

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL



"ACUICULTURA CON AGUAS RESIDUALES"

T E S I S

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO SANITARIO

GUILLERMO ISRAEL LEON SUEMATSU

Lima - Perú

Año 1992

MI GRATITUD AL:

- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), por permitirme el acceso a la información y brindarme facilidades para la ejecución de la tesis.

- Servicio Nacional de Abastecimiento de Agua y Alcantarillado (SENAPA), por darme la oportunidad de participar en el proyecto de reuso en acuicultura San Juan, fases III y IV.

- Ing. Alberto Flórez M., Director del CEPIS por su constante apoyo y aliento para la culminación de la tesis.

RECONOCIMIENTOS

Por su generoso apoyo y colaboración en este trabajo a:

- Ings. José Beteta L. y Ricardo Rojas V.; asesores de la tesis.
- Ings. Julio Moscoso C. y Hugo Nava C.; consultores del CEPIS y profesores de la Universidad Nacional Agraria, por sus conocimientos y asesoría brindados en acuicultura.
- Ing. Julia Gonzales, del laboratorio del CEPIS por su contribución en la información y discusión de aspectos físico-químicos.
- Blgas. Margarita Aurazo y Elena Gil, del CEPIS y de la Universidad Nacional Agraria respectivamente, por su contribución en la información y discusión de aspectos microbiológicos y de salud pública.
- Blgo. Guido Canales H. e Ing. Edgar Vega; por su colaboración en las actividades de campo en el complejo de lagunas San Juan.
- Lic. Beatriz Castañeda, por su asesoría en estadística y procesamiento de datos.

CONTENIDO

	RESUMEN	XII
	INTRODUCCION	1
I	ANTECEDENTES	5
II	OBJETIVOS	17
III	CRITERIOS DE CALIDAD DE AGUA	18
	3.1 Aspectos de salud pública relacionados con el uso de aguas residuales en acuicultura.	
	3.2 Criterios de calidad de agua de los efluentes utilizados en acuicultura.	
	3.3 Legislación.	
IV	PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON FINES DE USO ACUICOLA	33
VI	MATERIALES Y METODOS	40
	5.1 Descripción del sistema de tratamiento.	
	5.2 Mediciones de campo.	
	5.3 Análisis de la calidad de agua.	
	5.4 Operación del sistema de tratamiento.	

VI	RESULTADOS	52
	6.1 Cargas hidráulicas y orgánicas	
	6.2 Parámetros físico-químicos	
	6.3 Parámetros microbiológicos	
VII	ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS	80
	7.1 Cargas hidráulicas	
	7.2 Carga orgánica y remoción	
	7.3 Amonio total	
	7.4 Parásitos y virus	
	7.5 Bacterias	
	7.6 Modelo de predicción	
VII	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	118
	BIBLIOGRAFIA	122

RELACION DE TABLAS

- III-1 Resumen de los criterios de calidad de agua residual para el reuso en agricultura, recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS).
- III-2 Límites de calidad microbiológica, fijados en el artículo 82 del Reglamento de la Ley General de Aguas.
- III-3 Límites de calidad físico-química, fijados en el artículo 82 del Reglamento de la Ley General de Aguas.
- III-4 Estandares de calidad bacteriológica de pescado fresco.
- IV-1 Eliminación esperada de microorganismos en distintos procesos de tratamiento de aguas residuales.
- V-1 Parámetros físico-químicos medidos y frecuencia de muestreo del proyecto Acuicultura San Juan - Fases III y IV.
- V-2 Parámetros microbiológicos medidos y frecuencia de muestreo del proyecto Acuicultura San Juan - Fases III y IV.
- VI-1 Valores promedio, por experimentos, de la carga hidráulica aplicada al sistema de lagunas de estabilización.
- VI-2 Valores promedio de los parámetros físico-químicos medidos en el sistema de lagunas de estabilización.
- VI-3 Análisis cualitativo de parásitos en el sistema de lagunas de estabilización.
- VI-4 Serotipificación de cepas de salmonella aisladas del efluente terciario.
- VI-5 Detección de enterovirus en agua y peces.
- VII-1 Valores promedio de cargas orgánicas aplicadas a lagunas primarias, por experimento y durante el estudio.
- VII-2 Variación histórica de la calidad del agua residual cruda en el complejo de

lagunas de estabilización de San Juan.

VII-3 Valores promedio de los parámetros físico-químicos en el efluente terciario.

VII-4 Promedios geométricos y remoción acumulada de coliformes fecales en el sistema de lagunas de estabilización.

VII-5 Promedios geométricos de coliformes fecales en el efluente terciario y en los estanques de acuicultura.

VII-6 Criterio de calificación de peces aplicada en el estudio.

RELACION DE FIGURAS

- V-1 Distribución de lagunas en el Complejo de lagunas de estabilización San Juan, antes del inicio del proyecto.
- V-2 Ubicación de la Unidad de Acuicultura dentro de la distribución actual del Complejo de lagunas de estabilización de San Juan.
- V-3 Medidor Palmer-Bowlus, curva de calibración.
- VI-1 Variación del caudal de ingreso al sistema de lagunas de estabilización.
- VI-2 Variación de la carga superficial aplicada al sistema de lagunas de estabilización, por experimentos.
- VI-3 Variación de la DBO y DQO en el agua residual cruda, durante el estudio.
- VI-4 Variación del amonio total, nitrógeno orgánico, fósforo total y ortofosfatos en el agua residual cruda, durante el estudio.
- VI-5 Variación de los sólidos suspendidos totales y volátiles en el agua residual cruda, durante el estudio.
- VI-6 Variación de la DBO y DQO en el efluente primario, durante el estudio.
- VI-7 Variación del amonio total y del nitrógeno orgánico en el efluente primario, durante el estudio.
- VI-8 Variación del fósforo total, ortofosfatos y clorofila-a en el efluente primario, durante el estudio.
- VI-9 Variación de los sólidos suspendidos totales y volátiles en el efluente primario, durante el estudio.
- VI-10 Variación de la DBO y DQO en el efluente secundario, durante el estudio.
- VI-11 Variación del amonio total y del nitrógeno orgánico en el efluente secundario, durante el estudio.

- VI-12 Variación del fósforo total, ortofosfatos y clorofila-a en el efluente secundario, durante el estudio.
- VI-13 Variación de los sólidos suspendidos totales y volátiles en el efluente secundario, durante el estudio.
- VI-14 Variación de la DBO y DQO en el efluente terciario, durante el estudio.
- VI-15 Variación del amonio total y del nitrógeno orgánico en el efluente terciario, durante el estudio.
- VI-16 Variación de nitritos, nitratos, fósforo total y ortofosfatos en el efluente terciario, durante el estudio.
- VI-17 Variación de la clorofila-a y de los sólidos suspendidos totales y volátiles en el efluente terciario, durante el estudio.
- VI-18 Variación de la temperatura del agua en el sistema de lagunas de estabilización.
- VI-19 Remoción de coliformes fecales en el sistema de lagunas de estabilización.
- VI-20 Variación de coliformes fecales en el sistema de lagunas de estabilización.
- VI-21 Incidencia de Salmonella en el efluente terciario.
- VI-22 Colifagos en el efluente terciario, por experimentos.
- VII-1 Distribución de probabilidad acumulada de la carga superficial de DBO aplicada a lagunas primarias.
- VII-2 Distribución de probabilidad acumulada de la DBO en el agua residual cruda.
- VII-3 Distribución de probabilidad acumulada de la diferencia entre la carga superficial de DBO aplicada a lagunas primarias y la carga superficial calculada según modelo.
- VII-4 Variación mensual de amonio total y nitritos en el efluente terciario.
- VII-5 Remoción de helmintos en el sistema de lagunas de estabilización.

- VII-6 Remoción de protozoos en el sistema de lagunas de estabilización.
- VII-7 Variación de colifagos, por experimento en el efluente terciario y los estanques de acuicultura.
- VII-8 Distribución de probabilidad acumulada de coliformes fecales en el efluente terciario, durante todo el estudio.
- VII-9 Distribución de probabilidad acumulada de coliformes fecales en el efluente terciario, por experimentos.
- VII-10 Distribución de probabilidad acumulada de coliformes fecales en estanques de acuicultura, por experimentos.
- VII-11 Calidad sanitaria de los peces, por experimento.
- VII-12 Tasas de mortalidad neta, por nivel de tratamiento en el sistema de lagunas de estabilización.
- VII-13 Verificación del modelo de predicción de la calidad bacteriológica en lagunas de estabilización.

RESUMEN

En nuestro país y en general en toda América Latina la mayor cantidad de las aguas residuales, producidas en las ciudades, están siendo dispuestas en mares y ríos y en el riego de cultivos, sin ningún tipo de tratamiento previo, provocando de esta forma problemas de salud y de contaminación ambiental. Para modificar tal situación es necesario incrementar el tratamiento de las aguas residuales y favorecer su reuso con criterio sanitario, con tecnología acorde a nuestra realidad económica y a nuestros problemas de salud pública, como es el uso de lagunas de estabilización.

Sistemas combinados de tratamiento y reuso no solo tienen el objeto de disminuir la contaminación y los problemas de salud derivados de ella, sino también permiten la generación de nuevas fuentes alimenticias en áreas cercanas a las ciudades que producen los desechos, se amplía la frontera agrícola, se generan puestos de trabajo, y se realiza un uso más eficiente del recurso hídrico, especialmente en zonas desérticas como la costa peruana.

La presente tesis describe las experiencias realizadas entre 1988 y 1990, relacionadas a la ingeniería sanitaria y desarrolladas en el proyecto de reuso en acuicultura de aguas residuales tratadas en las lagunas de estabilización de San Juan, localizadas al sur de Lima, Perú. En dicho proyecto se demostró la factibilidad técnica y económica del uso de aguas residuales convenientemente tratadas en el cultivo de peces de la especie *Oreochromis niloticus*, conocida comercialmente como tilapia del Nilo.

Esta tesis, presenta los resultados obtenidos en la operación del sistema de lagunas de estabilización que abastecieron a la unidad de crianza de peces y del monitoreo de la calidad de agua del mismo. Dicho monitoreo ha permitido, en el presente trabajo, definir los niveles de calidad de agua que hacen factible el consumo humano directo de los peces, sin riesgos para la salud y definir los criterios de diseño y operación de lagunas de estabilización integradas a la actividad productiva de crianza de tilapia nilótica.

Como hallazgos principales de este estudio, se puede afirmar que el tratamiento de las aguas residuales en lagunas de estabilización es apropiado para obtener un efluente con niveles máximos de NMP de coliformes fecales de $1 \times 10^5/100$ ml, calidad suficiente para cosechar peces libres de parásitos, bacterias y virus patógenos. El modelo de flujo disperso es adecuado para el dimensionamiento de lagunas y posteriormente como una herramienta de operación de las mismas, para obtener la calidad microbiológica mencionada.

INTRODUCCION

En la mayoría de las ciudades de los países en vías de desarrollo, las aguas residuales se manejan en forma inapropiada con grave perjuicio al medio ambiente y, a través de este, a la salud pública.

Menos del 10% de las aguas residuales domésticas de América Latina están siendo tratadas (OMS.1987), y en muchos de los casos este tratamiento es poco exitoso por el uso de tecnología inapropiada. En el Perú, el 18% del agua residual producida tiene un tratamiento nominal (PRONADRET,1991).

Es práctica común encontrar la disposición de aguas residuales sin tratamiento previo a los cursos superficiales de agua. De este modo se contaminan amplias zonas litorales, donde se concentran poblaciones de peces que son extraídos para el consumo humano, y sus playas, que son utilizadas con fines recreativos.

La contaminación es aun más grave en el caso de descargas de agua residual en ríos que son utilizados como fuentes de abastecimiento de agua, ocasionando en general graves problemas de salud pública y/o encareciendo el tratamiento del agua de consumo humano, y por otro lado deteriorando la calidad bacteriológica y química de las aguas de riego aumentando los riesgos para la salud.

Los criterios y tecnologías de tratamiento de aguas residuales de uso común en los países industrializados, no tienen la misma aplicabilidad en los países en desarrollo debido a que su tecnología ha sido orientada fundamentalmente a la

remoción de materia orgánica y, últimamente a la remoción de nutrientes. La razón de esta orientación obedece obviamente a que en tales países no existen problemas de salud relacionados con enfermedades de origen hídrico. En una realidad como la nuestra, donde prevalecen altos índices de enfermedades diarreicas y parasitismo y existen zonas endémicas de tales enfermedades, el objetivo de nuestras instalaciones de tratamiento debe estar orientado a la remoción de parásitos y patógenos. Por otro lado los limitados recursos hacen que tales objetivos deban lograrse a un costo menor que las instalaciones convencionales, con el uso de tecnología apropiada a nuestros problemas y recursos.

Se suman a estas dificultades el no contar con personal calificado para tareas de operación y mantenimiento, de plantas convencionales, así como el de no disponer en forma oportuna repuestos de equipos; estos son factores determinantes para que gran parte de las plantas construidas bajo estos patrones, se encuentren paralizadas o estén trabajando por debajo de las eficiencias previstas.

Por otro lado, nuestras ciudades crecen con el sacrificio de tierras agrícolas que se urbanizan, encareciendo así los alimentos que deben ser transportados cada vez desde mayores distancias. Esta situación ha conducido a la creación de áreas agrícolas informales, sin estructuras de riego, que ha obligado a los agricultores a utilizar las aguas residuales crudas de las ciudades, en el cultivo de hortalizas y otros productos agrícolas, los cuales se convierten en vehículos de transmisión y propagación de diversos tipos de enfermedades entéricas, llegando a constituir uno de los factores de riesgo más graves para la salud.

Adicionalmente, es necesario tener en cuenta que un adecuado manejo de las aguas residuales, contribuye a beneficiar a la misma población que las generan mediante el desarrollo de actividades productivas, posibilitando ofertar productos esenciales y oportunidad de trabajo a la población desocupada, y constituyéndose en una alternativa económica para los estratos sociales menos favorecidos de nuestra sociedad, generalmente migratorios de las áreas rurales de las ciudades.

En este contexto, la reflexión de los problemas de nuestro país en materia de disposición y uso de aguas residuales, plantea la necesidad del uso de tecnologías apropiadas de tratamiento y el reuso de las aguas residuales.

Las lagunas de estabilización cumplen con los requerimientos de nuestras necesidades de tratamiento, ya que no solo son eficientes para la remoción de patógenos, sino que también permiten la transformación de la materia orgánica, liberando nutrientes y generando una gran biomasa de algas, elementos aprovechados por la agricultura y la acuicultura.

La acuicultura surge como una actividad agropecuaria, con alta rentabilidad, con el uso de aguas residuales convenientemente tratadas. En el complejo de lagunas de estabilización de San Juan se ha desarrollado la tecnología y demostrado la factibilidad de reuso en acuicultura, específicamente en el cultivo de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), cuyo consumo humano directo puede realizarse sin riesgos para la salud.

Esta actividad productiva, asociado a otros usos como son: la horticultura, forestación, silvicultura, cultivos industriales, entre otras posibilidades, dependiendo de las características geográficas de cada zona, permitirán ofrecer a los niveles de decisión del país un atractivo adicional, a la disminución de la contaminación, el de rentabilidad a través de la ampliación de la frontera agrícola, obviamente algunos costos de inversión y/o mantenimiento y operación serían absorbidos por el valor agregado de los efluentes de las lagunas de estabilización, aligerando así las presiones económicas que afrontan las empresas de saneamiento.

I. ANTECEDENTES

El uso de excretas y de aguas residuales en acuicultura es una práctica muy antigua, especialmente en Asia. El enriquecimiento de estanques piscícolas con excreta humana fue ampliamente practicado en los monasterios europeos en la época medieval. Actualmente la mayoría de los sistemas de reuso de excretas se encuentran en Asia, a pesar de que existen en operación sistemas comercialmente viables en Europa, particularmente en Alemania (en la República Federal Alemana).

A continuación, con el fin de evaluar el potencial de uso de excretas y aguas residuales en acuicultura se describen brevemente aquellos sistemas que están actualmente en operación en el mundo, práctica que demuestra la proposición de la posibilidad de reuso en una actividad comercialmente viable en países en desarrollo como el nuestro.

China

En China, las excretas humanas son recolectadas en carros, camiones y botes o balsas, tanto en las zonas urbanas como rurales, y se usan extensamente en agricultura. Cantidades importantes de excretas son empleadas en acuicultura en Changsha, provincia de Hunan, en 1979 existía un total de 270 hectáreas de lagunas de cultivo de peces alimentadas con aguas residuales produciendo aproximadamente el 50% del total de pescado consumido en la ciudad. En la ciudad de Chonjiahu, lagunas experimentales producen de 7 a 10 tn/ha/año de pescado, teniendo las lagunas un período de retención de 10 a 40 días. Más del 70% del pescado producido es carpa plateada y de cabeza grande; el resto de la producción son carpas que se

alimentan de los desechos del fondo de los estanques.

En Tainán, Taiwán, hay varios miles de hectáreas de lagunas, de las cuales un 80% son lagunas de agua salobre. En estas lagunas, las excretas se esparcen en el fondo de las mismas cuando estas permanecen vacías en la época de invierno. En las lagunas de agua dulce, las excretas se añaden unas cuatro a seis veces durante la época de cría. En Taiwan y China se usan alimentos complementarios como subproductos agrícolas y granos. El lodo de los estanques es usado como fertilizante en los campos agrícolas cercanos.

Indonesia

En este país se usan aguas superficiales contaminadas con heces, para alimentar los estanques de piscicultura. En Bojongloa hay más de 200 hectáreas de lagunas en las que vierten aguas superficiales contaminadas. En Cianjur, se cultivan peces en canales alimentados por las aguas cribadas de un arroyo contaminado que fluye rápidamente atravesando el centro de la ciudad.

En las ciudades de Cianjur, Bandung, Bogor y Sukubumi, se crían peces en jaulas sumergidas en arroyos y ríos contaminados, en los centros de las ciudades. Las jaulas son de forma rectangular o cuadrada, con menos de 3 metros de lado construidas con listones de madera o bambú, y cuentan con pequeños espacios entre ellos para permitir el flujo del agua a través de la jaula; estas se colocan sobre el fondo del curso de agua y se proyectan un poco en el aire; pero ocasionalmente están completamente sumergidas durante las épocas de crecidas. Los peces se alimentan

principalmente con invertebrados bénticos ricos en nutrientes, que se desarrollan en forma abundante en aguas contaminadas.

El uso de las excretas en piscicultura es una práctica tradicional de la acuicultura en Indonesia, particularmente en la Java occidental. El sistema de disposición de excretas comúnmente utilizado es la letrina colgante; en el oeste de Java alrededor del 25% de las lagunas de piscicultura tienen estas letrinas, en algunos distritos este porcentaje se incrementa alrededor del 90%. Las lagunas son pequeñas, usualmente de menos de 1000 m³ y las letrinas típicamente son de bambú o madera.

India

India tiene el mayor número y las áreas más extensas de lagunas alimentadas con aguas residuales. La más importante cría de peces con aguas residuales está situada cerca de Calcuta. Aproximadamente 2500 ha de lagunas son usadas para el tratamiento de aguas residuales. La producción anual de pescado se estima en 7000 toneladas por año o alrededor de 20 toneladas por día para los mercados de Calcuta. Los peces criados en las lagunas son la Carpa Indú Grande o la Tilapia.

Las lagunas se desaguan por uno a dos meses, en febrero y marzo, para eliminar la vegetación y el lodo. A veces se cultiva arroz, como cultivo alternativo. El agua llega a las lagunas desde los canales adyacentes a fines de marzo, o principios de abril, alcanzando 15 centímetros de profundidad. A continuación se vierten las aguas residuales hasta alcanzar una profundidad promedio de 90 cm, es decir que la

proporción de aguas residuales: agua fresca es de 5:1. Después de 15 a 20 días el agua se torna verdosa debido al crecimiento del fitoplancton. Luego de colocar los peces, se alimentan lentamente con agua residual alrededor de una vez durante 5 a 10 días; así la proporción de agua fresca y agua residual es de aproximadamente 1:4. Los criadores de peces han adquirido una considerable habilidad y experiencia en la alimentación de las lagunas con aguas residuales crudas, para evitar la desoxigenación del agua. Durante las épocas de los monzones, las lagunas se drenan para prevenir las inundaciones. Los peces alcanzan un tamaño comercial en unos 5 a 6 meses, después de los cuales son extraídos continuamente hasta febrero, cuando se vacían las lagunas.

Alemania

Los estanques de cultivo de peces, con el uso de aguas residuales fue desarrollada en Alemania a fines del siglo XIX para monitorear la calidad del agua drenada de los campos irrigados con aguas residuales. En base a la experiencia desarrollada en el sudeste asiático, el concepto combinado de tratamiento de aguas residuales y crianza de peces fue experimentado a inicio del siglo XX, en los que tuvieron problemas de acumulación de lodos en los estanques, debido a que empleaban agua residual cruda, para posteriormente utilizar un tratamiento previo.

En varias ciudades de Alemania se construyeron lagunas para cría de peces, alimentadas por aguas residuales, pero la mayor y más conocida estación está en Munich. El sistema de alcantarillado de Munich se construyó en 1881, y por el año 1900, el 75% del población tenía conexión al sistema, no había sistema de tratamiento

de aguas residuales hasta 1925 en que se utilizó un tanque Imhoff para la sedimentación de sólidos y digestión de lodos, el efluente era bombeado hacia los estanques piscícolas.

El sistema de tratamiento y lagunas piscícolas aun tratan alrededor del 25% de las aguas residuales previamente sedimentadas. El complejo de lagunas piscícolas consta de lagunas rectangulares cuyos tamaños varían de 0.3 a 10 hectáreas. La profundidad media es de 0.9 m, con una variación de 0.5 m en la entrada hasta 1.5 m a la salida. Hay 30 lagunas de cultivo y una batería de estanques pequeños para reproducción, crianza de alevinos, invernadero y almacenaje de los peces antes de su comercialización.

Los peces son criados por solo siete meses, de abril a octubre, debido a las bajas temperaturas del invierno. Las lagunas se llenan con agua de río en el mes de marzo y, a mediados de abril se siembran los peces; las aguas residuales se agregan en forma progresiva para permitir que los peces se adapten a ellas. Los estanques son drenados desde octubre a diciembre; un período seco de diciembre a marzo es suficiente para permitir la mineralización de lodos, no se ha realizado remoción de lodos en treinta años de operación.

Las carpas comunes son las especies más cultivadas y se alimentan de invertebrados de fondo tales como chironomidas y tubifex; pero también de zooplancton. Las producciones promedio de peces son de alrededor de 500 kg/ha/época de cultivo. Dos semanas antes de la cosecha, solo se adiciona agua fresca para eliminar las bacterias de los peces.

Israel

Se ha estimado que hay aproximadamente de 50 a 100 hectáreas de estanques de peces que reciben aguas residuales, usualmente provenientes de comunidades rurales relativamente pequeñas que producen de 100 a 600 m³ de aguas residuales por día y tienen una DBO₅ de usualmente 250 a 300 mg/l, no hay efluente de estos estanques y el agua residual reemplaza el agua perdida por infiltración y evaporación. El rango de carga orgánica es de aproximadamente de 25 a 45 kg DBO₅/ha/día, asumiendo que el agua residual solo equilibra la caída de 1 a 1.5 centímetros diarios en el nivel de agua de los estanques.

Normalmente se realiza un policultivo de carpa común, carpa china, múgil y tilapia; el rendimiento puede alcanzar producciones tan altas como de 5000 kg/ha/año. Al final de la etapa de crecimiento, los peces son depurados en lagunas de aguas limpias por varias semanas para eliminar malos olores y patógenos. Sin embargo, en la década pasada hubo una prohibición del uso de agua residual cruda para la crianza de peces debido a la preocupación sobre los posibles efectos en la salud y solo podrían ser utilizados efluentes secundarios de las plantas de tratamiento de agua residual.

Malasia y Tailandia

La migración de los chinos a través del sudeste asiático ha conducido a la introducción del uso de excretas en acuicultura en Malasia y Tailandia; pero esto se da a menor escala comparado a los niveles de uso en China. Ocasionalmente se

observan letrinas colgantes sobre los estanques piscícolas y hay una pocas granjas piscícolas que reusan las excretas recolectadas manualmente de las viviendas.

Vietnam

En Vietnam se aplican diversas estrategias para el empleo de excretas en acuicultura, además de las letrinas colgantes. Excretas humanas y de animales, junto con material vegetal, pueden ser compostados en condiciones anaerobias en el interior de un tanque de concreto. Luego, el efluente como el contenido del silo pueden añadirse en la laguna. El compost proveniente de las letrinas con pozo de preparación de abono, así como la orina separada de las heces, pueden agregarse a las lagunas piscícolas.

Bangladesh

Existen algunos usos de excretas para la piscicultura, en ciertas áreas, se utilizan letrinas colgantes ubicadas en la parte posterior de las viviendas, los canales a los que descargan se encuentran prácticamente vacíos durante el estiaje. Con la llegada de las lluvias, los peces ingresan con el agua a los canales y se desarrollan rápidamente por los niveles de nutrientes existentes.

Los peces son cosechados cuando desciende el nivel de las aguas, al final de la estación lluviosa, el uso de excretas en Bangladesh es por tanto incidental antes que intencional.

Perú

La Organización Panamericana de la Salud (OPS), viene estudiando y fomentando el uso de lagunas de estabilización como una de las alternativas viables de tratamiento de aguas residuales en los países de América Latina, y el reuso de aguas residuales en actividades productivas, como la agricultura y la acuicultura. Es así que desde 1977 el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) viene ejecutando, junto con instituciones nacionales, diversos estudios en el Complejo de Lagunas de estabilización de San Juan de Miraflores, en Lima Perú, complejo ubicado a 16 km al sur de Lima.

De otro lado, el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) Banco Mundial (BM) y la Agencia Alemana de Cooperación Técnica (GTZ) vienen auspiciando desde 1983 el Proyecto de Reuso de Aguas Residuales Tratadas en Acuicultura en las Lagunas de Estabilización de San Juan, con el fin de definir una tecnología que pueda, en la medida de lo posible, absorber los costos de tratamiento de las aguas residuales.

Este proyecto fue ejecutado en cuatro fases, las fases I y II fueron realizadas entre junio de 1983 y abril de 1984 y permitieron definir que las condiciones ambientales de las lagunas cuaternarias son satisfactorias para la supervivencia y crecimiento de los peces: Tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) y carpa común (*Cyprinus carpio*). Sin embargo, estas lagunas no resultaron prácticas para el manejo de una producción a escala comercial, por lo que se recomendó utilizar estanques construidos especialmente para el cultivo de peces y alimentados con efluentes de

lagunas terciarias. Los análisis microbiológicos, parasitológicos y toxicológicos preliminares mostraron que al parecer no existen impedimentos para destinar los peces al consumo humano directo (Moscoso y Nava, 1988).

Los resultados, de estas primeras fases, fueron discutidos por dos paneles de expertos en Lima, Perú (1984) y Bangkok, Tailandia (1987), las recomendaciones en ambos casos fue la implantación de una Unidad Experimental de Acuicultura en San Juan, para poder continuar las investigaciones.

En 1986 se iniciaron los estudios de ingeniería para la ejecución de la Unidad experimental, el proyecto fue desarrollado por el Servicio Nacional de Agua Potable y Alcantarillado (SENAPA), entidad que conjuntamente con CEPIS ejecutaron las fases III y IV del Proyecto Acuicultura San Juan, bajo los auspicios de la GTZ y del PNUD/BM. En junio de 1988 se concluyó la construcción de la Unidad Experimental de Acuicultura en una extensión de terreno de 1.44 ha, cedidas al proyecto por el Programa de Protección Ambiental y Ecología Urbana (PPAEU), del Ministerio de Vivienda, institución que tiene a su cargo la operación y mantenimiento del Complejo de Lagunas San Juan. Esta unidad experimental fue configurado para sembrar una población de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), y está constituida por:

Doce estanques experimentales de 400 m² cada uno,
seis estanques de servicio de 100 m² cada uno,
dos estanques demostrativos de 2700 y 3200 m²
respectivamente, y

un laboratorio temperado para la producción de alevinos revertidos de tilapia.

De acuerdo a la propuesta técnica que sustenta el convenio SENAPA/GTZ, los objetivos de la fase III del Proyecto fueron los siguientes:

- a. Diseñar e implantar una unidad experimental y demostrativa de acuicultura, empleando efluentes de las lagunas de San Juan.
- b. Implantar un programa de investigación que optimice la producción bajo un criterio económico.
- c. Establecer un protocolo de análisis sanitarios, adecuados para estos sistemas, que permitan determinar la factibilidad de consumo de los peces.

Por otro lado, según el contrato GTZ/OPS, el objetivo general de la fase IV fue el de continuar el programa de investigación, concebido para lograr el reuso de las aguas residuales a través de la acuicultura, considerando que los aspectos de bioingeniería, de salud pública y económicos tendrían una especial relevancia.

Bajo estos objetivos, durante las fases III y IV se desarrollaron cuatro experimentos consecutivos de 154 y 112 días en las estaciones de invierno y verano respectivamente, comprendidos entre julio de 1988 y abril de 1990.

Poblaciones de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) con pesos iniciales promedios desde 13 hasta 77 g fueron cultivadas a densidades entre 0.2 y 5 peces/m². Una alimentación suplementaria, en base a subproducto de trigo fue ensayada en los dos últimos experimentos.

De los resultados obtenidos, en los cultivos experimentales, se llegó a la conclusión que es posible configurar una actividad acuícola comercial asociada al uso eficiente de las aguas residuales tratadas en lagunas de estabilización.

