: dejar referencias, equipo y mano de obra	m ²	3.91	392.00	1,532.72
Excavación con máquina en material tipo II de 0.00 a 4.00 metros de profundidad en seco para estructuras.	m ³	33.56	1086.00	36,446.16
afine manual de fondo de la excavación realizada a máquina para dar niveles de desplante, incluye herramienta y mano de obra	m ²	7.87	392.00	3,085.04
Relleno de estructuras con material de excavación compactado al 85% proctor en capas de 20 cm de espesor, incluye herramientas, mano de obra y equipo.	m ³	27.72	392.00	10,866.24
Carga mecánica y acarreo en camión en 1er. Kilómetro del material del producto de excavación de estructuras	m ³	6.18	694.00	4,288.92
Acarreo km subsecuente al primero del producto de cortes en terracerías y despalmes.	m ³ -km	3.23	694.00	11,208.10
Plantilla de concreto simple f'c 150 kg/cm ² de 5 cm de espesor, incluye fabricación, colado y desperdicio	m ²	63.96	19.60	1,253.62
Acero de refuerzo fy = 4,200 kg/cm ² incluye suministro, habilitado, desperdicios, ganchos traslapes y colocación	ton	7342.10	69.22	508,220.16
Cimbra común en cimentaciones, incluye materiales, habilitado con bastidor metálico, mano de obra, desmoldante, colocación y descimbra	m ²	77.08	33.60	2,589.89
Cimbra de madera acabado aparente en muros hasta h = 6.00 metros, incluye material, habilitado, descimbra, bastidor metálico colocación, desmoldante y	m ²	94.85	420.00	39,837.00

descimbrado.				
Cimbra de madera en canales, incluye suministro de materiales, habilitado con bastidor metálico, colocación desmoldante y descimbrado.	m2	96.81	21.05	2,037.85
Concreto en cimentación y losa de fondo f'c = 250 kg/cm2, premezclado, incluye suministro, colado, vibrado y curado, desperdicios, pruebas, herramientas y mano de obra.	m3	1482.03	156.80	232,382.30
Concreto en muros f'c = 250 kg/cm2 premezclado bombeado hasta 6.00 metros, impermeabilizante integral, incluye colado vibrado, curado pruebas, herramientas y mano de obra.	m3	1557.24	420.00	654,040.80
limpieza final de la obra incluye herramientas, mano de obra retiros de escombros en camión	m2	3.66	392.00	1,434.72
Junta de construcción tipo c-2 con banda de PVC de 6" de ancho, incluye materiales, corte, desperdicios, acarreo y mano de obra	ml	110.56	84.00	9,287.04
Precio de equipo para aireación	unidad	2.00	125000.00	2,500,000.00
Consumo de energía al año				
Consumo de reactivos al año (polímero)				
Costo de amntenimiento y operación al año				
			TOTAL	4,018,510.56

CONCEPTO	UNIDAD	P.U	CANTIDAD	IMPORTE
Trazo y nivealción del terreno para desplante de estructuras, con aparatos de precisión, incluye: dejar referencias, equipo y mano de obra	m2	3.91	9978.00	39,013.98
Excavación con máquina en material tipo II de 0.00 a 4.00 metros de profundidad en seco para estructuras.	m3	33.56	4989.00	167,430.84
afine manual de fondo de la excavación realizada a máquina para dar niveles de desplnate, incluye herramienta y mano de obra	m2	7.87	0.00	0.00
Relleno de estructuras con material de excavación compactado al 85% proctor en capas de 20 cm de espesor, incluye herramientas, mano de obra y equipo.	m3	27.72	4989.00	138,295.08
Relleno de estructuras con material arenoso para lechos de secado de lodo.	m3	115.90	5987.00	693,893.30
Edificación de muros de tabique recocido de 7 x 14 x 28 cm, incluye jnivelación material, mano de obra y herramientas	ml	1325.00	3266.00	4,327,450.00

Carga mecánica y acarreo en camión en 1er. Kilómetro del material del producto de excavación de estructuras	m3	6.18	0.00	0.00
Acarreo km sussecuente al primero del producto de cortes en terracerías y despalmes.	m3-km	3.23	0.00	0.00
limpieza final de la obra incluye herramientas, mano de obra retiros de escombros en camión	m2	3.66	10000.00	36,600.00
Plantilla de concreto simple f'c 150 kg/cm2 de 5 cm de espesor, incluye fabricación, colado y desperdicio	m2	63.96	499.00	31,916.04
Acero de refuerzo fy = 4,200 kg/cm2 incluye suministro, habilitado, desperdicios, ganchos traslapes y colocación	ton	7342.10	100.00	734,210.00
Cimbra común en cimentaciones, incluye materiales, habilitado con bastidor metálico, mano de obra, desmoldante, colocación y descimbra	m2	77.08	121.00	9,326.68
Concreto en cimentación y losa de fondo f'c = 250 kg/cm2, premezclado, incluye suministro, colado, vibrado y curado, desperdicios, pruebas, herramientas y mano de obra.	m3	1482.03	998.00	1,479,065.94
Costo por manejo y disposición de lodos al año				
Costo de operación y mantenimiento al año				
			TOTAL	7,657,201.86

