

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**“METODOLOGÍA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE
LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN.”**

REALIZADO POR:
**BIRBE MATA, ROXIBEL
BOADAS PATIÑO, JESSICA**

Trabajo de grado presentado ante la Universidad de Oriente
como requisito parcial para optar al título de:

INGENIERO CIVIL

Barcelona, Mayo de 2010.

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**“METODOLOGÍA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE
LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN.”**

ASESOR ACADÉMICO:

Prof. Ana Ghanem
ASESOR ACADÉMICO

Barcelona, Mayo de 2010.

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**“METODOLOGÍA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE
LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN.”**

El jurado hace constar que asignó a esta tesis la calificación de:

Prof. Ana Ghanem

Asesor Académico

Prof. Hilda Morales

Jurado Principal

Prof. Edito León

Jurado Principal

Barcelona, Mayo de 2010.

RESOLUCIÓN

“De acuerdo al Artículo 44 del Reglamento de Trabajo de Grado, los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”.

DEDICATORIAS

En primer lugar a Dios y a la Virgen del Valle por acompañarme en todo momento y protegerme de todo peligro cuando estudiaba hasta tarde fuera de mi casa. Gracias por iluminar mi camino y brindarme la fortaleza necesaria para enfrentar las adversidades.

A mis padres, Yoleida, Roberto y Beatriz, quienes me brindaron su apoyo incondicional y amor durante esta etapa de mi vida. Sobretudo a mi mamá, que sin su ayuda en el cuidado de mi hijo no habría podido seguir adelante hasta lograr esta meta. Los Quiero!

A mi esposo Joan por brindarme todo su cariño, comprensión y consejos para que siguiera siempre adelante. A mi hijo, a quien amo, papi perdóname por no dedicarte el tiempo y la atención que merecías durante mi etapa de estudio.

A mis hermanos, tíos, primos y demás familiares por ser fuente de inspiración y colaborar conmigo, cada uno a su manera, en este recorrido.

A mis amigos: Dayana, Paolino, Mao, Vicente, Natasja, Mariangel, Jessica, Lauvict, Isabel, Sandy, Debora, Jean, Miguel, Víctor, María Carolina y Eduardo, gracias por brindarme su amistad y por ser incondicionales conmigo, son como hermanos para mi y agradezco a dios el haberlos puesto en mi camino. Daya, gracias por toda la paciencia que me has tenido desde que nos conocemos. A todos los quiero.

A todos mis amigos de la udo y compañeros de clases, gracias por aportar su granito de arena en mi crecimiento personal.

Roxíbel Bírbe

A Dios Todopoderoso y a la Virgen del Valle, por llenarme de paz y sabiduría en los momentos difíciles y de bendiciones y enseñanzas cada día de mi vida.

A mis padres quienes con esfuerzo, amor y paciencia me guiaron hasta lograr esta meta, gracias por su preocupación eterna y por esas muestras de cariño que lograron sobrepasar distancias y me hacían sentir aquí como en casa. Los amo infinitamente!

A mis hermanas y hermano, por cada abrazo, llamada y apoyo incondicional, por recibirme con los brazos abiertos siempre. A mi numerosa familia, tíos, tías, primos, abuela, quienes se preocuparon por mí y me motivaron a seguir adelante.

A mi novio Andy, quien ha estado a mi lado incondicionalmente, ha visto trazarme metas y ha estado a mi lado para celebrarlas, gracias por ser mi apoyo y mi compañero de batalla.

A mis por siempre amigas Wafaa y Mirna, por demostrarme que las verdaderas amistades soportan la distancia y el tiempo, gracias por estar siempre presentes en mi vida. Las quiero!

A mi bella familia estructural Sandy, Lauvict, Miguel, Roxy, Isabel y Nino, por todos los momentos de angustia y felicidad vividos durante nuestra vida universitaria, por las palabras de apoyo, por los consejos y por soportar a esa personita explosiva que llevo por dentro, por ser más que amigos, ser parte de mi día a día. Los adoro a montones!

A Dayana, Maoli, Vicente, Taja, Paolino, María Carolina, Mariangel y Eduardo con quienes compartí bellos e inolvidables momentos. A mis compañeros del CEDIC, por las experiencias y recuerdos de aquel bello grupo que conformamos y en especial a mi colega Andrés quien fue mi mano derecha.

Jessica Boadas.

AGRADECIMIENTOS

A la grandiosa Universidad de Oriente que nos brindó la oportunidad de prepararnos y aspirar a una de nuestras metas, como lo es ser unos profesionales.

A nuestros Profesores, que transmitieron cada uno a su estilo, sus enseñanzas de una manera motivadora, divertida, y de calidad, dejándonos al mismo tiempo la preocupación y motivación para seguir descubriendo los contenidos que seguiremos utilizando en nuestra etapa profesional.

A nuestra asesora académica, Profesora Ana Ghanem, el cual nos dio consejos sabios y oportunos, nos guió incondicionalmente y apoyo en todo momento, siendo de gran ayuda en la realización de nuestro trabajo de grado.

A nuestros compañeros de clase por todo su apoyo brindado y esos buenos momentos compartidos que jamás olvidaremos.

Y a todas esas personas que de alguna manera colaboraron para hacer posible este trabajo.

RESUMEN

Numerosas experiencias realizadas a través de más de 40 años han estimulado múltiples intentos para desarrollar problemas matemáticos que permitan diseñar o dimensionar lagunas de estabilización, las discrepancias entre los objetivos de las lagunas, metodologías de evaluación y clima, dan como resultado la existencia de literatura con grandes vacíos. Por tales motivos, se realizó esta investigación, que se basó en el análisis y estudio de las diversas metodologías de dimensionamiento de lagunas de estabilización, para el cual se investigó bibliografía y experiencias sobre el tema a nivel mundial para lograr la selección de dos métodos, el método desarrollado por Duncan Mara y el método desarrollado por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria (CEPIS), con los cuales se realizaron los cálculos correspondientes para un sistema de lagunas en serie: aeróbica, facultativa y de maduración. El análisis indicó que los resultados obtenidos con la metodología de Duncan Mara la determinan como la más completa a la hora de realizar el dimensionamiento de lagunas de estabilización, a su vez se desarrolló una hoja de cálculo en Excel para el método seleccionado y un diagrama de flujo que faciliten el entendimiento del mismo.

INDICE

RESOLUCIÓN.....	IV
DEDICATORIAS.....	V
AGRADECIMIENTOS	VII
RESUMEN	VIII
INDICE	9
INDICE DE FIGURAS	13
ÍNDICE DE TABLAS.....	15
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....	17
1 Introducción	18
1.1 Planteamiento del problema	18
1.2 Objetivos.....	20
1.2.1 Objetivo General	20
1.2.2 Objetivos Específicos.....	20
CAPÍTULO II MARCO TEÒRICO.....	21
2 Marco Teórico.....	22
2.1 Antecedentes.....	22
2.2 Lagunas de Estabilización.....	23
2.3 Objetivos de las lagunas.....	23
2.4 Ventajas del uso de lagunas.....	24
2.4.1 Simplicidad de Lagunas.....	24
2.4.2 Bajo Costo.	25
2.4.3 Reducción de coliformes y eliminación de patógenos.	25
2.4.4 Mínimo Manejo de Lodos.....	27
2.4.5 Manejo de altas concentraciones y cargas orgánicas.	28
2.5 Desventajas del uso de lagunas.....	29
2.6 Clasificación de las Lagunas de Estabilización.	31
2.7 Clasificación de acuerdo al contenido de oxígeno.....	32
2.7.1 Lagunas Anaeróbicas.....	32

2.7.2	Lagunas Facultativas.....	40
2.7.3	Lagunas Aeróbicas.....	48
2.8	Sistemas de lagunas de estabilización.....	52
2.9	Tratamiento preliminar del agua residual.....	54
2.10	Factores que Influyen en las reacciones biológicas en lagunas de estabilización.....	57
2.10.1	Factores no controlados por el hombre.....	57
2.10.2	Factores controlables por el hombre.....	59
2.11	Función de las Algas en las Lagunas de Estabilización.....	60
2.12	Modelos para el dimensionamiento de lagunas de estabilización.....	61
2.12.1	Modelo de Hermann y Gloyna.....	61
2.12.2	Modelo de Marais y Shaw.....	63
2.12.3	Modelo de Thirumurthy.....	64
2.12.4	Modelo de Oswald y Gotaas.....	65
2.12.6	Modelo de Mara.....	67
2.12.7	Modelos del CEPIS.....	74
2.13	Análisis de los métodos para el dimensionamiento de lagunas de estabilización según Cubillos.....	69
2.14	Análisis de los métodos para el dimensionamiento de lagunas de estabilización según investigadores de la Universidad del Zulia - Venezuela.....	70
	CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO	90
3	Marco Metodológico.....	91
3.1	Consideraciones generales.....	91
3.2	Tipo y diseño de la investigación.....	92
3.3	Descripción de los instrumentos de recolección de información ..	92
3.4	Diagrama del sistema adoptado para el análisis.....	93

3.5 Métodos de cálculo a comparar para el dimensionamiento del sistema	94
3.6 Problema propuesto para la comparación de métodos.	94
3.6.1 Datos.....	93
3.6.2 Resolviendo por el método del CEPIS.....	94
3.6.3 Resolviendo por el método de Mara	96
CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS.....	105
4 Análisis de datos y resultados	108
4.1 Modelo de Hermann y Gloyna.	106
4.2 Modelo de Marais y Shaw.	106
4.3 Modelo de Thirimurthy:	107
4.4 Modelo de Oswald y Gootas.....	107
4.5 Modelo de Mara.....	108
4.6 Modelo del CEPIS.	108
4.7 Análisis de los resultados de las metodologías adoptadas para la evaluación de un sistemas de lagunas.	111
4.7.1 Laguna anaeróbica.....	109
4.7.2 Laguna facultativa.....	111
4.7.3 Laguna de Maduración:	¡Error! Marcador no definido.
4.8 Diagramas de flujo.....	114
4.9 Hoja de cálculo en Excel.	114
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	119
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	124
ANEXOS	127
ANEXO A.1 DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CÁLCULO DE LAGUNAS ANAEROBICAS SEGÚN EL MÉTODO DE MARA.....	127
ANEXO A.2 DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CÁLCULO DE LAGUNAS FACULTATIVAS SEGÚN EL MÉTODO DE MARA	129

ANEXO A.3 DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CÁLCULO DE LAGUNAS AEROBICAS SEGÚN EL MÉTODO DE MARA.....	131
ANEXOS A.4 HOJA DE CÁLCULO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LAGUNAS SEGÚN EL MÉTODO DE MARA.....	133
ANEXOS A.5 ASPECTOS PARA EL DISEÑO FÍSICO Y CONSTRUCCIÓN DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN	135
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO.....	145

INDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1. Laguna anaeróbica en Honduras.	33
Fig. 2.2. Diagrama de una laguna anaeróbica.....	33
Fig. 2.3 Laguna facultativa en Honduras.	40
Fig. 2.4. Diagrama de una laguna facultativa.	41
Fig. 2.5. Interacción de bacterias y algas en las zonas aeróbicas y anaeróbicas en una laguna facultativa de estabilización.	45
Fig. 2.6 Laguna aeróbica en Honduras.	49
Fig. 2.7. Sólidos flotantes y gruesos nocivos en la operación de las lagunas.	56
Fig. 2.8. Sólidos arenosos no removidos impiden la mezcla del afluente con el contenido de la laguna.	57
Fig. 2.9. Vista en planta de un sistema de lagunas anaerobias en paralelo seguida de laguna facultativa alargada	75
Fig. 2.10. Esquema para lagunas anaeróbicas según el modelo de Sáenz.....	76
Fig. 2.11. Gráfica de tasa de aplicación superficial experimental Vs. modelos teóricos según investigadores de la Universidad del Zulia.	89
Fig. 3.1 Diagrama del sistema adoptado	93
Fig. 4.1. Rangos de temperatura para las hojas de cálculo.....	112
Fig. 4.2. Datos necesarios para la hoja de cálculo.	113
Fig. 4.3. Parámetros calculados para laguna anaeróbica con la hoja de cálculo.....	114
Fig. 4.4. Parámetros calculados para laguna facultativa con la hoja de cálculo.....	115
Fig. 4.5 Parámetros calculados para laguna de aeróbica o de maduración con la hoja de cálculo.....	115

Fig. 4.6. Tabla de iteración para valores de n y tiempo de retención hidráulica para lagunas anaeróbica o de maduración con la hoja de cálculo.	117
Fig. 4.7. Corrección del diseño de cargas para laguna con la hoja de datos.....	117
Fig. 4.8. Parámetros para las siguientes lagunas de maduración con la hoja de datos.	118

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Comparación de complejidad de operación y mantenimiento de otros procesos ante las lagunas.	25
Tabla 2-2. Eficiencia de Remoción de Patógenos para varios Procesos.	27
Tabla 2-3. Cantidades de lodos producidos por varios procesos.	28
Tabla 2-4. Resistencia de los procesos de tratamiento ante elevadas cargas.	29
Tabla 2-5. Área de terreno requerida para varios procesos de tratamiento.	30
Tabla 2-6. Tipos y aplicaciones de lagunas de estabilización de uso común.	53
Tabla 2-7. Ecuaciones de carga volumétrica para lagunas anaeróbicas de acuerdo a la temperatura para el método de Mara	68
Tabla 2-8. Porcentaje de remoción DBO para lagunas anaeróbicas de acuerdo a la temperatura para el método de Mara	69
Tabla 2-9. Tabla para valores de carga superficial y profundidad adicional	76
Tabla 2-10. Tabla para valores de constante de remoción bacteriano de acuerdo a la temperatura.	77
Tabla 2-11. Cuadro comparativo de resultados para los diferentes métodos de dimensionamiento según Cubillos	86
Tabla 3-5. Resumen de resultados obtenidos por el método del CEPIS	97
Tabla 3-4. Resumen de resultados obtenidos por el método de Mara	104

Tabla 4-1. Cuadro comparativo de los resultados obtenidos por el método de Mara y CEPIS 113

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

1 Introducción

1.1 Planteamiento del problema.

Uno de los métodos existentes para tratar el agua residual son las lagunas de estabilización, preferidas actualmente por las poblaciones y gobiernos latinoamericanos debido a su alta eficiencia en la descomposición de materia orgánica, bajo costo, simplicidad de construcción y facilidad en mantenimiento y operación de las mismas, lo cual ha producido un aumento en el uso de este tipo de lagunas como alternativa válida para la descontaminación y tratamiento adecuado de los efluentes provenientes de residencias e industrias, a fin de poder alcanzar niveles de pureza adecuados para una posible reutilización o descarga, sin causar daños ambientales.

Numerosas experiencias realizadas a través de más de 40 años han estimulado múltiples intentos para desarrollar modelos matemáticos que permitan diseñar o dimensionar lagunas de estabilización en función de la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) esperada, pero ninguno de esos métodos han logrado la completa aceptación mundial. Es por ello que el método seleccionado depende de los criterios del proyectista y de la disponibilidad de datos en la zona donde se desarrolla el proyecto. Las discrepancias entre los objetivos de las lagunas, metodologías de evaluación y clima, dan como resultado la existencia de literatura con grandes vacíos, que lejos de orientar tiende a confundir a aquellas personas que desean adquirir conocimientos básicos mediante la recopilación de información por diversas fuentes.

Además del problema antes expresado, las normas sanitarias Venezolanas, poseen un gran vacío en cuanto al tema de lagunas se refiere, por lo que hace incierta e insegura la forma de establecer parámetros apegados a la ley que puedan usarse en estos casos, por lo tanto, la presente investigación abarca el estudio de las metodologías de dimensionamiento de lagunas de estabilización, la selección de por lo menos dos de ellas, haciendo una comparación mediante cálculos de los métodos escogidos para establecer el que resulte más viable a la hora de realizar el diseño, así como también el desarrollo de una hoja de cálculo en Excel para el método seleccionado y un diagrama de flujo que faciliten la ejecución del mismo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Elaborar una metodología de diseño para el dimensionamiento de lagunas de estabilización basada en la selección de un método de cálculo que resulte más adecuado, entre los sugeridos en las diferentes fuentes bibliográficas.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Investigar acerca de los diferentes métodos de cálculo existentes en la literatura para el dimensionamiento de lagunas de estabilización.
2. Comparar por lo menos dos de las metodologías encontradas en base a ejemplos de cálculo y análisis de resultados.
3. Seleccionar la metodología de cálculo más adecuada en base a los resultados obtenidos.
4. Elaborar un diagrama de flujo y una hoja de cálculo en formato Excel para el dimensionamiento de lagunas de estabilización en base a la metodología seleccionada.

CAPÍTULO II
MARCO TEÒRICO

2 Marco Teórico.

2.1 Antecedentes.

A continuación se indican algunos Trabajos de Investigación que se han realizado en Venezuela y América latina relacionados a esta área, los cuales sirven como referencia para el desarrollo de este proyecto:

En el año 1986, Yáñez elaboró un proyecto sobre la reducción de organismos patógenos y diseño de lagunas de estabilización en países en desarrollo, donde presentó los datos más importantes de un proyecto de investigación sobre lagunas de estabilización. [1]

Posteriormente en el año 1990, Rojas y León desarrollaron la investigación para determinar los criterios de dimensionamiento de lagunas facultativas en serie y en paralelo, en el cual se discutió la eficiencia en las lagunas para la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno, comparable a los procesos convencionales. [2]

Recientemente, en el año 2007, Rondón elaboró un trabajo en el cual se abordó el diseño de un sistema de tratamiento de aguas servidas utilizando el método de flujo de pistón, en el cual se plantea la construcción de lagunas de estabilización, tipos y diseño. [3]

2.2 Lagunas de Estabilización.

Las lagunas de estabilización no son más que excavaciones realizadas en un terreno para el tratamiento de aguas residuales. Los trabajos de investigación realizados sobre lagunas en la década de 1940 permitieron el desarrollo de estos sistemas como una alternativa de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales. [1]

La tecnología de lagunas de estabilización es uno de los métodos naturales más utilizados para el tratamiento de aguas residuales en las comunidades pequeñas. Las lagunas de estabilización son fundamentalmente reservorios artificiales, es decir, estanques conformados perimetralmente por diques de tierra, con profundidades menores a 5 m, que comprenden una o varias series de lagunas como: anaeróbicas, facultativas y aeróbicas o de maduración.