En climas templados como Lima, el crecimiento de la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) es positivo y similar al obtenido en climas tropicales, solo durante los meses de verano. Las tilapias, revertidas sexualmente, con un peso inicial de 60 g pueden ser cultivadas durante 112 días de calor a una densidad de dos peces/m², para alcanzar un peso comercial de 250 g.

La máxima productividad de los estanques de acuicultura durante el verano fue de 30.79 kg/ha/día, obtenida a partir de una biomasa inicial de 960 kg/ha. La máxima capacidad de carga permisible se ha determinado en 4,400 kg/ha, lograda exclusivamente con el alimento natural producido en los estanques con el aporte de los efluentes de las lagunas de estabilización. Dada las características de alta productividad primaria, se ha verificado que la adición de alimentación complementaria no consigue elevar la capacidad de carga de los estanques.

En el período invernal en que la temperatura del agua desciende hasta 17 °C, no es factible efectuar una campaña de producción, debido a la baja tasa de

crecimiento que exhibe la tilapia.

Según los análisis realizados, de acuerdo a los criterios de calidad para peces de aguas cálidas aplicado por el Comité Internacional de Especificaciones Microbiológicas de Alimentos (ICMSF, 1983), los peces cultivados en las condiciones experimentales fueron considerados aptos para el consumo humano.

El estudio de mercado de la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) realizado en Lima mostró su alta aceptación, no habiendo evidencias de rechazo cuando se informó sobre la procedencia del producto. El mercado potencial definido fue de 180 TM mensuales para un precio de venta al público de EUA \$1.00/kg.

El manejo de la operación del sistema de tratamiento, el monitoreo de la calidad de sus efluentes y el procesamiento de datos correspondiente, durante los cuatro experimentos, han permitido desarrollar los temas de la presente tesis.

II. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL.

Demostrar la factibilidad técnica, desde el punto de vista de ingeniería sanitaria, del uso de aguas residuales, convenientemente tratadas, en actividades acuícolas, específicamente en el cultivo de la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*).

OBJETIVOS ESPECIFICOS.

1. Definir los niveles de calidad de los efluentes de las lagunas de estabilización que hagan factible el cultivo de la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), para ser destinado a consumo humano directo sin riesgos para la salud.
2. Definir los criterios de diseño de lagunas de estabilización a ser utilizados en sistemas integrados de tratamiento y reuso de aguas residuales en acuicultura.
3. Establecer los criterios de operación de sistemas integrados de lagunas de estabilización y estanques acuícolas, para obtener la calidad sanitaria adecuada, del agua a ser usada en acuicultura.

III. CRITERIOS DE CALIDAD DE AGUA.

3.1 Aspectos de salud pública relacionados con el uso de aguas residuales en acuicultura.

Existen varias amenazas potenciales a la salud pública ligadas al reuso de excretas y aguas residuales en acuicultura, y específicamente en piscicultura, que deben ser evitadas. Los sistemas descritos en el capítulo II dan por hecho, y deben su efectividad, a la cocción del pescado antes de su consumo.

Las excretas y aguas residuales contienen generalmente elevadas concentraciones de agentes patógenos excretados, sobre todo en los países como el nuestro donde predominan las enfermedades diarreicas y los parásitos intestinales. El grado de riesgo, del uso de aguas residuales en acuicultura, varía considerablemente según el tipo de patógeno involucrado.

Aparentemente, los peces no padecen de infecciones causadas por bacterias y virus que ocasionan enfermedad en animales de sangre caliente, humanos y ganado. Pero los peces transportan pasivamente los patógenos.

Generalmente es una creencia que los peces transportan pasivamente los patógenos sólo en las escamas y agallas, el líquido intraperitoneal y las vías digestivas. Sin embargo, investigaciones recientes realizadas en Israel muestran que tanto las bacterias como los virus pueden penetrar diferentes tejidos de los peces. La concentración de microorganismos en el agua determina su presencia en los tejidos

y, parece haber una concentración límite en el agua de los estanques piscícolas, aproximadamente 10^4 bacterias/100 ml y 10^3 virus/100 ml; por debajo de estos niveles, los organismos no penetran en los músculos de los peces. La concentración límite para los virus parece ser de un orden de magnitud menor que para las bacterias.

Strauss (1985), analizó las publicaciones sobre la supervivencia de agentes patógenos en el interior y la superficie del organismo de los peces y llegó a la conclusión de que:

- 1) Es muy probable que las bacterias invadan el músculo de los peces cuando estos se cultivan en estanques que contienen concentraciones de coliformes fecales y salmonellas en proporciones superiores a 10^4 y a 10^5 por 100 ml, respectivamente y, el potencial de invasión aumenta cuando es mayor la exposición de los peces al agua contaminada.
- 2) Ciertas pruebas sugieren que hay poca acumulación de organismos entéricos y agentes patógenos en el interior o en la superficie del tejido comestible de los peces cuando la concentración de coliformes fecales en el agua de los estanques de cultivo es inferior a $10^3/100$ ml (Buras N. y colaboradores, 1985).

Ciertos helmintos pueden ser transmitidos a través del reuso de excretas en sistemas de acuicultura, puesto que sus ciclos de vida incluyen organismos acuáticos (ya sean peces, cangrejos o macrófitos acuáticos) como huéspedes intermediarios. Sin

embargo, muchos helmintos tienen una distribución geográfica restringida y una infección, en particular, puede ser importante solo en aquellas áreas endémicas. Tal vez la especie más importante es *Clonorchis sinensis*, la fasciola hepática oriental. Ella está asociada con estanques piscícolas alimentados con excretas y se transmite intensamente donde los pescados se consumen crudos o parcialmente cocidos. La infección se presenta principalmente en China, Corea, Taiwán y Vietnam y la prevalencia local puede alcanzar el 60%. Tanto la fasciolosis hepática como la esquistosomiasis pueden controlarse si los bordes de los estanques acuícolas se mantienen libres de vegetación, para no fomentar la presencia de los caracoles que actúan como huéspedes intermediarios.

Por otro lado, se debe considerar que existe poco riesgo de contraer enfermedad por la ingestión de pescado bien cocido, puesto que el calor destruye los patógenos; pero el consumo de productos crudos, parcialmente cocidos o inapropiadamente conservados, puede representar un grave riesgo para la salud. Tal vez el componente de riesgo más importante para la salud, que generalmente no se toma en cuenta, es el manipuleo y preparación de los alimentos con productos contaminados y/o con malos hábitos de higiene. Por tanto, por la conservación de la salud pública, cabe asegurarse de mantener estrictas normas de higiene durante el manejo del pescado, sobre todo durante la evisceración. Esto se puede lograr con mayor facilidad en las operaciones comerciales, que en la acuicultura de subsistencia, para lo que se necesitarán a menudo programas continuos de educación para la salud. La práctica de cocinar el pescado, común en muchas regiones donde se emplean aguas residuales en acuicultura, es una importante medida de protección de la salud.

El caso específico de la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), es de una especie aparente solo para comer cocida, ya que normalmente se destinan a consumo humano como pez ración, a una talla comercial de 250 g. Por otro lado, los rendimientos de la tilapia como "filete" son mínimos. Este hecho hace a esta especie poco aparente, a pesar de su carne blanca, para la preparación de alimentos de consumo crudo, como es el caso del "cebiche".

El reuso de aguas residuales se vería limitado, si es que contienen químicos tóxicos provenientes de descargas industriales a la red de alcantarillado, como metales pesados y diversos materiales orgánicos, ya que estos se pueden bioacumular en los organismos acuáticos y a través de la cadena alimenticia en una mayor concentración en los peces cultivados, lo que a su vez pondrían en peligro la salud pública. Sin embargo, los niveles de metales pesados y pesticidas encontrados en lagunas de estabilización, generalmente se ha reportado como inferiores a los niveles límites de concentración aceptables, hecho probablemente asociado a bajas concentraciones en el agua residual cruda y/o por algún mecanismo de remoción, como es el incremento de pH en las lagunas de maduración que provoca la precipitación de ciertos iones.

Por otro lado, cuanto menor sea la cadena alimenticia, menor será el riesgo de acumulación de metales y/o pesticidas en los peces, de este modo la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), ofrece esa ventaja al ser una especie principalmente hervívora, filtradora de fitoplancton.

La construcción de sistemas de lagunas para el reuso puede proporcionar un medio propicio para la proliferación de vectores, especialmente mosquitos, que

puéden transmitir agentes infecciosos que no se encuentran en las excretas, como malaria y filariasis. Hay pocas posibilidades que los mosquitos se reproduzcan en lagunas que contengan peces, pues las larvas de los mosquitos serían depredados por estos.

3.2 Criterios de calidad de agua de los efluentes utilizados en acuicultura

En general, las normas o pautas de calidad de las aguas residuales a ser reusadas especifican tanto las normas explícitas (por ejemplo, las concentraciones máximas de coliformes) como el tratamiento mínimo requerido, y están orientados mayormente al uso en agricultura. Las normas elaboradas hace 10 o 20 años tendían a ser muy estrictas, dado que se basaban en una evaluación de riesgos potenciales para la salud asociados a la supervivencia de los agentes patógenos en las aguas residuales, el suelo y los cultivos, así como la posibilidad técnica del tratamiento.

La técnica más eficaz para destruir patógenos en aquel momento (utilizando el criterio de desaparición de coliformes) era la cloración del efluente, y, como ello se podía lograr con concentraciones residuales muy bajas de coliformes, la concentración permisible también se situaba en un nivel muy bajo. Por ejemplo las normas establecidas en California en 1968 permiten solo de 23 a 2.3 Coliformes totales /100 ml, según sea el tipo de cultivo regado (Departamento del Estado de California para la Salud Pública, 1968).

En 1973 una Reunión de Expertos de la Organización Mundial de la Salud, señaló que era "técnicamente posible en condiciones ordinarias producir un efluente de aguas residuales que no contengan más de 100 coliformes totales/100 ml" y que el riego sin restricciones de cultivos con ese efluente no produciría probablemente más que "un riesgo limitado para la salud" (OMS, 1973). En este mismo informe se indica la misma restricción de 100 organismos coliformes/100 ml para el uso en piscicultura y ninguna sustancia química que provoque la aparición de residuos nocivos en los peces, y para lograr esta calidad se recomendaba aplicar tratamiento primario y secundario, y desinfección: pudiendo utilizar además filtración en arena.

En la década pasada hubo un cambio de actitud en la Comunidad Científica, respecto al concepto de "riesgo cero" en el reuso de aguas residuales, por considerarlo exageradamente estricto; por ejemplo, un Grupo de Trabajo de la OMS en Europa afirmó que "desde el punto de vista económico y práctico es imposible alcanzar un nivel sin riesgo, aunque quizás sea técnicamente posible" (Oficina Regional de la OMS para Europa, 1981).

La evaluación de los datos epidemiológicos aceptables, es decir, una evaluación de riesgos reales para la salud, en contraste con los potenciales indican que las normas existentes pueden ser injustificadamente restrictivas. De otro lado, los métodos de diseño de lagunas de estabilización, que constituye el sistema de tratamiento de aguas residuales elegido en los países en desarrollo, han mejorado en la última década de manera que la remoción de cualquier nivel de patógenos, que se considere necesario, puede lograrse ahora con facilidad y seguridad.

Como resultado de estas consideraciones, en una Reunión de Expertos celebrada en Engelberg, Suiza, en julio de 1985, patrocinada por el Banco Mundial, la Organización Mundial de la Salud y el Centro Internacional de Referencia para la Evacuación de Desechos, se recomendaron las normas, cuyo resumen se muestra en la Tabla III-1.

Proceso de reutilización	Nematodos intestinales ^a (media aritmética del número de huevos viables por litro)	Coliformes fecales (media geométrica por 100 ml)
Riego restringido^b Riego de árboles, cultivos industriales, cereales, frutales ^c y forrajes ^d .	≤ 1	sin aplicación
Riego no restringido Riego de plantas de consumo crudo, campos deportivos y parques públicos ^e	≤ 1	$\leq 1000^f$

a Ascaris, Trichuris y anquilostomas

b En todos los casos se necesita un grado mínimo de tratamiento equivalente al menos a una laguna anaerobia con un día de retención seguido de una laguna facultativa de 5 días de retención o su equivalente.

c El riego debe suspenderse dos semanas antes de la cosecha, y no puede recogerse ningún fruto caído al suelo.

d El riego debe cesar dos semanas antes que se permita pastar al ganado.

e Los factores epidemiológicos locales pueden exigir normas más restrictivas para áreas verdes públicas, especialmente en hoteles de zonas turísticas.

f Cuando las plantas comestibles se consumen siempre bien cocidas, esta recomendación puede ser menos estricta.

Fuente: Centro Internacional de Referencia para la Evacuación de Desechos (1985)

Tabla III-1

Según las "Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura", Informe de un Grupo Científico de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 1989), es necesario realizar más estudios de investigación para poder establecer una norma definitiva de calidad de agua para la acuicultura.

Se recomienda, con carácter provisional, una *directriz sobre la calidad bacteriológica* de una media geométrica de $\leq 10^3$ coliformes fecales/ 100 ml para el agua de los estanques de cultivo de peces. En vista de la dilución de las aguas residuales que ocurre en la mayoría de estanques acuícolas, esta concentración, indicadora de la cantidad de bacterias en el medio acuático, puede lograrse tratando las aguas residuales hasta obtener un efluente, que alimente a los estanques de acuicultura, cuya calidad bacteriológica sea correspondiente a: de 10^3 a 10^4 coliformes fecales/100 ml. Por otro lado, la *directriz sobre el contenido de helmintos* apropiada para el uso de aguas residuales en acuicultura es la ausencia de huevos viables de tremátodos. Eso se logra fácilmente con el tratamiento en lagunas de estabilización.

Las mismas directrices deben tomarse en cuenta para el agua de estanques donde se cultivan verduras acuáticas (macrófitas) por que en algunas zonas se consumen crudas.

Bartone (1986), propone los siguientes criterios de calidad de los efluentes de lagunas de estabilización a ser usados en los estanques de piscicultura:

Coliformes fecales	10000/100 ml
Standard Plate Count	10000/100 ml
Ausencia de protozoos y helmintos	
Nitrógeno amoniacal	≤ 2 mg-N/l
Detergentes	≤ 1.5 mg ABS/l
Oxígeno disuelto	≥ 3 mg/l

Los criterios de calidad expuestos, sirvieron de marco de referencia al Proyecto: "Reuso en acuicultura de las aguas residuales tratadas en las lagunas de estabilización de San Juan".

3.3 Legislación

Según el Decreto Legislativo N° 613, "Código del Medio Ambiente y los Recursos Naturales", el Estado fomenta el reuso de las aguas residuales, así en el Capítulo XIX, del referido Código el artículo N° 111 establece:

"El Estado fomenta el tratamiento de las aguas residuales con fines de reutilización, siempre y cuando éstas recuperen los niveles cualitativos que exige la autoridad competente y no se afecte la salubridad pública."

El mismo Código refiere, en su artículo 107:

"Es responsabilidad del Ministerio de Salud garantizar la calidad del agua para consumo humano y en general, para las demás actividades en que su uso es necesario."

Sin embargo, a la fecha no se ha reglamentado los niveles de calidad asociados a los usos de las aguas residuales, con o sin tratamiento. La Ley General de Aguas, vigente, (Decreto Ley N° 17752, del 24/07/69), en su reglamentación (D.S. N° 41-70-A, del 20/02/70), establece los procesos de tratamiento de aguas residuales, necesarios para permitir el uso de efluentes, en el riego de ciertos cultivos. Los contenidos de los artículos 196 y 197 del Reglamento se resumen a continuación:

- 1) Los vegetales de tallo corto y rastrero que se consumen crudos, no podrán ser irrigados con aguas residuales tratadas o sin tratamiento.
- 2) Para cultivo de caña de azúcar solo se requiere de pretratamiento mediante una cámara de rejillas.
- 3) Cultivos industriales, se requiere tratamiento primario (pretratamiento con rejillas y desarenador, y: tanque séptico, Imhoff, sedimentador con o sin coagulación o lagunas anaerobias).
- 4) Frutales no rastreros, tubérculos y forrajes; se requiere de tratamiento secundario: filtros biológicos, lodos activados o lagunas de estabilización.

Sin embargo, no se precisa que niveles de calidad deben tener los efluentes de tales plantas de tratamiento de modo que el reuso minimice los riesgos para la salud.

La única referencia sobre niveles de calidad de agua en general, se encuentran en el Reglamento de la Ley General de Aguas (D.S. N° 261-69-AP, del 12/12/69),

en el Capítulo IV: "De la Clasificación de los Cursos de Agua y de las Zonas Costeras del País".

En el Artículo N° 81 (modificado por D.S. N° 007-83-SA, del 11/03/83) se indica:

"Para los efectos de la aplicación del presente Reglamento, la calidad de los cuerpos de agua en general ya sea terrestre o marítima del país se clasificarán respecto a sus usos de la siguiente manera:

- I. Aguas de abastecimiento doméstico con simple desinfección.
- II. Aguas de abastecimiento doméstico con tratamiento equivalente a procesos combinados de mezcla y coagulación, sedimentación, filtración y cloración, aprobados por el Ministerio de Salud.
- III. Aguas para riego de vegetales de consumo crudo y bebida de animales.
- IV. Aguas de zonas recreativas de contacto primario (baños y similares).
- V. Aguas de zonas de pesca de mariscos bivalvos.
- VI. Aguas de zonas de Preservación de Fauna Acuática y Pesca Recreativa o Comercial.

En el artículo N° 82 (modificado por D.S. N° 007-83-SA, del 11/03/83) se fijan los límites de calidad, para los efectos de protección de las aguas, correspondientes a los diferentes usos, los límites bacteriológicos fijados se muestran en la Tabla III-2.

LIMITES BACTERIOLOGICOS *

(VALORES EN NMP/100 ml)

COLIFORMES	USOS					
	I	II	III	IV	V	VI
TOTALES	8.8	20,000	5,000	5,000	1,000	20,000
FECALES	0	4,000	1,000	1,000	200	4,000

* Entendidos como valor máximo en 80% de 5 o más muestras mensuales.

Tabla III-2

Considerando que no existen niveles de calidad de aguas residuales tratadas, con fines de reuso, podríamos asumir los niveles fijados para un uso clase VI (de zonas de pesca recreativa o comercial), como los niveles correspondientes al uso en piscicultura, en el entendido de que cualquier reglamentación posterior tomará como referencia el Reglamento de la Ley de Aguas, perfeccionándola o modificándola.

En la Tabla III-3, se resumen los límites físico-químicos de los usos: Riego de vegetales de consumo crudo (Clase III), Aguas de zonas de pesca de mariscos bivalvos (Clase V), y de zonas de pesca recreativa o comercial (Clase VI).

VALORES LIMITES DE CALIDAD FISICO-QUIMICA

PARAMETRO ^a	CLASE III	CLASE V	CLASE VI
DBO _{5,20°C}	15	10	10
O.D.	3	5	4
SELENIO	50	5	10
MERCURIO	10	0.1	0.2
PCBs	b	2	2
ESTERES, ESTALATOS	0.3	0.3	0.3
CADMIO	50	0.2	4
CROMO	1,000	50	50
NIQUEL	b	2	c
COBRE	500	10	d
PLOMO	100	10	30
ZINC	25,000	20	c
CIANUROS	b	5	5
FENOLES	b	1	100
SULFUROS	b	2	2
ARSENICO	200	10	50
NITRATOS (N)	100	N.A.	N.A.

a DBO y O.D. en mg/l los demás en mg/m³

b Valores a ser determinados. En caso de sospechar su presencia se aplicará los valores de la Clase V provisionalmente

c Pruebas de 96 horas de LC₅₀ multiplicadas por 0.02

d Pruebas de 96 horas de LC₅₀ multiplicadas por 0.1

N.A. Valor no aplicable

LC₅₀ Dosis letal para provocar el 50% de muerte o inmovilización de la especie utilizada en el Bioensayo.

Tabla III-3

De otro lado en el Código Sanitario de Alimentos (D.S. N° 112-63-DGS, del 18/06/63) actualmente denominado Reglamento Sanitario de Alimentos, por el artículo 195 del Decreto Ley 17505, solo se refiere a características organolépticas, respecto a los pescados frescos, a saber:

- Carne dura a la presión de los dedos.
- Agallas de color rojo vivo.
- Ojos brillantes y saltones.
- Escamas bien adheridas.
- Vientre sin abultamientos.
- Olor a pescado fresco.

No se consignan valores de calidad bacteriológica, que lo definan como aptos para consumo humano al estado fresco, solo se indica un valor máximo de 125 mg de nitrógeno amoniacal por 100 g de muestra.

En las normas del Instituto de Investigación Tecnológica Industrial y de Normas Técnicas (ITINTEC), encontramos los límites de calidad bacteriológica para el filete de pescado:

- Numeración de Bacterias viables: 250,000/g
- Stafilococos: 5/g
- Salmonella: ausente.

La Empresa Pública de Certificaciones Pesqueras del Perú (CERPER), utiliza las recomendaciones de la International Commission on Microbiological Specifications for Food (ICMSF), la Tabla III-4 resume los límites señalados por la ICMSF y de los estándares de algunos países para la calidad bacteriológica del pescado fresco.

Indicador	ICMSF	USA	JAPON	ARGENTINA
SPC/g	$< 10^6$	$< 5 \times 10^4$	$< 10^6$	$< 10^6$
Colif./g		$< 0.7 \times 10^3$	negativo	< 200
E. coli				negativo _a
Salmonella	negativo	negativo	negativo	negativo _b
Staphylococo	$< 10^3/g$	$< 100/g$	negativo	$< 100/g$
Vibriones	negativo		negativo	

a negativo en 0.1 g

b negativo en 25 g

Tabla III-4

IV. PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON FINES DE USO ACUICOLA.

La reducción relativa de organismos coliformes se acepta en general como indicador de la eficacia microbiológica de los procesos de tratamiento de aguas residuales. El grado hasta el cual se eliminan los constituyentes microbiológicos, de las aguas residuales, mediante un proceso de tratamiento determinado se expresa en función de unidades logarítmicas₁₀ (por ejemplo, una reducción de tres unidades logarítmicas₁₀ = 10^{-3} = 99.9% de eliminación).

Se han realizado varios estudios para determinar la eficacia de los procesos de tratamiento de aguas residuales para eliminar ciertos agentes patógenos. Al parecer la mayoría de las bacterias patógenas vegetativas quedan eliminadas en igual proporción que los organismos coliformes, razón por la que es utilizado como indicador de reducción en los procesos de tratamiento.

Ciertos huevos de helmintos pueden ser eficazmente removidos con un ritmo de sedimentación adecuado. Los procesos clásicos de tratamiento no consiguen suprimir con tanta eficacia los virus, y pueden subsistir en un efluente clorado, incluso cuando se ha reducido drásticamente los coliformes.

La aplicación de coagulantes: sulfato de aluminio y cloruro férrico, ha demostrado eficiencias del orden del 99% al 99.9% en la remoción de virus, de otro lado, con la aplicación de cal, hasta elevar el pH a 11.3, y seguido de filtración en arena se ha logrado eficiencias del orden de 99.997% en la remoción de poliovirus I.

La desinfección con ozono y radiación ultravioleta son particularmente eficaces en la reducción de patógenos, pero su práctica en el tratamiento de aguas residuales aun es limitada por los costos asociados a estos sistemas.

En la Tabla IV-1 se presenta el grado de eficiencia prevista para la eliminación de los principales agentes patógenos microbiológicos en varios procesos de tratamiento de aguas residuales.

Con *procesos convencionales* (sedimentación, lodos activados, filtros biológicos, lagunas aeradas y zanjas de oxidación), a menos que se complementen con desinfección, no es posible producir un efluente que permita utilizar en forma irrestricta las aguas residuales sin riesgos para la salud. Además, los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales, por lo general no son eficaces para eliminar los huevos de helmintos y tienen muy poco efecto en los contaminantes químicos de las aguas residuales.

Las *lagunas de estabilización* son, por lo general, el método preferido de tratamiento de aguas residuales en climas tropicales y subtropicales, donde la tierra tiene un costo razonable o donde existen tierras eriazas de mínimo o nulo costo. Períodos de retención de 8 a 10 días aseguran la remoción de helmintos, pero es necesario un tiempo mayor de retención para un uso irrestricto de los efluentes, sin riesgos para la salud, dicho tiempo es función de las condiciones ambientales, para cada localización.

Eliminación esperada de microorganismos en distintos procesos de tratamiento de aguas residuales

Proceso de tratamiento	Eliminación (unidades logarítmicas) de			
	Bacterias	Helmintos	Virus	Quistes
Sedimentación primaria				
Simple	0-1	0-2	0-1	0-1
Con adición de químicos (a)	1-2	1-3	0-1	0-1
Lodos activados (b)	0-2	0-2	0-1	0-1
Biofiltración (b)	0-2	0-2	0-1	0-1
Laguna aireada (c)	1-2	1-3	1-2	0-1
Zanja de oxidación	1-2	0-2	1-2	0-1
Desinfección (d)	2-6	0-1	0-4	0-3
Lagunas de estabilización (e)	1-6	1-3	1-4	1-4
Depósitos de efluentes (f)	1-6	1-3	1-4	1-4

- (a) Es necesario seguir investigando para confirmar los resultados.
- (b) Incluso la sedimentación secundaria.
- (c) Incluso estanques de sedimentación
- (d) Cloración, ozonización.
- (e) Los resultados dependen del número de lagunas en serie.
- (f) Los resultados dependen del período de retención, que varía según la demanda.

Fuente: Feachem y colaboradores (1983)

Tabla IV-1

La *desinfección*, de ordinario mediante la cloración, de las aguas residuales sin tratar nunca se ha logrado a cabalidad en la práctica. Se puede emplear para reducir el número de bacterias de los efluentes de las plantas de tratamiento convencional, si esta tiene un buen funcionamiento. Sin embargo, es muy difícil y costoso mantener una tasa elevada, uniforme y previsible de eficacia en la desinfección. En todo caso, la cloración no afectará en nada a los huevos de los helmintos. En el caso de lagunas de estabilización, siempre que se pueda cumplir con los niveles de calidad previamente establecidos en el diseño, no es necesaria ni se justifica la desinfección.

Algunas veces el *tratamiento terciario* se emplea para mejorar los efluentes del tratamiento biológico secundario donde se pretende emplearlos en agricultura y acuicultura. En varios países se ha empleado la filtración rápida en arena, con ese fin, sobre todo para poder eliminar mejor los sólidos y nutrientes en suspensión y reducir la demanda bioquímica de oxígeno, pero poco se sabe de su capacidad para eliminar los microorganismos patógenos. La experiencia de la filtración rápida en el tratamiento de agua para consumo humano, indica que la reducción de las concentraciones de bacterias y virus podría ser solo nominal. Sin embargo, la eliminación de huevos de helmintos en una unidad de filtración en buen funcionamiento puede ser sustancial, la bibliografía reporta que son necesarias las investigaciones de remoción de helmintos en filtros de arena, antes de recomendarla como un sistema seguro.

Una mejor posibilidad, para el tratamiento terciario consiste en agregar uno o más estanques en serie a una planta de tratamiento convencional. El agregar esos

estanques de "pulimento" es una forma apropiada de mejorar una planta establecida de tratamiento de aguas residuales, de modo que se puedan emplear los efluentes para el riego de cultivos o zonas verdes y en acuicultura.

Antes de seleccionar los métodos de tratamiento necesarios para el aprovechamiento de las aguas residuales, es preciso definir claramente las normas que se han de observar o la calidad que se ha de obtener. Las condiciones locales, las ubicaciones posibles, el tamaño de la planta y los factores económicos forman parte de las consideraciones que influirán en la selección del sistema de tratamiento.

En relación a los costos de infraestructura, operación y mantenimiento y principalmente a las eficiencias de remoción de patógenos, la tecnología más viable, de acuerdo a la realidad económica de los países latinoamericanos, es el uso de lagunas de estabilización para el tratamiento de aguas residuales y el acondicionamiento que permita el uso de efluentes sin riesgos para la salud. El único inconveniente de estos sistemas es la superficie relativamente amplia que exigen, pero es necesario evaluar adicionalmente que los beneficios que derivan de un sistema integrado: tratamiento-reuso de aguas residuales, pueda compensar ampliamente cualquier esfuerzo que se haga para su implantación. En cualquier lugar, es preciso, calcular y comparar cuidadosamente los costos y beneficios de los diversos sistemas de tratamiento antes de tomar una decisión.

Otro elemento de juicio, es el relacionado con la vigilancia y control de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales, que tendrá que ser desarrollado no solo por la entidad que tenga a cargo la operación del sistema

sino también por la autoridad de salud, a fin de minimizar los riesgos de utilizar un efluente fuera de los niveles establecidos. En tal sentido, en las plantas convencionales, el funcionamiento de los procesos puede fluctuar de un día para otro, aun cuando se opere hábilmente, de modo que se requerirá de una vigilancia continua para determinar si los efluentes son de la calidad estipulada en las normas. Por su parte, el funcionamiento de las lagunas de estabilización debidamente diseñadas no variará de esa forma y, por tanto, se puede adoptar un procedimiento de vigilancia menos costoso y riguroso.

Por este marco de referencia, en cuanto a procesos de tratamiento de aguas residuales se refiere, aun cuando se reconoce que los sistemas de lagunas de estabilización no son de aplicación universal, el desarrollo de la presente tesis está orientado a la aplicación de estos sistemas como la tecnología apropiada para los países como el nuestro donde el reuso de las aguas residuales no solo implica una posibilidad técnica, sino una necesidad cada vez más sentida.