Operación y mantenimiento	228,830.00			
Disposición y manejo de residuos al año	443,775.00			
Consumo de reactivos al año	0.00			
Consumo de energía	430,000.00			
			TOTAL	1,102,605.00
			Importe total	12,778,317.42

ESPESADO DIGESTOR FILTRO

CONCEPTO	UNIDA D	P.U	CANTIDA D	IMPORTE
Trazo y nivelación del terreno para desplante de estructuras, con aparatos de precisión, incluye: dejar referencias, equipo y mano de obra	m2	3.91	43.00	168.13
Excavación con máquina en material tipo II de 0.00 a 4.00 metros de profundidad en seco para estructuras.	m3	33.56	129.00	4,329.24
afine manual de fondo de la excavación realizada a máquina para dar niveles de desplante, incluye herramienta y mano de obra	m2	7.87	43.00	338.41
Relleno de estructuras con material de excavación compactado al 85% proctor en capas de 20 cm de espesor, incluye herramientas, mano de obra y equipo.	m3	27.72	43.00	1,191.96
Carga mecánica y acarreo en camión en 1er. Kilómetro del material del producto de excavación de estructuras	m3	6.18	129.00	797.22
Acarreo km subsecuente al primero del producto de cortes en terracerías y despalmes.	m3-km	3.23	129.00	2,083.35
Plantilla de concreto simple f_c 150 kg/cm ² de 5 cm de espesor, incluye fabricación, colado y desperdicio	m2	63.96	43.00	2,750.28
Acero de refuerzo $f_y = 4,200$ kg/cm ² incluye suministro, habilitado, desperdicios, ganchos traslapes y colocación	ton	7342.10	4.20	30,836.82
Cimbra común en cimentaciones, incluye materiales, habilitado con bastidor metálico, mano de obra, desmoldante, colocación y descimbra	m2	77.08	4.60	354.57
Cimbra de madera acabado aparente en muros hasta $h = 6.00$ metros, incluye material, habilitado, descimbra, bastidor metálico colocación, desmoldante y descimbrado.	m2	94.85	46.00	4,363.10
Cimbra de madera en canales, incluye suministro de materiales, habilitado con bastidor metálico, colocación desmoldante y descimbrado.	m2	96.81	288.00	27,881.28
Concreto en cimentación y losa de fondo $f_c = 250$ kg/cm ² , premezclado, incluye suministro, colado, vibrado y curado, desperdicios, pruebas, herramientas y mano de obra.	m3	1482.03	17.30	25,639.12
Concreto en muros $f_c = 250$ kg/cm ² premezclado bombeado hasta 6.00 metros, impermeabilizante integral, incluye colado vibrado, curado pruebas, herramientas y mano de obra.	m3	1557.24	34.30	53,413.33
limpieza final de la obra incluye herramientas, mano de obra retiros de escombros en camión	m2	3.66	43.00	157.38
Acabado de losa de fondo de espesadores de concreto con concreto de 250 $f_c = 250$ kg/cm ² de 0.5 cm de espesor, acabado pulido	m2	77.03	43.00	3,312.29
Junta de construcción tipo c-2 con banda de PVC de 6" de ancho, incluye materiales, corte, desperdicios, acarreo y mano de obra	ml	110.56	12.00	1,326.72

Precio de rastras para espesado, no incluye: mano de obra, colocación y nivelación.				300,000.00
			TOTAL	458,943.20