Las lagunas de estabilización son una alternativa económica en la remoción de patógenos y helmintos que no se tienen en los sistemas tradicionales, además en este sistema no es necesario utilizar cloro para la desinfección del efluente y no necesita partes mecánicas produciendo un ahorro en los costos de adquisición, operación y mantenimiento.

2.3 Objetivos de las lagunas.

- Reducir e inactivar organismos patógenos presentes en líquidos residuales.
- Disminuir la Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) ó la Demanda química de oxígeno (DQO) del líquido.

- Permitir la reutilización del líquido para agricultura.

2.4 Ventajas del uso de lagunas.

Entre las ventajas del uso de lagunas de estabilización se encuentran: la simplicidad de lagunas, bajo costo, reducción de coliformes y eliminación de patógenos, mínimo manejo de lodos y el manejo de altas concentraciones y cargas orgánicas.

2.4.1 Simplicidad de Lagunas.

Las lagunas son más sencillas de diseñar, construir, operar y mantener que cualquier otro proceso de tratamiento. La excavación es la actividad principal en la construcción. La construcción de obras civiles es mínima: solamente estructuras de ingresos, interconexiones, salidas, y el revestimiento de los taludes interiores.

La operación y mantenimiento consiste normalmente en tareas de rutina como el corte de vegetación en la orilla y en el dique, remoción de natas y sólidos flotantes, la medición diaria del caudal, y el monitoreo periódico del afluente y efluente. A continuación se presenta en la tabla 2.1 la comparación de complejidad de operación y mantenimiento de otros procesos ante las lagunas.

Tabla 2-1. Comparación de complejidad de operación y mantenimiento de otros procesos ante las lagunas.

Proceso de Tratamiento	Nivel de Complejidad	Nivel de Capacitación de personal	Requerimiento de Monitoreo del Proceso
Lodos Activados	Alto	Alto	Alto
Filtro Percolador	Medio-Alto	Medio-Alto	Medio
Laguna Aireada	Medio-Alto	Medio-Alto	Medio-Alto
Sistema de Lagunas de Estabilización	Bajo	Bajo	Bajo

Fuente: Metcalf & Eddy [6]

2.4.2 Bajo Costo.

Las lagunas cuestan mucho menos que los otros procesos de tratamiento. El equipo requerido se puede obtener localmente; las plantas de lodos activados, por ejemplo, requieren de la importación de equipo mecanizado y piezas de repuesto costosas, mientras que una serie de lagunas de estabilización no consumiría ninguna energía eléctrica.

2.4.3 Reducción de coliformes y eliminación de patógenos.

Las coliformes son una familia de bacterias que se encuentran comúnmente en las plantas, el suelo y los animales, incluyendo a los humanos. La presencia de bacterias coliformes en el suministro de agua es

un indicio de que el suministro de agua puede estar contaminado con aguas negras u otro tipo de desechos en descomposición.

En aguas tratadas los coliformes totales funcionan como una alerta de que ocurrió contaminación, sin identificar el origen. Indican que hubo fallas en el tratamiento, en la distribución o en las propias fuentes domiciliarias.

Las lagunas de estabilización tienen una ventaja enorme sobre los sistemas de tratamiento convencionales (lodos activados y sus variaciones, filtros de escurrimiento, etc.) en relación a la reducción de coliformes fecales y huevos de helmintos. La Organización Mundial de la Salud, OMS [15], recomienda que para irrigación irrestricta, los efluentes de las aguas residuales deben contener:

- ≤ 1 huevo de nemátodos intestinales por litro (media aritmética, número de huevos por litro) para riego de cultivos que comúnmente se consumen crudos, campos de deporte, parques públicos y riego de cultivos de cereales industriales, praderas, etc.

- ≤ 1000 coliformes fecales por 100 ml (media geométrica, número de CF/100 ml) para riego de cultivos que comúnmente se consumen crudos, campos de deporte y parques públicos.

Los sistemas de tratamiento convencionales tienen una baja reducción de organismos patógenos. En las lagunas la eliminación de microorganismos patógenos es muy superior a la alcanzada mediante otros métodos de tratamiento, tal como se muestra en la tabla 2.2 para la eficiencia de remoción de patógenos con respecto a otros procesos.

Tabla 2-2. Eficiencia de Remoción de Patógenos para varios Procesos.

Proceso	Remoción, %		Remoción, ciclos Log ₁₀ ⁴			
	DBO	SS	Virus	Bacteria	Huevos de Helmintos	Quistes de Protozoarios
Sedimentación primaria	25-40	40-70	0-1	0-1	0-1	0-2
Lodos activados	55-95	55-95	1-2	0-2	0-1	1-2
Filtros percoladores¹	50-95	50-90	1-2	0-2	0-1	1-2
Desinfección con cloro	-----	-----	0-4	2-6	0-1	0-3
Lagunas en serie²	70-95	55-95 ³	2-4	2-6	2-4 (100%)	2-4 (100%)
<ol style="list-style-type: none"> 1. Precedidos y seguidos de sedimentación 2. Dependiendo del número de lagunas en serie, tiempo de retención hidráulica y factores de diseño físico. 3. El efluente de lagunas puede contener altas concentraciones de SS en forma de algas. 4. 1 ciclo log₁₀=90% remoción, 2 ciclos=99%, 3 ciclos 99,9%, etc. Las lagunas pueden remover el 100% de los huevos de helmintos y 100% de los quistes protozoarios. 						

Fuente: Yáñez [1]

2.4.4 Mínimo Manejo de Lodos.

Una ventaja fundamental en el uso de lagunas es el hecho que se producen menos lodos que cualquier otro proceso como, ya que los lodos quedan en la laguna primaria por años en vez de horas o días como en los otros procesos, se consolidan con tiempo y ocupan menos volumen poco a poco.

Los lodos de cualquier proceso estarán muy contaminados con huevos de helmintos, quistes de protozoarios, y otros patógenos bacterianos y de los virus, en las lagunas el manejo de lodos es mínimo con menos concentración de patógenos en los mismos debido a su edad. La remoción de lodos de una laguna primaria es necesaria solamente cada 5 a 10 años. A continuación se muestra en la tabla 2.3 las cantidades de lodos producidos por varios procesos de tratamiento de aguas residuales.

Tabla 2-3. Cantidades de lodos producidos por varios procesos.

Proceso de Tratamiento	Lodos Producidos (m³ de lodos mojados por 1000 m³ de aguas residuales tratadas)
Sedimentación Primaria	2.1 - 3.3
Lodos Activados	1.4 - 1.9
Tratamiento Secundario sin digestión de Lodos	3.5 - 5.2
Tratamiento secundario con digestión de Lodos	2.6 - 3.9
Laguna Facultativa de Estabilización	0.4 - 0.6

Fuente: Metcalf & Eddy [6]

2.4.5 Manejo de altas concentraciones y cargas orgánicas.

Las lagunas de estabilización, como resultado de su largo tiempo de retención hidráulica, lo que se mide en días en vez de horas para tecnologías

más complicadas, tienen mucha más resistencia a cargas altas orgánicas, hidráulicas, y a concentraciones altas a compuestos tóxicos. Como resultado, en muchos países industrializados se utilizan frecuentemente lagunas para tratar aguas residuales industriales por su mejor estabilidad y resiliencia. A continuación se muestra en la tabla 2-4 la resistencia de los procesos de tratamiento de aguas residuales ante elevadas cargas.

Tabla 2-4. Resistencia de los procesos de tratamiento ante elevadas cargas.

Proceso	Sensitividad a Cargas Altas de Materia Orgánica	Sensitividad a Cargas Altas Hidráulicas	Sensitividad a Compuestos Tóxicos
Lodos Activados	Alta	Alta	Alta
Filtro Percolador	Media	Media	Media
Laguna Aireada	Baja - Media	Baja – Media	Baja - Media
Sistema de lagunas Facultativas	Baja	Baja	Baja

Fuente: Metcalf & Eddy [6]

2.5 Desventajas del uso de lagunas.

- Requiere grandes extensiones de terreno, como se puede observar en la tabla 2-5

Tabla 2-5. Área de terreno requerida para varios procesos de tratamiento.

Proceso de Tratamiento	Área Requerida (m²/persona)
Lodos Activados	0.3 – 1
Filtro Percolador	0.4 – 1
Laguna Aireada	4 – 10
Sistema de Lagunas de Estabilización	2 - 20 ¹
1. El área requerida depende sobre el clima, el diseño, y el nivel de tratamiento requerido.	

Fuente: Metcalf & Eddy [6]

- En el efluente se da una concentración elevada de algas que puede ocasionar problemas en fuentes receptoras superficiales.
- Las lagunas pueden causar impactos negativos sobre las aguas subterráneas si no se impermeabilizan o si el recubrimiento se daña.
- Un diseño inapropiado o una incorrecta operación pueden generar malos olores.
- Se requiere disponer de terrenos aptos para la ejecución de la laguna.
- Deben estar alejados de la zona poblada, lo que obliga a proyectar emisarios de gran longitud.

- Cuando el efluente contiene algas y en el cuerpo receptor hay pocos nutrientes, las algas vegetan y tienen una pequeña demanda (DBO) que no es objetable. En cambio si no hay luz solar suficiente se mueren y sedimentan produciendo demanda de oxígeno por respiración endógena.
- En cursos sin agua permanente como ocurre en zonas secas no es aconsejable la aplicación de lagunas, ya que las algas del efluente pueden producir olores al descomponerse.

2.6 Clasificación de las Lagunas de Estabilización.

Existen diversas formas de clasificar lagunas, entre las cuales se pueden nombrar las siguientes:

- De acuerdo con el contenido de oxígeno, pueden ser: Aeróbicas, Anaeróbicas y Facultativas.
- De acuerdo con el lugar que ocupan con relación a otros procesos, las lagunas pueden clasificarse como: Primarias o de aguas residuales crudas, secundarias, si se reciben efluentes de otros procesos de tratamiento y de maduración si su propósito fundamental es reducir el número de organismos patógenos o su reutilización en riegos o cultivo de peces.
- De acuerdo al régimen de flujo, los sistemas pueden ser: Flujo de pistón, de mezcla completa y de flujo disperso.

- De acuerdo al modelo de operación pueden ser: Lagunas en paralelo, lagunas en series y lagunas con recirculación del efluente.

2.7 Clasificación de acuerdo al contenido de oxígeno.

Esta es la clasificación más común y básica de los tipos de lagunas, de acuerdo con el contenido de oxígeno pueden ser: Anaeróbicas, Facultativas y Aeróbicas o de maduración.

2.7.1 Lagunas Anaeróbicas.

Estas son las unidades más pequeñas de la serie. Por lo general tienen una profundidad de 2 a 5 m y reciben altas cargas orgánicas volumétricas mayores a $1000 \text{ g DBO}_5/\text{m}^3 \text{ d}$. El propósito de una laguna anaeróbica es remover un porcentaje de la carga orgánica (DBO) y la mayoría de los sólidos suspendidos bajo condiciones anaeróbicas por la acción de bacterias anaeróbicas, y por lo tanto disminuir el área requerida para el sistema total de lagunas. [8]



Fig. 2.1. Laguna anaeróbica en Honduras.

Fuente: Oakley [16]

Como consecuencia de la elevada carga orgánica y el corto periodo de retención del agua residual, entre 2 y 5 días. Estas altas cargas orgánicas producen condiciones anaerobias estrictas (oxígeno disuelto ausente) en todo el volumen de la laguna. En términos generales, las lagunas anaerobias funcionan como tanques sépticos abiertos y trabajan extremadamente bien en climas calientes. En la figura 2.1 se muestra un diagrama de una laguna anaeróbica.

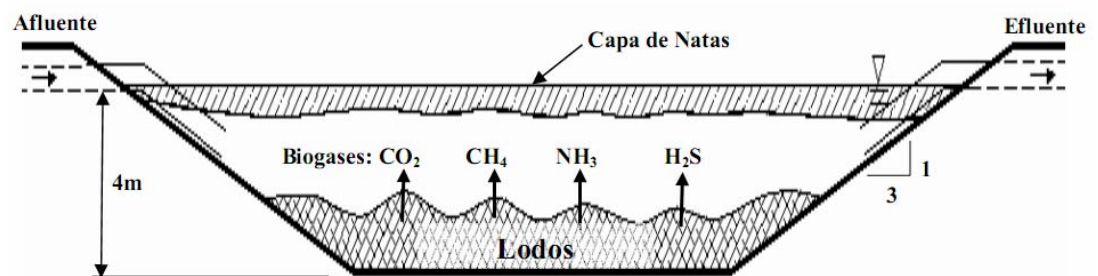


Fig. 2.2. Diagrama de una laguna anaeróbica.

Fuente: Oakley [16]

Normalmente estas lagunas son las primeras de una serie, correspondiendo al tratamiento primario en el proceso de depuración. Por otra parte, pueden constituir, por si solas un sistema de depuración para poblaciones inferiores a 2.000 habitantes que requieran exclusivamente tratamiento primario.

El principal inconveniente de este tipo de tratamiento, es la posibilidad de que produzca malos olores, si el diseño no es correcto o si el contenido en azufre, responsable de la formación de sulfhídrico, del influente es superior a 100 mg/l.

2.7.1.1 Procesos en lagunas anaeróbicas.

El proceso de depuración en este tipo de lagunas tiene lugar mediante una fermentación anaeróbica. En estos procesos, en los cuales se puede llegar hasta la formación de metano, participan cuatro grupos microbianos: las bacterias hidrolíticas (Clostridium, Streptococos, Lactobacillus, Peptococcus), las bacterias acidogénicas (Acetovibrio, Butyrivibrio, Lactobacillus), bacterias acetogénicas (Acetogenicum, Syntrophobacter, Acetobacterium) y las bacterias metanogénicas (Methanobacterium, Methanococcus, Methanospirillum) todos ellos complementarios e imprescindibles para el proceso.

La estabilización de la materia orgánica en lagunas anaeróbicas tiene lugar mediante tres etapas: Hidrólisis, Formación de ácidos y la Formación de metanos.

2.7.1.1.1 Hidrólisis.

Este término indica la conversión de compuestos orgánicos complejos e insolubles en otros compuestos más sencillos y solubles en agua. Esta etapa es fundamental para suministrar los compuestos orgánicos necesarios para la estabilización anaeróbica en forma que puedan ser utilizados por las bacterias responsables de las dos etapas siguientes.

2.7.1.1.2 Formación de ácidos (acidogénesis).

Los compuestos orgánicos sencillos generados en la etapa anterior son utilizados por las bacterias generadoras de ácidos. Como resultado se produce su conversión en ácidos orgánicos volátiles. Hay una gran variedad de bacterias capaces de efectuar la etapa de formación de ácidos, y además esta conversión ocurre con gran rapidez. En la formación de ácidos ocurre la fase acidogénica.

2.7.1.1.3 Formación de metano (metanogénesis).

Una vez que se han formado estos ácidos orgánicos, una nueva categoría de bacterias entra en acción, y los utiliza para convertirlos finalmente en metano y dióxido de carbono. Esta fase se conoce como metanogénica.

2.7.1.2 Criterios para el diseño de lagunas anaeróbicas.

Los factores que hay que tener en cuenta al proyectar una laguna anaeróbica son fundamentalmente los aspectos de conservación del calor, sedimentación de materia en suspensión y almacenamiento de lodos, Considerando estos como los mecanismos responsables de la degradación anaeróbica y las variables ambientales que influyen sobre ellos. A continuación se exponen algunas de las características de las lagunas anaeróbicas y su efecto sobre el proceso global de depuración como lo son: la profundidad y tamaño, el tiempo de retención, la recirculación, formación de espuma en la superficie, carga orgánica, entre otras consideraciones.

2.7.1.2.1 Profundidad y tamaño.

La mejor alternativa al proyectar las lagunas anaeróbicas implica la construcción de varias lagunas pequeñas, profundas y con tiempos cortos de residencia del agua residual. Las principales razones para esta elección son las siguientes:

1. Conservación de calor: La superficie expuesta a intercambios de calor con la atmósfera en lagunas profundas y de pequeño tamaño es muy reducida, y los taludes de tierra proporcionan un adecuado sistema de aislamiento para prevenir el enfriamiento excesivo del agua durante el los meses fríos.
2. Disminución en los requerimientos de terreno: Cuando se usan lagunas profundas disminuye la necesidad de superficie a ocupar para alcanzar un determinado nivel de depuración. Las lagunas anaeróbicas profundas permiten reducir la superficie ocupada total por la planta de lagunaje en un 40-50% [12].

3. Disminución del riesgo de arrastre de sólidos: En el diseño profundo, el lodo sedimenta en el fondo de la balsa y es muy poco probable que se produzca su arrastre con la salida.

4. Oxigenación restringida al minimizar la superficie: Al ser inferior la superficie la transferencia de oxígeno disminuye. Además la mezcla inducida por la acción del viento es muy escasa, debido al efecto de los taludes y a la imposibilidad de formación de olas.

5. La concentración de sólidos en una zona pequeña favorece la compactación de los lodos: En lagunas anaeróbicas de gran tamaño y escasa profundidad se produce a menudo la flotación de los lodos, con el consiguiente peligro de arrastre por el efluente [15]. Sin embargo, en lagunas profundas (profundidad superior a 2,5 m.) los lodos se acumulan en el fondo, donde se produce su mineralización en condiciones anaeróbicas.

6. Los costos de mantenimiento son menores en lagunas profundas, ya que el lodo se va acumulando durante un periodo de varios años (normalmente de 3-6 años), por lo que sólo es necesario el vaciado de las lagunas después de un tiempo elevado de utilización. De esta forma el diseño profundo no sólo facilita la acumulación de lodos, sino que proporciona un lugar de almacenamiento, donde tiene lugar su mineralización.

7. Las lagunas pequeñas y profundas son mucho más flexibles, ya que permiten establecer distintos tipos de circulación y modificar los tiempos de tratamiento si se detectan anomalías en su funcionamiento. Por otra parte, la disponibilidad de varias lagunas anaeróbicas es necesaria para las operaciones de vaciado y limpieza, y los costos implicados son mucho menores en lagunas pequeñas.