Los niveles de contaminación ambiental producidos por la disposición, sin tratamiento previo, en mares y ríos y/o su utilización en el riego de vegetales de consumo crudo, situación que se traduce en las crecientes tasas de mortalidad y morbilidad de enfermedades entéricas y de parasitismos, ahora con un componente adicional como es el cólera, debe revertirse en breve plazo a través del tratamiento de aguas residuales.

La tecnología disponible, de uso de lagunas de estabilización, es compatible

con el objetivo de reducir agentes patógenos antes que materia orgánica y nutrientes, como es la orientación de los sistemas convencionales; y para viabilizar económicamente tales plantas de tratamiento, la alternativa es integrarlos a sistemas de reuso de efluentes en forma segura, donde la acuicultura es una de las posibilidades.

V. MATERIALES Y METODOS

5.1 Descripción del sistema de tratamiento

El complejo de lagunas San Juan se encuentra en operación, en forma continua, desde 1964. El esquema general del complejo hasta 1987 consistía de 21 lagunas ocupando un área total de aproximadamente 30 Hectáreas.

Las lagunas están divididas en dos baterías según se muestra en la Figura V-1; la batería alta con seis lagunas primarias y cuatro secundarias, los efluentes secundarios son utilizados en agricultura, silvicultura e irrigación de parques; la batería baja con once lagunas, ha sido utilizado en diferentes proyectos de investigación (Evaluación de lagunas de estabilización de San Juan Fases I y II, Proyecto Acuicultura San Juan Fases I y II , entre otros), la distribución de estas lagunas ha estado relacionada con los objetivos de cada proyecto.

Sin embargo, antes de la fecha de inicio del proyecto: "Reuso en Acuicultura de las Aguas Residuales Tratadas en las Lagunas de Estabilización de San Juan - Fase III", la distribución encontrada ha sido de: cinco lagunas primarias y cinco secundarias y una terciaria (Figura V-1), los efluentes de esta batería son utilizados para riego agrícola.

Dadas las conclusiones y recomendaciones del Proyecto: "Monitoring and Maintenance of Treated Water Quality in the San Juan Lagoons Supporting Aquaculture"- Final Report of Phases I-II (1985), el reuso en Acuicultura es posible si se utiliza el efluente de tres lagunas en serie a flujo continuo, operando la laguna

primaria bajo cargas superficiales de DBO_5 promedio entre 250-350 Kg $\text{DBO}_5/\text{Ha-día}$. De otro lado, por un acuerdo entre el Servicio Nacional de Abastecimiento de Agua Potable y Alcantarillado (SENAPA) y el Programa de Protección Ambiental y Ecología Urbana (PPAEU), se asignó como área, para la construcción de la Unidad de Acuicultura, la laguna secundaria A-4(S).

Por las razones expuestas, el complejo de lagunas San Juan fue modificado según se muestra en la Figura V-2. El sistema de lagunas que abastece a la Unidad de Acuicultura quedó entonces configurado por: dos lagunas primarias A-1(P) y B-1(P), una laguna secundaria A-2(S) (de la batería alta), y una terciaria A-3(T) (de la batería baja, inicialmente primaria, transformada a terciaria al construirse la interconexión correspondiente).

Por investigaciones anteriores, el sistema de ingreso de agua residual cruda, al complejo de lagunas, fue construido a fin de mantener aproximadamente constante el caudal de ingreso a la batería baja, por tal motivo, el canal de alimentación de la batería alta es el que asume las variaciones de caudal, este hecho obligó a construir un dispositivo de captación independiente, a partir del canal de la batería baja, con el objeto de abastecer al sistema de tratamiento de aguas residuales - reuso acuícola y mantener condiciones controladas de Cargas Hidráulicas y Orgánicas. Para la medición de caudales se construyó un medidor de régimen crítico tipo Palmer Bowlus.

5.2 Mediciones de campo

5.2.1 Geometría de las lagunas

Debido a las modificaciones realizadas en el complejo de lagunas San Juan, para acondicionar el sistema de tratamiento-uso acuícola, (v.gr. limpieza de lodos, dispositivos de ingreso, interconexiones, medidor Palmer-Bowlus), durante el desarrollo de los experimentos, se realizaron trabajos de batimetría, a fin de obtener los valores de área superficial y volumen, y de este modo estimar las medidas de profundidad promedio, longitud y ancho de cada una de las lagunas.

Se utilizó un teodolito Marca KERN modelo DKM1 y se aplicó el método de seccionamiento.

5.2.2 Caudales

El caudal total de ingreso al sistema, de agua residual cruda, fue determinado a través de la medición continua del nivel de agua en el medidor de régimen crítico Palmer-Bowlus instalado en el canal de alimentación. Este medidor fue calibrado y la curva característica correspondiente se muestra en la Figura V-3. El registro continuo de la altura de agua en el canal, aguas arriba del medidor, fue realizado durante el período de Julio 1988 a Abril 1990, usando un registrador Stevens tipo F, modelo 64.

Los afluentes a las lagunas primarias fueron controladas con un partidor ubicado en el canal de alimentación, aguas abajo del medidor. Dicho partidor fue calibrado en función del área superficial de cada laguna con el objeto de someterlas a aproximadamente la misma carga superficial de DBO₅.

Para completar la información requerida en el balance de caudales, en el sistema de tratamiento y en cada experimento, se realizó la medición de la infiltración- evaporación, cerrando los dispositivos de ingreso y salida de cada laguna y midiendo las variaciones del nivel de agua al cabo de 24 y 48 horas.

5.2.3 Temperatura

Las mediciones fueron realizadas seis veces por semana aproximadamente a las 6:00 a.m. y a las 2:00 p.m., las lecturas se realizaron a 30 cm. del nivel de agua.

5.2.4 Mediciones Meteorológicas

Fueron obtenidas de la estación metereológica La Molina, incluye las mediciones de temperatura ambiental, velocidad y dirección del viento, evaporación, radiación solar y horas de sol.

5.3 Análisis de la calidad de agua

5.3.1 Análisis Físico-químicos

La toma de muestras se realizó entre las 8:00 a 10:00 a.m., en el canal de alimentación, en el caso del agua residual cruda y en los dispositivos de salida, de cada laguna, para los efluentes.

En base a las recomendaciones de Edwards (1988), fueron realizadas las mediciones de los parámetros que se muestran en la Tabla V-1.

3.3.2 Análisis Microbiológicos

La toma de muestras se realizó entre las 8:00 a 10:00 a.m., en el canal de alimentación, en el caso del crudo, y en los dispositivos de salida, de las lagunas, para los efluentes.

En base a las recomendaciones de Buras (1988), se han determinado los parámetros que se indican en la tabla V-2.

PARAMETRO	FRECUENCIA
DBO ₅ Total	Semanal
DBO ₅ Soluble	Semanal
DQO Total	Semanal
DQO Soluble	Semanal
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	Quincenal
Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)	Quincenal
Amonio Total	Semanal
Nitrógeno Orgánico	Quincenal
Nitritos (*)	Quincenal
Nitratos (*)	Quincenal
Fósforo total	Quincenal
Ortofosfatos	Quincenal
Clorofila-a	Semanal

(*) Solo en el efluente terciario.

Tabla V-1

PARAMETRO		FRECUENCIA	
		Terciaria _a	Otras _b
Coliformes totales (NMP/100ml)		Semanal	Mensual
Coliformes fecales (NMP/100ml)		Semanal	Mensual
Standard Plate Count		Semanal	---
Conteo bacterial en mFC agar _c		Semanal	---
Bacteriófagos de E. coli		Semanal	---
Salmonella		Semanal	---
Clostridium sulfito reductor _c		Semanal	---
Enterovirus		Anual	Anual
Parásitos	Protozoos	Mensual	Mensual
	Helmintos	Mensual	Mensual

a Efluente de la laguna terciaria.

b Efluentes de lagunas primarias, secundaria y del agua residual cruda.

c Solo en el primer y segundo experimento.

Tabla V-2

5.4 Operación del sistema de tratamiento

5.4.1 Modelo de Cargas Orgánicas Superficiales para lagunas primarias

Para la determinación de la carga superficial aplicada y con el objeto de mantener las lagunas bajo características de facultativas, se ha utilizado el modelo propuesto por Yanez (1980), que se basa en el análisis de NH_3 y la carga superficial de DBO_5 aplicada a lagunas primarias en San Juan:

$$CS_{m\acute{a}x} = 357.4 * 1.085^{(T-20^{\circ})}$$

(1)

$CS_{m\acute{a}x}$: Carga Máxima de DBO_5 , aplicable a una laguna facultativa, en kg DBO_5 /ha.día

T : Temperatura del agua ($^{\circ}C$)

5.4.2 Modelo de Flujo Disperso para la Predicción de la calidad bacteriológica

Para la predicción de la calidad bacteriológica en términos de coliformes fecales se ha utilizado el modelo de flujo disperso cuya aplicación en reducción bacteriana ha sido propuesta por muchos investigadores: Dissanayake (1981), Yanez (1986), Polprasert (1983), Saenz (1987), entre otros.

El modelo consiste en la aplicación de las siguientes fórmulas:

$$\frac{N}{N_0} = \frac{4ae^{(1/2d)}}{(1+a)^2 e^{(a/2d)} - (1-a)^2 e^{(-a/2d)}}$$

(2)

$$a = (1 + 4.K_b.R.d)^{1/2}$$

(3)

N : Coliformes fecales en efluente

N_0 : Coliformes fecales en afluente

d : Factor de dispersión adimensional

K_b : Tasa de mortalidad neta de Coliforme fecal (1/día)

R : Período de Retención (días)

a : Factor adimensional

Para el cálculo del factor de dispersión "d", se ha utilizado el modelo propuesto por Polprasert y Bhattarai (1985), modificada por Saenz (1987):

$$d = \frac{1.158[R(W+2Z)]^{0.489}(W)^{1.511}}{(T+42.5)^{0.734}(LZ)^{1.489}}$$

(4)

L, W y Z: Longitud, ancho y profundidad de la laguna respectivamente, en m.

El valor de Kb , calculado por la expresión propuesta por Saenz (1987)

$$Kb = 0.623 \times 1.037^{(T-20)}$$

(5)

Posteriormente en base a los valores de tasa de mortalidad determinadas en San Juan, durante los Proyectos: "Evaluación de las lagunas de estabilización de San Juan - Fase II" (81-82) y "Evaluación Microbiológica y Toxicológica sobre reuso de aguas residuales en riego"(86-88) se determinaron correlaciones, para la tasa de mortalidad neta en cada nivel de tratamiento.

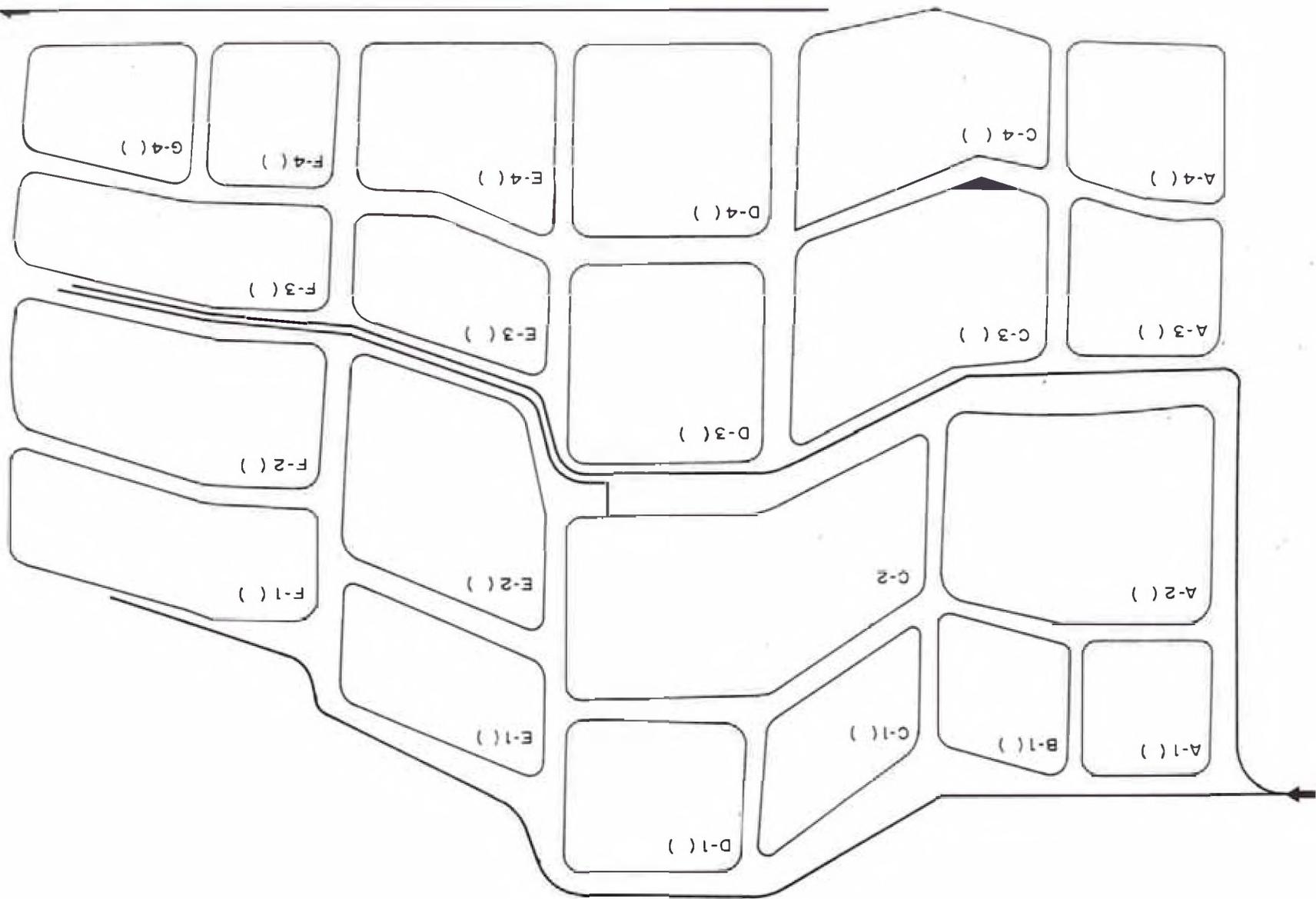
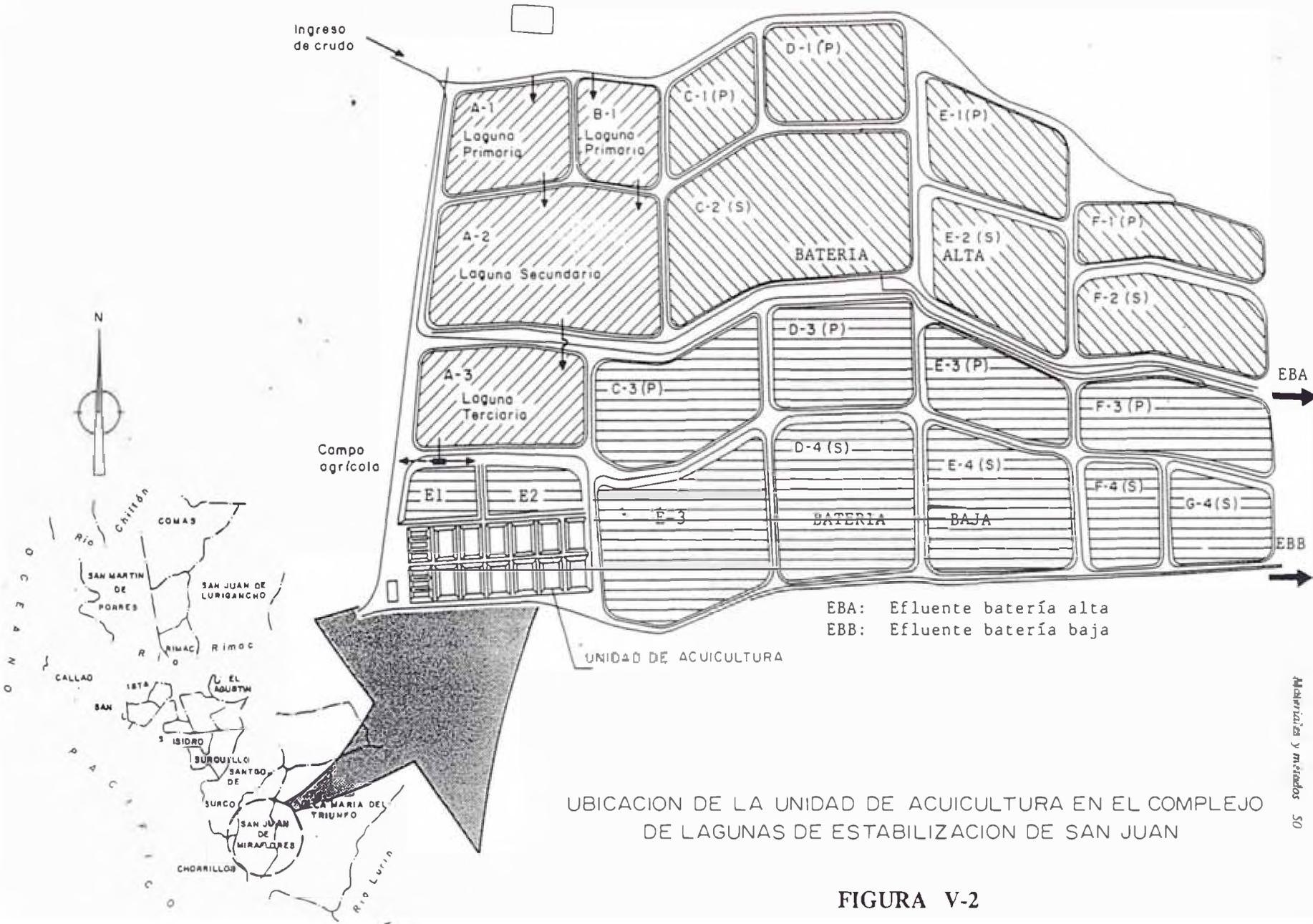
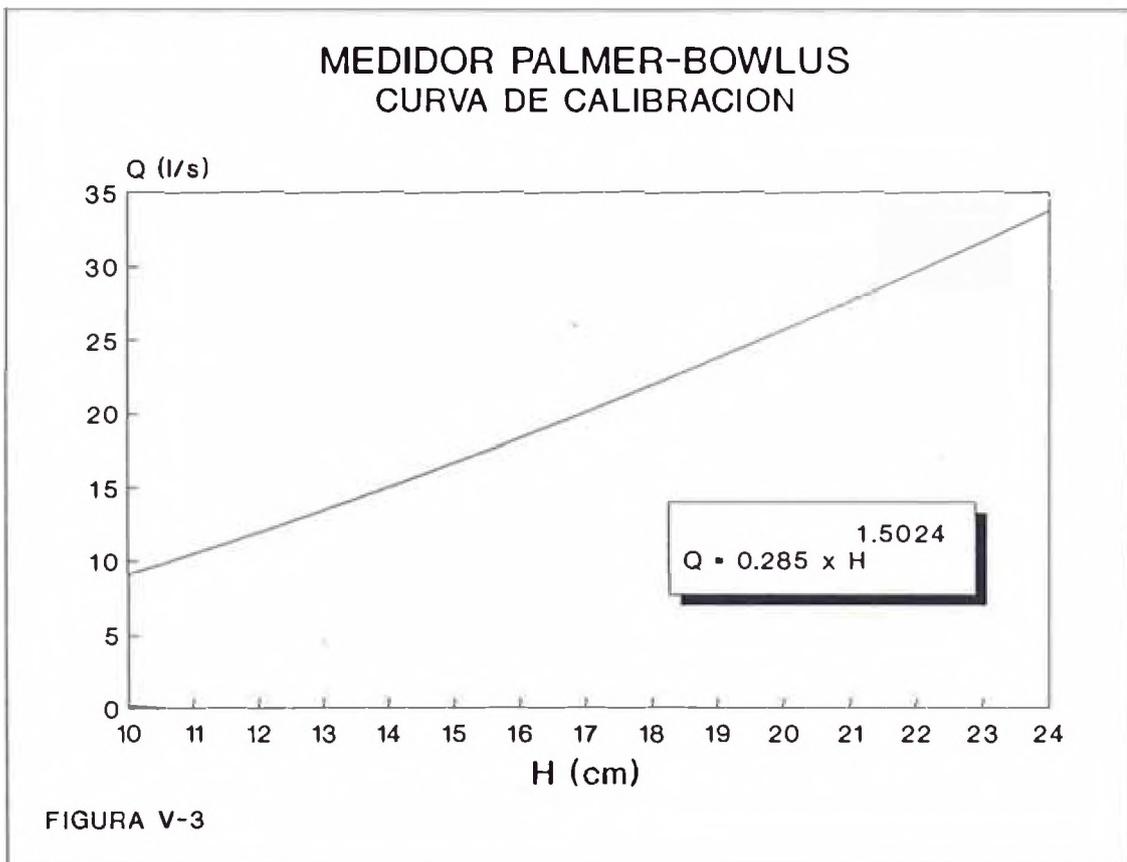


FIGURA V-1



Materiales y métodos 50

FIGURA V-2



VI. RESULTADOS

6.1 Cargas hidráulicas y orgánicas

La carga hidráulica en cada laguna se ha calculado realizando el balance de caudales, se determinó la tasa de infiltración en cada una de ellas. La Tabla VI-1, resume: los caudales promedio aplicados en cada experimento, el área, profundidad y volumen de cada laguna, la tasa de infiltración- evaporación estimada, y el período de retención teórico.

La variación del caudal de crudo se muestra en la Figura VI-1.

La carga de DBO_5 promedio de las lagunas primarias han sido calculadas multiplicando el caudal promedio semanal por el valor correspondiente de DBO_5 . La variación de las cargas superficiales de DBO_5 en las lagunas y por experimento se muestran en la Figura VI-2.

6.2 Parámetros físico-químicos

Los promedios de calidad físico-química del agua residual cruda y de los efluentes de las lagunas del sistema, durante el período de estudio del Proyecto, han sido calculados en base a los datos semanales o bisemanales, según sea el caso, de DQO (total y soluble), DBO_5 (total y soluble), Clorofila-a, fósforo total, ortofosfatos, amonio total, nitrógeno orgánico, nitritos, nitratos, sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos volátiles (SSV) y alcalinidad. Estos resultados se muestran en

la Tabla VI-2 y la variación histórica de cada uno de los parámetros determinados en las Figuras: del VI-3 al VI-17.

La variación histórica de la temperatura del agua, durante el estudio, se muestra en la Figura VI-18

6.3 Parámetros microbiológicos

6.3.1 Parásitos

La remoción, en el sistema de lagunas de estabilización, de protozoos entéricos y helmintos identificados en el agua residual cruda, se muestran en la Tabla VI-3, se indica, además la frecuencia de identificaciones positivas en cada laguna y por cada experimento del período de estudio.

6.3.2 Bacterias Coliformes

Los promedios geométricos por experimento, de los niveles de Coliformes fecales a través del sistema de lagunas, se muestran en la Figura VI-19.

La variación histórica, durante el período de estudio, del nivel de Coliformes Fecales en agua residual cruda y en cada efluente del sistema, se muestran en la Figura VI-20

Carga hidraulica en el sistema de estabilizacion. Valores promedio por experimentos

LAGUNA	CAUDAL AFLUENTE (l/s)	CAUDAL EFLUENTE (l/s)	AREA (ha)	PROFUN- DIDAD (m)	VOLUMEN (m3)	TASA DE INF.-EVAP (cm/dia)	Periodo retencion (dias)
PRIMER EXPERIMENTO (Del 4 de julio al 5 de diciembre de 1988):							
PRIMARIAS	13.79	12.01	1.14	1.43	16,302	1.35	15.7
SECUNDARIA	12.01	9.88	1.84	1.68	30,912	1.00	36.2
TERCIARIA	9.88	7.56	1.00	1.31	13,100	2.00	20.0
TOTAL 1			3.98		60,314		72.0
SEGUNDO EXPERIMENTO (Del 9 de enero al 23 de abril de 1989):							
PRIMARIAS	25.34	23.82	1.14	1.43	16,302	1.15	7.9
SECUNDARIA	23.82	21.69	1.84	1.68	30,912	1.00	16.5
TERCIARIA	21.69	19.49	1.00	1.31	13,100	1.90	7.8
TOTAL 2			3.98		60,314		32.2
TERCER EXPERIMENTO (Del 5 de junio al 6 de noviembre de 1989):							
PRIMARIAS	16.09	14.51	1.14	1.43	16,302	1.20	13.0
SECUNDARIA	14.51	12.38	1.84	1.68	30,912	1.00	28.9
TERCIARIA	12.38	10.18	1.00	1.31	13,100	1.90	14.9
TOTAL 3			3.98		60,314		56.8
CUARTO EXPERIMENTO (Del 18 de diciembre de 1989 al 9 de abril de 1990):							
PRIMARIAS	25.37	12.84	1.14	1.43	16,302	9.50	14.7
SECUNDARIA	12.84	10.28	1.84	1.68	30,912	1.20	34.8
TERCIARIA	10.28	8.43	1.00	1.31	13,100	1.60	18.0
TOTAL 4			3.98		60,314		67.5

Tabla VI-1

Valores Promedio de los parametros fisico-quimicos medidos en el sistema de lagunas de estabilizacion en todo el periodo experimental del 4 de julio de 1988 al 9 de abril de 1990.

(Valores en mg/l)

PARAMETRO	CRUDO	PRIMARIAS	SECUNDARIA	TERCIARIA
DQO total	562	202	183	171
DQO soluble	149	67	53	46
DBO5 total	278	53	91	80
DBO5 soluble	67	15	19	15
Solidos suspendidos totales	270	96	111	103
Solidos suspendidos volatiles	229	88	100	94
Fosforo total	7.70	4.73	4.76	4.54
Ortofosfatos	4.02	2.22	1.12	1.60
Nitrogeno Amoniacal	47.49	22.15	7.12	1.78
Nitrogeno organico	19.25	8.16	10.58	10.55
Nitritos				0.43
Nitratos				0.72
Clorofila-a (ug/l)		943	1139	1113
Alcalinidad total	260	210	154	135

Tabla VI-2

ANALISIS CUALITATIVO DE PARASITOS EN EL SISTEMA DE LAGUNAS DE ESTABILIZACION

	HELMINTOS										PROTOZOOS					
	<i>Ascaris lumbricoides</i>		<i>Trichuris trichura</i>		<i>Hymenolepis nana</i>		<i>Hymenolepis diminuta</i>		<i>Taenia</i>		<i>Toxocara</i>		<i>Giardia lamblia</i>		<i>Entamoeba coli</i>	
EXPERIMENTO 1																
CRUDO	7/7	100.0%	1/7	14.3%	4/7	57.1%	0/7	0.0%	1/7	14.3%	0/7	0.0%	7/7	100.0%	7/7	100.0%
PRIMARIAS	1/7	14.3%	1/7	14.3%	1/7	14.3%	0/7	0.0%	0/7	0.0%	0/7	0.0%	0/7	0.0%	3/7	42.9%
SECUNDARIA	0/7	0.0%	0/7	0.0%	0/7	0.0%	0/7	0.0%	0/7	0.0%	0/7	0.0%	0/7	0.0%	0/7	0.0%
TERCIARIA	0/7	0.0%	0/7	0.0%	0/7	0.0%	0/7	0.0%	0/7	0.0%	0/7	0.0%	0/7	0.0%	0/7	0.0%
EXPERIMENTO 2																
CRUDO	3/4	75.0%	1/4	25.0%	3/4	75.0%	3/4	75.0%	0/4	0.0%	1/4	25.0%	4/4	100.0%	4/4	100.0%
PRIMARIAS	1/4	25.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%
SECUNDARIA	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%
TERCIARIA	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%
EXPERIMENTO 3																
CRUDO	11/11	100.0%	5/11	45.5%	6/11	54.5%	0/11	0.0%	0/11	0.0%	0/11	0.0%	10/11	90.9%	11/11	100.0%
PRIMARIAS	0/11	0.0%	0/11	0.0%	0/11	0.0%	0/11	0.0%	0/11	0.0%	0/11	0.0%	0/11	0.0%	0/11	0.0%
SECUNDARIA	0/11	0.0%	0/11	0.0%	0/11	0.0%	0/11	0.0%	0/11	0.0%	0/11	0.0%	0/11	0.0%	0/11	0.0%
TERCIARIA	0/11	0.0%	0/11	0.0%	0/11	0.0%	0/11	0.0%	0/11	0.0%	0/11	0.0%	0/11	0.0%	0/11	0.0%
EXPERIMENTO 4																
CRUDO	4/4	100.0%	4/4	100.0%	3/4	75.0%	1/4	25.0%	0/4	0.0%	2/4	50.0%	4/4	100.0%	4/4	100.0%
PRIMARIAS	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%
SECUNDARIA	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%
TERCIARIA	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%	0/4	0.0%

Tabla VI-3

6.3.3 Salmonella

Los resultados de detección de Salmonella en el efluente terciario, mediante la técnica del Número Más Probable (NMP), fueron negativos, al obtener tales resultados se utilizó la técnica cualitativa de concentración en almohadillas de gasa, que permite expresar los resultados como presencia/ausencia. Los resultados de incidencia de Salmonella, con esta técnica cualitativa, se muestran en la Figura VI-21.

La serotipificación de 43 cepas dio como resultado un 90.7% de *Salmonella enterica* serovar paratyphi B y 9.3% del serovar newport, ambas de origen humano, tal como se muestra en la Tabla VI-4.