CONCEPTO	UNIDAD	P.U	CANTIDAD	IMPORTE
Trazo y nivelación del terreno para desplante de estructuras, con aparatos de precisión, incluye: dejar referencias, equipo y mano de obra	m2	3.91	392.00	1,532.72
Excavación con máquina en material tipo II de 0.00 a 4.00 metros de profundidad en seco para estructuras.	m3	33.56	1086.00	36,446.16
afine manual de fondo de la excavación realizada a máquina para dar niveles de desplante, incluye herramienta y mano de obra	m2	7.87	392.00	3,085.04
Relleno de estructuras con material de excavación compactado al 85% proctor en capas de 20 cm de espesor, incluye herramientas, mano de obra y equipo.	m3	27.72	392.00	10,866.24
Carga mecánica y acarreo en camión en 1er. Kilómetro del material del producto de excavación de estructuras	m3	6.18	694.00	4,288.92
Acarreo km subsecuente al primero del producto de cortes en terracerías y despalmes.	m3-km	3.23	694.00	11,208.10
Plantilla de concreto simple f'c 150 kg/cm2 de 5 cm de espesor, incluye fabricación, colado y desperdicio	m2	63.96	19.60	1,253.62
Acero de refuerzo fy = 4,200 kg/cm2 incluye suministro, habilitado, desperdicios, ganchos traslapes y colocación	ton	7342.10	69.22	508,220.16
Cimbra común en cimentaciones, incluye materiales, habilitado con bastidor metálico, mano de obra, desmoldante, colocación y descimbra	m2	77.08	33.60	2,589.89
Cimbra de madera acabado aparente en muros hasta h = 6.00 metros, incluye material, habilitado, descimbra, bastidor metálico colocación, desmoldante y descimbrado.	m2	94.85	420.00	39,837.00
Cimbra de madera en canales, incluye suministro de materiales, habilitado con bastidor metálico, colocación desmoldante y descimbrado.	m2	96.81	21.05	2,037.85
Concreto en cimentación y losa de fondo f'c = 250 kg/cm2, premezclado, incluye suministro, colado, vibrado y curado, desperdicios, pruebas, herramientas y mano de obra.	m3	1482.03	156.80	232,382.30
Concreto en muros f'c = 250 kg/cm2 premezclado bombeado hasta 6.00 metros, impermeabilizante integral, incluye colado vibrado, curado pruebas, herramientas y mano de obra.	m3	1557.24	420.00	654,040.80

limpieza final de la obra incluye herramientas, mano de obra retiros de escombros en camión	m2	3.66	392.00	1,434.72
Junta de construcción tipo c-2 con banda de PVC de 6" de ancho, incluye materiales, corte, desperdicios, acarreo y mano de obra	ml	110.56	84.00	9,287.04
Precio de equipo (sopladores y difusores)				804,470.00
			TOTAL	2,322,980.6

CONCEPTO	UNIDA D	P.U	CANTIDA D	IMPORTE
Edificio para alojar equipo de secado de lodos de dosificación de reactivos y su almacén, construido a base de concreto armado y estructura metálica con cubierta de lámina y muros de tabique acabado aparente.	m2	2776.60	50.00	138,830.00
Equipo de deshidratación de lodos (filtros banda)	unidad	2.00	1250000. 00	2,500,000.0 0
Costo de operación y mantenimiento al año				
			TOTAL	2,638,830.0
Operación y mantenimiento		68,109.		
Disposición y manejo de residuos al año		576,450		
Consumo de reactivos al año		421,200		
Consumo de energía		500,000		
			Importe total	6,986,512.9

ESPESADO-CAL

CONCEPTO	UNIDA D	P.U	CANTIDA D	IMPORTE
Trazo y nivelación del terreno para desplante de estructuras, con aparatos de precisión, incluye: dejar referencias, equipo y mano de obra	m2	3.91	43.00	168.13
Excavación con máquina en material tipo II de 0.00 a 4.00 metros de profundidad en seco para estructuras.	m3	33.56	129.00	4,329.24
afine manual de fondo de la excavación realizada a máquina para dar niveles de desplante, incluye herramienta y mano de obra	m2	7.87	43.00	338.41
Relleno de estructuras con material de excavación compactado al 85% proctor en capas de 20 cm de espesor, incluye herramientas, mano de obra y equipo.	m3	27.72	43.00	1,191.96
Carga mecánica y acarreo en camión en 1er. Kilómetro del material del producto de excavación de estructuras	m3	6.18	129.00	797.22
Acarreo km subsecuente al primero del producto de cortes en terracerías y despalmes.	m3-km	3.23	129.00	2,083.35
Plantilla de concreto simple f'c 150 kg/cm2 de 5 cm de espesor, incluye fabricación, colado y desperdicio	m2	63.96	43.00	2,750.28
Acero de refuerzo fy = 4,200 kg/cm2 incluye suministro, habilitado, desperdicios, ganchos traslapes y colocación	ton	7342.10	4.20	30,836.82
Cimbra común en cimentaciones, incluye materiales, habilitado con bastidor metálico, mano de obra, desmoldante, colocación y descimbra	m2	77.08	4.60	354.57
Cimbra de madera acabado aparente en muros hasta h = 6.00 metros, incluye material, habilitado, descimbra, bastidor metálico colocación, desmoldante y descimbrado.	m2	94.85	46.00	4,363.10
Cimbra de madera en canales, incluye suministro de materiales, habilitado con bastidor metálico, colocación desmoldante y descimbrado.	m2	96.81	288.00	27,881.28
Concreto en cimentación y losa de fondo f'c = 250 kg/cm2, premezclado, incluye suministro, colado, vibrado y curado, desperdicios, pruebas, herramientas y mano de obra.	m3	1482.03	17.30	25,639.12
Concreto en muros f'c = 250 kg/cm2 premezclado bombeado hasta 6.00 metros, impermeabilizante integral, incluye colado vibrado, curado pruebas, herramientas y mano de obra.	m3	1557.24	34.30	53,413.33
limpieza final de la obra incluye herramientas, mano de obra retiros de escombros en camión	m2	3.66	43.00	157.38
Acabado de losa de fondo de espesadores de concreto con concreto de 250 f'c = 250 kg/cm2 de 0.5 cm de espesor, acabado pulido	m2	77.03	43.00	3,312.29
Junta de construcción tipo c-2 con banda de PVC de 6" de ancho, incluye materiales, corte, desperdicios, acarreo y mano de obra	ml	110.56	12.00	1,326.72