8. Dados los mecanismos por los que transcurre la degradación, un tiempo de residencia prolongado y una elevada superficie son contraproducentes, ya que de esta forma se favorece la oxigenación del medio (por reaeración y/o fotosíntesis), lo cual causa problemas en las lagunas anaeróbicas.

2.7.1.2.2 Tiempo de retención.

Al discutir los mecanismos de la degradación anaeróbica, hay que ajustar cuidadosamente el tiempo de retención, de modo que las fases acidogénicas y metanogénicas estén equilibradas y no haya posibilidad de desarrollo de algas en superficie. El tiempo de residencia recomendado en estas lagunas oscila entre 2 a 5 días, dependiendo de la naturaleza del vertido y del clima del lugar de emplazamiento [15].

2.7.1.2.3 Recirculación.

La recirculación consiste en tomar una parte del efluente de la laguna e introducirla de nuevo en ésta. El objetivo de esta operación es proporcionar una siembra de microorganismos adaptados a las condiciones de las lagunas anaeróbicas y conseguir un grado mayor de mezcla. Los estudios realizados en lagunas anaeróbicas han demostrado que la recirculación tiene un efecto contraproducente, porque la mayor turbulencia da lugar al mantenimiento de sólidos en suspensión, que en ausencia de recirculaciones se incorporan a la capa de lodos.

2.7.1.2.4 Formación de espumas en superficie.

La formación de espumas o costras en superficie es normal en lagunas anaeróbicas, y según algunos autores, esta resulta beneficiosa porque previene las pérdidas de calor, sobre todo en climas fríos, e impide la liberación de malos olores.

2.7.1.2.5 Carga orgánica.

La carga orgánica en lagunas anaeróbicas suele darse en relación al área superficial o volumen de las lagunas, es decir, como carga superficial o volumétrica. Esta última medida es más significativa para estas lagunas, ya que los fenómenos superficiales no tienen gran interés en la degradación anaeróbica. Las cargas volumétricas empleadas normalmente en lagunas pequeñas y profundas están en el intervalo 100 - 400 g DBO₅/m³ día, dependiendo de la naturaleza del vertido a tratar.

2.7.1.3 Otras consideraciones.

Las lagunas anaeróbicas que suelen operar en paralelo, es decir, dividiendo el afluente en varias partes que alimentan a cada una de las lagunas, y reuniendo de nuevo el efluente de éstas para alimentar el resto de la instalación, los resultados con respecto a lagunas anaeróbicas en serie no recomiendan el uso de esta modalidad, ya que las lagunas que reciben el efluente ya tratado presentan problemas de operación debidos a la escasez de carga orgánica aplicada. Por otra parte, la disposición en paralelo con varias lagunas permite paralizar una o varias de ellas para efectuar labores de limpieza sin que ello afecte la marcha global de la depuradora.

2.7.2 Lagunas Facultativas.

Son cuerpos de agua superficiales, de 1.5 a 2 metros de profundidad que se extienden sobre un área relativamente grande, en la cual los efluentes permanecen por un período aproximado de 15 a 50 días. La remoción de materia orgánica se logra a través de procesos físicos, químicos y biológicos, que involucran la acción de algas y bacterias bajo la influencia de la luz solar (fotosíntesis), produciéndose la estabilización de la materia orgánica bajo la forma de células de algas nuevas y compuestos finales inorgánicos, como el CO_2 . Las características principales de las lagunas facultativas son el comensalismo entre algas y bacterias en el estrato superior y la descomposición anaeróbica de los sólidos sedimentados en el fondo.



Fig. 2.3 Laguna facultativa en Honduras.

Fuente: Oakley [16]

Poseen una zona aeróbica y una anaeróbica, operan con una carga orgánica media. En las capas superiores hay un proceso aeróbico y en las capas inferiores se tiene un proceso anaeróbico, donde se produce simultáneamente fermentación ácida y metánica. En este tipo de lagunas se

puede encontrar cualquier tipo de microorganismos, desde anaeróbicos estrictos, en el lodo del fondo, hasta aeróbicos estrictos en la zona inmediatamente adyacente a la superficie. Además de las bacterias y protozoarios, en las lagunas facultativas es esencial la presencia de algas, que son las principales suministradoras de oxígeno disuelto.

A diferencia de lo que ocurre con las lagunas anaeróbicas, el objetivo perseguido en las lagunas facultativas es obtener un efluente de la mayor calidad posible, en el que se haya alcanzado una elevada estabilización de la materia orgánica, y una reducción en el contenido en nutrientes y bacterias coliformes.

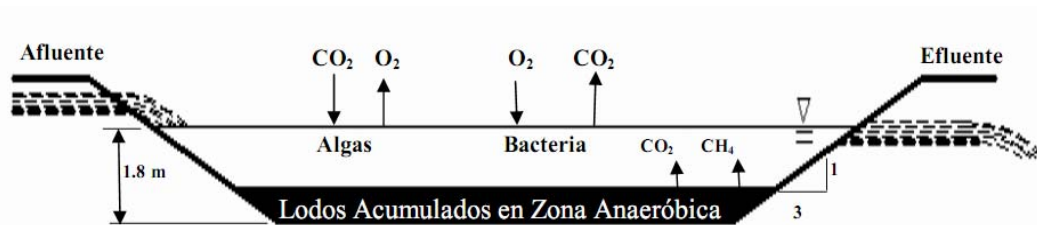


Fig. 2.4. Diagrama de una laguna facultativa.

Fuente: Oakley [16]

Estas lagunas pueden ser de dos tipos: Laguna facultativas primarias que reciben aguas residuales crudas y laguna facultativas secundarias que reciben aguas sedimentadas de la etapa primaria. Las lagunas facultativas son diseñadas para remoción de DBO_5 con base en una baja carga orgánica superficial. En una laguna facultativa existen tres zonas:

- *Zona superficial:* En la que existen bacterias aeróbicas y algas en una relación simbiótica, predominan los procesos de fermentación y reducción de la materia orgánica.
- *Zona inferior anaeróbica:* En la que se descomponen activamente los sólidos acumulados por acción de las bacterias anaeróbicas.
- *Zona intermedia:* Es parcialmente aerobia y anaerobia, la descomposición de los residuos orgánicos la llevan a cabo las bacterias facultativas. Los sólidos de gran tamaño se sedimentan para formar una capa de lodo anaeróbico. La descomposición anaeróbica de los sólidos de la capa de lodo implica la producción de compuestos orgánicos disueltos y de gases.

2.7.2.1 Procesos en lagunas facultativas.

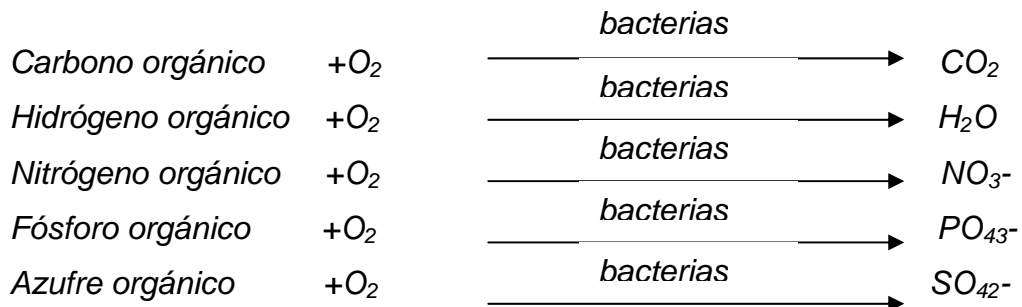
Uno de los signos de buen funcionamiento en las lagunas facultativas es el desarrollo de un color verde brillante debido a la presencia de algas. Las bacterias y algas actúan en forma simbiótica, con el resultado global de la degradación de la materia orgánica. Las bacterias utilizan el oxígeno suministrado por las algas para metabolizar en forma aeróbica los compuestos orgánicos. En este proceso se liberan nutrientes solubles (nitratos, fosfatos) y dióxido de carbono en grandes cantidades. Estos son utilizados por las algas en su crecimiento. De esta forma, la actividad de ambas es mutuamente beneficiosa.

Puesto que la presencia de oxígeno es ventajosa para el tratamiento, las lagunas facultativas se diseñan de forma que se favorezcan los mecanismos de oxigenación del medio. Las dos fuentes de oxígeno en

lagunas facultativas son la actividad fotosintética de las algas y la reaireación a través de la superficie.

Puesto que las algas necesitan luz para generar oxígeno, y la difusión de éste en el agua es muy lenta, las lagunas tienen normalmente poca profundidad (1.5 a 2 metros), para facilitar así un ambiente oxigenado en la mayor parte del perfil vertical. La profundidad a la cual se anula el contenido de oxígeno disuelto se llama oxipausa y varía a lo largo del día y del año.

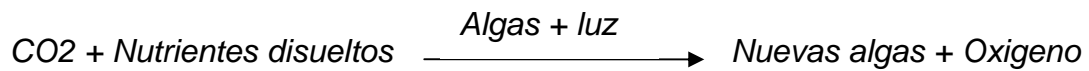
Desde el punto de vista de la depuración, las bacterias se pueden describir como pequeños reactores bioquímicos capaces de autorregularse. La oxidación biológica es la conversión bacteriana de los compuestos orgánicos hasta compuestos inorgánicos oxidados, proceso que se conoce con el nombre de mineralización. Como ejemplo de estos procesos tenemos:



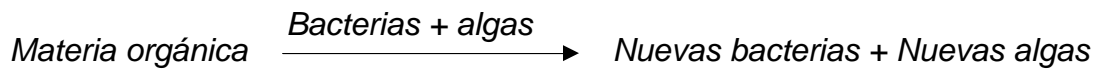
Las bacterias oxidan los productos de desecho para conseguir la energía y materias primas necesarias para la síntesis de las moléculas complejas de las que están formadas (proteínas, polisacáridos, etc). El proceso global de oxidación bacteriana puede describirse mediante la ecuación siguiente:



Por su parte, las algas sintetizan la materia orgánica de la que están constituidas en presencia de luz, para lo que necesitan, además, dióxido de carbono y nutrientes disueltos:



De esta forma, si se combina la actividad de algas y bacterias, el proceso global es el siguiente:



En conjunto se obtiene una estabilización de la materia orgánica, que se traduce en fuertes descensos de la demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno del agua a su paso por las lagunas facultativas [12]. En la figura 2.5 aparece un esquema simplificado de los principales procesos por los que tiene lugar la depuración en lagunas facultativas.

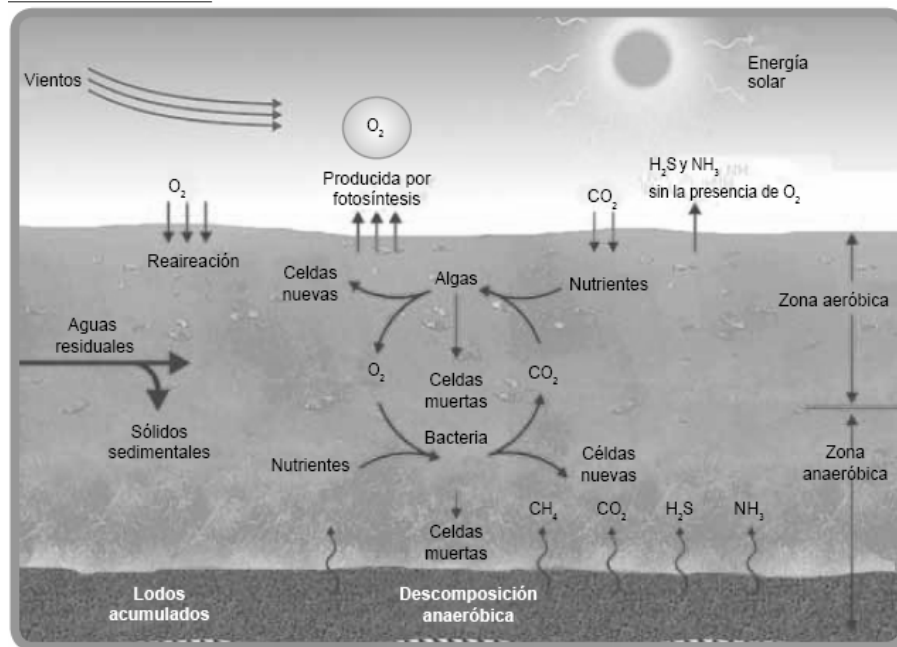


Fig. 2.5. Interacción de bacterias y algas en las zonas aeróbicas y anaeróbicas en una laguna facultativa de estabilización.

Fuente: Rolim [7]

2.7.2.2 Criterios de diseño de lagunas facultativas

Para el dimensionamiento de lagunas facultativas es necesario considerar ciertos criterios de diseño, entre ellos se encuentran: profundidad, radiación solar, evaporación, recirculación y sedimentación.

2.7.2.2.1 Profundidad

La profundidad de las lagunas facultativas suele fijarse entre 1.5 a 2 metros. El límite inferior viene condicionado a la posibilidad de crecimiento de vegetación emergente para profundidades menores, lo cual se desaconseja normalmente para evitar el desarrollo de mosquitos. En cuanto al límite

superior, las profundidades inferiores a 2 metros tienen el objetivo de limitar la posibilidad de estratificación, así como favorecer un ambiente aeróbico en la mayor parte del perfil vertical.

Por otra parte, en climas áridos una mayor profundidad repercute en una disminución de la evaporación, lo que es beneficioso tanto desde el punto de vista de almacenamiento para riegos como para evitar aumentos de salinidad en el efluente.

2.7.2.2.2 Radiación solar

La luz es fundamental para la actividad fotosintética, esta depende no sólo de la luz que alcanza la superficie del agua, sino de la que penetra en profundidad. Dado que el medio es normalmente muy turbio, debido sobre todo a la presencia de algas (este fenómeno se conoce como autosombreado), la luz que penetra en la laguna se atenúa rápidamente y se anula a poca distancia de la superficie. Por esta razón la profundidad de las lagunas debe ser pequeña, garantizando así que la mayor parte de la columna de agua va a contar con cierto grado de iluminación.

2.7.2.2.3 Evaporación

Este factor debe tenerse en cuenta en climas muy cálidos y secos. Se considera que una evaporación diaria de 5 milímetros no provoca efectos apreciables en las lagunas [15]. La repercusión principal de la evaporación es la concentración de los sólidos que contiene el agua almacenada. El

consiguiente aumento de la salinidad puede resultar perjudicial si el efluente se va a emplear en riegos.

2.7.2.2.4 Recirculación

La actividad biológica en las lagunas facultativas está muy influida por las características de la circulación del agua. Cuando se proyecta una laguna facultativa se calcula el tiempo necesario para alcanzar un determinado grado de depuración. Este tiempo se denomina tiempo teórico de retención, y resulta de dividir el volumen de la laguna por el caudal de agua a tratar que recibe.

Desde el punto de vista de la depuración lo que importa es si realmente todo el material que entra en la laguna permanece en ella durante ese tiempo, o si hay diferencias importantes entre el tiempo que una parte u otra del fluido permanece en la laguna. Cuando esto ocurre, la fracción que atraviesa rápidamente el estanque alcanza un grado menor de estabilización que la que permanece embalsada durante más tiempo. Estas diferencias en el tiempo real de residencia provocan siempre la disminución de la eficacia de la depuración.

2.7.2.2.5 Sedimentación

Los sedimentos que aparecen en las lagunas facultativas están formados por desechos orgánicos refractarios al tratamiento biológico, compuestos orgánicos biodegradables y complejos minerales precipitados.

Cuando la laguna facultativa recibe el efluente de una laguna anaerobia la generación de los lodos en el fondo es extremadamente lenta. Si recibe aguas residuales crudas la acumulación puede ser de varios centímetros por año. Por ello en el dimensionamiento de las lagunas facultativas se debe considerar este factor.

2.7.3 Lagunas Aeróbicas.

También conocida como laguna de maduración, son lagunas poco profundas de 1 a 1.5 m de profundidad de modo que la luz del sol penetra hasta el fondo y suelen tener tiempo de residencia elevada, entre 20 y 30 días, soportan cargas orgánicas bajas y contienen oxígeno disuelto en todo instante y en todo volumen del líquido. En ellas se produce la degradación de la materia orgánica mediante la actividad de bacterias aeróbicas que consumen oxígeno producido fotosintéticamente por las algas.

Este tipo de laguna tiene como objetivo fundamental la eliminación de bacterias patógenas, tienen un efecto desinfectante, eliminación de nutrientes y clarificador del efluente. Estas lagunas reciben el efluente de lagunas facultativas y su tamaño y número depende de la calidad bacteriológica requerida en el efluente final.



Fig. 2.6 Laguna aeróbica en Honduras.**Fuente: Oakley [16]**

Las lagunas aeróbicas son unidades poco profundas y presentan menos estratificación vertical, al tiempo que exhiben una buena oxigenación a través del día en todo su volumen. La población de algas es mucho más diversa en las lagunas de maduración comparada con las lagunas facultativas.

2.7.3.1 Procesos en lagunas aeróbicas.

En las lagunas aeróbicas o de maduración se pueden encontrar diferentes procesos que son los encargados de clarificar el efluente proveniente de otros procesos, entre ellos se encuentran: la eliminación de patógenos, la nitrificación y la reducción de nutrientes.

2.7.3.1.1 Eliminación de patógenos.

Las bacterias coliformes se utilizan como indicadores de la calidad del agua desde el punto de vista de su contaminación por microorganismos patógenos, es decir, causantes de enfermedades. Su eliminación en las lagunas de maduración se debe a la acción combinada de varios factores, que en conjunto crean unas condiciones muy desfavorables para su supervivencia. Los factores que afectan a la desaparición de microorganismos patógenos en las lagunas de maduración pueden dividirse en las categorías siguientes:

1. *Físicos*. La temperatura y sedimentación son los dos factores más importantes. La sedimentación consiste en la incorporación al fondo de la laguna de agregados de microorganismos, debido a que su peso específico es mayor que el del agua. Una vez que se produce su depósito en el fondo, estos agregados son atacados por bacterias que se desarrollan en la capa de lodos, y finalmente desaparecen. La temperatura es un factor muy importante en la velocidad de desaparición de microorganismos patógenos y esta velocidad de eliminación aumenta con la temperatura.