SEROTIPIFICACION DE CEPAS DE SALMONELLA AISLADAS DEL EFLUENTE TERCIARIO

<i>Salmonella enterica</i>	N° de cepas	%
serovar oraniemburg	0	0.0
serovar newport	4	9.3
serovar paratyphi B	39	90.7
TOTAL DE CEPAS	43	100.0

Tabla VI-4

6.3.4 Virus

Los análisis de Enterovirus realizados en el sistema muestran presencia en el

agua residual cruda y efluente primario, estos han sido realizados en el Instituto de Salud Pública de Perú en la que descartan la presencia específica de virus de polio y hepatitis , y en la Universidad de Arizona con otra metodología en la que descartan la presencia de Enterovirus en general, incluyendo polio, cocksakie y rotavirus, desafortunadamente no se realizó la evaluación de la remoción por nivel de tratamiento. Los datos reportados se muestran en la Tabla VI-5

DETECCION DE ENTEROVIRUS EN AGUA Y PECES

NIVEL	ENTEROVIRUS ₍₁₎	ENTEROVIRUS ₍₂₎
CRUDO	-----	8,007/ 1 LITRO
PRIMARIA	-----	924/ 1 LITRO
SECUNDARIA	-----	-----
TERCIARIA	NEGATIVO	-----
ESTANQUES ACUICOLAS	NEGATIVO	0/ 5 LITROS
PECES	NEGATIVO	-----

- (1) Análisis cualitativos efectuados en el Instituto de Salud Pública - Perú en líneas celulares VERO y HEP-2
- (2) Número más probable, determinado en línea celular BGM, en la Universidad de Arizona - EUA

Tabla VI-5

La determinación de bacteriófagos se realizó en el efluente terciario, los valores por experimento se muestran en la Figura VI-22.

SISTEMA DE LAGUNAS DE ESTABILIZACION CAUDAL DE INGRESO AL SISTEMA

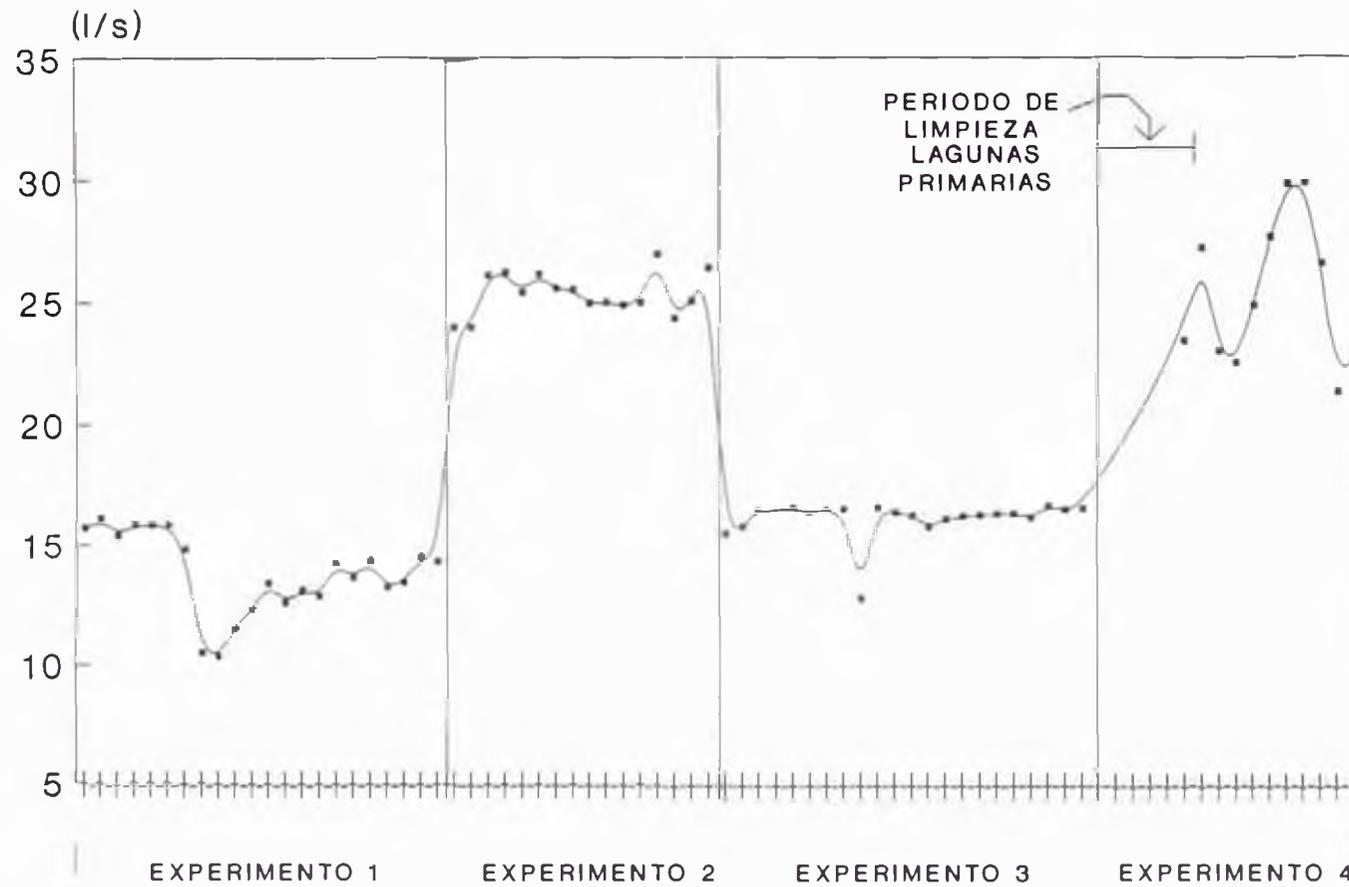
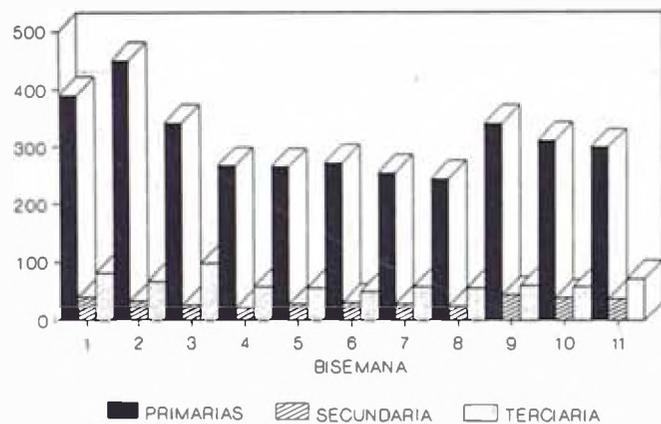
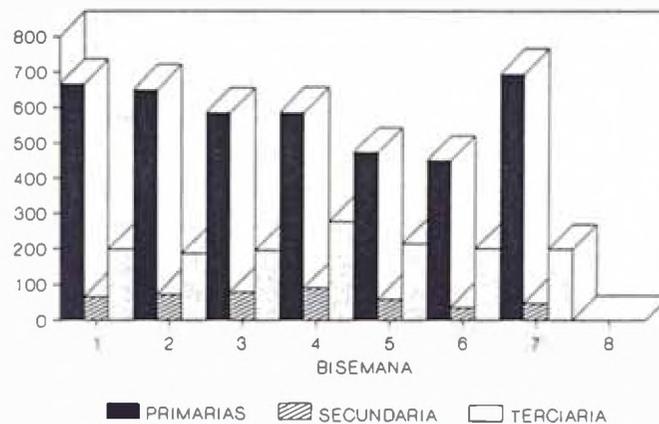


FIGURA VI-1

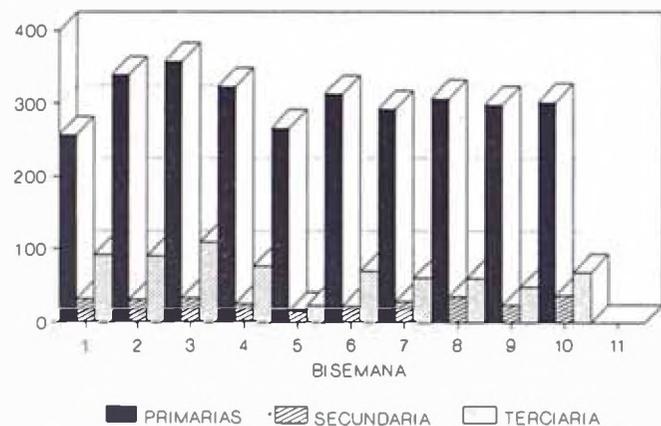
**CARGA SUPERFICIAL (Kg DBO5/ha/día)
EXPERIMENTO 1**



**CARGA SUPERFICIAL (Kg DBO5/ha/día)
EXPERIMENTO 2**



**CARGA SUPERFICIAL (Kg DBO5/ha/día)
EXPERIMENTO 3**



**CARGA SUPERFICIAL (Kg DBO5/ha/día)
EXPERIMENTO 4**

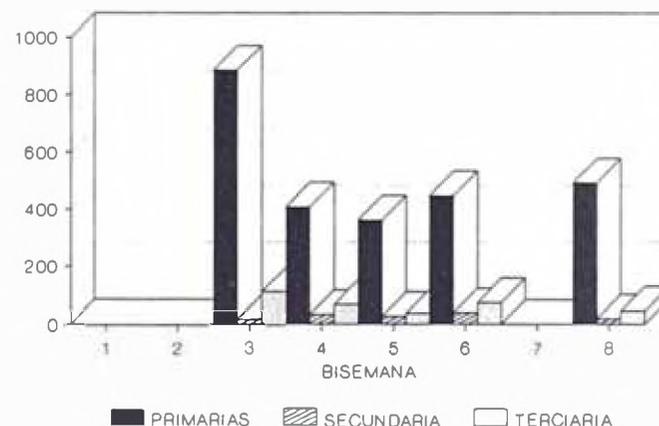


FIGURA VI-2

VARIACION EN EL CRUDO DURANTE EL ESTUDIO

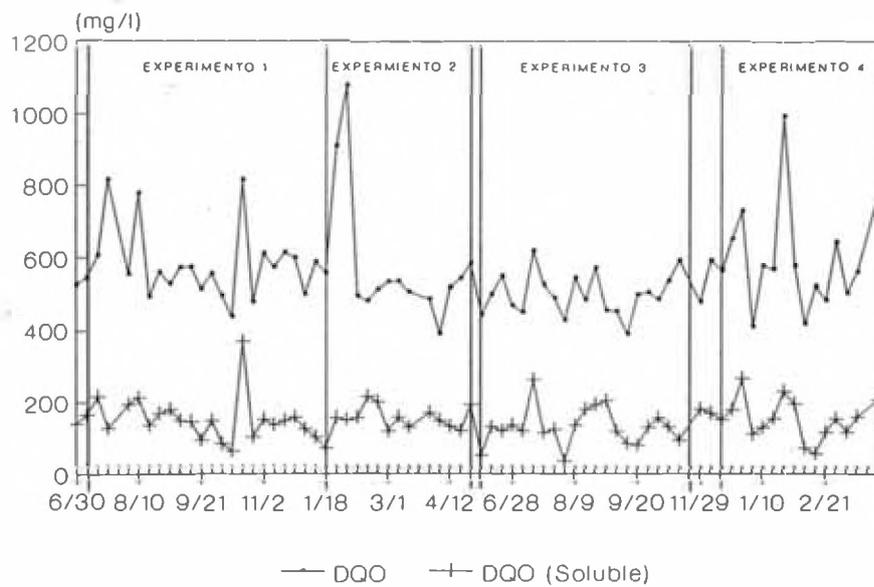
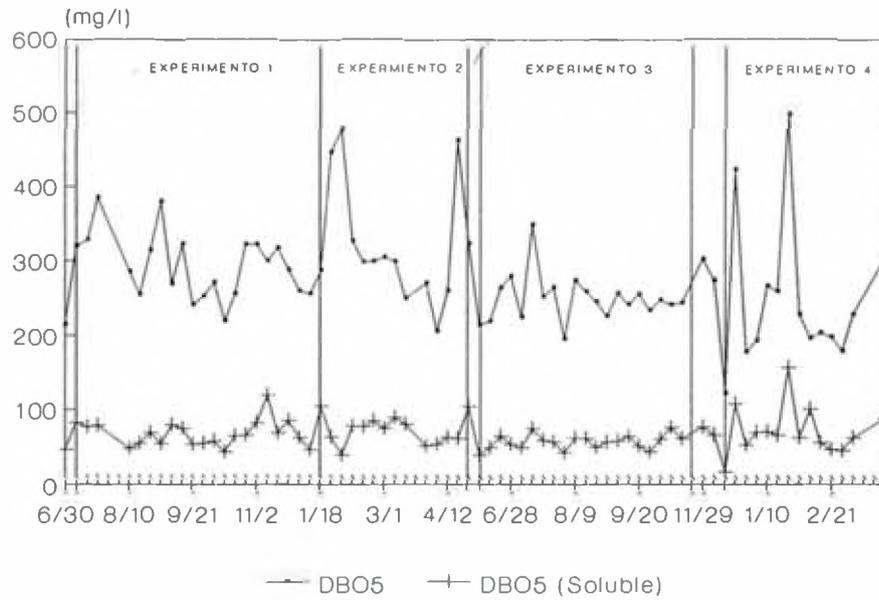


FIGURA VI-3

VARIACION EN EL CRUDO DURANTE EL ESTUDIO

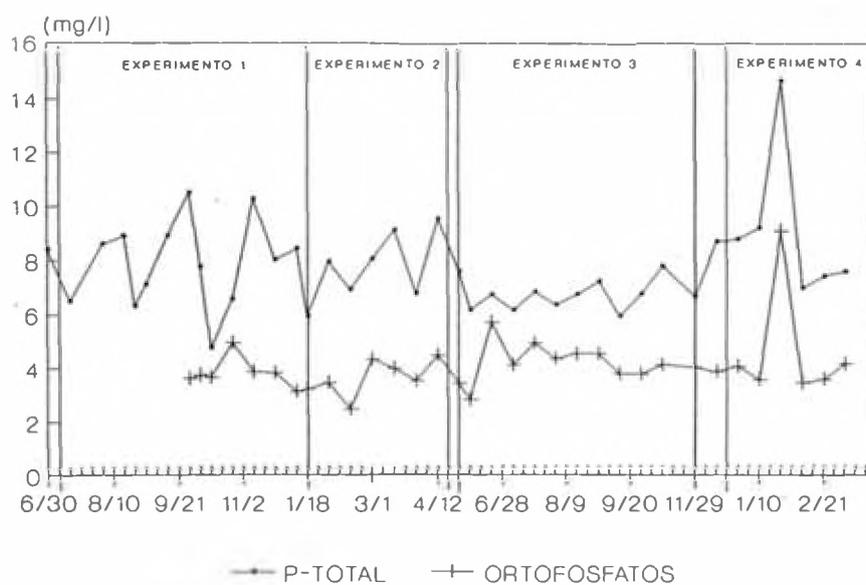
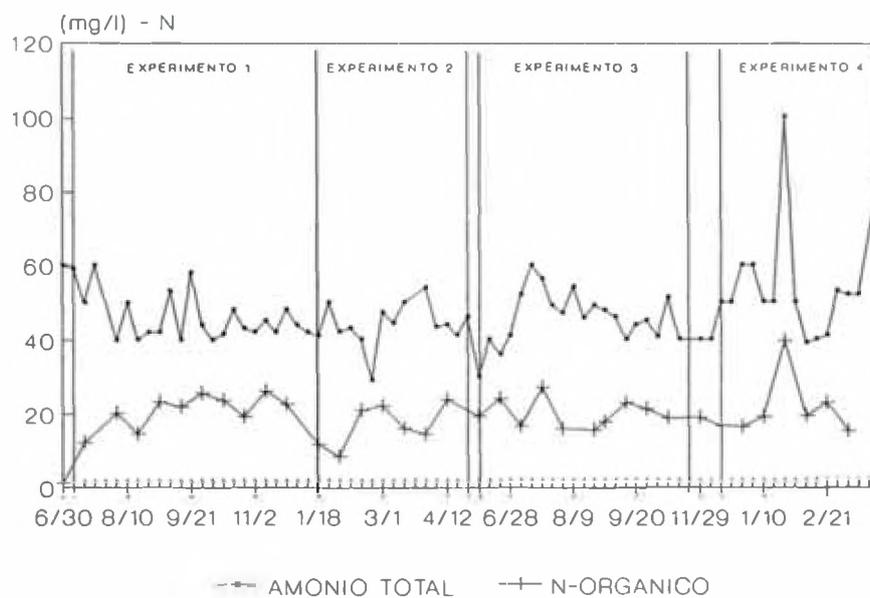
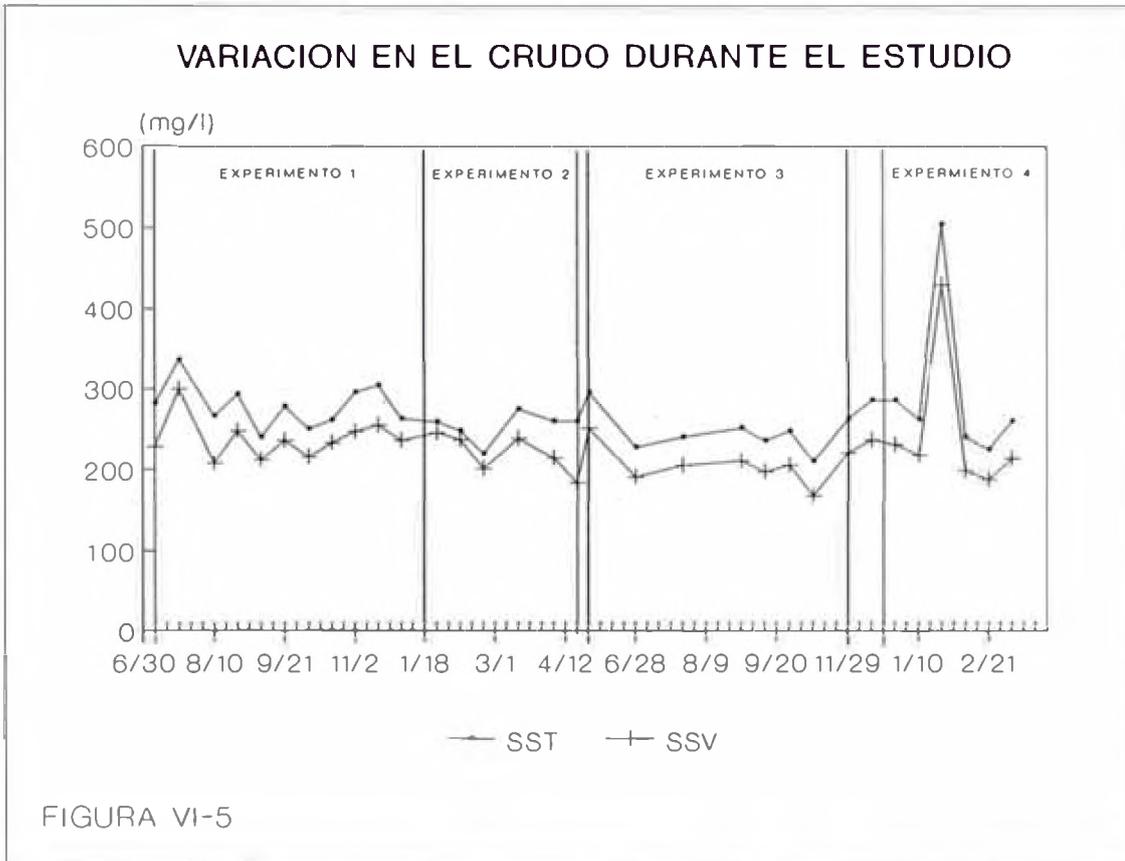


FIGURA VI-4



VARIACION EN EL EFLUENTE PRIMARIO

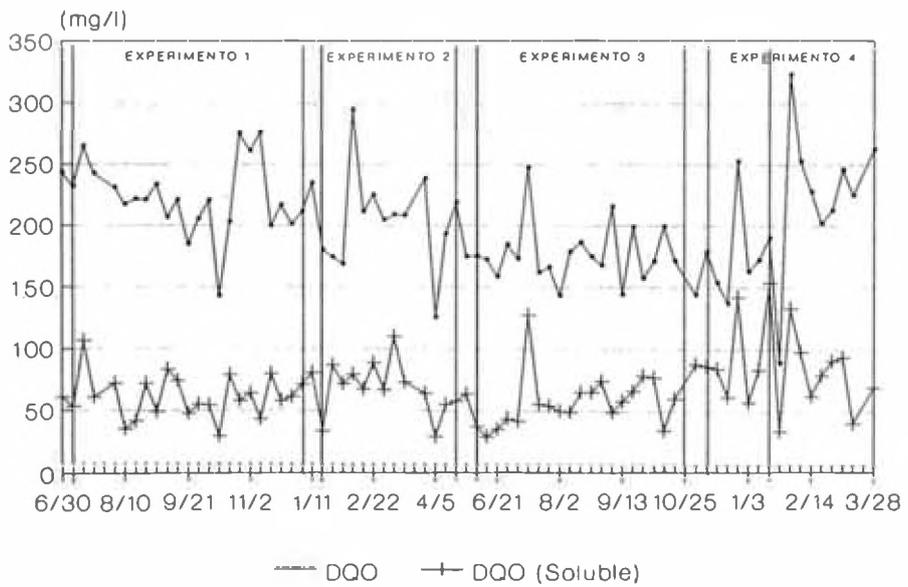
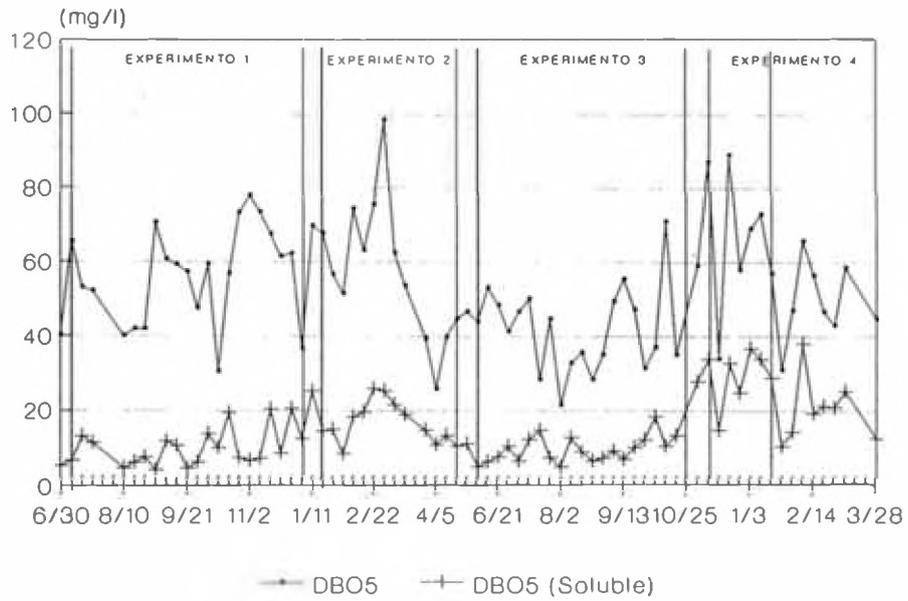


FIGURA VI-6

VARIACION EN EL EFLUENTE PRIMARIO

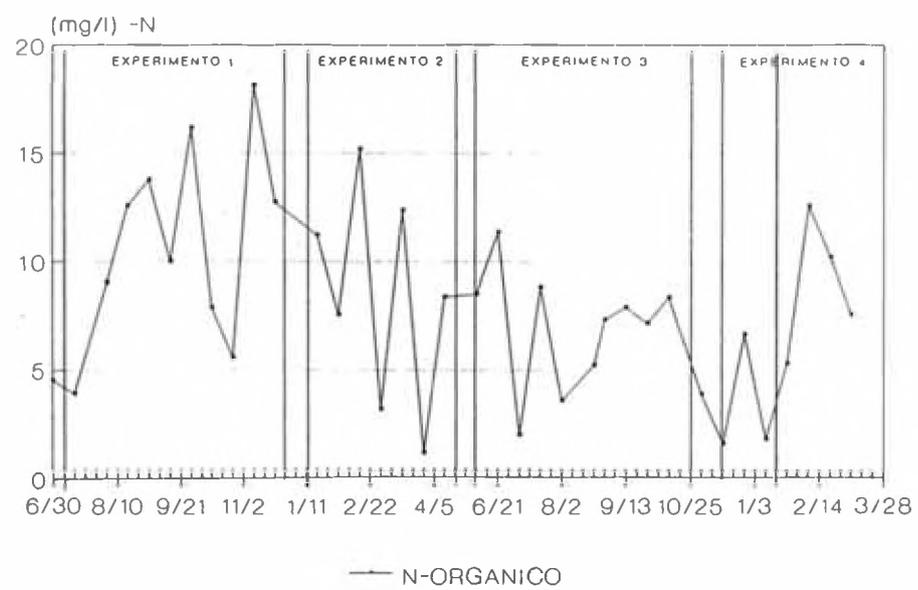
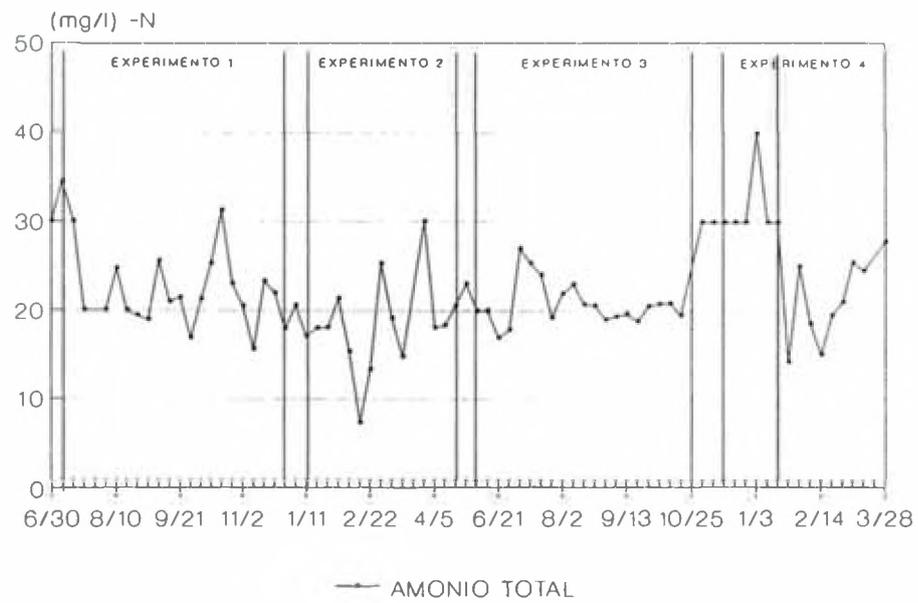


FIGURA VI-7

VARIACION EN EL EFLUENTE PRIMARIO

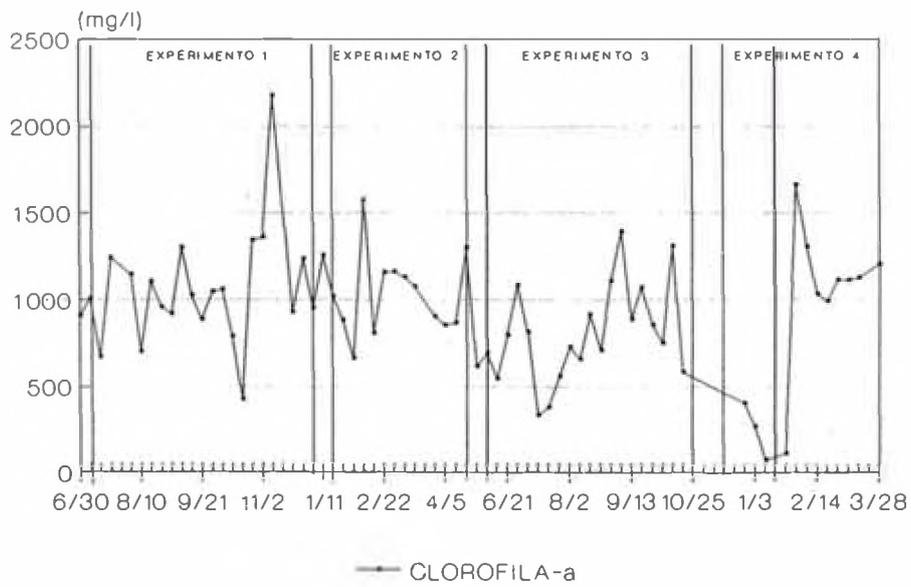
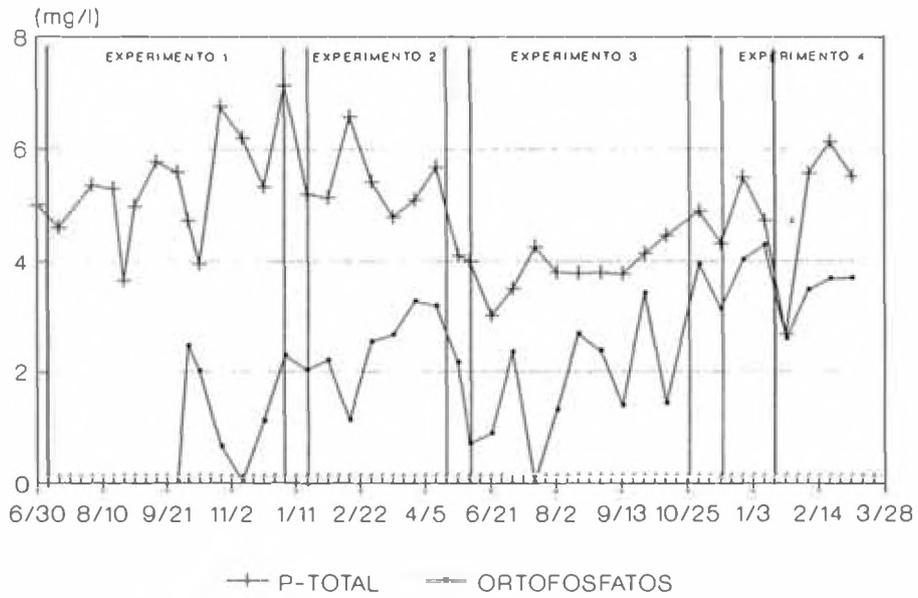