Precio de rastras para espesado, no incluye: mano de obra, colocación y nivelación.				600,000.00
			TOTAL	758,943.20

CONCEPTO	UNIDAD	P.U	CANTIDAD	IMPORTE
Trazo y nivelación del terreno para desplante de estructuras, con aparatos de precisión, incluye: dejar referencias, equipo y mano de obra	m2	3.91	9.00	35.19
Excavación con máquina en material tipo II de 0.00 a 4.00 metros de profundidad en seco para estructuras.	m3	33.56	18.00	604.08
afine manual de fondo de la excavación realizada a máquina para dar niveles de desplante, incluye herramienta y mano de obra	m2	7.87	9.00	70.83
Relleno de estructuras con material de excavación compactado al 85% proctor en capas de 20 cm de espesor, incluye herramientas, mano de obra y equipo.	m3	27.72	1.00	27.72
Carga mecánica y acarreo en camión en 1er. Kilómetro del material del producto de excavación de estructuras	m3	6.18	1.00	6.18
Acarreo km subsecuente al primero del producto de cortes en terracerías y despalmes.	m3-km	3.23	1.00	16.15
Plantilla de concreto simple f'c 150 kg/cm2 de 5 cm de espesor, incluye fabricación, colado y desperdicio	m2	63.96	9.00	575.64
Acero de refuerzo fy = 4,200 kg/cm2 incluye suministro, habilitado, desperdicios, ganchos traslapes y colocación	ton	7342.10	1.70	12,481.57
Cimbra común en cimentaciones, incluye materiales, habilitado con bastidor metálico, mano de obra, desmoldante, colocación y descimbra	m2	77.08	9.00	693.72
Cimbra de madera acabado aparente en muros hasta h = 6.00 metros, incluye material, habilitado, descimbra, bastidor metálico colocación, desmoldante y descimbrado.	m2	94.85	20.00	1,897.00
Cimbra de madera en canales, incluye suministro de materiales, habilitado con bastidor metálico, colocación desmoldante y descimbrado.	m2	96.81	45.00	4,356.45
Concreto en cimentación y losa de fondo f'c = 250 kg/cm2, premezclado, incluye suministro, colado, vibrado y curado, desperdicios, pruebas, herramientas y mano de obra.	m3	1482.03	3.60	5,335.31
Concreto en muros f'c = 250 kg/cm2 premezclado bombeado hasta 6.00 metros, impermeabilizante integral, incluye colado vibrado, curado pruebas, herramientas y mano de obra.	m3	1557.24	10.52	16,382.16
limpieza final de la obra incluye herramientas, mano de obra retiros de escombros en camión	m2	3.66	10.00	36.60

Acabado de losa de fondo de espesadores de concreto con concreto de 250 f'c = 250 kg/cm2 de 0.5 cm de espesor, acabado pulido	m2	77.03	9.00	693.27
Junta de construcción tipo C-2 con banda de PVC de 6" de ancho, incluye materiales, corte, desperdicios, acarreo y mano de obra	ml	110.56	13.00	1,437.28
Precio de equipo para mezclado , no incluye: mano de obra, y colocación				150,000.00
			TOTAL	194,649.15

Operación y mantenimiento	34,000.00			
Disposición y manejo de residuos al año	2,604,890			
Consumo de cal al año	100,000			
Consumo de energía	64,400.			
			Importe total	3,756,882.3