2. *Físico-químicos*. La salinidad del agua, pH, concentración de oxígeno disuelto e intensidad de la luz solar son los factores físico-químicos más influyentes. El tiempo de supervivencia de los microorganismos patógenos varía inversamente con la salinidad del medio. La eliminación de patógenos aumenta con el pH de la laguna. La presencia de oxígeno disuelto, causado por el efecto de choque del paso entre lagunas facultativas con concentraciones bajas o moderadas de oxígeno a lagunas de maduración con concentraciones elevadas, da lugar a un aumento en la velocidad de eliminación de patógenos. En presencia de luz la eliminación de patógenos es mucho más rápida, por lo que debe evitarse la construcción de lagunas de maduración profundas en las que buena parte de la columna de agua se encuentra en la oscuridad.

3. *Factores bioquímicos*. La concentración de nutrientes, presencia de compuestos tóxicos y predadores son los principales factores bioquímicos implicados en la eliminación de patógenos. La escasa concentración de materia orgánica en estas lagunas constituye un serio obstáculo para la supervivencia de los microorganismos heterótrofos como los que se pretende eliminar en esta etapa del tratamiento (bacterias, protozoos y hongos). Las algas secretan sustancias tóxicas que afectan a los microorganismos

patógenos, algunas de ellas muy activas en presencia de la luz. La presencia de predadores como protozoos, bacteriófagos, microcrustáceos y rotíferos da lugar a una fuerte reducción en las bacterias patógenas.

2.7.3.1.2 Nitrificación.

Aunque la conversión biológica de nitrógeno amoniacal a nitratos puede iniciarse en las lagunas facultativas cuando la concentración de oxígeno disuelto es suficientemente elevada, el medio aeróbico propio de las lagunas de maduración es mucho más adecuado para el desarrollo de las bacterias nitrificantes. Esta conversión tiene gran importancia para impedir el acceso del nitrógeno amoniacal a cursos de agua receptores donde puedan tener efectos tóxicos sobre la fauna. Las oscilaciones de oxígeno disuelto durante el día son menores, también se producen descensos durante la noche, dando lugar a concentraciones nulas de oxígeno iniciando el ciclo nitrificación-desnitrificación.

2.7.3.1.3 Reducción de nutrientes.

El descenso en la concentración de nutrientes solubles observado en las lagunas de maduración se debe fundamentalmente al consumo por el fitoplancton, posible desnitrificación durante la noche y a la precipitación de sales insolubles de fósforo que se incorporan al sedimento.

Las lagunas de maduración pueden suplir en parte el mal funcionamiento de las lagunas facultativas, permitiendo así obtener un efluente de calidad aceptable durante épocas del año en las que la depuración es muy lenta, o ayudando a absorber puntas de carga y caudal,

2.7.3.2 Criterios de diseño de lagunas aeróbicas.

En cuanto a su aspecto físico, las lagunas aeróbicas son muy similares a las facultativas, y en muchas ocasiones tienen incluso el mismo tamaño y profundidad. Debido a que la alimentación de estas lagunas presenta un alto grado de estabilización de la materia orgánica, la demanda de oxígeno disuelto es mucho menor que en las facultativas, y la fotosíntesis y aireación superficial permiten obtener un ambiente aeróbico en toda la columna de agua.

Debe evitarse la construcción de lagunas de maduración profundas en las que buena parte de la columna de agua se encuentra en la oscuridad, ya que la eliminación de patógenos es mucho más rápida en presencia de luz.

2.8 Sistemas de lagunas de estabilización.

Las lagunas pueden ser operadas en paralelo o en serie. Se usan cajas de distribución con vertederos ajustables en sistemas que funcionan en paralelo para dividir igualmente el afluente de las aguas residuales entre las celdas primarias. En las lagunas operadas en serie, la calidad del efluente mejora cada vez que pasa a través de cada laguna. Por eso, sistemas en serie son usados cuando una mejor calidad del efluente es requerida.

Sin embargo, es importante observar que el diseño de cada laguna debe ser basado en las condiciones de su afluente, y no un promedio de condiciones para todas las lagunas en serie. A continuación en la tabla 2-6 se presenta un resumen sobre tipos y aplicaciones de sistemas de lagunas de estabilización.

Tabla 2-6. Tipos y aplicaciones de lagunas de estabilización de uso común.

Tipos de estanque	Denominación común	Características identificables	Aplicación
Aeróbico	<p>Estanque anaerobio de baja carga.</p> <p>Estanque aerobio de alta carga.</p> <p>Estanque de maduración o terciario.</p>	<p>Proyectados para mantener condiciones aerobias en todas las profundidades del líquido, para optimizar la producción de tejido celular de algas y lograr altas cantidades de proteínas utilizables similar a los estanques d baja carga pero muy ligeramente cargados</p>	<p>Tratamiento de residuos orgánicos solubles y efluentes secundarios.</p> <p>Eliminación de nutrientes tratamientos de residuos orgánicos solubles, conversión de residuos.</p> <p>Utilizado para mejorar los efluentes de procesos de tratamientos secundarios convencionales</p>
Aeróbico - anaeróbico (fuente de oxígeno: fuente suplementaria)	<p>Estanque facultativo aireado</p>	<p>Más profundos que un estanque de alta carga. La fotosíntesis y reaireación superficial proporciona oxígeno para la estabilización aerobia en las capas superiores. Las capas inferiores son</p>	<p>Tratamiento de aguas residuales desbastada o procedente de decantación primaria o residuos industriales</p>

		facultativas.	
Aeróbico - anaeróbico (fuente de oxígeno: alga)	Estanque facultativo	Como el anterior, pero sin aireación suplementaria. La fotosíntesis y reaireación superficial proporcionan oxígeno en las capas superiores	Tratamiento de aguas residuales desbastada o procedente de decantación primaria o residuos industriales
Anaeróbico	Estanque anaerobio, estanques de pretratamiento anaerobio	Prevalen las condiciones anaerobias en toda la profundidad, generalmente seguidas por estanques aerobios o facultativos	Tratamiento de aguas residuales domesticas e industriales
Anaeróbico seguido de aerobio-anaerobio	Sistema de estanques	Combinación de los tipos de estanque descritos anteriormente. Los estanques aerobios-anaerobios pueden ir seguidos por un estanque aerobio. Con frecuencia se implantara recirculación desde los estanques aerobios a los anaerobios	Tratamiento completo de aguas residuales domesticas e industriales con altas eliminaciones de bacterias

Fuente: Babbit,. [5]

2.9 Tratamiento preliminar del agua residual.

Los sistemas con lagunas pueden no requerir de tratamiento preliminar alguno; sin embargo, la ventaja del pretratamiento radica en que minimiza la cantidad de material flotante que causa molestias en la primera laguna. En el tratamiento de aguas residuales de instituciones se acostumbra a utilizar tamices o equipos de maceración, para reducir el tamaño de trapos y demás material flotante.

En aguas residuales residenciales basta con usar una rejilla para proteger la cabecera de la planta o las estaciones de bombeo de objetos de gran tamaño. Instalaciones como monitores de caudal, muestreadores y estaciones de bombeo son por lo general los únicos equipos que se instalan antes de la descarga del agua residual en las lagunas de tratamiento.

En un sistema de tratamiento de aguas residuales a través de lagunas de estabilización, el pretratamiento sirve para lo siguiente. [12]:

1. Remover los sólidos grandes (gruesos) que flotan o están suspendidos: Estos sólidos gruesos consisten principalmente de papel, plásticos, trapos y tela, y otros desechos sólidos que pueden entrar el alcantarillado. Dependiendo de la abertura de las barras en una rejilla, los sólidos gruesos también pueden consistir de excretas humanas.

2. Remover los sólidos inorgánicos pesados, los que se llaman sólidos arenosos, que han entrado al alcantarillado: Estos sólidos entran el alcantarillado por las conexiones de tubería y los pozos de inspección y consisten principalmente de arena y otros sólidos.

Los sólidos flotantes y gruesos pueden causar problemas nocivos en la operación de las lagunas, ellos ayudan la formación de nata que puede producir malos olores, sirven como un foco para la reproducción de insectos, y producen condiciones desagradables a la vista.



Fig. 2.7. Sólidos flotantes y gruesos nocivos en la operación de las lagunas.

Fuente: Oakley [16]

Los sólidos arenosos pueden llenar la entrada de la laguna primaria donde impiden la mezcla del afluente con el contenido de la laguna, erosionan el revestimiento y los taludes interiores, y causan problemas de cortocircuitos hidráulicos, malos olores, y condiciones desagradables a la vista. También, los sólidos arenosos pueden contribuir significativamente al volumen de lodos que llena una laguna primaria, y como resultado la laguna necesitará limpieza con más frecuencia. [16]



Fig. 2.8. Sólidos arenosos no removidos impiden la mezcla del afluente con el contenido de la laguna.

Fuente: Oakley [16]

2.10 Factores que Influyen en las reacciones biológicas en lagunas de estabilización.

Las reacciones biológicas son fundamentales para garantizar el buen funcionamiento y depuración de las aguas residuales, es por ello que para el diseño o dimensionamiento de lagunas de estabilización es necesario controlar diversos factores, los cuales se pueden dividir en dos grupos: los factores no controlados por el hombre y factores controlados por el hombre.

2.10.1 Factores no controlados por el hombre.

Son aquellos que no dependen de actividades humanas, y no pueden ser controlados, entre ellos se encuentran: radiación solar, temperatura del agua en las lagunas, viento, evaporación y precipitación.

2.10.1.1 Radiación solar.

La luz solar es fundamental para la actividad fotosintética, ésta depende no solo de la luz que alcanza la superficie del agua, sino de la que penetra en profundidad. Como la intensidad de la luz varía a lo largo del año, la velocidad de crecimiento de las algas cambia de misma forma. En las lagunas facultativas es fundamental la fotosíntesis realizada por las algas para producir el oxígeno requerido por las bacterias aeróbicas. La radiación solar que se produce durante el día interviene en forma directa en la fotosíntesis.

2.10.1.2 Temperatura del agua en las lagunas.

Las reacciones físicas, químicas y bioquímicas que ocurren en las lagunas de estabilización son muy influenciadas por la temperatura. En general, se puede decir que la velocidad de degradación aumenta con la temperatura, en especial en lo que concierne a la actividad de las bacterias. Estos fenómenos son retardados por las bajas temperaturas. Por eso, el proyecto de las lagunas debe tener en cuenta siempre las condiciones de temperaturas más adversas. Los procesos de reducción de la materia orgánica por acción bacteriana son dependientes de la temperatura.

2.10.1.3 Viento.

El viento tiene un efecto importante en el comportamiento de las lagunas, ya que induce a la mezcla vertical del líquido de la laguna, una buena mezcla asegura una distribución más uniforme de DBO, oxígeno disuelto (importante para lagunas aeróbicas y facultativas), bacterias y algas y por lo tanto un mejor grado de estabilización del agua residual.

Influyen en la aireación y homogenización de los líquidos dentro de las lagunas, además de regular la temperatura.

2.10.1.4 Evaporación.

La repercusión principal de la evaporación es la concentración de los sólidos que contiene el agua almacenada. El consiguiente aumento de la salinidad puede resultar perjudicial si el efluente se va a emplear en riego.

2.10.1.5 Precipitación.

El oxígeno disuelto suele bajar después de tormentas debido a la demanda adicional de oxígeno provocada por los sólidos arrastrados por el agua de lluvia y los sedimentos de las lagunas que se mezclan con la columna de agua. Otro efecto de la lluvia es una cierta oxigenación en la zona superficial de las lagunas, debido tanto al propio contenido en oxígeno de la lluvia como a la turbulencia que provoca con su caída.

2.10.2 Factores controlables por el hombre.

Son aquellos que el hombre puede controlar por una serie de procedimientos, matemáticos, físicos, químicos entre otros, para garantizar el buen funcionamiento de los diversos tipos de lagunas de estabilización. Entre estos factores se encuentran:

- Carga orgánica superficial (kg DBO/d.hab).
- Profundidad de la laguna (m).
- Distribución del ingreso de la carga hidráulica.
- Período de detención hidráulica (d).
- Operación en serie o en paralelo.

La definición, valores y ecuaciones recomendadas para estos factores dependen de la metodología de cálculo empleada para el diseño, por lo cual solo se hace referencia en este punto.

2.11 Función de las Algas en las Lagunas de Estabilización.

Las algas tienen un rol sumamente importante en el proceso biológico de las lagunas de estabilización, pues son los organismos responsables de la producción de oxígeno molecular, elemento vital para las bacterias que participan en la oxidación bioquímica de la materia orgánica [4].

La presencia de las algas en niveles adecuados, asegura el funcionamiento de la fase aeróbica de las lagunas, cuando se pierde el equilibrio ecológico se corre con el riesgo de producir el predominio de la fase anaeróbica, que trae como consecuencia una reducción de la eficiencia del sistema. Las acciones que desarrollan las algas en el agua residual son:

- Producir oxígeno para la descomposición de la materia orgánica y mantener las condiciones aeróbicas del líquido.
- Remueven los nutrientes como son los compuestos del fósforo, nitrógeno y carbono para satisfacer necesidades nutricionales.

2.12 Modelos para el dimensionamiento de lagunas de estabilización.

2.12.1 Modelo de Hermann y Gloyna.

Hermann y Gloyna, en 1958 presentaron el primer modelo que describe el comportamiento de lagunas de estabilización facultativas en base a la teoría cinética, ellos utilizaron la expresión de Arrhenius para relacionar los tiempos teóricos de retención a dos temperaturas distintas, necesarios para obtener una remoción de la DBO del 90 %. [9]

Periodo de retención para el mes más frío del año

$$PR_t = PR_{35} \cdot \theta^{(35-t)} \quad (2.1)$$

Donde:

PR_{35} : Periodo de retención a 35 °C para 90% remoción DBO (d)

θ : 1.085, Valor recomendado para el coeficiente de temperatura, factor de Arrhenius.

t : Temperatura ambiente de aguas residuales para el mes más frío del año (°C).

Volumen de la laguna

$$V = 7.0 * Q_a * \theta^{(35-t)} = PR_t * Q_a \quad (2.2)$$

Donde:

7.0 : Período de retención calculado según el comportamiento y eficiencia en lagunas experimentales (d)

Q_a: Caudal del agua residual (m³/d)

θ: 1.085, Valor recomendado para el coeficiente de temperatura, factor de Arrhenius.

t: Temperatura ambiente de aguas residuales para el mes más frío del año (°C).

PR_t: Periodo de retención a para el mes mas frío del año (d)

Área superficial

$$A = \frac{V}{P} \quad (2.3)$$

Donde:

V: Volumen de la laguna (m³)

P: Profundidad de la laguna.

Carga superficial aplicada

$$C_{sa} = \frac{Q_a * S_a}{A} \quad (2.4)$$

Donde:

C_{sa}: Carga superficial aplicada (kg DBO/ha/d)

Q_a: Caudal del agua residual (m³/d)

S_a: DBO del agua residual a una temperatura t (kg DBO)

A: Área superficial de la laguna (m²)

2.12.2 Modelo de Marais y Shaw.

Marais y Shaw, propusieron en el año 1961 un modelo cinético en el cual cada laguna es considerada individualmente, aunque forme parte de un sistema de lagunas en serie, y cada laguna representa a un reactor de mezcla completa, y flujo continuo, en donde la DBO se ejerce según una reacción de primer orden. [9]

Posteriormente Marais modificó este modelo incluyendo la influencia del lodo depositado en el fondo de la laguna, la producción de gases de la fermentación del lodo y su contribución a la DBO en las capas superiores.

Concentraciones materia orgánica biodegradable en el efluente

$$S = \frac{S_a}{1 + K \cdot PR} \quad (2.5)$$

Donde:

S y S_a : Concentraciones materia orgánica biodegradable en el efluente y afluente respectivamente (mg/l)

K : Constante o velocidad de degradación de la DBO a temperatura °C para un día.

PR : Periodo de retención a para el mes mas frio del año (d)

Eficiencia de la laguna

$$E = \frac{S_a - S}{S_a} * 100 \quad (2.6)$$

Donde:

S y S_a : Concentraciones materia orgánica biodegradable en el efluente y afluente respectivamente (mg/l)

E : Eficiencia de la laguna de estabilización (%)

Periodo de retención

$$PR = \frac{E}{K(1 - E)} \quad (2.7)$$

Donde:

PR : Periodo de retención para 90% remoción DBO (d)

K : Constante o velocidad de degradación de la DBO para un día (l/d)

E : Eficiencia de la laguna de estabilización (%)

2.12.3 Modelo de Thirumurthy

En el año 1974, Thirumurthy propuso un modelo en base a que no hay mezcla completa en la laguna, en cambio el flujo es disperso y se aproxima a las condiciones de un reactor de flujo arbitrario. [9]

Este modelo requiere de la toma de medidas en lagunas en operación, para su utilización es considerado como un modelo operativo y la escasez de valores experimentales no permite hacer una discusión más amplia sobre la aplicabilidad del modelo.

$$\frac{S}{S_a} = \frac{4\alpha e^{-1/2d}}{(1+\alpha)^2 e^{\alpha/2d} - (1-\alpha)^2 e^{-\alpha/2d}} \quad (2.8)$$

$$\frac{S}{S_a} = \frac{4\alpha e^{1-\frac{\alpha}{2d}}}{(1+\alpha)^2} \quad (2.9)$$

Donde:

$$\alpha = \sqrt{1 + 4K(PR)di}$$

$$di = \frac{D}{UL} = \frac{D(PR)}{L^2}$$

di : Coeficiente de dispersión y constante de efusividad

D : Coeficiente de dispersión axial (m^2/h)

U : Velocidad del fluido en la laguna (m/d)

L : Longitud o trayectoria del desplazamiento del agua que entra hasta el agua que sale de la laguna (m)

S y S_a : Concentraciones materia orgánica biodegradable en el efluente y afluente respectivamente (mg/l)

2.12.4 Modelo de Oswald y Gotaas.

En 1957 Oswald y Gotaas publicaron un estudio sobre la fotosíntesis en el tratamiento de aguas residuales en lagunas. El modelo se basa en la relación simbólica que se establece entre algas y bacterias saprofitas en lagunas de estabilización aeróbicas. En estas lagunas el oxígeno sintetizado por las algas es utilizado por las bacterias en la oxidación de materia orgánica y, el dióxido de carbono de la oxidación es utilizado por las algas en la síntesis de materia celular de algas. [9]

Este modelo es aplicable en el dimensionamiento de lagunas aeróbicas o de alta producción de biomasa, ha sido utilizado equivocadamente para dimensionar lagunas facultativas y su aplicación ha llevado a sobredimensionar lagunas facultativas y a numerosos diseños defectuosos. No es aplicable al dimensionamiento de lagunas facultativas.