FIGURA VI-8

VARIACION EN EL EFLUENTE SECUNDARIO

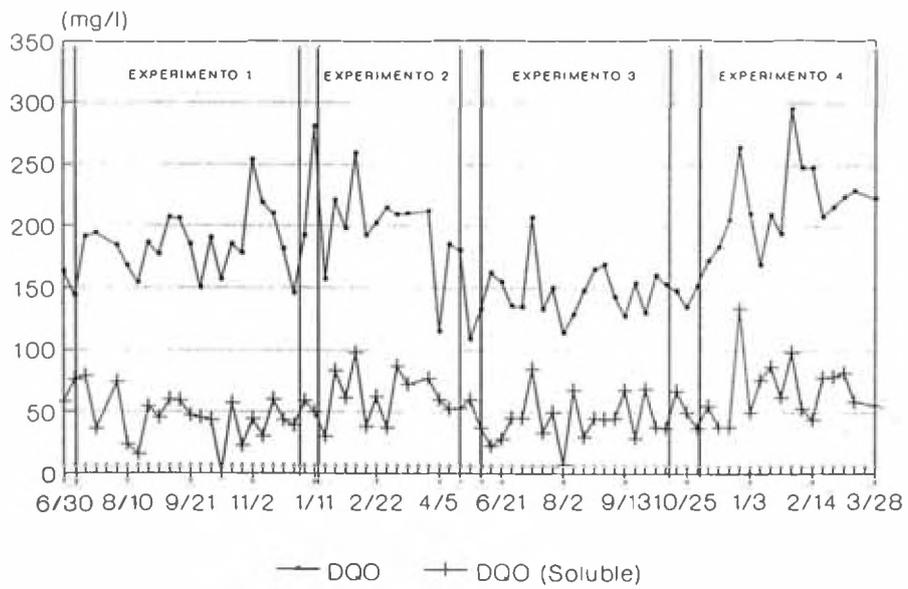
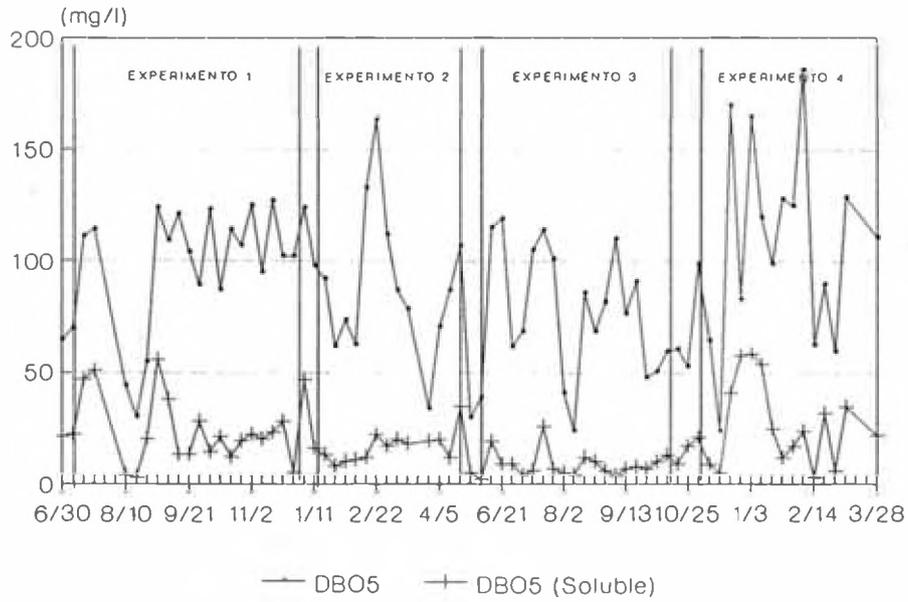


FIGURA VI-10

VARIACION EN EL EFLUENTE SECUNDARIO

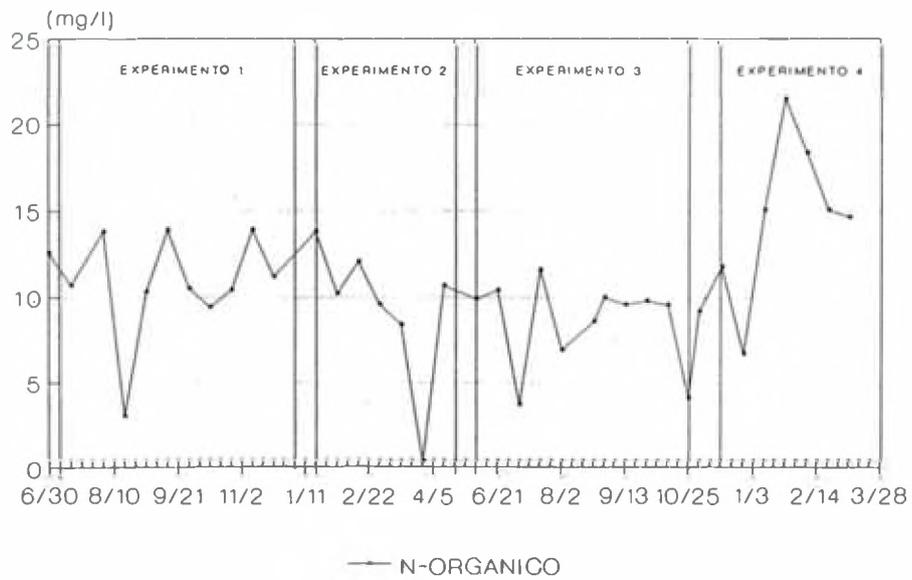
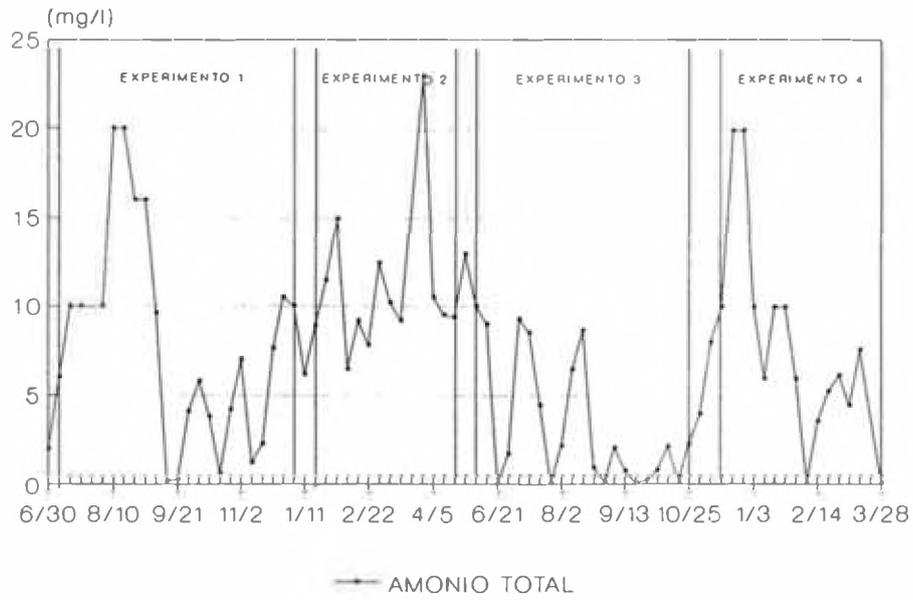


FIGURA VI-11

VARIACION EN EL EFLUENTE SECUNDARIO

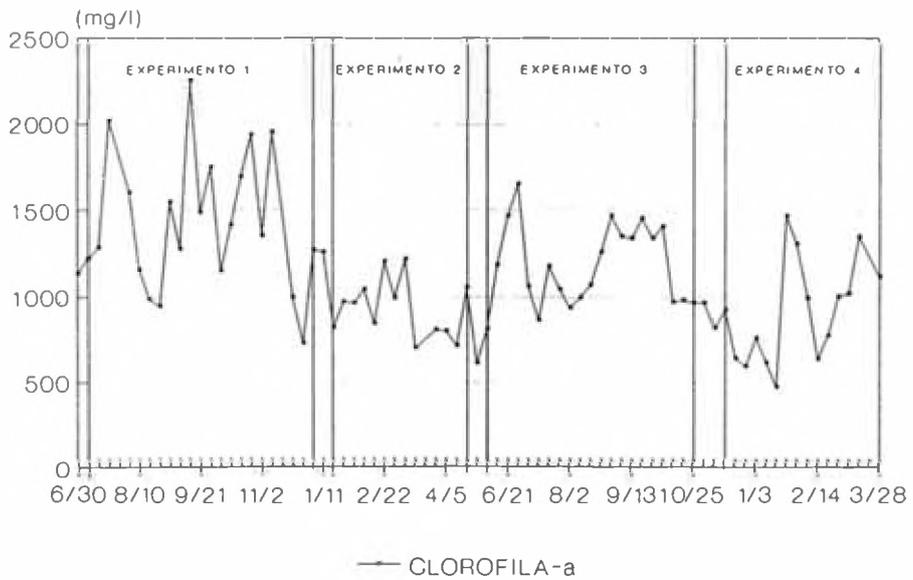
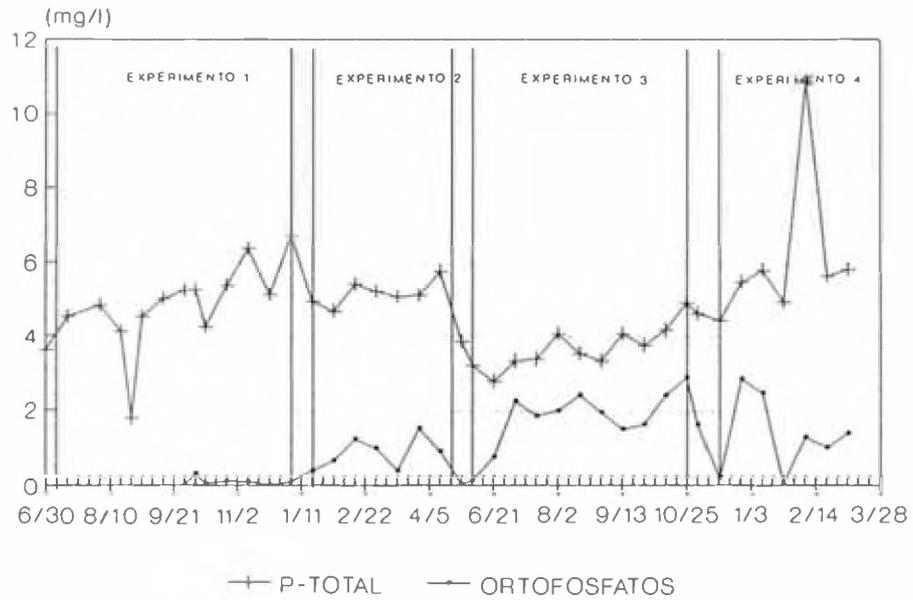
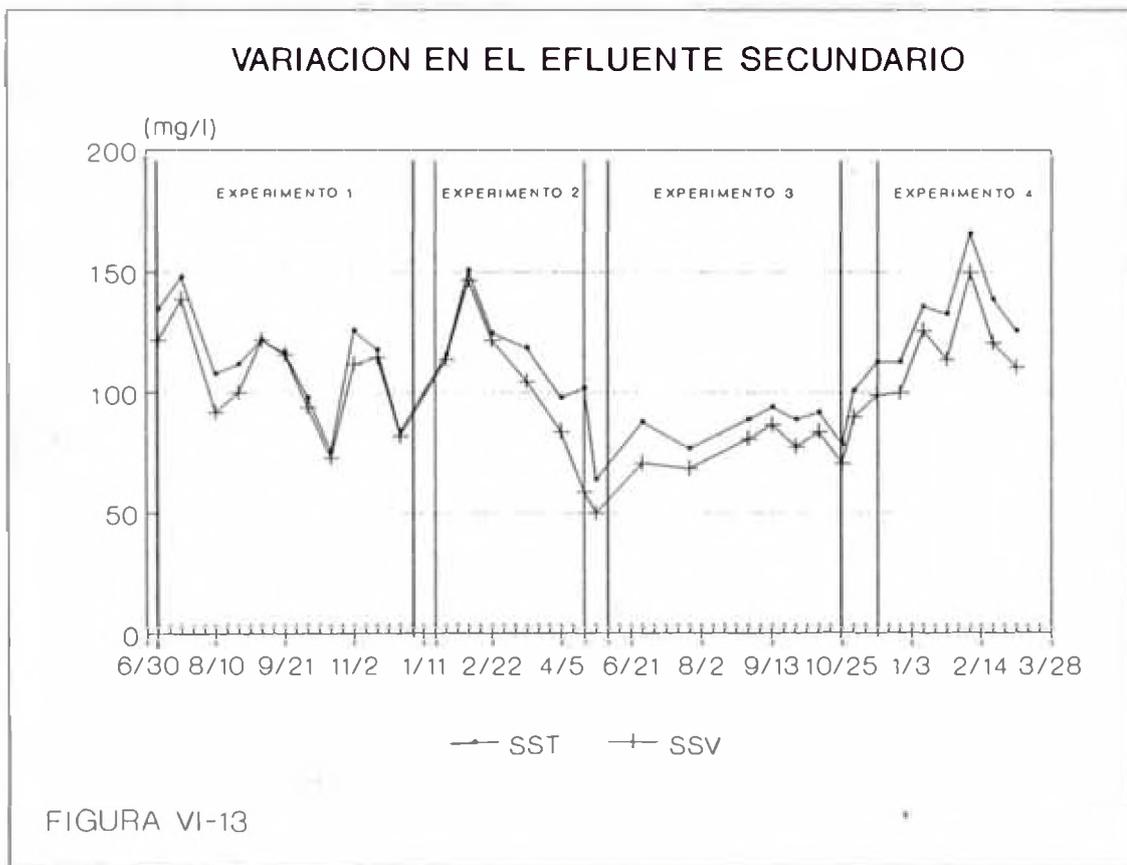


FIGURA VI-12



VARIACION EN EL EFLUENTE TERCIARIO

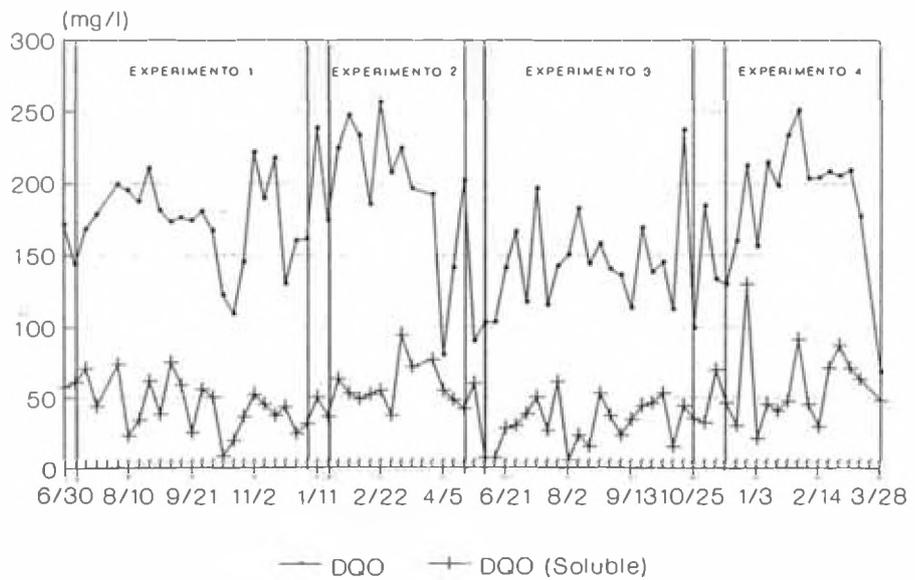
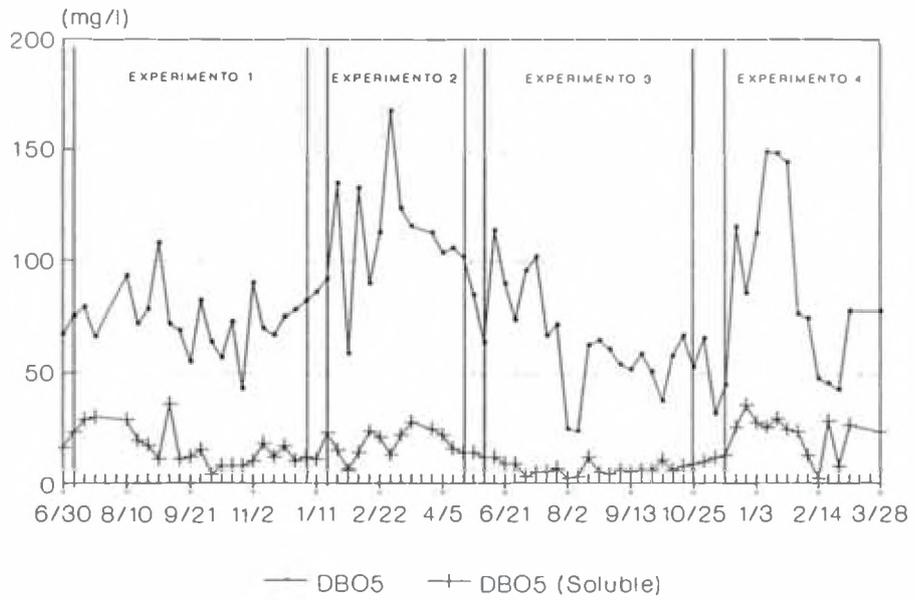


FIGURA VI-14

VARIACION EN EL EFLUENTE TERCIARIO

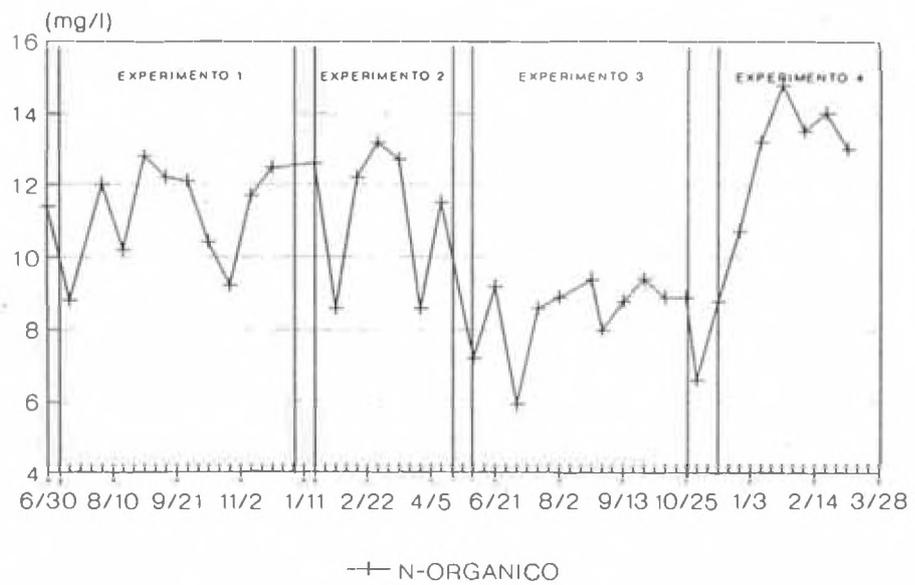
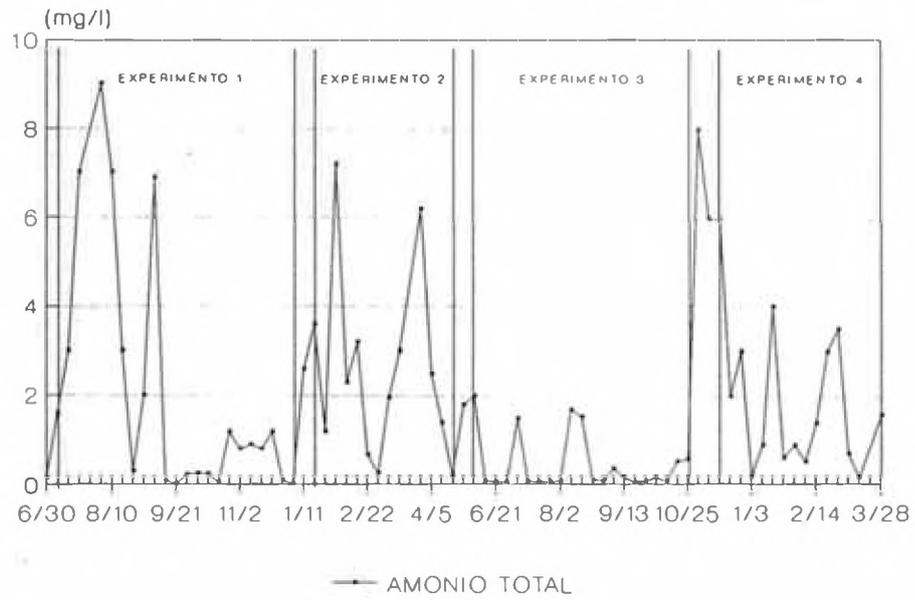


FIGURA VI-15

VARIACION EN EL EFLUENTE Terciario

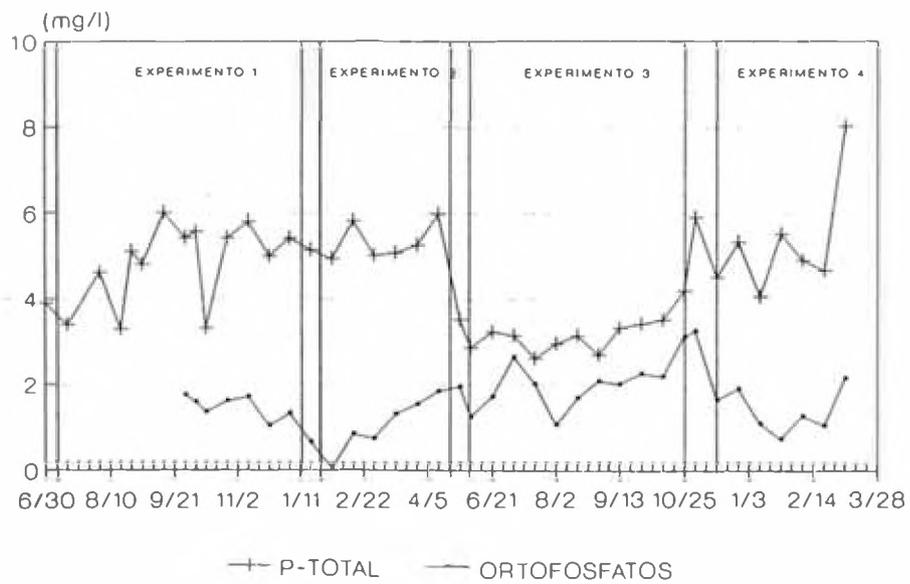
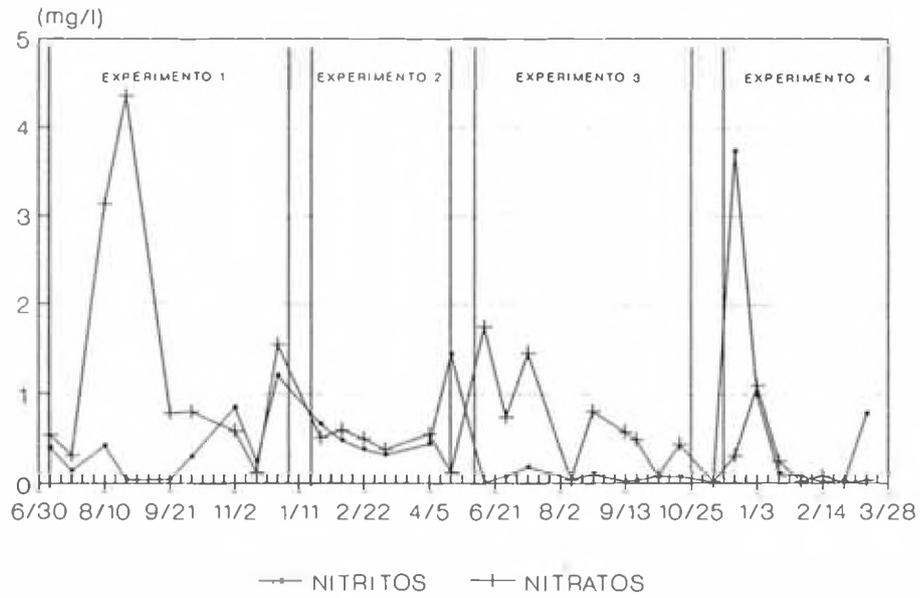


FIGURA VI-16

VARIACION EN EL EFLUENTE TERCIARIO

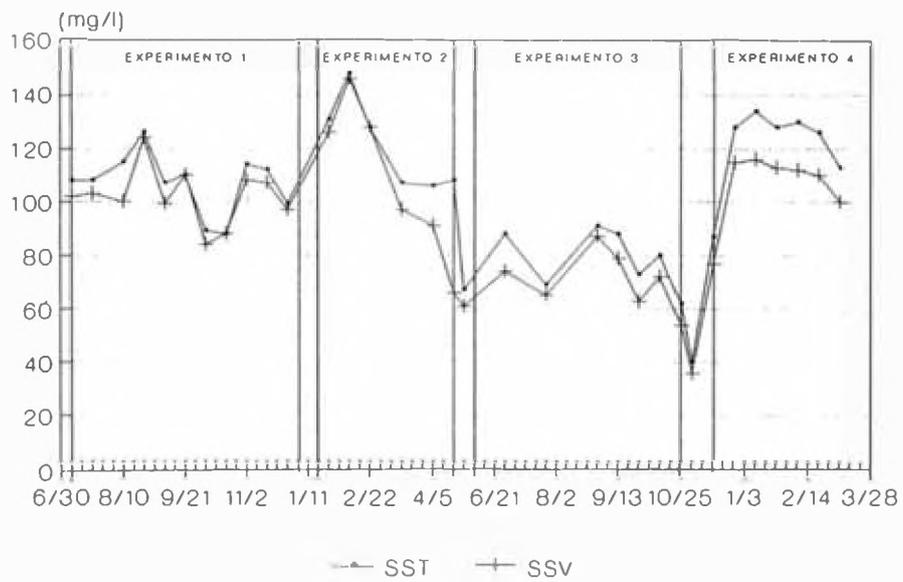
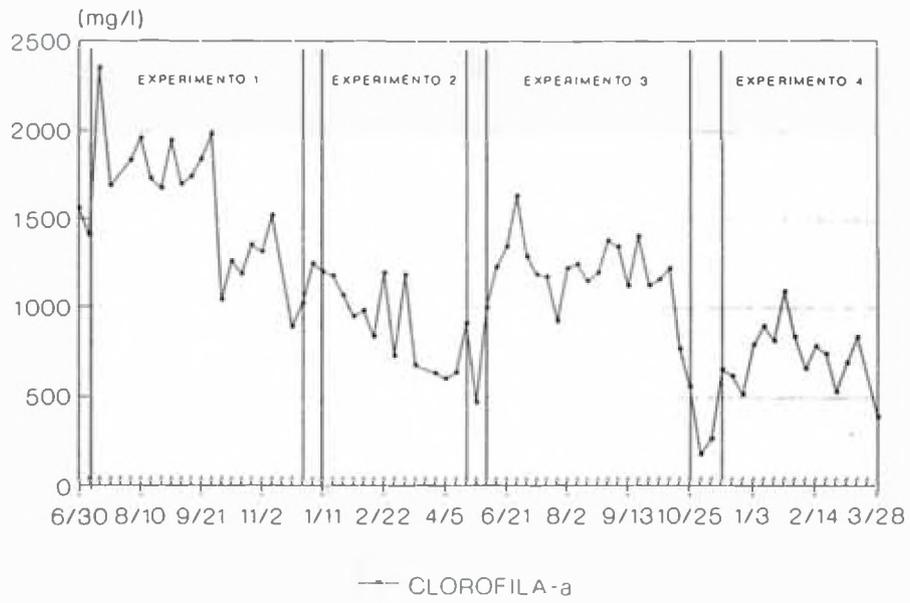