Energía

$$E_s = S * A \quad (2.10)$$

Donde:

E_s : Energía solar (calorías)

S : Insolación media visible (calorías/ cm²/día)

A : Área superficial de la laguna (cm²)

Energía solar absorbida

$$H = S * A(PR)F = h * C_a \quad (2.11)$$

Donde:

S : Insolación media visible (calorías/ cm²/día)

A : Área superficial de la laguna (cm²)

PR : Periodo de retención (d)

F : Constante de eficiencia de absorción de energía (0.2 a 0.9)

C_a : Concentración de algas en la laguna (mg/l)

h : Calor de combustión de las algas (calorías/mg algas)

Profundidad

$$d = \frac{\ln Li}{\alpha Ca} \quad (2.12)$$

Donde:

\ln Logaritmo natural

d Profundidad hasta la cual penetra la luz (cm)

α Coeficiente de extinción de la luz, entre 10^{-3} Y 2×10^{-3}

Ca : Concentración de algas en la laguna (mg/l)

Li : Intensidad de la luz incidente (bujías)

2.12.5 Modelo de Mara

Entre 1970 y 1996, Mara realizó investigaciones en las cuales desarrolló metodologías basadas principalmente en la temperatura como factor determinante en el diseño de lagunas, para ello elaboró criterios basados en sistemas de lagunas anaeróbicas, facultativas y de maduración, en las cuales el caudal del efluente de una pasa a ser el caudal del afluente de la siguiente laguna, logrando así relacionarlas, y tener valores más exactos en cuanto al volumen, área, tiempo de retención y carga orgánica de las mismas. [8]

2.12.5.1 Para laguna anaeróbica.

El diseño de carga está dado por medio de las ecuaciones presentadas para diversos rangos de temperatura mínima anual de las aguas residuales presentadas en la tabla 2-7:

Tabla 2-7. Ecuaciones de carga volumétrica para lagunas anaeróbicas de acuerdo a la temperatura para el método de Mara

Temperatura mínima anual de agua residual °C	λ_v Carga volumétrica (g/m ³ d)
< 10	100
10 - 20	20T - 100
20 - 25	10T + 100
>25	350

Fuente: Mara [12]

Volumen de la laguna:

$$V_a = L_i Q / \lambda_v \quad (2.13)$$

Donde:

V_a : Volumen de la laguna (m³)

L_i : Demanda bioquímica de oxígeno del afluente (mg/l)

Q : Caudal de agua residual a tratar (m³/ d)

λ_v : Diseño de carga de la laguna obtenido de acuerdo al rango de temperatura mínima anual del agua residual con la tabla 2-7(g m³/ d)

Tiempo de retención

$$\theta_a = V_a / Q \quad (2.14)$$

Donde:

θ_a : Tiempo de retención hidráulico (d)

V_a : Volumen de la laguna (m³)

Q : Caudal de agua residual a tratar (m³/ d)

Porcentaje de remoción de la DBO

El porcentaje de remoción de la DBO está dado por medio de las ecuaciones presentadas para diversos rangos de temperatura media del aire en el mes más frío de las aguas residuales presentadas en la tabla 2-8:

Tabla 2-8. Porcentaje de remoción DBO para lagunas anaeróbicas de acuerdo a la temperatura para el método de Mara

Temperatura mínima anual del agua residual °C	R Porcentaje de remoción DBO (%)
< 10	40
10 - 20	2T + 20
20 - 25	2T + 20
>25	70

Fuente: Mara [12]

2.12.5.2 Para laguna facultativa.

Diseño de carga

$$\lambda_s = 350 (1.107 - 0.002T)^{T-25} \quad (2.15)$$

Donde:

λ_s : Diseño de carga de la laguna facultativa (Kg ha/ d)

T : Temperatura media del aire en el mes más frío °C

Área de la laguna

$$A_f = 10L_i Q / \lambda_v \quad (2.16)$$

Donde:

A_f : Área de la laguna facultativa (m²)

L_i : Demanda bioquímica de oxígeno del afluente (mg/l)

λ_v : Diseño de carga de la laguna facultativa (Kg ha/ d)

Q Caudal de agua residual a tratar (m³/ d)

Tiempo de retención

$$\theta_f = \frac{2A_f D}{(2Q - 0.001 A_f e)} \quad (2.17)$$

Donde:

θ_f Tiempo de retención hidráulico de la laguna facultativa (d)

A_f : Área de la laguna facultativa (m²)

D : Profundidad de la laguna (m)

Q Caudal de agua residual a tratar (m³/ d)

e : Rata de evaporación media en el mes más caliente (mm/d)

Caudal del efluente

$$Q_e = Q_i - 0.001 A_f e \quad (2.18)$$

Donde:

Q : Caudal de agua residual a tratar (m^3/d)

A_f : Área de la laguna facultativa (m^2)

e : Rata de evaporación (mm/d)

2.12.5.3 Para laguna de maduración.

Constante de degradación para una temperatura dada

$$K_t = 2.6(1.19)^{T-20} \quad (2.19)$$

Donde:

K_t : Constante de degradación de la materia orgánica (d^{-1})

T : Temperatura mínima anual del agua residual $^{\circ}C$

Tiempo de retención

$$\theta_m = \left\{ \left[\frac{N_i}{N_e} (1 + K_t \theta_a) (1 + K_t \theta_f) \right]^{1/n} - 1 \right\} / K_t \quad (2.20)$$

Donde:

N_i : Número de coliformes fecales en el afluente (FC cada 100 ml)

N_e : Número de coliformes fecales en el efluente (FC cada 100 ml)

K_t : Constante de degradación de la materia orgánica (d^{-1})

θ_a : Tiempo de retención hidráulico de la laguna anaeróbica (d)

θ_f : Tiempo de retención hidráulico de la laguna facultativa (d)

n : Número de lagunas de maduración, valor a iterar para hallar tiempo de retención hidráulico.

Carga de la primera laguna de maduración

$$\lambda_{Sm1} = 10 \times 0.3 \times L_i \times D / n \quad (2.21)$$

Donde:

λ_{Sm1} :Diseño de carga de la laguna maduración (Kg ha/ d)

L_i : Demanda bioquímica de oxígeno del afluente (mg/l)

D :Profundidad de la laguna (m)

n : Valor obtenido de la iteración, número de lagunas de maduración.

Tiempo de retención primera laguna maduración

$$\theta_{m1} = 10L_i Q / \lambda_{m1} \quad (2.22)$$

Donde:

θ_f :Tiempo de retención hidráulico de primera laguna maduración (d)

L_i :Demanda bioquímica de oxígeno del afluente (mg/l)

λ_{m1} :Diseño de carga de la laguna facultativa (Kg ha/ d)

Q :Caudal de agua residual a tratar (m³/ d)

Tiempo de retención en las siguientes lagunas de maduración

$$\theta_m = \left\{ [N_i / N_e (1 + K_t \theta_a) (1 + K_t \theta_f) (1 + K_t \theta_{m1})]^{1/n} - 1 \right\} / K_t \quad (2.23)$$

Donde:

N_i :Número de coliformes fecales en el afluente (FC cada 100 ml)
 N_f :Número de coliformes fecales en el efluente (FC cada 100 ml)
 K_c :Constante de degradación de la materia orgánica (d^{-1})
 θ_a :Tiempo de retención hidráulico de la laguna anaeróbica (d)
 θ_f :Tiempo de retención hidráulico de la laguna facultativa (d)
 θ_{m1} :Tiempo de retención de la laguna primera laguna maduración (d)
 n :Número de lagunas de maduración, valor a iterar para hallar tiempo de retención hidráulico.

Área de la primera laguna de maduración

$$A_{m1} = \frac{2Q_i \theta_m}{(2D + 0.001 e \theta_m)} \quad (2.24)$$

Donde:

A_{m1} :Área de la primera laguna maduración (m^2)
 Q :Caudal de agua residual a tratar (m^3/d)
 θ_m :Tiempo de retención de la laguna primera laguna maduración (d)
 D :Profundidad de la laguna (m)
 e :Rata de evaporación (mm/d)

Caudal del efluente de la primera laguna de maduración

$$Q_e = Q_i - 0.001 A_{m1} e \quad (2.25)$$

Donde:

A_{m1} :Área de la primera laguna maduración (m^2)

Q_i : Caudal de agua residual a tratar (m^3/d)

e : Rata de evaporación (mm/d)

Área de las siguientes lagunas de maduración

$$A_{mn} = \frac{2Q_e \theta_m}{(2D + 0.001 e \theta_m)} \quad (2.26)$$

Donde:

A_{mn} : Área de las siguientes lagunas de maduración (m^2)

θ_m : Tiempo de retención de la laguna primera laguna maduración (d)

D : Profundidad de la laguna (m)

e : Rata de evaporación (mm/d)

Q_e : Caudal del efluente (m^3/d)

Caudal del efluente de las siguientes lagunas de maduración

$$Q_e = Q_i - 0.001 A_{mn} e \quad (2.27)$$

Donde:

A_{mn} : Área de las siguientes lagunas de maduración (m^2)

e : Rata de evaporación (mm/d)

Q_i : Caudal de agua residual a tratar (m^3/d)

2.12.6 Modelos del CEPIS

El Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria (CEPIS), ha desarrollado con el pasar de los años por medio de muchos autores certificados por esa organización, publicaciones sobre lagunas de estabilización basadas en métodos experimentales existentes. Entre las investigaciones más reconocidas se encuentra la del sistemas de lagunas anaeróbicas y facultativas según Sáenz [14], y el modelo de laguna facultativa según Yáñez [1].

2.12.6.1 Sistemas de lagunas según Saéenz.

Sáenz [14], mediante el análisis de gran cantidad de datos obtenidos a partir de estudios y evaluaciones del funcionamiento de lagunas de estabilización, el Programa de Salud Ambiental de la OPS logró definir un modelo matemático para predecir fácilmente la calidad del efluente. La aplicación del modelo reveló que en zonas tropicales se podían reducir a un mínimo el área y volumen de las lagunas de estabilización mediante el uso de lagunas anaerobias primarias de alta carga seguidas en serie de lagunas facultativas alargadas cuya relación de longitud a ancho es de 15:1, como mínimo (ver figura 2.9).

Pese a que esta orientado a conseguir un efluente con determinada concentración de coliformes fecales, el diseño propuesto elimina simultáneamente de 80 a 90% de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO). En general, la calidad microbiológica del efluente de estas lagunas es muy buena, lo que hace pensar que si instalaciones de este tipo se usaran ampliamente en países tropicales constituirían una herramienta muy valiosa para combatir el cólera y otras enfermedades diarreicas transmitidas por el agua. Dada la calidad del efluente de este sistema de lagunas no es necesario colocar una laguna aeróbica subsecuente al sistema.

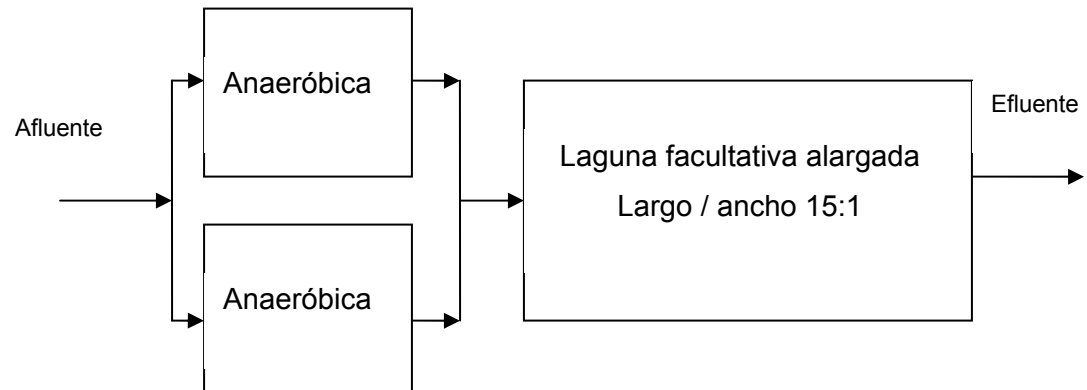


Fig.2.9 Vista en planta de un sistema de lagunas anaeróbicas en paralelo seguida de laguna facultativa alargada.

Fuente: Saézn [14]

2.12.6.2 Lagunas anaeróbicas según Sáenz [14]

Estas lagunas serán cuadradas y tendrán una profundidad funcional (Z_{p1}) de 4 m y una profundidad adicional (Z_{p2}) para la acumulación de lodo, que se sacará cada 2 años, como se puede observar en la figura 2.10.

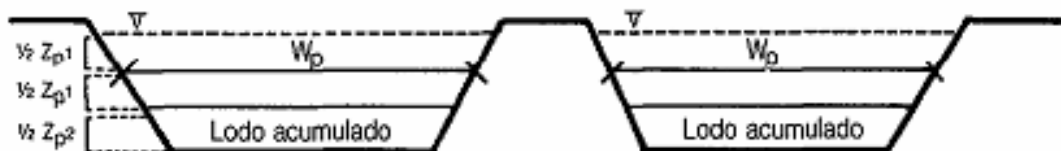


Fig. 2.10. Esquema para lagunas anaeróbicas.

Fuente: Sáenz [14].

La carga orgánica superficial aplicable por unidad de área y por día y la profundidad adicional necesaria para el lodo acumulado dependerán de la

temperatura promedio del agua durante el mes más frío del año, como se ilustra en el la tabla 2.9.

Tabla 2-9. Tabla para valores de carga superficial, profundidad adicional

Temperatura °C	Lagunas Anaeróbicas Primarias	
	I (Kg/Ha-d)	Zp ₂ (m)
15	2000	0.60
20	3000	0.80
25	4000	1.00
30	5000	1.20

Fuente: Sáenz [14]

Longitud del lado de la laguna anaeróbica.

$$W_p = 100 (Y_c (P/2) / i)^{1/2} \quad (2.28)$$

Donde:

W_p : Longitud promedio de uno de los lados de la laguna primaria (m)

Y_c :Demanda bioquímica de oxígeno a una temperatura de 20°C, expresada en g/día per cápita, se obtiene del producto del caudal por la DBO del agua residual

P :Población tributaria en miles de habitantes.

i :Carga orgánica superficial (demanda bioquímica de oxígeno a 20°C)para la temperatura promedio del agua durante el mes más frío del año, en kg/ ha.d, obtenido de la tabla 2-10.

Área de las lagunas anaeróbicas

$$A = W_p * W_p \quad (2.29)$$

Donde:

W_p : Longitud promedio de uno de los lados de la laguna primaria (m).

2.12.6.3 Laguna facultativa alargada según Sáenz [14]

Esta laguna, que recibe el efluente de las lagunas primarias, funciona a base de un mecanismo de flujo a pistón, según el cual las aguas residuales que entran en la laguna la atraviesan sin mezclarse con el resto del agua que hay en ella. Según el método desarrollado por Sáenz [14], se obtiene el valor de la constante de remoción bacteriana diaria de las lagunas alargadas según la tabla 2-10.

Tabla 2-10. Tabla para valores constante de remoción bacteriana de acuerdo a la temperatura

Temperatura °C	
	Kb
15	0.59
20	0.75
25	0.96
30	1.22

Fuente: Sáenz [14]

Concentración de bacterias en el efluente de la laguna alargada

$$N = N_o \left(e^{-\frac{4}{9}(V/Q)K_b} \right) \quad (2.30)$$

Donde:

N : Concentración de bacterias en el efluente que sale de la laguna alargada

N_o : Concentración de bacterias en el efluente que entra en la laguna alargada

e : Constante (aprox. 2,71828).

V : Volumen de la laguna alargada (m^3)

Q : Caudal que entra en la laguna alargada (m^3/d)

K_b : Constante de remoción bacteriana (d^{-1}).

Relación Volumen/caudal de agua residual de la laguna alargada

$$\frac{V}{Q} = \frac{-\frac{9}{4} * \text{Log}_e(N / N_o)}{K_b} \quad (2.31)$$

Donde:

N : Concentración de bacterias en el efluente que sale de la laguna alargada

N_o : Concentración de bacterias en el efluente que entra en la laguna alargada

e : Constante (aprox. 2,71828).

V : Volumen de la laguna alargada (m^3)

Q : Caudal que entra en la laguna alargada (m^3/d)

K_b : Constante de remoción bacteriana (d^{-1}).

Volumen de la laguna alargada en función del ancho promedio

$$V = p * 3We * 5We \quad (2.32)$$

Donde:

V : Volumen de la laguna alargada (m³).

We : Ancho promedio de la laguna alargada (m).

p : Profundidad de la laguna alargada (2 a 3 m)

Ancho promedio de la laguna alargada

$$We = 0.83(Q / Kb)^{1/2} \quad (2.33)$$

Donde:

We : Ancho promedio de la laguna alargada (m).

Q : Caudal que entra en la laguna alargada (m³/d)

Kb : Constante de remoción bacteriana (d⁻¹).

Área de la laguna alargada

$$A = 15 * We \quad (2.34)$$

Donde:

We : Ancho promedio de la laguna alargada (m).