FIGURA VI-17

SISTEMA DE LAGUNAS DE ESTABILIZACION VARIACION DE LA TEMPERATURA DEL AGUA

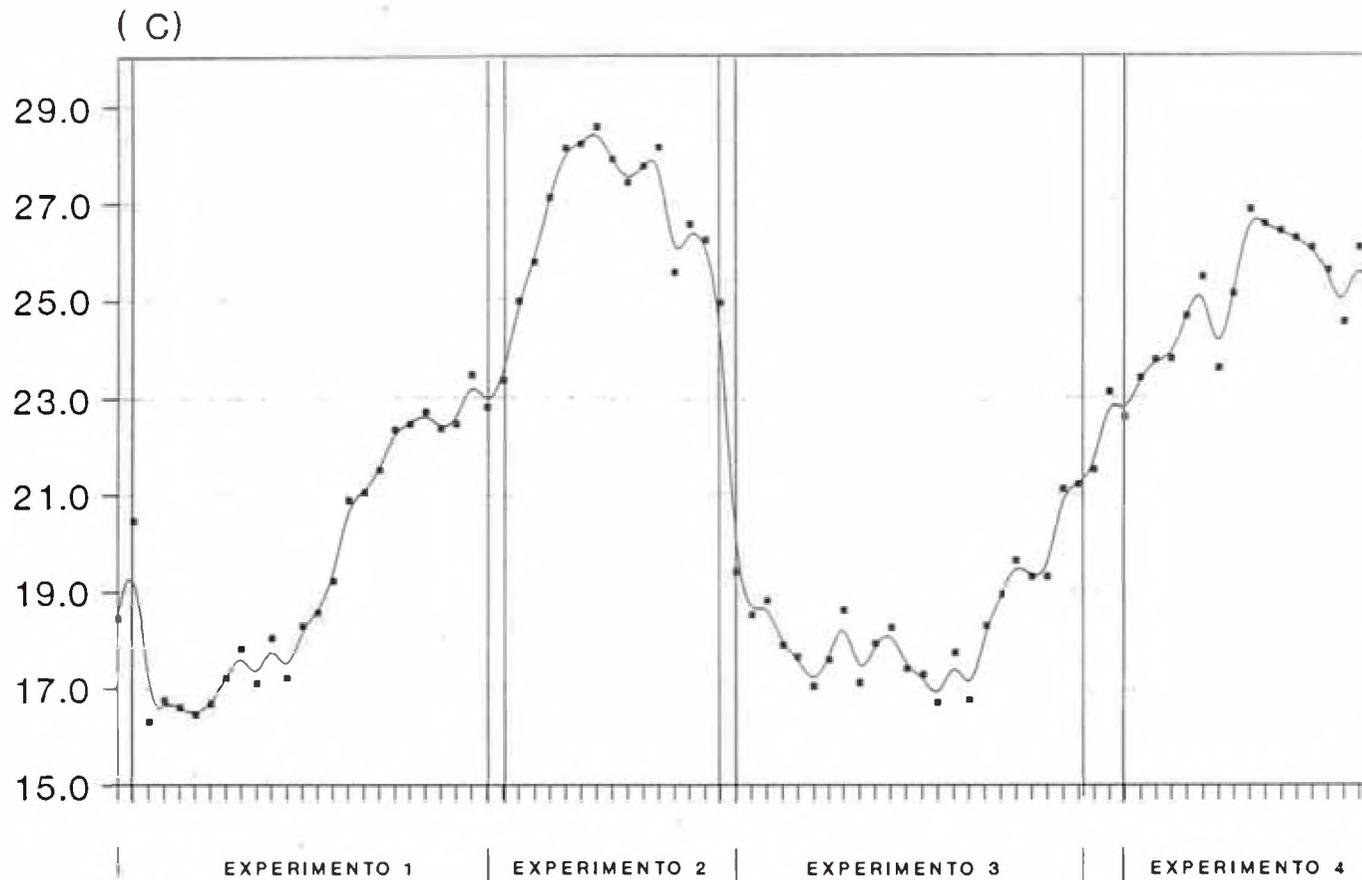


FIGURA VI-18

SISTEMA DE LAGUNAS DE ESTABILIZACION REMOCION DE COLIFORMES FECALES

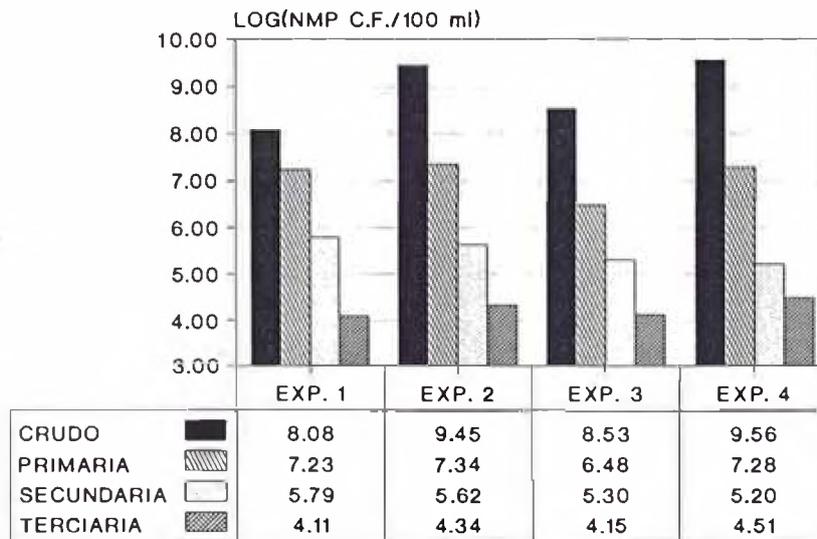
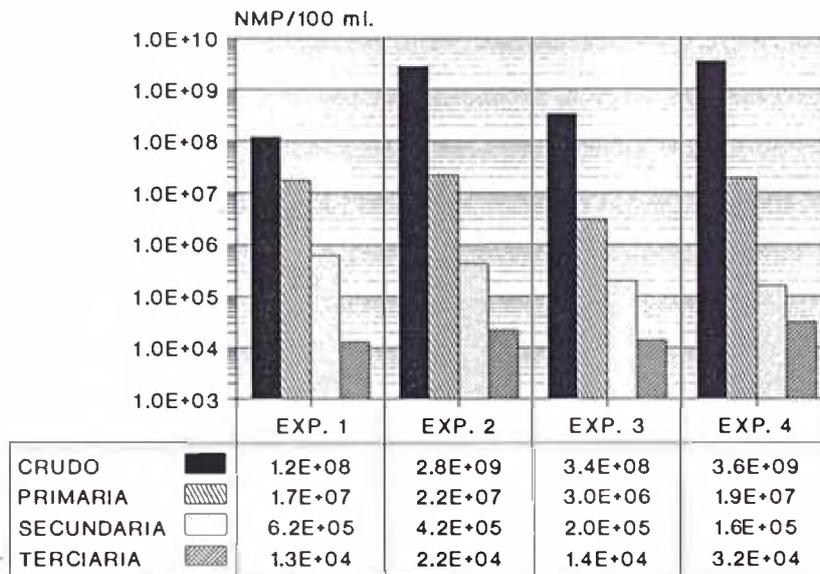


FIGURA VI-19

SISTEMA DE LAGUNAS DE ESTABILIZACION VARIACION DE COLIFORMES FECALES

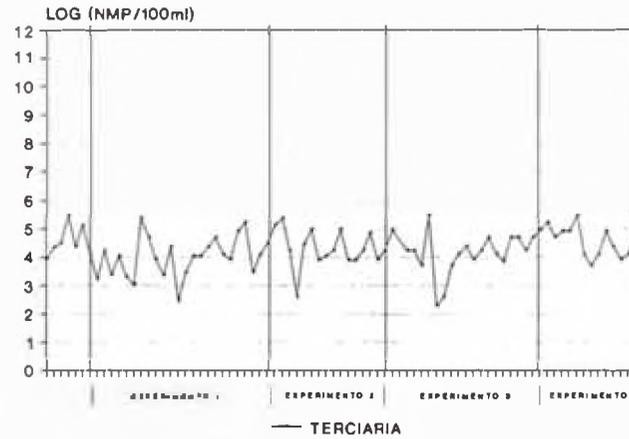
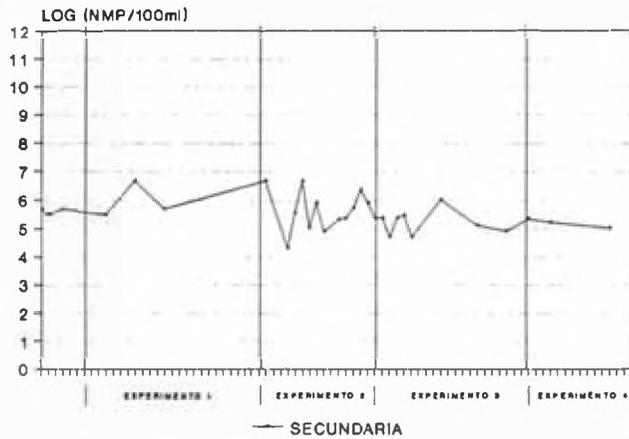
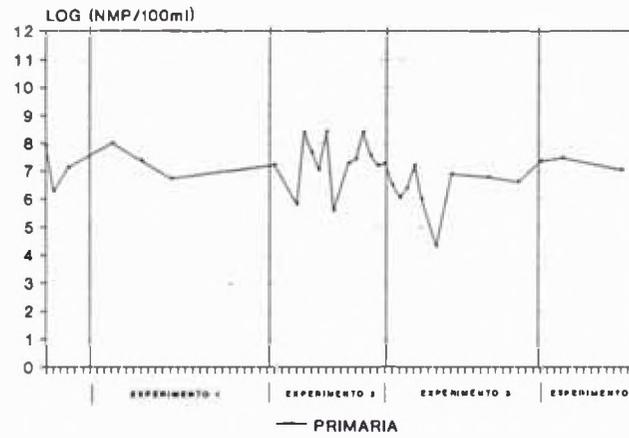
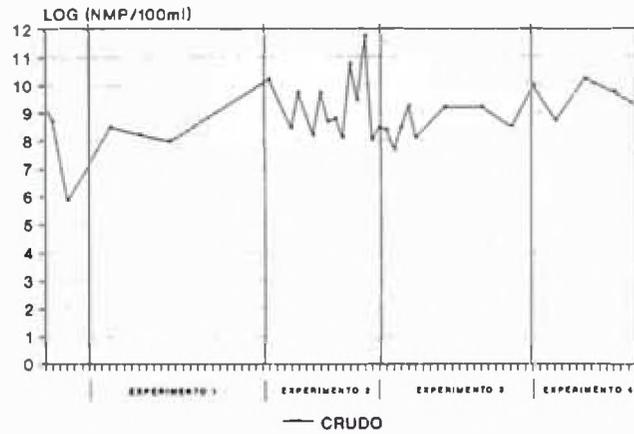


FIGURA VI-20

INCIDENCIA DE SALMONELLA EFLUENTE TERCIARIO

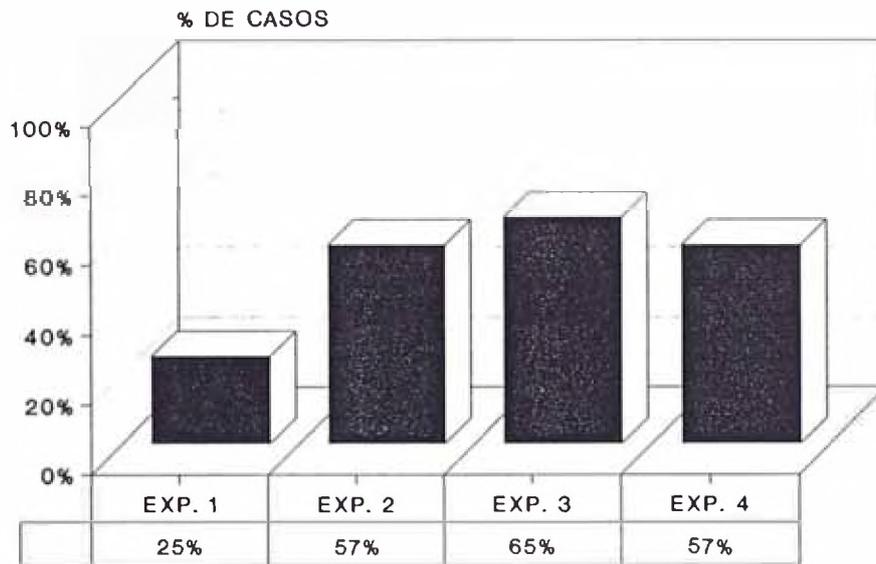


FIGURA VI-21

COLIFAGOS EFLUENTE TERCIARIO

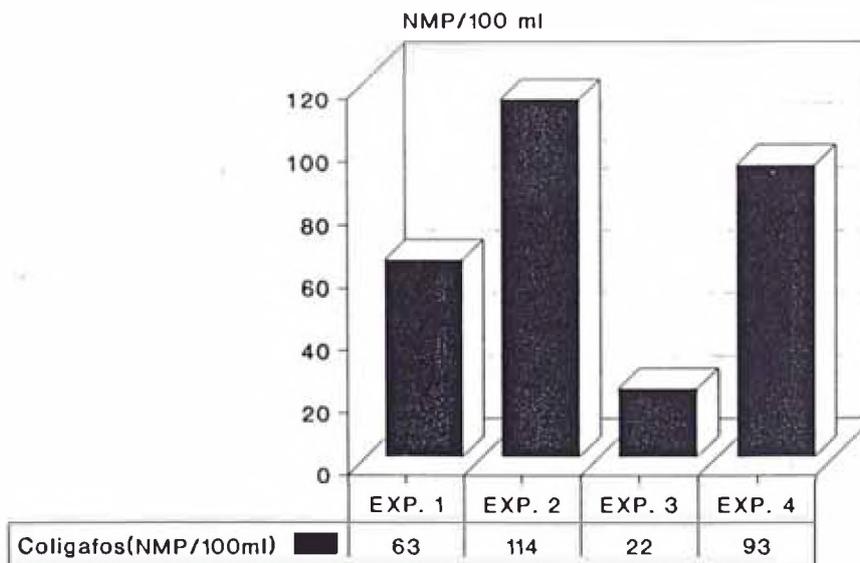


FIGURA VI-22

VII. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

7.1 Cargas hidráulicas

Las variaciones bruscas de caudal entre experimentos, se deben a que este ha estado definido en función de la calidad bacteriológica, en términos de Coliformes fecales, del efluente terciario a ser utilizado en acuicultura. En el entendido que satisfaciendo esta condición, los demás requerimientos (v.gr. amonio total, O.D., nutrientes) estaban ampliamente satisfechos y son además niveles impredecibles ya que no se contó con un modelo de comportamiento y/o predicción de tales parámetros, bajo las condiciones del sistema de tratamiento.

Los niveles de Coliforme fecal, establecidos en cada experimento fueron los siguientes :

Experimento 1 : 1×10^3 /100 ml.

Experimento 2, 3 y 4 : 1×10^4 /100 ml.

Para definir el caudal de ingreso en los experimentos 1 y 2, se utilizó el modelo de flujo disperso, con la estimación de las variables: factor de dispersión y tasa de mortalidad neta para coliformes fecales propuesta por Sáenz(1987). Para los otros dos experimentos se modificó este modelo, estimando tasas de mortalidad para cada nivel de tratamiento, según se discute más adelante.

El mayor período de retención nominal, del primer experimento esta asociado a la menor eficiencia de remoción de coliformes en los meses de invierno y al mayor

nivel de exigencia de la eficiencia de remoción, establecido en dicho experimento.

Los períodos de retención nominales, presentados en los experimentos 2 y 3, son los que nos darían una mejor idea de la capacidad de tratamiento del sistema de lagunas utilizado para lograr el objetivo de los mismos niveles de calidad de agua.

En la etapa preliminar al inicio del experimento 4 y durante 5 semanas de iniciado el mismo, se coincidió con la limpieza de lodos de las lagunas primarias. Realizada esta limpieza quedó modificada la tasa de infiltración de las mismas, por lo que a pesar de que este experimento fue realizado en los meses de verano se tiene un mayor período de retención asociado a los mismos requerimientos de calidad de agua de los experimentos 2 y 3.

Basado en la experiencia obtenida con este tipo de operación de lagunas se puede especular acerca de, cuál sería la forma adecuada de operar un sistema de lagunas asociado al uso en acuicultura, u otro uso, en el que se fija un nivel máximo de Coliformes fecales, u otro parámetro indicador, para lo cual se presentarían los siguientes escenarios, entre otros:

- A) **Un sistema tratamiento-reuso, en el que se decida mantener constante la calidad del efluente todo el año y la temperatura del agua varíe drásticamente en forma estacional (Áreas Sub tropicales, caso Lima-San Juan):**

Para este escenario, los caudales de ingreso se aumentarían, reduciendo el

período de retención. en función de la mayor capacidad de remoción cuanto mayor es la temperatura y viceversa.

Este tipo de sistemas requerirían de diseños que contemplen el uso de una batería que trabaje en paralelo que absorba las variaciones del caudal que provocamos al regular el caudal, en el entendido de que el diseño global de la planta de tratamiento, responde a un caudal promedio. Esta batería auxiliar tendría una calidad del efluente variable a lo largo del año y se debe contemplar además que evaluando su grado de eficiencia mínima, esta responda a los objetivos de tratamiento y/o reuso posterior.

Se debe asegurar además, una regulación de caudales adecuada en los períodos de limpieza de lodos, a fin de no perjudicar la calidad requerida.

B) Un sistema de tratamiento-reuso, con la calidad del efluente variable asociado a las variaciones estacionales de la temperatura del agua (Áreas Sub tropicales y tropicales):

El diseño del Sistema tratamiento-reuso debe realizarse en función de la calidad requerida para el uso del efluente y calculada para las condiciones más desfavorables (temperatura promedio del mes más frío). No se regularían caudales, bajo las condiciones de operación normal, y la calidad del efluente mejoraría, respecto al nivel de diseño, con el aumento de temperatura. En el manejo integral del sistema tratamiento-reuso, se puede programar otros usos cuyos requerimientos de calidad sean más estrictos (riego irrestricto, por ejemplo) conforme aumente la

calidad del efluente a lo largo del año. Así mismo para no desmejorar la calidad del efluente durante los períodos de limpieza de lodos, esta actividad debe programarse en los meses de temperaturas altas.

Sea cual fuere el escenario, se hace evidente que es necesario un mayor entendimiento de los fenómenos que gobiernan la eficiencia de remoción de las lagunas de estabilización y que tales conocimientos se traduzcan en modelos de predicción simples y prácticos que sirvan como herramienta adecuada para la operación de sistemas de tratamiento-reuso, sin que esto signifique por cierto, que se desestime un programa de monitoreo y control mínimo. Se debe tomar en consideración que los programas de monitoreo y control, por si solos, no permiten una toma de decisión inmediata, ya que esta debe esperar los tiempos que tomen los ensayos de laboratorio (v.gr. DBO, 5 días; Coliformes fecales, 4 días con el medio lauril triptosa), y por otro lado un cambio en el caudal de ingreso tiene que producir una modificación estable en la calidad de agua del efluente, probablemente, después un tiempo similar al del período de retención real de las lagunas de estabilización.

Se debe mencionar, además, que los modelos de calidad de agua deben estar asociados a un adecuado sub modelo hidráulico, que no solo incorpore el balance hídrico, sino también los tiempos de retención promedio reales. Desafortunadamente en el presente estudio no se realizaron pruebas de trazadores en el sistema de lagunas de estabilización, para poder evaluar el comportamiento hidráulico de cada una de ellas, ya que esta actividad no estuvo dentro de los objetivos del proyecto.

7.2 Carga orgánica y remoción.

La operación de las lagunas primarias, ha estado orientada a mantener estas bajo las características de facultativas, para ello se estimaron las cargas a aplicarse con el modelo propuesto por Yanez (Fórmula N° 1). Sin embargo las variables críticas, más importantes en el uso en acuicultura son los parásitos y bacterias patógenas por lo que, como se mencionó en el punto anterior, el manejo de caudales de ingreso estaba basado en la calidad del efluente terciario en términos de Coliformes fecales.

Los valores promedios de carga de $\text{DBO}_5/\text{ha.día}$, por experimento y durante todo el estudio son las siguientes (Tabla VII-1):

EXPERIMENTO	Carga Superficial Aplicada kg $\text{DBO}_5/\text{ha.día}$		
	Promedio	Mínimo	Máximo
1	304.8	214.3	450.5
2	591.9	390.2	857.4
3	308.6	189.2	434.4
4	478.4	345.4	887.5
Todo el estudio	388.0	189.2	887.5

Tabla VII-1

La eficiencia de remoción promedio de DBO en lagunas primarias ha sido de 84.17%, cifra que esta dentro del rango de los valores reportados por muchos investigadores. (Arthur-1983, Arceivala-1981, Saenz-1985)

La distribución de probabilidad acumulada de la carga superficial se muestra en la Figura VII-1, en ella se puede apreciar que aproximadamente en un 70% de la duración del estudio se han presentado cargas entre 250 a 450 kg DBO₅ /ha.día, rango más amplio al recomendado por Bartone (1985), que es de 250 a 350 kg DBO₅ /ha.día.

Para el análisis de esta diferencia debe tomarse en consideración el marcado cambio que ha experimentado las características del agua residual cruda que ingresa al complejo de lagunas San Juan.

Se muestra en la Tabla VII-2, las variaciones, de los valores promedios, de las características del agua residual cruda, evaluadas en los proyectos de investigación desarrollados por CEPIS, en San Juan. El valor promedio de la DBO₅, en el presente estudio es de 278 mg/l, la distribución de probabilidades acumuladas se muestra en la Figura VII-2.

CARGA SUPERFICIAL DE DBO5 - PRIMARIAS DISTRIBUCION DE PROBABILIDAD ACUMULADA

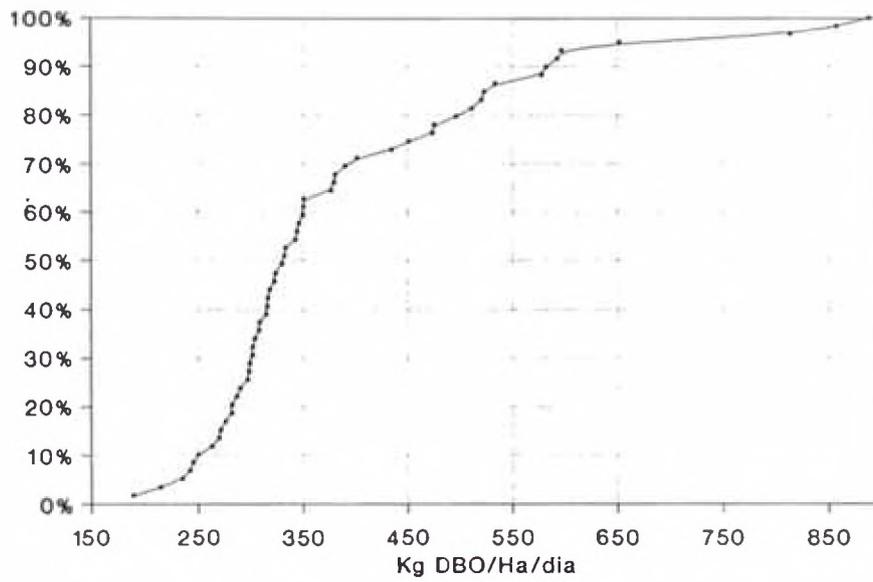


FIGURA VII-1

DBO5 - CRUDO DISTRIBUCION DE FRECUENCIAS ACUMULADAS

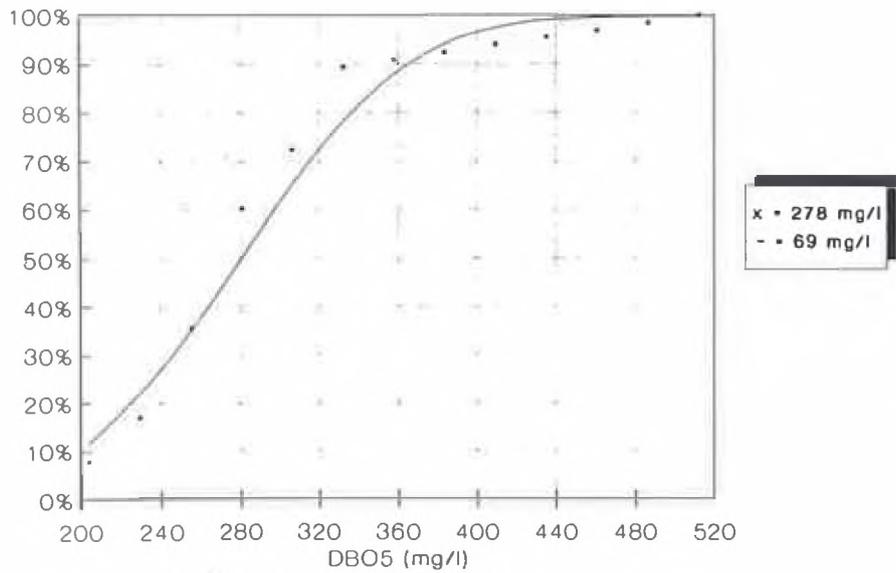


FIGURA VII-2

COMPLEJO DE LAGUNAS SAN JUAN - VARIACION HISTORICA DE LA CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL CRUDA

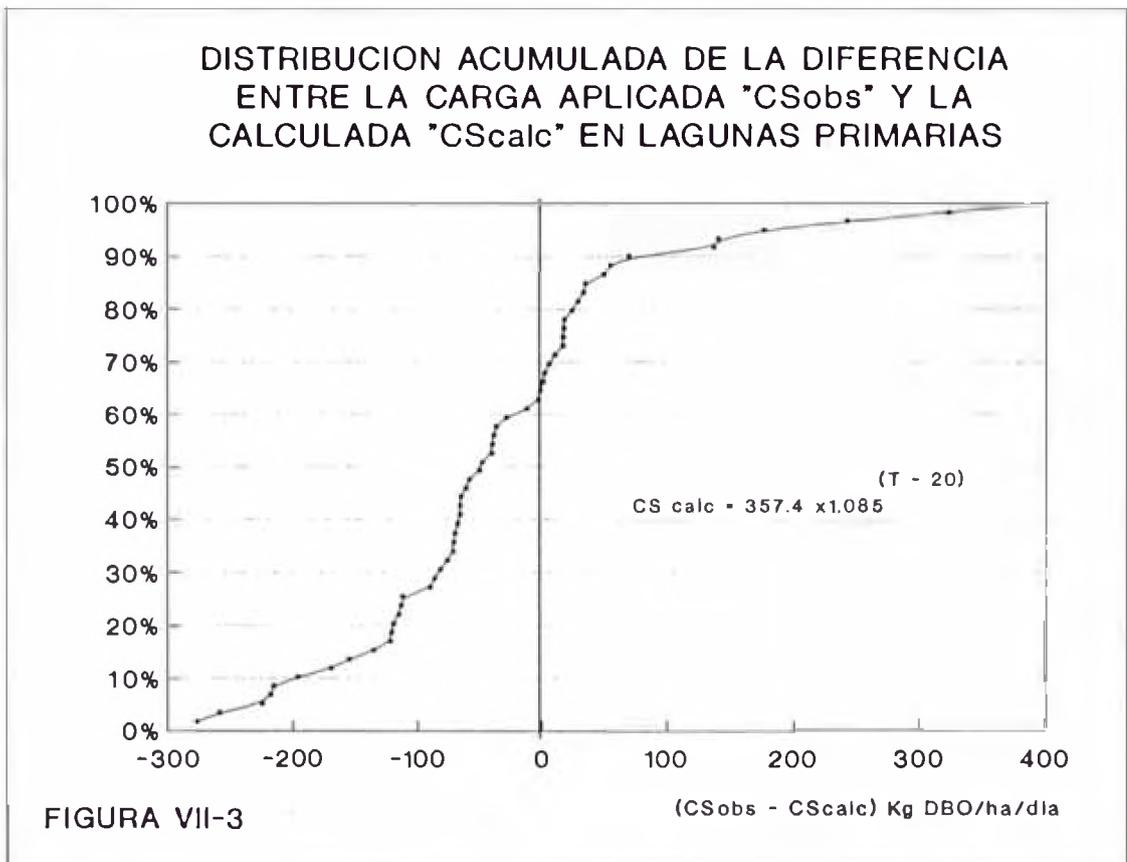
PROYECTO :	EVALUATION OF THE SAN JUAN STABILIZATION PONDS-FASE I			ACUICULTURA SAN JUAN FASES I y II			ACUICULTURA SAN JUAN FASES III y IV		
PERIODO DE ESTUDIO :	1979			1983-1984			1988-1990		
PARAMETRO	PROMEDIO	MAXIMO	MINIMO	PROMEDIO	MAXIMO	MINIMO	PROMEDIO	MAXIMO	MINIMO
DBO5 (TOTAL) (mg/l)	174.30	285.00	93.00	155.73	320.50	36.40	278	500	123
DBO5 (SOLUBLE) (mg/l)							67	158	17
DQO (TOTAL) (mg/l)	332.30	436.00	220.00				562	1079	391
DQO (SOLUBLE) (mg/l)							149	370	36
pH	7.51	7.80	7.20				7.3	8.1	7
P-TOTAL (mg/l)	4.41	6.45	2.87				7.70	14.60	4.73
ORTOFOSFATO (mg/l)	3.07	3.23	2.94	3.10	8.01	0.38	4.02	9.00	2.44
AMONIO TOTAL (mg/l)	29.30	39.60	10.39	31.80	76.71	14.80	47.50	100.00	29.00
N-ORGANICO (mg/l)	17.20	23.10	8.90	18.07	29.60	10.20	19.30	39.40	1.30
ALCALINIDAD (mg/l)	247.60	296.00	181.00	270.50	798.00	162.00	260.00	296.00	223.00
COLIFORME TOTAL (NMP/100ml)	8.79E+07	4.30E+08	1.50E+07	1.26E+08	4.60E+08	2.40E+07	1.17E+09	5.40E+10	7.00E+07
COLIFORME FECAL (NMP/100ml)	6.38E+07	4.60E+08	9.30E+06	4.02E+07	9.30E+07	9.30E+06	8.61E+08	5.40E+10	5.00E+07
C:N	7.1:1						8.4:1		
C:N:P	75.4:10.5:1						73:8.7:1		
Caudal Promedio (l/s)	180			230			250		

Tabla VII-2

La mayor concentración presentada en estos últimos años se debe al incremento de la población de aporte, esta no ha mantenido la dotación de agua potable a lo largo del tiempo, sino que por el contrario con el crecimiento de población, la ha visto disminuida notablemente. Tal situación se agrava por la escasez creciente de agua potable en Lima, que se agudiza en los meses de verano, como es de esperar la DBO_5 en el crudo es mayor en estos meses.