2.12.6.4 Lagunas facultativas modelo según Yáñez [1]

Según Cubillos [11], el modelo esta basado en el método de Mc. Garry y Pescod modificado de acuerdo a ciertas correlaciones para valores de temperatura y carga orgánica, las cuales quedan expresadas en las siguientes ecuaciones:

Ecuación de correlación para la carga superficial removida

$$C_s = 357.4 * 1.085^{(T-20)} \quad (2.35)$$

Donde:

C_s :Carga superficial removida (kg DBO/ha/d)

357.4 y 1.085 :Valores corregidos por Yáñez basados en la ecuación de carga orgánica removida de Mc. Garry y Pescod (adimensional)

T : Temperatura mínima anual del agua residual °C

Área de la laguna (ha)

$$A = \frac{Q_a * S_a}{C_s} \quad (2.36)$$

Donde:

Q_a : Caudal del agua residual (m³/d)

S_a : DBO del agua residual (kg DBO)

$C_{s,a}$: Carga superficial aplicada del afluente (kg DBO/ha)

Volumen de la laguna (m³)

$$V = A * 10000 * P \quad (2.37)$$

Donde:

A: Área de la laguna (ha)

P: Profundidad de la laguna (1.8 - 2 m)

Periodo de retención

$$PR = \frac{V}{(Q_a - PI)} \quad (2.38)$$

Donde:

PR: Periodo de retención para 90% remoción DBO (d)

V: Volumen de la laguna (m³)

Q_a: Caudal del agua residual (m³/d)

PI: Perdidas en la laguna (evaporación (m³/d) + infiltración (m³/d))

Carga superficial

$$C_{sa} = \frac{Q_a * S_a}{A} \quad (2.39)$$

Donde:

C_{sa}: Carga superficial aplicada (kg DBO/ha/d)

Q_a: Caudal del agua residual (m³/d)

S_a: DBO del agua residual a una temperatura t (kg DBO)

A: Área superficial de la laguna (m²)

Carga superficial del efluente

$$C_{se} = C_{sa} - C_{sr} \quad (2.40)$$

Donde:

C_{se}: Carga superficial efluente (kg DBO/ha/d)

C_{sa}: Carga superficial aplicada del afluente (kg DBO/ha)

C_{sr}: Carga superficial removida (kg DBO/ha/d)

Concentraciones materia orgánica en la laguna

$$Se = \frac{C_{se} + A + 1000}{Q_a - PI} \quad (2.41)$$

Donde:

C_{se}: Carga superficial efluente (kg DBO/ha/d)

A: Área superficial de la laguna (ha²)

Q_a: Caudal del agua residual (m³/d)

PI: Perdidas en la laguna (evaporación (m³/d) + infiltración (m³/d))

2.12.6.4.1 *Para lagunas secundarias.*

Caudal de la laguna secundaria

$$Q = Q_a - Pl \quad (2.42)$$

Donde:

Q : Caudal del agua residual de la laguna secundaria (m³/d)

Q_a : Caudal del agua residual afluente (m³/d)

Pl : Perdidas en la laguna (evaporación (m³/d) + infiltración (m³/d))

DBO total del afluente de la laguna

$$DBO_{ta} = 2 * S_e \quad (2.43)$$

Donde:

DBO_{ta} : DBO total del afluente de la laguna (mg/l)

S_e Concentraciones de materia orgánica en la laguna (g/m³)

Carga orgánica que ingresa a la laguna secundaria

$$CO = Q * DBO_{ta} \quad (2.44)$$

Donde:

CO: Carga orgánica que ingresa a la laguna secundaria (kg DBO/d)

Q: Caudal del agua residual de la laguna secundaria (m³/d)

DBO_{ca}: DBO total del afluente de la laguna (mg/l)

Área de la laguna (ha)

$$A = \frac{CO}{C_{ca}} \quad (2.45)$$

Donde:

A: Área superficial de la laguna (m²)

CO: Carga orgánica que ingresa a la laguna secundaria (kg DBO/d)

C_{ca}: Carga superficial aplicada del afluente (kg DBO/ha)

Volumen de la laguna (m³)

$$V = A * 10000 * P \quad (2.46)$$

Donde:

A: Área de la laguna (ha)

P: Profundidad de la laguna (m)

Periodo de retención

$$PR = \frac{V}{(Q_a - P)} \quad (2.47)$$

Donde:

PR: Periodo de retención para 90% remoción DBO (d)

V: Volumen de la laguna (m³)

Q_a: Caudal del agua residual (m³/d)

PI: Perdidas en la laguna (evaporación (m³/d) + infiltración (m³/d))

Concentraciones materia orgánica en la laguna

$$S_e = \frac{C_{se} + A \cdot 1000}{Q - PI} \quad (2.48)$$

Donde:

C_{se}: Carga superficial efluente (kg DBO/ha/d)

A: Área superficial de la laguna (ha²)

Q: Caudal del agua residual (m³/d)

PI: Pérdidas en la laguna (evaporación (m³/d) + infiltración (m³/d))

2.13 Análisis de los métodos para el dimensionamiento de lagunas de estabilización según Cubillos.

Tomando como punto de partida los métodos anteriormente descritos, Cubillos se ha dado a la labor de comparar las diferentes metodologías basadas en experiencias regionales a diferentes temperaturas en lagunas de estabilización.

Este autor realizó experimentos en lagunas facultativas del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIDIAT) y el Instituto Colombiano

Agropecuaria (ICA), utilizando las metodologías de cálculo de descritas, obteniendo los siguientes resultados para las metodologías de Hermann y Gloyna, Marais y Shaw, Mc. Garry y Pescod y la metodología del CEPIS elaborado por Yáñez [11].

Para ello se presenta en la tabla 2-10 el resumen de resultados, mediante un cuadro comparativo de los diferentes métodos, donde es posible concluir que en los métodos de dimensionamiento con dos lagunas el área y volumen total son menores para una misma DBO del efluente. [11].

Tabla 2-11. Cuadro comparativo de resultados para los diferentes métodos de dimensionamiento según Cubillos.

Parámetro	Hermann Y Gloyna	Maraís y Shaw	Mc Garry y Pescod	CEPIS- Yáñez
DATOS:				
Q m³/d	8750	8750	8750	8750
CO kg/día	2424	2424	2424	2424
Parámetro	Hermann Y Gloyna	Maraís y Shaw	Mc Garry y Pescod	CEPIS- Yáñez
RESULTADOS				
Área, ha	7.7	11.4	6.1	6.1
Volumen, m³	138250	204750	109800	109800
PR, días	15.83	23.4	13.3	13.3

Evap + inf, mm	—	—	598	598
DBO efluente,mg/l	28	28	75	52
Csa, kg/ha.d	315	213	400	400
Csr, kg/ha.d	—	—	300.3	330.2
A, ha	—	—	4.1	2.8
Volumen, m ³	—	—	73800	50400
PR, día	—	—	9.4	6.4
DBO efluente, mg/l	—	—	30	25
Evap + Inf, mm	—	—	402	274

Fuente: [11].

2.14 Análisis de los métodos para el dimensionamiento de lagunas de estabilización según investigadores de la Universidad del Zulia-Venezuela.

Un grupo de investigadores como parte de su trabajo de grado, presentaron la publicación sobre la evaluación del sistema de lagunas facultativas que conforman la planta de tratamiento de aguas residuales en Cabimas, estado Zulia. Estos utilizaron diversas metodologías de cálculo que junto con valores experimentales permitieron realizar una gráfica comparativa para cada método [17], que se presenta en la fig. 2.10:

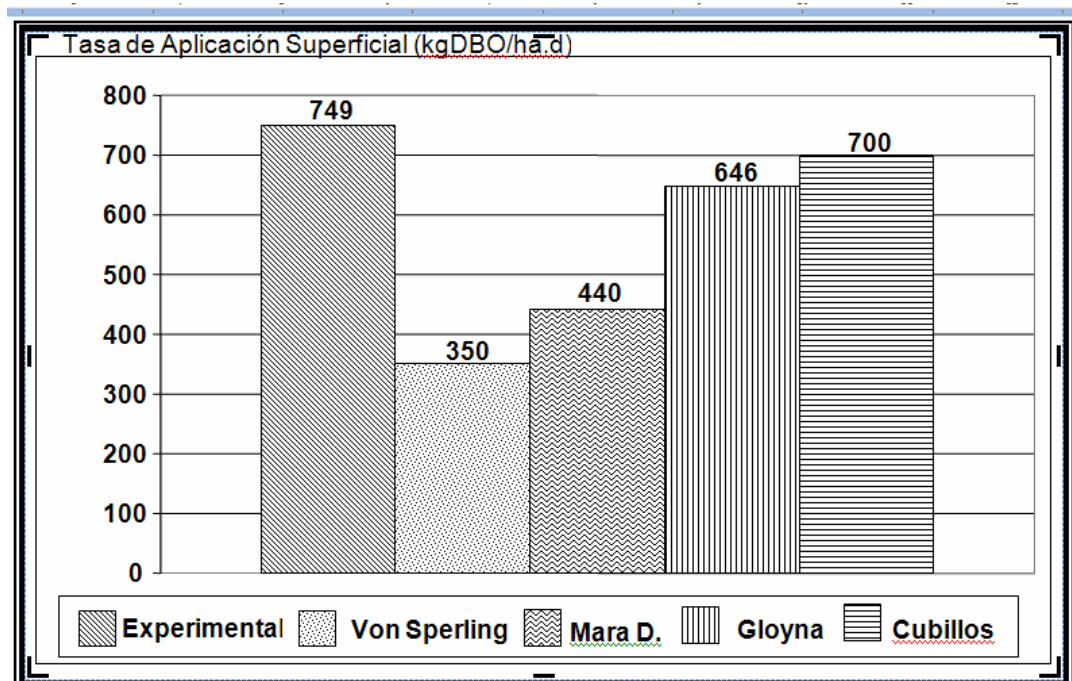


Fig. 2.11. Gráfica de tasa de aplicación superficial experimental Vs. modelos teóricos según investigadores de la Universidad del Zulia.

Fuente: Yabroudi [17].

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO





3 Marco Metodológico


En este capítulo se explican los procedimientos metodológicos empleados para recabar la información, que permiten justificar la propuesta de dimensionamiento más eficaz para un sistema de lagunas de estabilización. Esta metodología tuvo como punto de partida la definición de los tipos de lagunas a estudiar, las metodologías existentes a nivel mundial, así como también los parámetros de dimensionamiento a calcular.

3.1 Consideraciones generales.

El marco metodológico de la presente investigación, propone elaborar una metodología de diseño para el dimensionamiento de lagunas de estabilización basada en la selección de un método de cálculo que resulte más adecuado, entre los sugeridos en las diferentes fuentes bibliográficas, donde es necesario situar al detalle, el conjunto de métodos, técnicas y protocolos experimentales que se emplearon en el proceso de recolección de los datos requeridos en la investigación propuesta.

En función de las características derivadas del problema investigado y de los objetivos establecidos, en el marco metodológico del presente estudio, se delimitaron anticipadamente los diversos procedimientos técnicos y documentales empleados para recopilar, presentar y analizar los datos, con la finalidad de cumplir con el propósito general de la investigación planteada.

En tal sentido, se desarrollaron importantes aspectos relativos al tipo de estudio y a su diseño de investigación, la metodología utilizada y los criterios bajo los cuales fueron seleccionados los métodos de cálculo de los distintos



tipos de lagunas; las técnicas e instrumentos que se emplearon en la recolección de los datos y las características esenciales de los mismos; así como también, el análisis e interpretación de los resultados que permitieron destacar las evidencias más significativas del procedimiento desarrollado.

3.2 Tipo y diseño de la investigación

Para este estudio se utilizó la investigación documental y la investigación analítica, esta última se basó en un procedimiento más complejo que consistió fundamentalmente en establecer la comparación de variables entre los tipos de metodologías en estudio sin ser manipuladas, para de esta manera analizar las diferencias de los resultados obtenidos mediante la aplicación de dos metodologías de cálculo desarrolladas para un sistema de lagunas de estabilización.

3.3 Descripción de los instrumentos de recolección de información

Se utilizaron las técnicas de: observación documental, presentación resumida, resumen analítico y análisis crítico. A partir de la observación documental, como punto de partida en el análisis de las fuentes documentales, mediante una lectura general de los textos y normas, se inició la búsqueda y observación de los hechos presentes en los materiales escritos consultados que fueron de interés para esta investigación. Esta lectura inicial, fue seguida de varias lecturas más detenidas y rigurosas de los textos, a fin de captar sus planteamientos esenciales y aspectos lógicos de sus contenidos y propuestas, a propósito de extraer los datos bibliográficos útiles para el estudio que se está realizando.

La aplicación de la técnica de presentación resumida de un texto, permitió dar cuenta, de manera fiel y en síntesis, acerca de las ideas básicas que contienen los autores de las metodologías de dimensionamiento consultadas.

3.4 Diagrama del sistema adoptado para el análisis.

El análisis de las metodologías para el dimensionamiento se basó en un sistema básico o elemental para este tipo de lagunas, el cual consistió en un sistema consecutivo de lagunas anaeróbica, facultativa y aeróbica o de maduración. A continuación se presenta un diagrama del sistema de lagunas de estabilización adoptado para el estudio de las diversas metodologías de cálculo:

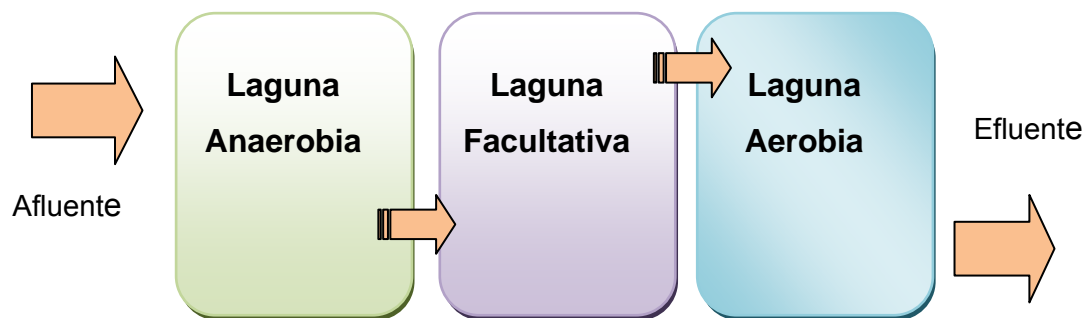


Fig. 3.1 Diagrama del sistema adoptado para el método de Mara

Fuente: propia

Para el método de Sáenz se utilizará un sistema de lagunas como el de la figura 2.9.



3.5 Métodos de cálculo a comparar para el dimensionamiento del sistema

Para realizar la comparación de las metodologías de cálculo, se analizaron cada uno de los métodos de forma cualitativa, dando como resultado la selección de dos de ellos en base a la eficiencia del sistema, la simplicidad de desarrollo del mismo y a criterios de diversos autores que analizaron los métodos de estudio anteriormente. Resultado de esto, los métodos en los que se basa este análisis sobre metodologías de dimensionamiento de lagunas de estabilización son: el desarrollado por Yáñez y Sáenz del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria (CEPIS), y el método desarrollado por Mara.

3.6 Problema propuesto para la comparación de métodos.

Se pretende dimensionar un sistema de lagunas en serie anaeróbica, facultativa y aeróbica de acuerdo a los siguientes datos:

3.6.1 Datos

- *Población:* 30000 habitantes.300 L/hab/día
- *Caudal medio anual de aguas residuales:* 9000 m³/d.
300 L/hab/día
- *DBO del agua residual:* 280 mg/l.
- *Coliformes fecales del agua residual:* 1 x 10⁸ coliformes fecales por cada 100 ml.
- *Coliformes fecales del efluente:* 1000 coliformes fecales por cada 100 ml.

- *Temperatura mínima anual de diseño: 20 °C.*
- *Rata de evaporación promedio anual: 6 mm/d.*
- *Infiltración en el suelo de la laguna: 0.02 mm/h*
- *Profundidad de la laguna anaeróbica: 4 m.*
- *Profundidad de la laguna facultativa: 2 m.*
- *Profundidad de la laguna aeróbica o de maduración: 2 m.*

3.6.2 Cálculos preliminares

Carga orgánica:

$$Y_c = 300 \frac{l}{hab.d} * 280 \frac{mg}{l} * \frac{1g}{1000 mg} = 84 \frac{g}{hab.d}$$

3.6.3 Método del CEPIS:

Está basado en las recomendaciones de cálculo, formulas y correlaciones de Sáenz [14] para lagunas anaeróbica, facultativa certificados por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria (CEPIS):

3.6.3.1 Laguna anaeróbica.

Según el método de Sáenz [14], se determinan los valores de carga superficial, zona de acumulación de lodos y la constante de crecimiento bacteriano mediante la tabla 2-9, para una temperatura mínima anual de diseño de 20° C. Obteniendo los siguientes resultados:

- Carga Orgánica superficial (i)= 3000 Kg DBO₅/ ha.d
- Profundidad para la zona de lodos (Z_{p2})= 0.80 m.

Para calcular la longitud promedio de uno de los lados de la laguna anaeróbica se aplica la ecuación 2.28:

$$W_p = 100 \left[\frac{84 \frac{g}{hab.d} (30/2)}{\frac{3000 \text{ kg}}{ha.d}} \right]^{1/2} = 64.807 \text{ m}$$

El Área de cada laguna anaeróbica se calcula mediante la ecuación 2.29:

$$A = 64.807 \text{ m} * 64.807 \text{ m} = 4199.95 \text{ m}^2$$

Calculo del volumen de cada laguna:

$$V = 4199.95 \text{ m}^2 * 4 \text{ m} = 16.799.80 \text{ m}^3$$

3.6.3.2 Laguna facultativa.

Según el método desarrollado por Sáenz [14], se obtiene un valor de la constante de remoción bacteriana diaria de las lagunas alargadas según la tabla 2-10 de 0.75 d^{-1} .