Limitados por la variable: cantidad de agua requerida en los estanques de acuicultura, el sistema de lagunas de estabilización fue sometido, entonces, a mayores cargas superficiales de DBO_5 .

Las cargas superficiales de DBO_5 aplicadas a las lagunas primarias, han estado en algunos momentos por encima de lo establecido con la Fórmula N° 1 (aproximadamente el 30% del tiempo de duración del proyecto, ver Figura VII-3), para las temperaturas del agua presentadas durante el estudio, esta situación fue compensada por los momentos en que se sometió al sistema a niveles por debajo de la carga superficial calculada.



Podemos asegurar entonces que a pesar de una mayor concentración en el crudo y a valores variables de Carga superficial, que puede estar incluso en algunos momentos alrededor de 800 Kg DBO₅/ha.día, como sucedió en el proyecto cuando hubieron cortes prolongados en el suministro de agua potable a la población de aporte al sistema, las lagunas de estabilización pueden soportar tales sobrecargas sin perjudicar la calidad de agua para uso en acuicultura y en general cualquier otro uso, ventaja de operación que solo se presenta en este tipo de sistemas que son, sin lugar a dudas, los compatibles con nuestra realidad socio-económica, geográfica y con nuestras necesidades de reuso.

7.3 Amonio Total

Los niveles de amonio ($\text{NH}_{3(\text{g})} + \text{NH}_4^+$) decrecen progresivamente a través de las lagunas en serie. La fracción de amonio total del efluente primario respecto al crudo siempre estuvo por debajo de 1.0 que indicaría que las sobrecargas eventuales de DBO_5 en las lagunas primarias no ha significado que estas se conviertan en anaerobias, según el criterio utilizado por Yanez (1980,1986), para determinar las cargas superficiales máximas para lagunas facultativas.

Los niveles de amonio total en el efluente terciario tienen un valor promedio de 1.78 mg/l-N durante todo el experimento, los valores promedio son mayores en los experimentos 2 y 4 (meses de verano), según se muestra en la Tabla VII-3. Por otro lado en la Figura VII-4, se puede observar que hubieron picos que oscilaron entre 4 y 8 mg/l-N, estos valores están por debajo de los presentados en las fases I y II del proyecto acuicultura en el efluente terciario, cuyos valores promedio fueron de 11.6 y 8.3 mg/l-N en dos lagunas terciarias en las que se cultivaban peces (Bartone y colaboradores, 1985).

El criterio de operación del sistema de tratamiento en función de la calidad bacteriológica del efluente terciario, ha permitido obtener una excelente calidad desde el punto de vista de amonio total y se debe considerar, además, que esta concentración será reducida a un nivel menor en los estanques de producción acuícola y, por tanto, niveles asociados de $\text{NH}_{3(\text{g})}$ más bajos, debido a los efectos de dilución y asimilación tomando en cuenta que se utiliza solo agua para compensación de evaporación-filtración en tales estanques.

VALORES PROMEDIOS DE LOS PARAMETROS FISICO-QUIMICOS EN EL EFLUENTE TERCIARIO

	DQO		DBO		CHLa (ug/l)	P TOTAL (mg/l)	P-PO4	NH3 NH4	N ORG	NO2	NO3	SST	SSV	ALCA (mgCa CO3/l)
	TOT	SOL	TOT	SOL										
	(mg/l)		(mg/l)											
EXPERIMENTO 1														
PROMEDIOS	172.04	44.57	73.41	16.14	1554.36	4.79	1.48	1.99	11.21	0.40	1.35	106.91	102.00	127.00
DESVIACION ESTANDAR	27.89	17.94	13.27	8.27	357.49	0.90	0.24	2.68	1.29	0.37	1.37	10.70	10.30	1.00
EXPERIMENTO 2														
PROMEDIOS	200.00	55.93	110.07	18.14	913.50	5.31	0.99	2.59	11.34	0.62	0.44	121.33	109.00	128.00
DESVIACION ESTANDAR	44.77	15.41	25.05	6.06	220.50	0.38	0.56	1.97	1.80	0.38	0.16	15.64	26.88	1.63
EXPERIMENTO 3														
PROMEDIOS	140.73	33.36	65.18	7.23	1144.09	3.23	2.01	0.50	8.47	0.07	0.71	77.25	69.38	134.40
DESVIACION ESTANDAR	34.31	16.68	21.99	3.29	261.27	0.41	0.54	0.68	1.02	0.05	0.54	10.32	9.99	9.33
EXPERIMENTO 4														
PROMEDIOS	185.00	56.82	84.19	20.81	667.76	5.37	1.65	2.50	11.83	0.72	0.23	110.75	97.38	150.00
DESVIACION ESTANDAR	43.07	26.89	38.20	9.35	226.88	1.16	0.76	2.27	2.68	1.20	0.35	30.24	26.13	7.12
TODO EL ESTUDIO														
PROMEDIOS	171.03	46.16	80.23	14.88	1113.43	4.54	1.60	1.78	10.55	0.43	0.72	103.27	94.24	135.38
DESVIACION ESTANDAR	42.72	21.79	29.72	8.77	433.64	1.17	0.67	2.21	2.20	0.70	0.91	23.91	23.84	10.91

Tabla VII-3

VARIACION EN EL EFLUENTE TERCIARIO

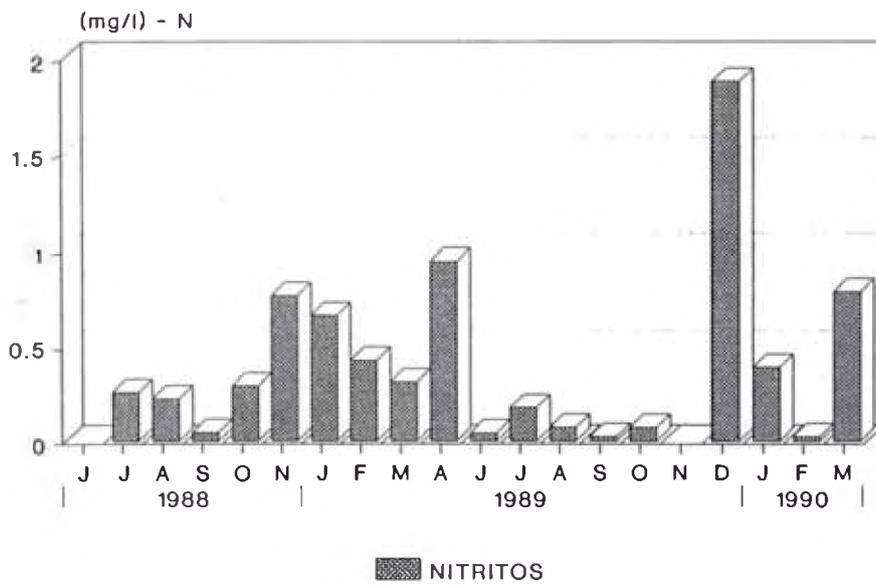
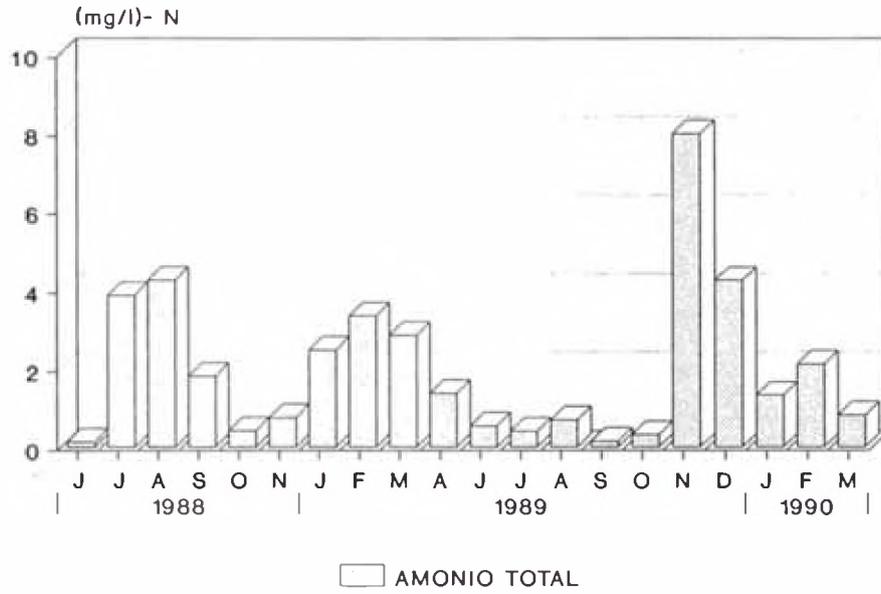


FIGURA VII-4

En el período preliminar del experimento 4, se tomó la decisión de realizar la limpieza de lodos de las lagunas primarias, estas no cuentan con un sistema de desagüe que permitan su vaciado total, por tanto gran parte del volumen de agua de las primarias fue evacuado a la laguna secundaria por sifonamiento y bombeo; problemas en el alquiler de equipo de bombeo y maquinaria pesada para la remoción de lodos y el tiempo de secado de los mismos, provocaron que la limpieza se realice desde inicio de noviembre 1989 a fines de enero 1990.

Las necesidades de agua en los estanques de acuicultura fueron satisfechas inicialmente con el represamiento de la laguna terciaria y posteriormente con la interconexión provisional, al sistema, de la laguna primaria C-1 (que no cuenta con un sistema de medición de caudales); el sistema de tratamiento pudo ser reestablecido a su configuración normal en la última semana de enero de 1990 (semana 6 del experimento 4).

Esta situación anómala, en el sistema de tratamiento, tuvo niveles no controlados, ya que desafortunadamente no se realizó controles de calidad en el mes de noviembre y no se pudo calcular la magnitud de las cargas orgánicas provocadas por la limpieza de lagunas, en los eventos descritos anteriormente. Fue finalmente, el efluente terciario correspondiente a este mes el que se utilizó para el llenado inicial de los estanques de acuicultura, a partir del 24/11/89.

Bajo estas condiciones se realizó la siembra en los estanques el día 3/12/89 y en los dos días posteriores se presentó una mortalidad de peces del orden del 37% (tal nivel de mortalidad obligó a reformular el experimento); el nivel de amonio total el

29/11/89 fue de 8.0 mg/l, pero un solo valor puntual no puede cuantificar cuál fue la magnitud exacta y sus variaciones horarias durante el llenado de estanques, en la siembra y durante los días en que se presentó la mortalidad. Sin embargo, se distinguieron características singulares en la laguna terciaria, a saber, presencia de Cladoceros (principalmente *Daphnia* y *Moina*), Copepodos (*Cyclops*) y Rotíferos (*Brachionus*) que depredaban las algas (en el mes de noviembre se reportó el valor mínimo, de todo el período de estudio, de Clorofila-a en el efluente terciario, 178 $\mu\text{g/l}$), luego la aparición de "blooms" de algas. Este fenómeno se repitió en ciclos cada vez más atenuados.

Por otro lado, otra característica especial presentada, asociada al nivel alto de amonio total en el mes de noviembre de 1989, es el valor máximo de nitritos reportado durante todo el experimento, como se muestra en la Figura VII-4. El mayor nivel de Amonio total probablemente este asociado a la mortalidad de organismos predatorios de algas y/o a sus productos de excreción, consecuentemente, el nivel alto de nitritos posterior, se debería a la disminución del potencial de nitrificación, a causa de el consumo de O_2 por respiración y a la baja concentración de algas.

El valor de amonio total, de 2 mg/l-N, considerado por Bartone y colaboradores (1985), como el nivel que haga posible el crecimiento satisfactorio de tilapia, pudo ser logrado en todo momento bajo condiciones normales de operación del sistema de tratamiento, inclusive en períodos de limpieza de lagunas, pero el período de llenado inicial de estanques es un momento crítico de operación que debe ser manejado con mayor cuidado.

Basado en la experiencia de San Juan, preferentemente el llenado de estanques de acuicultura no debe coincidir con el período de limpieza de lagunas de estabilización a menos que se tomen las medidas de seguridad adecuadas, como es el uso de efluentes de otra batería de lagunas que se encuentren en paralelo, fuentes de abastecimiento de agua alternativas, entre otras posibilidades a estudiar. Por otro lado el diseño de sistemas tratamiento-reuso de efluentes, deberá superar las dificultades de operación de limpieza, presentadas en San Juan.

7.4 Parásitos y virus

En las Figuras VII-5 y VII-6 se puede observar la remoción total de helmintos y protozoos entéricos a nivel de la laguna primaria en la mayoría de los casos, los períodos de retención promedio de las lagunas primarias variaron entre 15.7 y 7.9 días, en los experimentos 1 y 2 respectivamente y es en estos experimentos en que se determinó alguna presencia de parásitos en el efluente primario, la razón de tal presencia esta asociada probablemente, a la menor temperatura del agua en el experimento 1 y por tanto a una menor eficiencia del mecanismo de sedimentación de partículas y en el caso del experimento 2, evidentemente la presencia de algunos parásitos en el efluente primario esta asociado al menor tiempo de retención nominal, Shuval y colaboradores (1986) sugieren períodos de retención mayores de 10 días para la remoción total de parásitos; Yanez (1984) recomienda el uso de lagunas primarias y secundarias con un período de retención nominal total de 20 días.

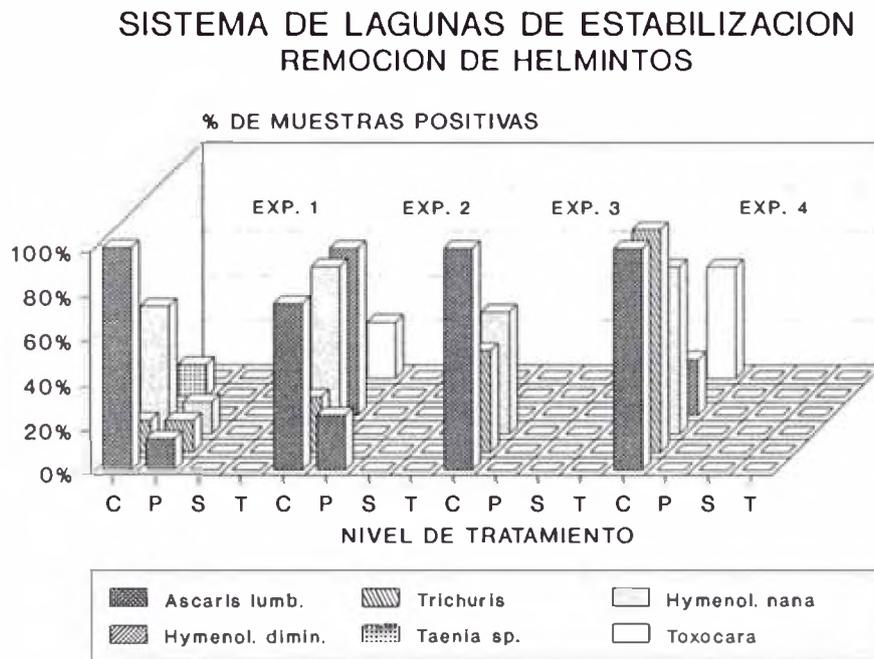


FIGURA VII-5

C : CRUDO P : PRIMARIA
S : SECUNDARIA T : TERCIARIA

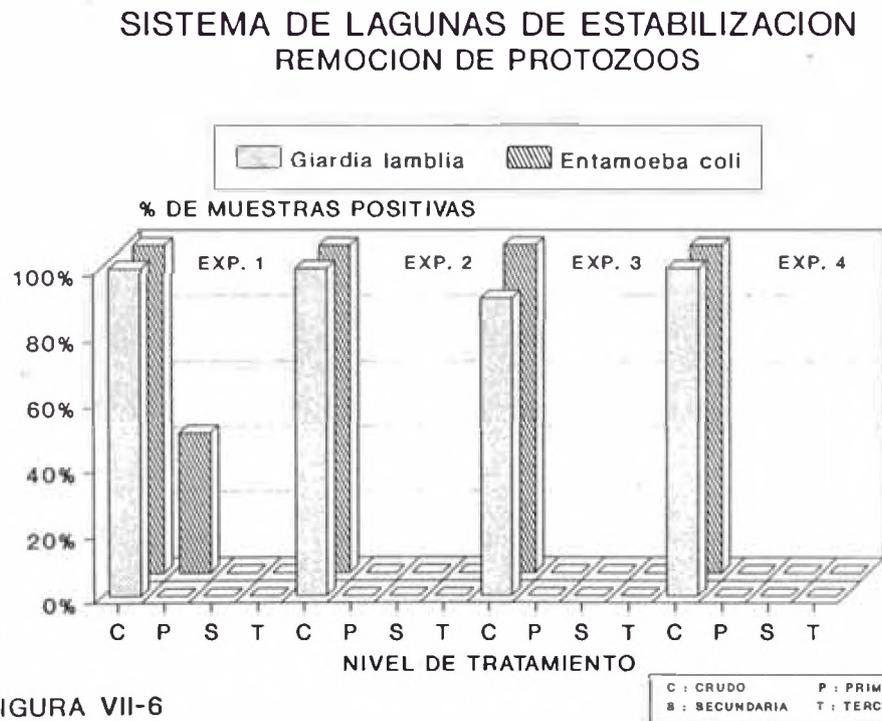


FIGURA VII-6

C : CRUDO P : PRIMARIA
S : SECUNDARIA T : TERCIARIA

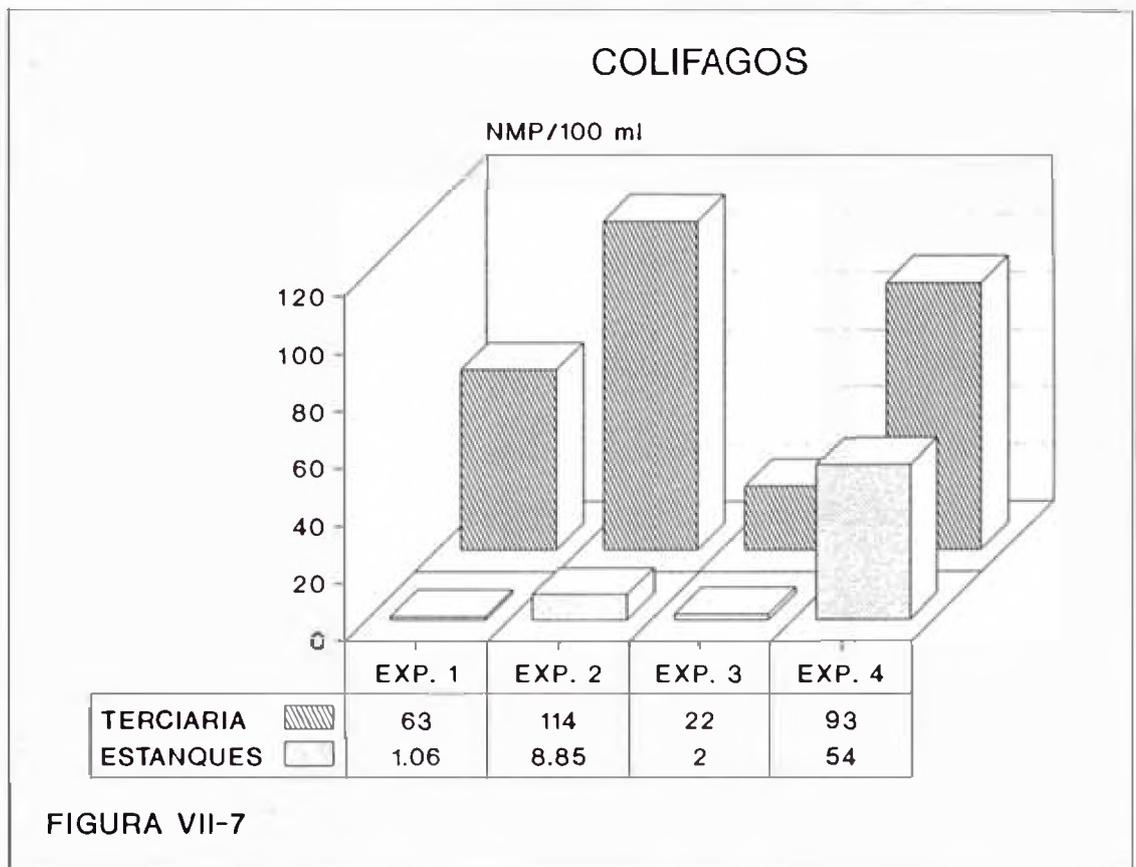
El sistema de tratamiento cuenta con una laguna secundaria que no guarda relación con los valores de período de retención recomendados, ya que se trata de la laguna más grande del sistema y con períodos de retención nominales promedio que han variado entre 16.5 y 36.2 días; por tal motivo no se han detectado parásitos y protozoos entéricos en el efluente secundario. El sistema cuenta además con "baffleds" en los dispositivos de salida de cada laguna, según recomendaciones de Yanez (1983), para prevenir la posibilidad del paso de parásitos como partículas flotantes, o resuspendidas.

Los diseños de sistemas de tratamiento-reuso acuícola, definitivamente asegurarán la remoción de parásitos y protozoos entéricos, ya que estos estarán basados en términos de remoción de Coliformes fecales, que es la variable crítica del diseño, y que define períodos de retención mayores que los requeridos para la remoción total de parásitos y protozoos entéricos.

En cuanto a virus, el sistema ha demostrado su gran eficiencia de remoción, ya que en el efluente terciario no se ha detectado la presencia de enterovirus, desafortunadamente no se ha podido establecer el período de retención asociado a esta remoción total por no haber realizado un seguimiento en todo el sistema, ya que esta evaluación no estaba considerada dentro de los objetivos del proyecto.

Los niveles detectados de Colifagos en el efluente terciario han estado, en promedio, por debajo de 100 NMP/100 ml y tales niveles se reducen aun más en los estanques acuícolas como podrá apreciarse en la Figura VII-7. Tales valores están por debajo de los reportados por Edwards y colaboradores (1984), en estanques

acuícolas alimentados con mezclas de orina y excretas ("Septage fed fish ponds"), lo que demuestra otra de las ventajas de utilizar sistemas de lagunas de estabilización, desde el punto de vista de este indicador de contaminación fecal.



7.5 Bacterias

El indicador principal utilizado, para el monitoreo de la calidad bacteriológica son los Coliformes fecales, las bondades de uso de este ya han sido identificadas y comprobadas, en otras experiencias desarrolladas en San Juan, como indicador de remoción, en lagunas de estabilización, de bacterias patógenas (Yanez y colaboradores, 1980; Yanez, 1983) y de remoción de parásitos (Bartone y colaboradores, 1985). En tal sentido, como es de suponer, los modelos de remoción de bacterias existentes, estén en su mayoría orientados a Coliformes fecales.

Por otro lado, los criterios de calidad de agua para el uso de aguas residuales tratadas en acuicultura están en términos de parásitos y Coliformes fecales:

* Bartone, 1986

Protozoos y helmintos ausentes

Coliforme fecal < 10,000/100 ml

* OMS, 1989

Ausencia de huevos viables de trematodes

Coliformes fecales < 1000 - 10000 /100 ml (en el efluente a ser utilizado)

Coliformes fecales, media geométrica < 1000/100 ml (en los estanques acuícolas)

Los promedios geométricos de coliformes fecales, por lagunas y por experimento y la remoción acumulada se muestran en la Tabla VII-4.

En la Tabla VII-5 se muestran los promedios geométricos de Coliformes fecales del efluente terciario y en los estanques, se incluye además la tasa de aporte de agua a los estanques de acuicultura que está directamente relacionada a la tasa de infiltración- evaporación.

La calidad del efluente terciario, es mejorada en los estanques de acuicultura ya que estos se encuentran en "batch", y reciben el efluente terciario para el llenado inicial y, posteriormente, para compensar las pérdidas por infiltración- evaporación. Las distribuciones de probabilidad acumulada de Coliformes fecales en el efluente terciario y en los estanques se muestran en las Figuras: VII-8, VII-9 y VII-10.

Promedios geométricos y remoción acumulada de coliformes fecales en el sistema de lagunas de estabilización

LAGUNA	Coliformes fecales (NMP/100 ml)	Remoción acumulada %
EXPERIMENTO 1 (Del 4 de julio al 5 de diciembre de 1988):		
CRUDO	1.20E+08	
PRIMARIAS	1.70E+07	85.8333
SECUNDARIA	6.20E+05	99.4833
TERCIARIA	1.30E+04	99.9892
EXPERIMENTO 2 (Del 9 de enero al 23 de abril de 1989):		
CRUDO	2.80E+09	
PRIMARIAS	2.20E+07	99.2143
SECUNDARIA	4.20E+05	99.9850
TERCIARIA	2.20E+04	99.9992
EXPERIMENTO 3 (Del 5 de junio al 6 de noviembre de 1989):		
CRUDO	3.40E+08	
PRIMARIAS	3.00E+06	99.1176
SECUNDARIA	2.00E+05	99.9412
TERCIARIA	1.40E+04	99.9959
EXPERIMENTO 4 (Del 18 de diciembre de 1989 al 9 de abril de 1990):		
CRUDO	3.60E+09	
PRIMARIAS	1.90E+07	99.4722
SECUNDARIA	1.60E+05	99.9956
TERCIARIA	3.20E+04	99.9991

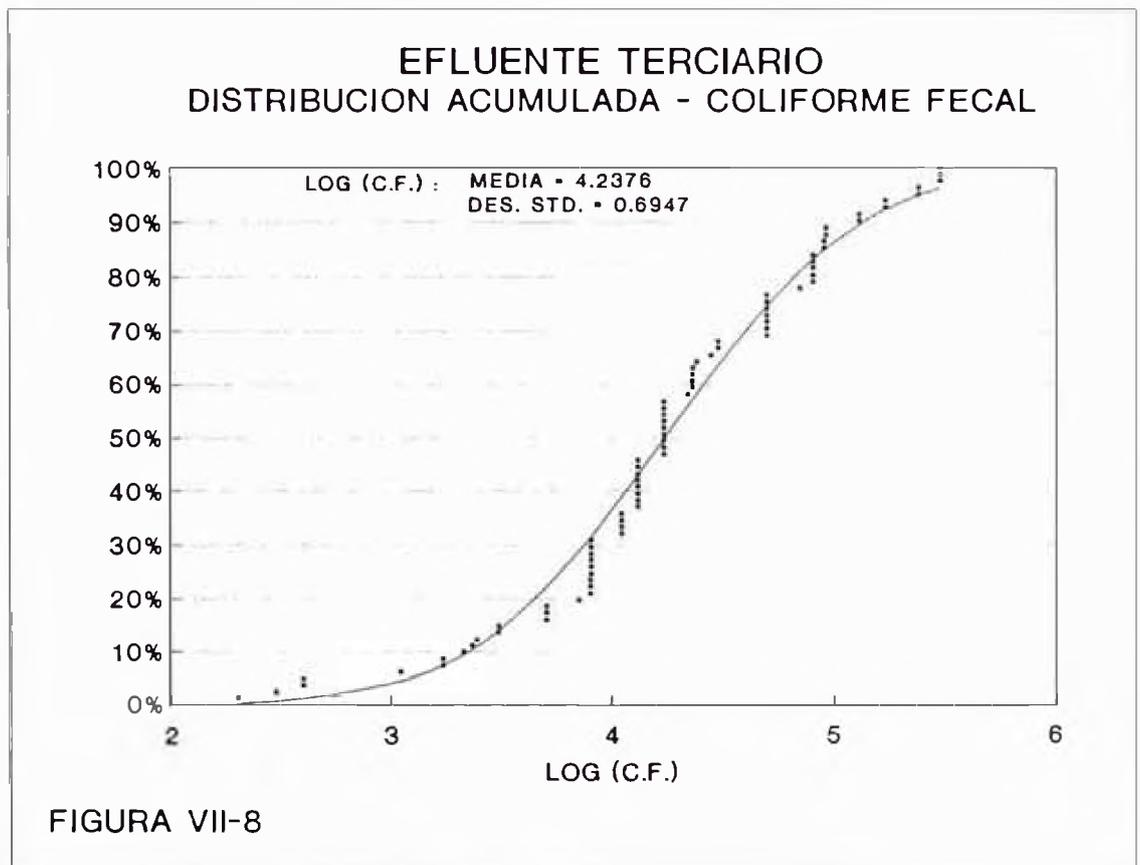
Tabla VII-4

Promedios geométricos de coliformes fecales en el efluente terciarios y en los estanques de acuicultura

EXPERIMENTO	Coliformes fecales (NMP/100 ml)		TASA DIARIA DE APORTE DE AGUA (%) *
	EFLUENTE	ESTANQUES	
1	1.30E+04	1.00E+02	1.6
2	2.20E+04	2.80E+03	2.2
3	1.40E+04	3.30E+03	2.9
4	3.20E+04	1.10E+03	4.4