Para conocer el volumen de la laguna facultativa alargada, es necesario despejar el valor del volumen de la ecuación 2.31:

$$\frac{V}{9000 \frac{\text{m}^3}{d}} = \frac{-(9/4) * \text{Log}_e(10^3 / 10^8)}{0.75 \text{ d}^{-1}}$$

$$V = 25,90408d * 9000 \frac{m^3}{d} = 233136.72m^3$$

El área de la laguna alargada calculada con el valor de la profundidad de es de:

$$A = \frac{233136.72m^3}{2m} = 116568.36m^2$$

A continuación se muestra la tabla resumen de resultados obtenidos por el método CEPIS según Sáenz

Tabla 3-1. Resumen de resultados obtenidos por el método del CEPIS

Tipo de laguna	Parámetro	Resultado
Lagunas anaeróbicas en paralelo	Área	4199.95 m ²
	Volumen	16.799.80 m ³
Laguna facultativa alargada	Área	116568.36 m ²
	Volumen	233136.72 m ³

3.6.4 Método de Mara:

3.6.4.1 Laguna anaeróbica.

El diseño de carga está dado por medio de las ecuaciones presentadas para diversos rangos de temperatura mínima anual de las aguas residuales presentadas en la tabla 2-7, que para una temperatura mínima anual del agua residual de 20°C, la carga volumétrica para una laguna anaeróbica viene dada por:

$$\lambda_v = (10 * T) + 100$$

$$\lambda v = (10 * 20) + 100 = 300 \text{ g/m}^3\text{d}$$

El volumen de la laguna viene dado por la ecuación 2.13:

$$V_a = \frac{280 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \times 9000 \text{ m}^3/\text{d}}{300 \text{ g/m}^3\text{d}} = 8400 \text{ m}^3$$

El tiempo de retención viene dado por la ecuación 2.14:

$$\theta_a = \frac{8400 \text{ m}^3}{9000 \text{ m}^3/\text{d}} = 0.93 \text{ d}$$

Aplicando la ecuación para el porcentaje de remoción de la DBO dado por la tabla 2-8, que para una temperatura mínima anual de 20 °C es:

$$R = (2 * 20) + 20 = 60 \%$$

Para una profundidad de 4 metros, el área superficial promedio viene dado por:

$$As \text{ prom} = V_a / Y_{pA}$$
$$As \text{ prom} = 8400 \text{ m}^3 / 4 \text{ m} = 2100 \text{ m}^2$$

Si es cuadrada el lado de la laguna se calcula de la siguiente manera:

$$W = \sqrt{As \text{ prom}} = \sqrt{2100 \text{ m}^2} = 45.83 \text{ m}$$

3.6.4.2 Laguna facultativa.

El diseño de carga esta dado por la ecuación 2.15:

$$\lambda_s = 350 (1.107 - (0.002 * 20))^{20-25} = 253.07 \text{ Kg/ha.d}$$

Como en la laguna anaeróbica se remueve un 60% de la DBO, entonces La demanda bioquímica del efluente de la laguna anaeróbica es:

$$Li = \frac{(100 - 60)}{100} * 280 \frac{\text{mg}}{\text{l}} = 112 \text{ mg/l}$$

El área superficial de la laguna viene dado por la ecuación 2.16:

$$A_f = \frac{10 * 112 \frac{\text{mg}}{\text{l}} * 9000 \text{ m}^3/\text{d}}{253.07 \text{ Kg/ha.d}} = 39830.39 \text{ m}^2$$

El tiempo de retención viene dado por la ecuación 2.17:

$$\theta_f = \frac{2 * 39830.39 \text{ m}^2 * 2 \text{ m}}{\left(2 * 9000 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} - 0.001 \frac{\text{mm}}{\text{m}} * 39830.39 \text{ m}^2 * 6 \frac{\text{mm}}{\text{d}}\right)} = 8.97 \text{ d}$$

El caudal del efluente se obtiene mediante la ecuación 2.18:

$$Q_e = 9000 \frac{m^3}{d} - \left(0.001 \frac{mm}{m} \times 39830.39 m^2 \times 6 \frac{mm}{d} \right) = 8761.02 m^3/d$$

3.6.4.3 Laguna de maduración

Para 20° C el valor de K_t está dado por la ecuación 2.19:

$$K_t = 2.6(1.19)^{20-20} = 2.60 d^{-1}$$

La ecuación 2.20 puede estar reacomodada de la siguiente manera:

$$\theta_m = \{ [10^8 / 10^3 (1 + 2.60 \times 0.93 d)(1 + 2.60 \times 8.97 d)]^{1/n} - 1 \} / 2.60$$

Calculando para $n=1$

$$\theta_m = \{ [10^8 / 10^3 (1 + 2.60 \times 0.93 d)(1 + 2.60 \times 8.97 d)]^{1/1} - 1 \} / 2.60 = 461.47 d$$

Dando valores a n se obtienen los siguientes resultados:

n	
1	461.47 d
2	26.64 d
3	4.09 d
4	2,26 d



Las primeras dos combinaciones de θ_m para $n=1$ y $n=2$ son rechazadas porque no se cumple la condición: $\theta_m > \theta_f$, es decir el tiempo de retención de la laguna facultativa (8.97 d) es menor que el valor obtenido.

Otra condición que es necesario verificar es: $\theta_m > \theta_m^{\min}$ (3 d). Analizando los resultados obtenidos la iteración para $n=4$, el valor es menor al mínimo (3 d) por lo cual se toma este como el valor para $n=4$.

Se puede observar que los valores posibles son los de $n=3$ y $n=4$, ya que cumplen con ambas condiciones de diseño, por lo que para escoger el valor más apropiado se debe escoger el menor valor del producto de n por el tiempo de retención obtenido.

Se obtiene para $n=3$ un producto de 12.26, mientras que para $n=4$ un valor de 12.00, por lo que $n=4$ es escogido, el cual nos indica a su vez que es necesario colocar 4 lagunas de maduración para lograr la calidad del efluente esperado.

Se chequea la carga de la primera laguna de maduración, mediante la ecuación 2.21:

$$\lambda_{5\min} = \frac{10 \times \left(0.3 \times 280 \frac{\text{mg}}{\text{l}}\right) \times 2\text{m}}{3 \text{ d}} = 420 \text{ kg/ha d}$$

Este valor es más alto que el 75% de la carga de la laguna facultativa por lo cual se calcula este valor multiplicando 0.75 por la carga orgánica obtenida de la laguna facultativa en la ecuación 2.15:

$$(\text{= } 0.75 \times 253.07 = 189.80 \text{ kg/ha d})$$

Así $\lambda_{5(\theta_{m1})}$ es tomado como 189.80 kg/ ha. d y θ_{m1} calculado mediante la ecuación 2.22:

$$\theta_{m1} = \frac{10 \times \left(0.3 \times 280 \frac{\text{mg}}{\text{l}}\right) \times 2\text{m}}{189.80 \text{ kg/ha d}} = 6.64 \text{ d}$$

El tiempo de retención en la segunda laguna de maduración es calculado de la ecuación 2.23:

$$\theta_m = \left\{ \left[\frac{10^8}{10^3} (1 + 2.60 \times 0.93\text{d}) (1 + 2.60 \times 8.97) (1 + 2.60 \times 6.64 \text{d}) \right]^{1/n} - 1 \right\} / 2.60$$

Calculando para n=1

$$\begin{aligned} \theta_m &= \left\{ \left[\frac{10^8}{10^3} (1 + 2.60 \times 0.93\text{d}) (1 + 2.60 \times 8.97 \text{d}) (1 + 2.60 \times 6.64 \text{d}) \right]^{1/1} - 1 \right\} / 2.60 = \\ &= 65.32 \text{ d} \end{aligned}$$

Dando valores a n se obtienen los siguientes resultados:

n	
1	65.32 d
2	7.72 d
3	3.65 d
4	2.46 d

La primera combinación de θ_m para n=1 es rechazada porque no cumple la condición: $\theta_m > \theta_f$, es decir el tiempo de retención de la laguna facultativa es menor que el valor obtenido.

Otra condición que es necesario verificar es: $\theta_m > \theta_m^{\min}$ (3 d). Analizando los resultados obtenidos la iteración para n=2, n=3 y n=4 los valores obtenidos son menores al mínimo por lo cual se toma 3 días como el valor de θ_m .

Se debe escoger el menor valor del producto de n por el tiempo de retención calculado, se obtiene para n=2 un producto de 15.94, para n=3 un valor de 10.95, mientras que para n=4 es 12, por lo que n=3 es escogido, este valor es el tiempo de retención de las siguientes lagunas aeróbicas.

Para la profundidad de dato de 2 m, el área de la primera laguna de maduración esta dada por la ecuación 2.24:


$$A_{m1} = \frac{2 \times 8761.02 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \times 6.64 \text{ d}}{\left[(2 \times 2 \text{ m}) + \left(0.001 \frac{\text{mm}}{\text{d}} \times 6 \frac{\text{mm}}{\text{d}} \times 6.64 \text{ d} \right) \right]} = 38264 \text{ m}^2$$

El caudal del efluente viene dado por la ecuación 2.25:

$$Q_e = 8761.02 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} - \left(0.001 \frac{\text{mm}}{\text{m}} \times 38264 \text{ m}^2 \times 6 \frac{\text{mm}}{\text{d}} \right) = 8531.43 \text{ m}^3/\text{d}$$

Similarmente el área de la segunda laguna de maduración y su efluente viene dado por las ecuaciones 2.26 y 2.27:

$$A_{m2} = \frac{2 \times 8531.43 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \times 3.65 \text{ d}}{\left[(2 \times 2 \text{ m}) + \left(0.001 \frac{\text{mm}}{\text{m}} \times 6 \frac{\text{mm}}{\text{d}} \times 3.65 \text{ d} \right) \right]} = 20613.05 \text{ m}^2$$


$$Q_e = 8531.43 \text{ m}^3/\text{d} - \left(0.001 \frac{\text{mm}}{\text{m}} \times 20613.05 \text{ m}^2 \times 6 \frac{\text{mm}}{\text{d}}\right) = 8407.76 \text{ m}^3/\text{d}$$

Para la tercera laguna de maduración se aplica igualmente las ecuaciones 2.26 y 2.27, pero con los resultados de la segunda laguna de maduración:

$$A_{m3} = \frac{2 \times 8407.76 \text{ m}^3/\text{d} \times 3.65}{\left[(2 \times 2 \text{ m}) + \left(0.001 \frac{\text{mm}}{\text{m}} \times 6 \frac{\text{mm}}{\text{d}} \times 3.65 \text{ d}\right)\right]} = 20314.23 \text{ m}^2$$

$$Q_e = 8407.76 \text{ m}^3/\text{d} - \left(0.001 \frac{\text{mm}}{\text{m}} \times 20314.23 \text{ m}^2 \times 6 \frac{\text{mm}}{\text{d}}\right) = 8285.87 \text{ m}^3/\text{d}$$

Se repite el procedimiento para la cuarta laguna de maduración con los resultados de la tercera laguna y las ecuaciones 2.26 y 2.27:

$$A_{m4} = \frac{2 \times 8285.87 \text{ m}^3/\text{d} \times 3.65 \text{ d}}{\left[(2 \times 2 \text{ m}) + \left(0.001 \frac{\text{mm}}{\text{m}} \times 6 \frac{\text{mm}}{\text{d}} \times 3.65 \text{ d}\right)\right]} = 20019.74 \text{ m}^2$$

$$Q_e = 8285.87 \text{ m}^3/\text{d} - \left(0.001 \frac{\text{mm}}{\text{m}} \times 20019.74 \text{ m}^2 \times 6 \frac{\text{mm}}{\text{d}}\right) = 8165.75 \text{ m}^3/\text{d}$$

Teóricamente existe un traslado acumulativo de remoción de la DBO de un 90 % en la laguna anaeróbica y facultativa y un 25% en las cuatro lagunas de maduración, el efluente final tendrá una remoción de la DBO de:

$$280 \times 0.1 \times 0.75 \times 0.75 \times 0.75 \times 0.75 = 8,86 \text{ mg/l}$$



A continuación en la tabla 3-2 se muestran los resultados obtenidos para el método de Mara:

Tabla 3-2. Resumen de resultados obtenidos por el método de Mara

Tipo de laguna	Parámetro	Resultado
Laguna anaeróbica	Volumen:	8400 m ³
	Tiempo de retención:	0.93 d
Laguna facultativa	Área:	39830.39 m ³
	Tiempo de retención:	8.97 d
1° laguna de maduración	Área:	38264 m ³
	Tiempo de retención:	6.64 d
2° laguna de maduración	Área:	20613.05 m ³
	Tiempo de retención:	3.65 d
3° laguna de maduración	Área:	20314.23 m ³
	Tiempo de retención:	3.65 d
4° laguna de maduración	Área:	20019.74 m ³
	Tiempo de retención:	3.65 d

CAPÍTULO IV
ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS

4 Análisis de datos y resultados

Los métodos que se mencionan a continuación fueron debidamente explicados en el capítulo II, seguidamente, se presenta un análisis sobre las características de creación, diseño y condiciones, así como también su nivel de aplicabilidad en países o regiones de clima cálido.

4.1 Modelo de Hermann y Gloyna.

Está basado en la ecuación de Arrhenius y desarrollado en 1958, para el dimensionamiento de lagunas facultativas con una remoción de entre un 80 y 90% de la Demanda Bioquímica de Oxígeno. Permite el cálculo de los parámetros de dimensionamiento: volumen, carga superficial orgánica, profundidad y área superficial, a pesar de todas estas características y de que dicho método trabaja para temperaturas hasta 35 °C y a pesar de que es mencionado ampliamente en libros, no se consideró apropiado para el análisis debido a su antigüedad.

4.2 Modelo de Marais y Shaw.

Está basado en el método de Suwannokarn y desarrollado en 1961, para el dimensionamiento de lagunas facultativas. Permite el cálculo de los parámetros de dimensionamiento: balance de masas, concentraciones de materia orgánica, velocidad de reacción, periodo de retención y eficiencia. La debilidad del método consiste en que el mismo no incluye todos los factores que intervienen durante la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno, también es necesario para el cálculo la determinación de la temperatura media del agua a la que se produce la estabilización. Dada la complejidad y

la serie de datos y análisis que conlleva la búsqueda de este valor, no se consideró práctico para evaluarlo. Adicionalmente, los métodos de cálculo desarrollados en este método son similares a la metodología de Hermann y Gloyna.

4.3 Modelo de Thirumurthy.

Este modelo fue desarrollado en 1974 bajo la condición de que no existe mezcla completa en la laguna, aproximándose en su cálculo a un reactor de flujo. Esta metodología permite el conocimiento de los siguientes parámetros de dimensionamiento: coeficiente de dispersión difusividad, coeficiente de dispersión axial, velocidad fluida en la laguna y la longitud de trayectoria. Este método es considerado operativo, solo permite evaluar la operación en lagunas facultativas en funcionamiento, por lo cual no es aplicable para el diseño o dimensionamiento.[11]

4.4 Modelo de Oswald y Gotaas.

Este modelo desarrollado en 1957, puede ser utilizado para el dimensionamiento de lagunas aeróbicas o de alta producción de biomasa, está basado en la relación simbiótica que se establece entre algas y bacterias saprofitas, para ello se requiere información sobre la radiación solar visible, insolación, horas de sol, etc., lo cual en regiones con escasez de estaciones meteorológicas y mediciones de radiación solar dificulta la obtención de los datos anteriormente mencionados, por lo que dada la complejidad del caso no se aplicará este modelo para su discusión.

4.5 Modelo de Mara.

Está basado en el método de Mc. Garry y Pescod para lagunas facultativas, este mismo autor permite el diseño de lagunas anaeróbicas y de maduración utilizando simples datos para realizar el diseño de las mismas, obteniendo de estos cálculos parámetros importantes para el dimensionamiento como son: la temperatura, demanda bioquímica de oxígeno y la concentración de coliformes fecales. La gran ventaja de este autor es que ha realizado una serie de investigación es alrededor del mundo lo que permite corregir y correlacionar factores climatológicos para diversos países, lo cual convirtió este modelo en candidato para el análisis de las metodologías de dimensionamiento de lagunas.

4.6 Modelo del CEPIS.

El Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria (CEPIS), es una institución que avala trabajos de investigación de diversos autores. En el caso de lagunas de estabilización, existen dos destacados autores quienes basados en experiencias en países centroamericanos y del trópico, desarrollaron una serie de correlaciones con métodos existentes destacados, a modo de perfeccionar el método. Sáenz ha propuesto un sistema continuo como el que se evalúa en este proyecto, por tal motivo se tomó esta metodología para establecer un sistema único, denominado modelo según CEPIS.

4.7 Análisis de los resultados de las metodologías adoptadas para la evaluación de un sistema de lagunas

A continuación se detallará el análisis de los resultados de acuerdo al tipo de laguna según se resume en tabla 4-1:

4.7.1 Laguna Anaeróbica.

Se puede observar que para el método del CEPIS, no se ofrece un parámetro esencial como lo es el tiempo de retención para este tipo de lagunas, el valor de volumen no se especifica como tal, pero se puede calcular con el valor de largo promedio y la profundidad de la laguna. Este valor obtenido es de 16799,80 m³ para cada laguna anaeróbica colocadas en paralelo, siendo un total de 33599.60 m³ para las dos lagunas. El volumen de la laguna por el método de Mara es de 8400 m³, lo que nos indica que el volumen para laguna según CEPIS es aproximadamente 4 veces mayor al requerido por Mara.

4.7.2 Lagunas facultativa y de maduración

Al igual que en la laguna anaeróbica el método del CEPIS no arroja valores de tiempo de retención, sin embargo para el diseño de este tipo de laguna alargada se obtiene un volumen de 233136.72 m³. Este valor se debe comparar con el volumen total requerido por las lagunas facultativas y de maduración calculados según el método de Mara ya que las del CEPIS cumple las dos funciones: remoción de la DBO y de los coliformes. El volumen total requerido según Mara para es de 278082.82 m³, siendo ambos volúmenes algo similares.

El método de Mara permite mediante la iteración de los valores de tiempo de retención hidráulico hallar un valor más exacto y eficiente para este tipo de sistema, convirtiendo este en la metodología escogida para este tipo de lagunas.

Tabla 4-1. Cuadro comparativo de los resultados obtenidos por el método del CEPIS y Mara respectivamente. Fuente: propia

Modelo CEPIS			Modelo Mara		
Tipo de laguna	Parámetro	Resultado	Tipo de laguna	Parámetro	Resultado
Anaeróbicas en paralelo	Área	4199.95 m ²	Anaeróbica	área	2100 m ²
	Volumen	16799.80 m ³		Volumen	8400 m ³
	Tiempo retención	_____		Tiempo retención	0.93 d
Facultativa alargada	Área	116568.36 m ²	Facultativa	Área	39830.39 m ²
	Volumen	233136.72 m ³		Volumen	79660.78 m ³
	Tiempo retención	_____		Tiempo retención	8.97 d
NOTA: Esta laguna también cumple con el proceso de remoción de coliformes, por lo tanto su volumen se compara con las lagunas facultativas y de maduración del método de Mara.			Maduración 1	HRT	6.64 d
				Área	38264 m ²
				Volumen	76528 m ³
			Maduración 2	HRT	3.65 d
				Área	20613.05 m ²
				Volumen	41226.1 m ³
			Maduración 3	HRT	3.65 d
				Área	20314.23 m ²
				Volumen	40628.46 m ³
			Maduración 4	HRT	3.65 d
				Área	20019.74m ²
				Volumen	40039.48 m ³
			Volumen lagunas facultativa y maduración:		278082.82 m ³



4.8 Diagramas de flujo

Seleccionada la metodología de Duncan Mara para realizar cálculos para el dimensionamiento de lagunas de estabilización y para facilitar el análisis y operaciones matemáticas del mismo, se presentan en los anexos A1, A2 Y A3, los diagramas de flujo para el cálculo de lagunas anaeróbicas, facultativas y aeróbicas por el método descrito anteriormente. Dichos diagramas a pesar de presentarse en forma separada, permiten un manejo en serie de este tipo de lagunas.

4.9 Hoja de cálculo en Excel.

Para facilitar el cálculo del sistema de lagunas, se elaboró una hoja de cálculo en Excel, la cual fué desarrollada siguiendo el método seleccionado, y para diferentes rangos de temperaturas que deben ser preestablecidos con anterioridad para la utilización de esa hoja de cálculo. Dichos rangos están comprendidos entre 10 a 20 °C, 20 a 25 °C y temperaturas mayores a los 25°C. A continuación se ilustra el procedimiento para la utilización de la misma y la forma de presentación de los resultados obtenidos:

Primero, se escoge en las pestañas ubicadas en la parte inferior de la hoja del cálculo, conocidas como libros, aquella cuya temperatura este en el rango comprendido para el cual se desea diseñar.

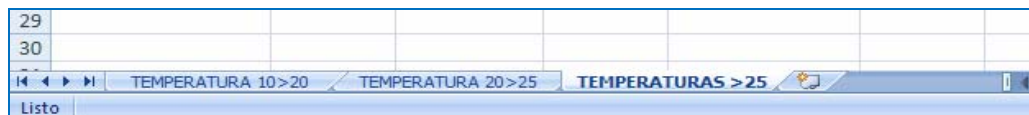


Fig. 4.1. Rangos de temperatura para las hojas de cálculo



Al abrir el programa se visualiza en la celda A1, la instrucción de insertar los siguientes datos en las unidades especificadas en la columna color verde, esto permite insertar en la celdas desde la B3 a la celda B11 los datos para el cálculo del sistema de laguna, que se deberán introducir en las unidades especificadas en la columna C, en el siguiente orden: Caudal, DBO del afluente, Coliformes del sistema, Coliformes del efluente, Rata de evaporación, Temperatura, Profundidad de la laguna anaeróbica, Profundidad de la laguna facultativa y por ultimo la Profundidad de la laguna de maduración. Como se puede observar en la figura 4.2.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Inserte los siguientes datos en las unidades especificadas en la columna color verde:						
2							
3	CAUDAL	9000	m3/dia				
4	DBO	280	mg/l				
5	COLIFORMES SISTEMA	100000000	CF por cada 100 ml	→		colocar valor sin exponencial	
6	COLIFORMES EFLUENT	1000	CF por cada 100 ml	→		colocar valor sin exponencial	
7	RATA EVAPORACION	6	mm/d				
8	TEMPERATURA	20	°C				
9	PROFUNDIDAD	4	m	→		valor para laguna anaeróbica	
10	PROFUNDIDAD	2	m	→		valor para laguna facultativa	
11	PROFUNDIDAD	1,5	m	→		valor para laguna maduración	
12							
13							

Fig. 4.2. Datos necesarios para la hoja de cálculo.

El programa automáticamente arrojará los resultados para el sistema de lagunas, presentando diferentes parámetros de acuerdo al tipo de laguna, los cuales se especifican a continuación:



Para lagunas anaeróbicas, que de acuerdo al sistema presentado para el análisis es la primera de la serie de lagunas, los datos introducidos arrojarán inmediatamente los siguientes parámetros de diseño: diseño de carga superficial, volumen, tiempo de retención, porcentaje de remoción de DBO, respectivamente en las celdas C16 a la C19, en las unidades especificadas en las celdas B16 a la B19. Como se puede observar en la figura 4.3.

	A	B	C
13			
14	Laguna anaerobica		
15		Unidades	
16	Diseño de carga	g/m ³ d	300,00
17	Volumen	m ³	8400
18	Tiempo de retención	d	0,93
19	Remoción de DBO	%	60
20			

Fig. 4.3. Parámetros calculados para laguna anaeróbica con la hoja de cálculo

Para la laguna facultativa se obtendrá automáticamente los parámetros: Diseño de carga superficial, área, tiempo de retención y caudal del efluente en las celdas G16 a la G19, con las unidades especificadas en la columna F para dichas celdas. Tal como se puede observar en la figura 4.4

	E	F	G
13			
14	Laguna facultativa		
15		Unidades	
16	Diseño de carga	kg/ha d	253,07
17	Área	m ²	39830,39
18	Tiempo de retención	d	8,97
19	Caudal del efluente	m ³ /d	8761,02
20			

Fig. 4.4. Parámetros calculados para laguna facultativa con la hoja de cálculo

Para la primera laguna de maduración se tendrán los siguientes parámetros: constante KT , carga orgánica, tiempo de retención, área y caudal, en las celdas C24 a la C28 con las unidades especificadas en la columna B respectivamente. Como se puede observar en la figura 4.5

	A	B	C
22	Laguna maduración (1)		
23		Unidades	
24	KT	d(-1)	2,60
25	Carga orgánica	kg/ha d	420,00
26	Tiempo de retención	d	6,64
27	Área	m ²	38264,00
28	Caudal	m ³ /d	8531,43
29			

Fig. 4.5 Parámetros calculados para laguna de aeróbica o de maduración con la hoja de cálculo

A diferencia de los otros tipos de lagunas, para la laguna de maduración los cálculos se realizan por medio de una iteración del valor de n , que refiere al número de lagunas de maduración que necesita el sistema



para la obtención de un caudal del efluente con los valores que se indicaron como datos del problema, para dicha iteración se presenta al lado de los resultados para esta laguna una tabla que fue realizada con funciones lógicas para dar el valor a seleccionar tomando en cuenta los siguientes parámetros:

En la fila 22, se presentan los valores de n , con los cual se realiza la iteración, dichos valores van del 1 al 4 tal como lo recomienda el autor. Posteriormente en la fila 23 se presentan los resultados de los valores de tiempo de retención obtenidos para esos valores de n .

Luego se puede observar en las dos siguientes filas posteriores la verificación de dos condiciones, en la fila 25 se verifica que los valores de tiempo de retención de la columna no sean mayores que el tiempo de retención para la laguna facultativa calculada anteriormente, arrojando el resultado de FALSO, para los valores que deben ser rechazados y VERDADERO para los valores a considerar.

Luego de ello utilizando igualmente funciones lógicas se verifica que el tiempo de retención obtenido no sea menor al mínimo que es 3 días, para valores que cumplen con la condición, el programa arrojará el mismo número en la fila 29 y colocara el valor 3 a aquellos que sean menores al mismo.

Finalmente para la iteración se muestra en la fila 28 los valores que realmente se deben considerar para el calculo, especificados con VERDADERO, y FALSO para aquellos que no pueden ser tomados en cuenta, de una u otra forma el programa arrojará en la Celda f-29 el menor valor entre los posibles que será con el que se realiza los cálculos de la laguna de maduración. Toda esta tabla puede observarse en la figura 2.6



	F	G	H	I	J
22	valores de n	1	2	3	4
23	θ_m	461,47	13,32	4,09	2,26
24					
25	$\theta_m > \theta_f$	FALSO	FALSO	VERDADERO	VERDADERO
26	$\theta_m < (\theta_{min}=3d)$	461,47	13,32	4,09	3,00
27					
28		FALSO	FALSO	VERDADERO	VERDADERO
29	12,00	461,47	26,64	12,26	12
30					3,00

Fig. 4.6. Tabla de iteración para valores de n y tiempo de retención hidráulica para lagunas anaeróbica o de maduración con la hoja de cálculo.

De igual forma en la fila 30 se observara en la fila 30 el valor del tiempo de retención para la primera laguna de maduración.

Es importante destacar un valor que se apreciara en la Celda D25, ya que este verifica que la carga orgánica no sea mayor que la de la laguna facultativa dando el mismo valor obtenido en la celda C25 si cumple con esta condición, en caso contrario, el programa calculara automáticamente este valor y será con el que se realizara el resto de los valores para la laguna.

	A	B	C	D
22	Laguna maduración (1)			
23		Unidades		
24	KT	d(-1)	2,60	
25	Carga orgánica	kg/ha d	420,00	189,80
26	Tiempo de retención	d	6,64	
27	Área	m ²	38264,00	
28	Caudal	m ³ /d	8531,43	
29				
30	Tiempo de retención primera laguna maduración			3,00

Fig. 4.7. Corrección del diseño de cargas para laguna con la hoja de datos



El procedimiento de iteración para esta laguna se repite para la obtención del tiempo de retención de otras lagunas de maduración, de acuerdo con el valor de n obtenido en la primera iteración. El programa arrojará resultados hasta para 4 lagunas de maduración consecutivas. Como se puede observar en la figura 4.8.

Para las siguientes lagunas de maduración solo se obtendrán valores de parámetro de tiempo de retención, área y caudal.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
33	Laguna maduración (2)					valores de n	1	2	3	4
34		Unidadar				Øm	65,32	7,72	3,65	2,46
35	Tiempo de retención	d	3,65							
36	Área	m ²	20613,05				FALSO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO
37	Caudal	m ³ /d	8407,76				65,32	7,72	3,65	3
38										
39							FALSO	VERDADERO	VERDADERO	VERDADERO
40						10,95	65,32	15,44	10,95	12
41	Laguna maduración (3)								3,65	
42		Unidadar								
43	Tiempo de retención	d	3,65							
44	Área	m ²	20314,23							
45	Caudal	m ³ /d	8285,87							
46										
47										
48										
49	Laguna maduración (4)									
50		Unidadar								
51	Tiempo de retención	d	3,65							
52	Área	m ²	20019,74							
53	Caudal	m ³ /d	8165,75							
54										
55										

Fig. 4.8. Parámetros para las siguientes lagunas de maduración con la hoja de datos.

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Los métodos escogidos para el dimensionamiento de lagunas de estabilización fueron el modelo de Mara y el modelo del CEPIS por Sáenz, ya que, de todos los métodos estudiados estos fueron los que presentaron sistemas de lagunas continuas, permitiendo un mejor análisis del dimensionamiento y fácil comprensión de los resultados.

Cabe destacar que las temperaturas establecidas por otros métodos de cálculo tienen rangos muy grandes que pueden llevar a errores de funcionamiento, para lo cual Mara y Sáenz han establecido rangos variables de acuerdo a las zonas en estudio que proporcionan una mayor exactitud a la hora de emplear dichas metodologías.

La metodología de Mara es una de las más recientes y se adapta bien al momento de realizar cálculos de dimensionamiento debido a que ofrece un mayor número de parámetros que se pueden ser tomados en cuenta a la hora de realizar el diseño.

La relación entre el proceso de lagunas y la temperatura es un factor altamente estudiado por Mara, ya que en sus investigaciones ha realizado estudios alrededor del mundo y a determinado los coeficientes de relación tanto para climas cálidos como templados.

La metodología de Mara, resulta práctica a la hora de dimensionar lagunas ya que proporciona de manera fácil y simplificada los parámetros para el dimensionamiento de los tres tipos de lagunas: anaeróbicas, facultativas y aerobias.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un análisis previo de las características del agua residual, ya que estos valores determinan el dimensionamiento de las lagunas de estabilización.

Establecer las profundidades para cada tipo de laguna, de acuerdo al rango recomendado para el diseño, permite asegurar que los cálculos estén adecuados a la condición para la cual se está diseñando, evitando por ejemplo que por un mal dimensionamiento las lagunas facultativas se conviertan en aeróbicas o anaeróbicas.

A la hora de dimensionar se debe escoger preferiblemente el método que proporcione sistemas de lagunas donde el efluente de una laguna sea tratado en laguna subsiguientes para obtener una mayor eficiencia del proceso.

El tiempo de retención hidráulico es un parámetro fundamental que permite garantizar que el agua residual salga con la calidad esperada, por ello se recomienda aplicar métodos que permitan el cálculo de estos valores para cada tipo de laguna.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] Yáñez, C., “Reducción de organismos patógenos y diseño de lagunas de estabilización en países en desarrollo”, Trabajo presentado en el XIX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS). Santiago, Chile, (1984).

[2] Rojas, R. y León, G., “Lagunas Facultativas en serie y en paralelo. Criterios de dimensionamiento”, Trabajo de investigación, CEPIS/OPS, Lima, Perú. (1990).

[3] Rondón, M., “Diseño del sistema de recolección y tratamiento de aguas servidas para las poblaciones de Morichalito y San José de Morichalito ubicado en el municipio Cedeño, Estado Bolívar”. Tesis de Grado, Departamento de Ingeniería Civil, UDO, Barcelona (2007).

[4] Crites, R. & Tchobanoglous, G. “Sistema de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados”. Ediciones McGraw-Hill interamericana S.A, (2000).

[5] Babbitt, B., “Alcantarillado y tratamiento de aguas negras”, Compañía editorial Continental, 7ma edición, (1980).

[6] Metcalf & Eddy, “Ingeniería de aguas residuales” Volumen 1, Tratamiento, vertido y reutilización, Ediciones McGraw-Hill, España, 3ra edición, (1995).

[7] Rolim, S. “Seminario internacional tratamiento de aguas residuales a través de humedales naturales y artificiales y lagunas de estabilización”.

Organización Panamericana de la Salud. Santa Fe de Bogotá, Colombia. (1999).

[8] Romero, R. "Tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización". Editorial Alfaomega. 3ª. Edición. (1999).

[9] Cubillos, A. "Criterios para dimensionar lagunas de estabilización". Serie ambiente y recursos renovables AR-9. Mérida, Venezuela. (1982).

[10] Sáenz, R. "Lagunas de estabilización y otros sistemas simplificados para el tratamiento de aguas residuales". Manual DTIAPA N°C-14 CEPIS. Perú, Lima, (1985).

[11] Cubillos, A. "Lagunas de estabilización". Serie ambientes y recursos naturales renovables AR-15. Mérida, Venezuela. (1985).

[12] Mara, D., Alabaster, G. y Pearson, H. "Waste stabilization ponds: a design manual for eastern Africa". Lagoon Technology international, Leeds, Inglaterra, (1992).

[13] Gloyna, E., "Estanques de estabilización de aguas residuales". Organización mundial de la salud, Serie de monografías, N° 60. (1973).

[14] Sáenz, R., "Lagunas de estabilización en el trópico: promoción del reuso sanitario de las aguas". (1994). Disponible en:

<http://hist.library.paho.org/Spanish/BOL/v116n3p189.pdf>

[15] Organización Mundial de la salud. “Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura. Ginebra, Serie de informes técnicos 778. (1989).

[16] Oakley, S., “Lagunas de estabilización en Honduras: Manual de diseño, construcción, operación y mantenimiento, monitoreo y sostenibilidad”. Universidad estatal de California. California. (2005).

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y
ASCENSO:**

TÍTULO	METODOLOGÍA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN.
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Birbe M., Roxibel D.V.	CVLAC: 15.126.692 E MAIL: roxibirbe@hotmail.com
Boadas P., Jessica D.V	CVLAC: 18.399.766 E MAIL: y2sk22@gmail.com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Dimensionamiento

Sistemas de Lagunas

Métodos de cálculo

Lagunas anaeróbicas

Lagunas facultativas

Lagunas aeróbicas o de maduración

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	
	Ingeniería Civil

RESUMEN (ABSTRACT):

Numerosas experiencias realizadas a través de mas de 40 años han estimulado múltiples intentos para desarrollar problemas matemáticos que permitan diseñar o dimensionar lagunas de estabilización, por tal motivo se realizó esta investigación, que se basó en el análisis y estudio de las diversas metodologías de dimensionamiento de lagunas de estabilización, para el cual se investigó bibliografía y experiencias sobre el tema a nivel mundial para lograr la selección de dos métodos, el método desarrollado por Duncan Mara y el método desarrollado por el Centro Panamericano de ingeniería Sanitaria (CEPIS), con los cuales se realizó los cálculos

correspondientes para un sistema de lagunas aeróbica, facultativa y de maduración consecutivas. El análisis indicó que los resultados obtenidos con la metodología de Duncan Mara la determina como la más completa a la hora de realizar el dimensionamiento de lagunas de estabilización, a su vez se desarrollo una hoja de cálculo en Excel para el método seleccionado y un diagrama de flujo que faciliten el entendimiento del mismo.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
Ghanem R., Ana V.	ROL	CA	AS	TU X	JU
	CVLAC:	5.396.725			
	E_MAIL	ana_ghanem@hotmail.com			
	E_MAIL				
Morales, Hilda.	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	5.189.811			
	E_MAIL	moraleshc@gmail.com			
	E_MAIL				
León, Edito.	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:				
	E_MAIL	ejeleonc@cantv.net			
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU

	CVLAC:	
	E_MAIL	
	E_MAIL	

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2010	05	26
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS. Dimensionamiento lagunas. doc	Application / msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J K L M
 N O P Q R S T U V W X Y Z . a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z . 0 1 2 3 4
 5 6 7 8 9 .

ALCANCE

ESPACIAL: _____(OPCIONAL)

TEMPORAL: _____(OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

CONSUM
OS
ACUMULADOS

Ingeniero Civil

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Ingeniería Civil

INSTITUCIÓN:

Universidad De Oriente/Núcleo Anzoátegui

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

De acuerdo al artículo 41 de Reglamento de Trabajo de Grado

“Los trabajos de grado son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”

Roxibel D. V. Birbe M.

AUTOR

Jessica D. V. Boadas P.

AUTOR

Ana Ghanem
TUTOR

Edito León
JURADO

Hilda Morales
JURADO

POR LA SUBCOMISION DE TESIS