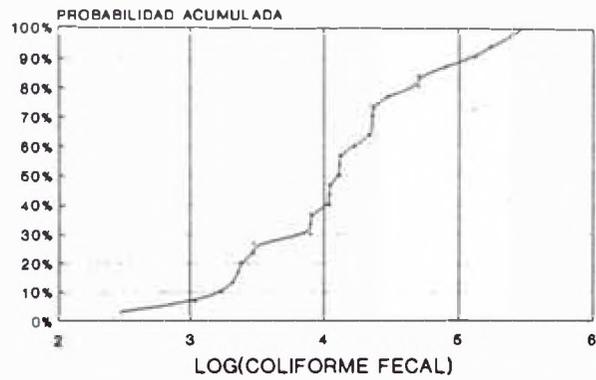
(*) % del volumen de estanques

Tabla VII-5

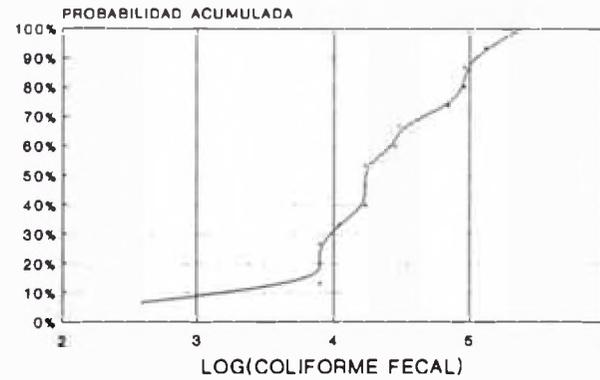


DISTRIBUCION DE PROBABILIDAD ACUMULADA DE COLIFORME FECAL
 - EFLUENTE TERCIARIO -

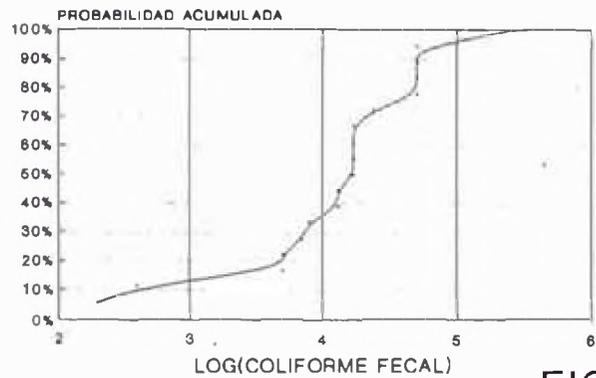
EXPERIMENTO 1



EXPERIMENTO 2



EXPERIMENTO 3



EXPERIMENTO 4

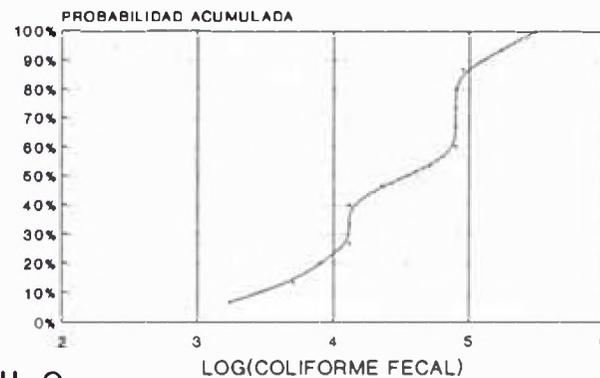
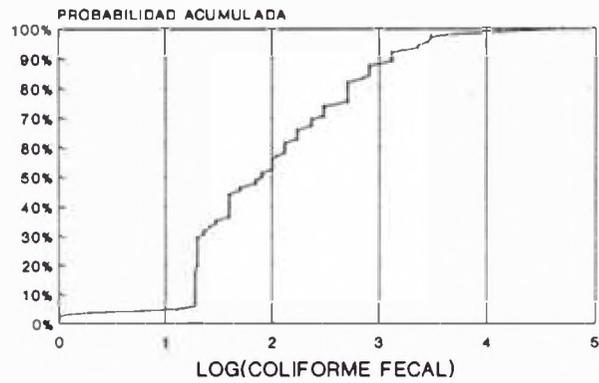


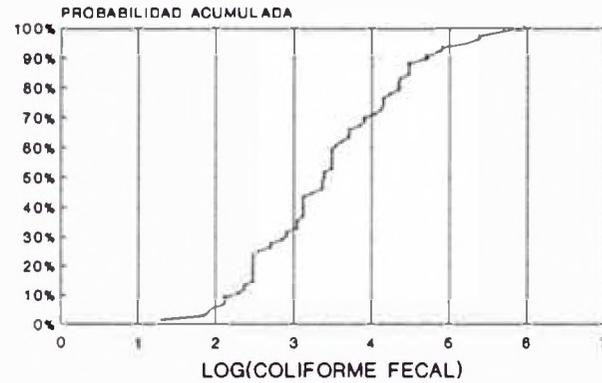
FIGURA VII-9

DISTRIBUCION DE PROBABILIDAD ACUMULADA DE COLIFORME FECAL
- ESTANQUES EXPERIMENTALES -

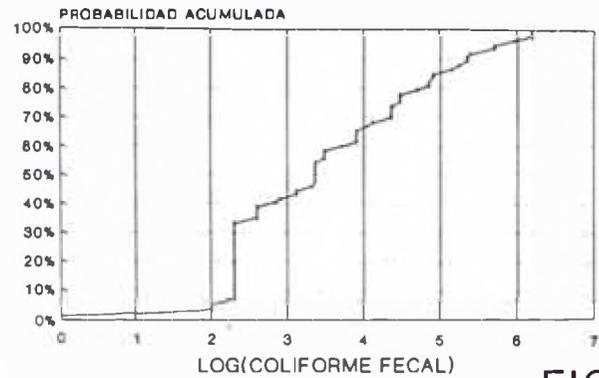
EXPERIMENTO 1



EXPERIMENTO 2



EXPERIMENTO 3



EXPERIMENTO 4

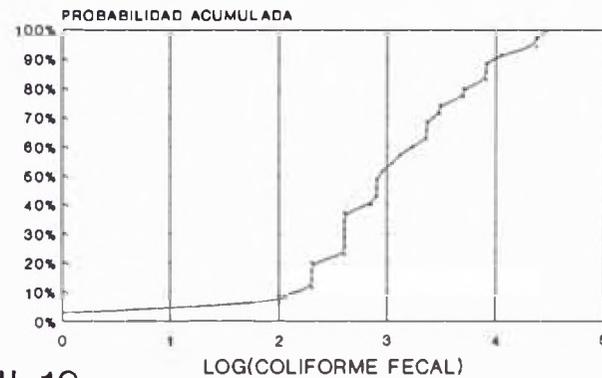


FIGURA VII-10

La mayor diferencia entre la calidad del efluente terciario y los estanques de acuicultura sucedió en el experimento 1 y ha sido consecuencia de un menor aporte promedio de agua en este experimento respecto al tercero, ambos ejecutados en meses de invierno; en general podemos esperar que la calidad del efluente terciario sea mejorada en un ciclo logarítmico en los estanques de acuicultura como promedio; sin embargo debe tomarse en consideración que en estos, se pueden presentar valores pico que aparecen no solo por una disminución de la eficiencia de remoción del sistema sino también por que la operación de aporte de agua se realiza en tiempos muy cortos.

Estos aspectos deberán tomarse en cuenta en las operaciones de llenado y relleno de estanques de acuicultura, será deseable que los períodos de aporte de agua a estanques, además de guardar estrecha relación con las pérdidas por evaporación-infiltración, se realicen en tiempos prolongados a fin de que la carga de bacterias tenga un efecto atenuado y no provoque picos indeseables.

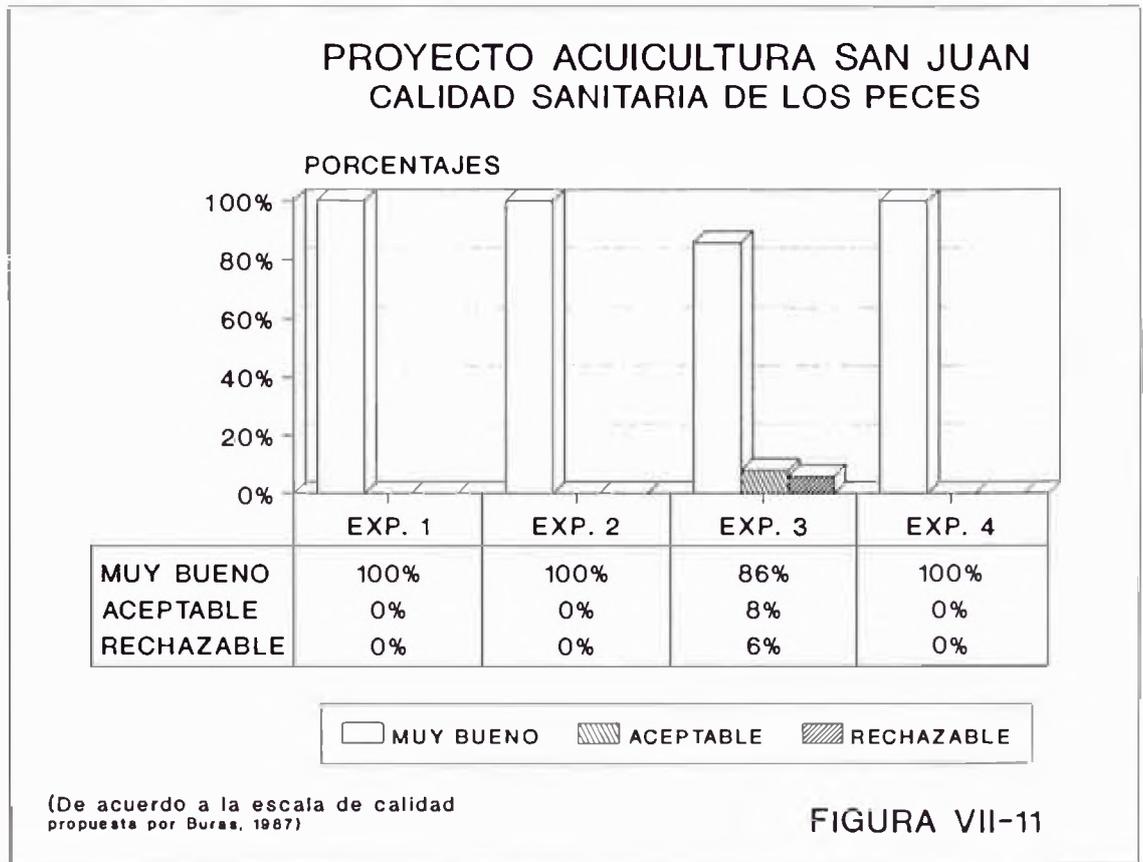
Los resultados de calidad de peces que se muestran en la Figura VII-11, indican la calificación obtenida por las muestras de peces tomadas en las cosechas de cada experimento, las categorías indicadas son las recomendadas por Buras (1987) :

Calificación del pez	Concentración total de bacterias en el músculo (bacteria/g)
MUY BUENO	0 - 10
ACEPTABLE	10 - 50
RECHAZABLE	> 50

Tabla VII-6

Como puede apreciarse en la Figura VII-11, solo en el experimento 3 hubieron peces calificados como rechazables (6%) y aceptables (8%), si analizamos la distribución de probabilidad acumulada de coliformes fecales en los estanques en este experimento (Figura VII-10), notamos que en aproximadamente un 35% del tiempo los peces estuvieron expuestos a un nivel superior a $1 \times 10^4/100$ ml y en un 15% por encima de $1 \times 10^5/100$ ml y a un pico superior a $1 \times 10^6/100$ ml (hay que considerar, además, que es un experimento de invierno y que su duración fue de 154 días); por otro lado, en el experimento 2 (experimento de verano con 112 días de duración), también estuvieron expuestos en aproximadamente 30% del tiempo a niveles superiores a $1 \times 10^4/100$ ml, sin embargo, todos los peces tienen la calificación de "muy bueno".

Desde el punto de vista de análisis de riesgo, la probabilidad asociada al riesgo de contaminación de peces, por invasión de bacterias al músculo es función, principalmente, del nivel y tiempo de exposición (notase los mayores niveles y mayores tiempos de exposición del experimento 3) y de la susceptibilidad del pez, que aparentemente es mayor a menor temperatura.



Por todo esto, a fin de hacer mínimo el nivel de riesgo de contaminación de la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), por bacterias en el músculo, y permitir por tanto su consumo humano directo, el nivel máximo de coliformes fecales en los estanques acuícolas debe ser de $1 \times 10^4/100\text{ml}$ y esperando una reducción de un ciclo logarítmico del efluente del sistema de tratamiento, al alimentar en forma adecuada a estos estanques y continuar el proceso de remoción en un reactor en batch, el nivel máximo de Coliformes fecales en el efluente, a ser usado con fines acuícolas debe ser de $1 \times 10^5/100\text{ml}$. (valores que están por encima de los recomendados por Bartone(1986) y OMS (1989)).

En cuanto se refiere a la Salmonella, este no ha sido detectado en el efluente terciario con el método del Número Más Probable (NMP), al efectuar la técnica cualitativa de ausencia/presencia a través de concentración si se ha detectado presencia, sin embargo es de esperar que los niveles asociados sean muy bajos (tan bajos que no son detectables por NMP). Por otro lado, al realizar la serotipificación, las cepas han sido de origen humano, este hecho no debe ser motivo de alarma, porque la contaminación por Salmonella esta asociada a dosis infectivas altas (mayor a 1×10^6 , Feachem y colaboradores, 1983). Sin embargo, esta presencia no implica una baja eficiencia del sistema de lagunas de estabilización, ya que puede estar asociada a otro mecanismo de transporte. En San Juan existe una población importante de aves, que se incrementa con los períodos migratorios, en ocasiones se ha observado a algunas de estas posandose en los canales de conducción de agua residual cruda y lagunas primarias, para luego instalarse en diques y dispositivos de salida con ocasionales "baños", en las lagunas secundaria y terciaria; esta situación, será un fenómeno normal en todos los sistemas de tratamiento-reuso de efluentes,

pero que el nivel de riesgo asociado es prácticamente nulo si se garantiza la calidad del efluente, del sistema de tratamiento en términos de parásitos y coliformes fecales.

7.6 Modelo de Predicción

El modelo de flujo disperso, surge como una alternativa al tradicionalmente utilizado para bacterias que es el de mezcla completa, su aplicabilidad ha sido estudiada y recomendada por varios investigadores (Dissanayake,(1981);Yanez,(1986);Polprasert y Bhattarai (1985), Saenz (1987))

Este modelo ha sido utilizado para estimar el período de retención necesario para reducir los niveles de coliformes fecales del crudo a la calidad fijada para el efluente terciario en cada experimento, aplicando las Formulas (2), (3) y (4), se calibró el modelo con las características geométricas de cada una de las lagunas que comprende el sistema de tratamiento.

La regulación de caudales se ha realizado en forma drástica, entre cada experimento, tomando en cuenta la temperatura del agua promedio esperada para cada experimento (considerando los de verano e invierno), estos caudales fueron calculados con ayuda del modelo de dispersión, lo que permite asegurar que dicho modelo es una gran herramienta para operación de lagunas. Durante el desarrollo de los experimentos alguna variación fue realizada cuando se presentaban picos en el crudo y en el efluente terciario, salvo en el caso del experimento 4, en que la regulación de caudales de ingreso estuvo gobernada por la escasez de agua. Este tipo de operación no será el normalmente utilizado en plantas de tratamiento-reuso en acuicultura, estos

deben ser dimensionados para las condiciones más desfavorables, es decir para la temperatura del agua que corresponda al promedio mensual mínimo, la calidad del efluente del sistema mejorará con el incremento de la temperatura.

La tasa de mortalidad de coliforme fecal utilizada en el experimento 1, fue la propuesta por Saenz, y que esta dada por la Fórmula N° 5, durante la ejecución de este experimento se han procesado tasas de mortalidad evaluadas en San Juan, en el proyecto Evaluación de las lagunas de estabilización de San Juan-Fase II (1981-1982), para lagunas facultativas: primarias, secundarias y terciarias, reportadas por Yanez (1986), y las evaluadas en el proyecto: Evaluación Microbiológica y Toxicológica sobre reuso de aguas residuales en riego (1986-1988); con estos datos y tomando en cuenta la temperatura promedio del agua, durante la ejecución de tales pruebas, se han establecido las siguientes relaciones para tasas de mortalidad neta de Coliformes fecales (K_b) :

Lagunas primarias :

$$K_b = 0.477 \times 1.18^{(T-20)}$$

(6)

Lagunas secundarias

$$K_b = 0.904 \times 1.04^{(T-20)}$$

(7)

Láguas terciarias :

$$Kb=0.811 \times 1.09^{(T-20)}$$

(8)

Se debe mencionar que para el caso de lagunas terciarias solo se contó con 3 datos, que no son suficientes, pero que sin embargo la fórmula N° 8 nos brinda una estimación del orden de magnitud y tendencia. La Figura VII-12, muestra las relaciones mencionadas en función de la temperatura del agua.

Los valores dados por las formulas N°s: 7 y 8, son muy parecidas al valor propuesto por Yanez (1986):

$$Kb=0.841 \times 1.07^{(T-20)}$$

(9)

en cambio, esto no sucede con los valores de Kb para primarias. Definitivamente, los mecanismos de remoción de bacterias son diferentes para cada nivel de tratamiento por las condiciones ambientales diferentes (v.gr. variaciones de pH, oxígeno disuelto, nutrientes disponibles, bacterias adheridas a sólidos sedimentables, etc.) y en cada nivel de tratamiento predominarán mecanismos de remoción diferentes.

LAGUNAS DE ESTABILIZACION DE SAN JUAN

TASAS DE MORTALIDAD - COLIFORME FECAL

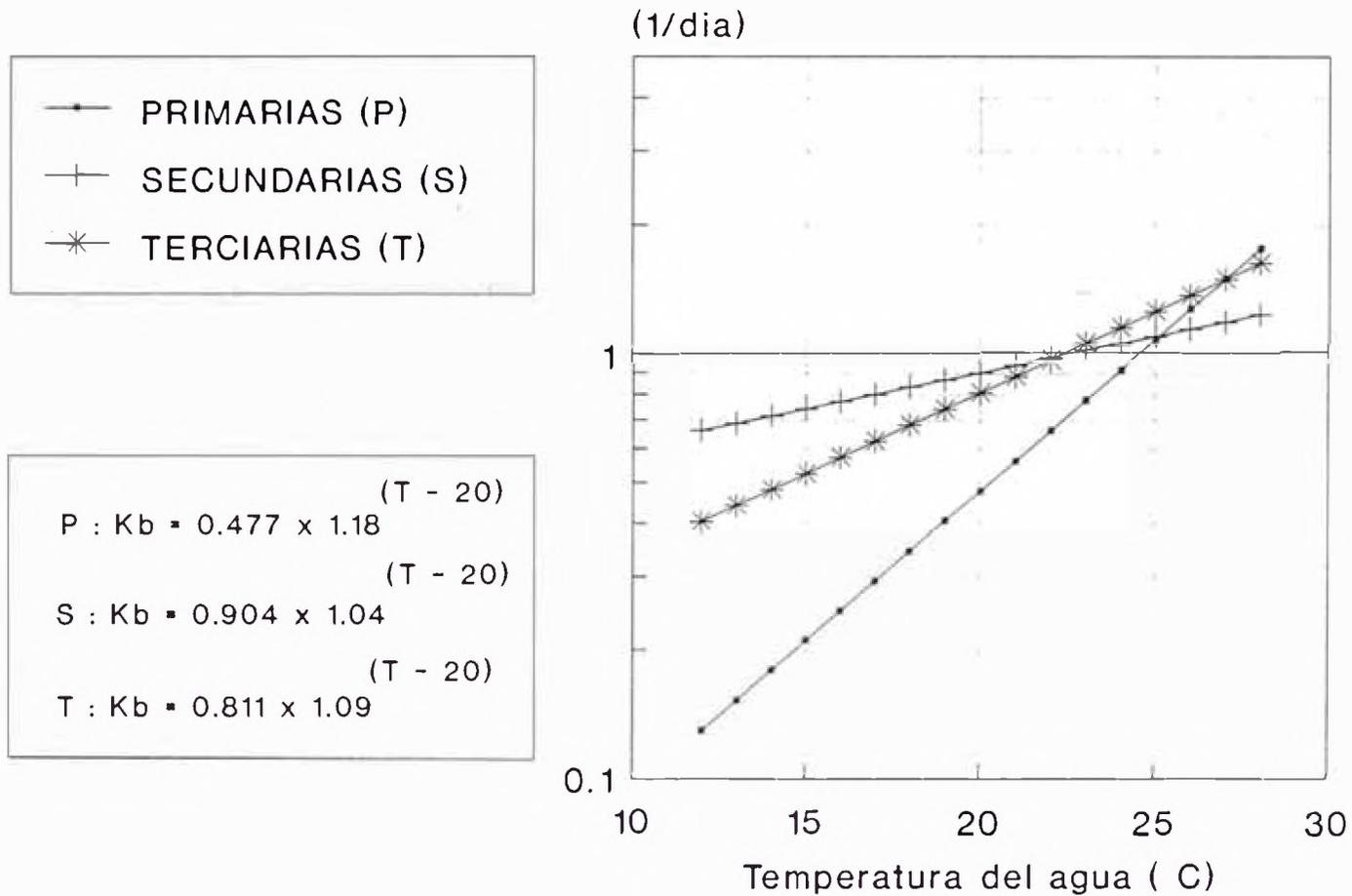


FIGURA VII-12

Si analizamos los valores de K_b para lagunas de maduración (secundarias y terciarias) y sus factores de dependencia de la temperatura estos son aparentemente muy similares, porque los mecanismos de remoción en estas también deben ser análogos. En el caso de lagunas primarias los K_b deben ser menores y el factor de dependencia de la temperatura diferente, probablemente asociado al mecanismo de remoción predominante.

Se ha calibrado el modelo de flujo disperso, que comprende las fórmulas N°s: 2, 3 y 4, con las características geométricas de las lagunas que comprenden el sistema de tratamiento para uso en acuicultura, las tasas de evapo-filtración y con los valores de K_b de cada una de ellas dadas por las fórmulas N°s: 6, 7 y 8

Alimentando este modelo con los valores de caudal de ingreso al sistema, el nivel de coliformes fecales y la temperatura del agua se han calculado valores de coliformes fecales en los efluentes de cada laguna, estos han sido comparados con los valores observados del programa de monitoreo del proyecto tomando en cuenta los períodos de retención nominal correspondientes, y los caudales y temperaturas compatibles. De esta forma se ha encontrado una buena correlación entre el valor predicho y el valor observado, como se muestra en la Figura VII-13, se indica, también, el intervalo de confianza al 95%, como se puede apreciar, la recta de correlación está muy cercana a la curva teórica; el intervalo de confianza incluye a esta recta, lo que permite afirmar de que el modelo de flujo disperso no solo puede ser una ayuda para la operación de lagunas, sino también una herramienta de diseño.

La aplicación de el modelo de flujo disperso en otras situaciones geográficas, debe ser enriquecida con información local, si está disponible, (v.gr. tasas de mortalidad , modelos de predicción del factor de dispersión d , tasas de evapofiltración, etc.).

MODELO DE PREDICCIÓN

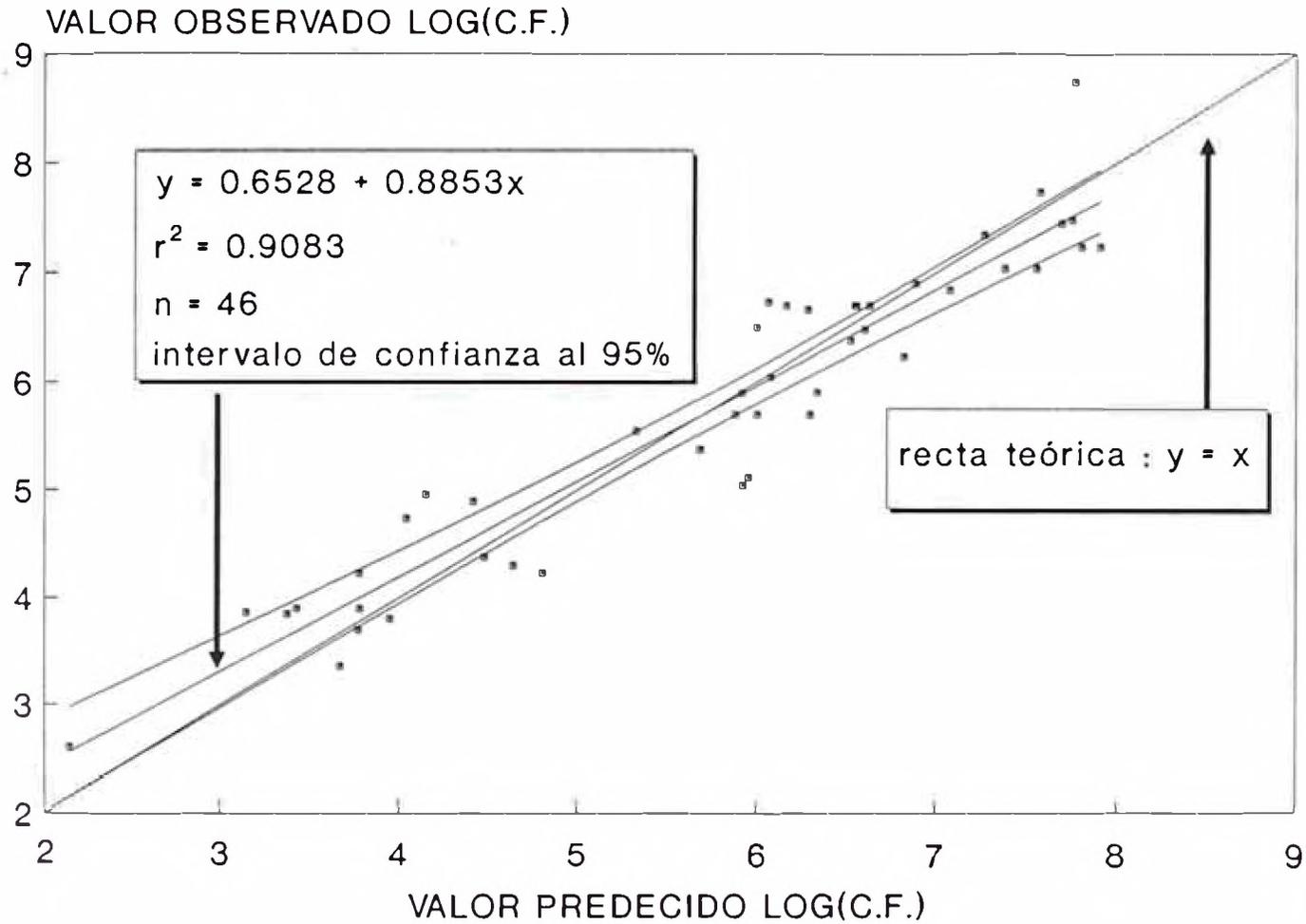


FIGURA VII-13

VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1) Los efluentes de un sistema de lagunas de estabilización, son adecuados para el uso en acuicultura, en cultivo de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), si es que se toman en cuenta las siguientes consideraciones:
 - a) Las lagunas deben operar con un número adecuado de lagunas en serie y este no debe ser menor de dos (una primaria y una secundaria como mínimo en cada batería)
 - b) El sistema de lagunas debe ser dimensionado y operado de forma que se remueva el 100% de parásitos (helmintos y protozoos)
 - c) El nivel máximo de coliforme fecal en el efluente a ser utilizado con fines acuícolas, específicamente en el cultivo de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), debe ser de 1×10^5 NMP/100ml. Este nivel puede ser alcanzado inclusive a nivel de efluente secundario, si se realiza un dimensionamiento y operación adecuados.

- 2) El dimensionamiento de sistemas de lagunas de estabilización con el objetivo de uso de efluentes puede ser realizado con los siguientes criterios:
 - a) El dimensionamiento del sistema de tratamiento debe realizarse para las condiciones ambientales más desfavorables, es decir para la temperatura promedio mensual mínima del agua.

- b) El sistema de lagunas de estabilización debe permitir la remoción total de parásitos (protozoos y helmintos), para ello se debe asegurar un período de retención global superior a 10 días.
- c) El dimensionamiento de lagunas primarias, se debe basar en el criterio de carga superficial máxima en Kg DBO₅/ha/día, para mantener la laguna como facultativa, y evitar problemas de malos olores, se puede utilizar el modelo propuesto por Yañez (Formula N° 1).
- d) Para mejorar la eficiencia de remoción las lagunas deben ser más alargadas que anchas, la relación largo:ancho mínima recomendada es de 2:1.
- e) Para el dimensionamiento de las lagunas de maduración (de secundarias en adelante), se debe aplicar el criterio de calidad bacteriológica en términos de Coliformes fecales.
- f) Con ayuda del modelo de flujo disperso, se pueden definir las dimensiones de las lagunas y estas deben ser tales que satisfaga la calidad de 1×10^5 NMP/100 ml como máximo, en toda época del año. Como un factor de seguridad de diseño, se puede calcular con el nivel de 5×10^4 NMP/100 ml, para el efluente a ser utilizado para la alimentación de los estanques acuícolas.

- 3) La operación de sistemas de tratamiento-reuso en acuicultura debe contemplar un monitoreo mínimo, a fin de garantizar la calidad adecuada de los efluentes, este debe incluir las siguientes determinaciones:
 - a) Medición diaria de caudales (afluente-efluente del sistema)
 - b) Medición mensual de DBO_5 , en el agua residual cruda y en el efluente del sistema.
 - c) Medición mensual de Coliformes fecales, en el agua residual cruda y en el efluente del sistema.

- 4) En la operación del sistema se debe evaluar el impacto de las variaciones de calidad del crudo en el efluente del sistema, en términos de Coliformes fecales. Como una herramienta de predicción de calidad de agua se puede utilizar el modelo de flujo disperso.

- 5) Satisfechos los requerimientos de calidad bacteriológica y parasitológica, los niveles de amonio total no deben representar riesgos para el cultivo de tilapia, sin embargo se debe tomar precauciones adicionales en los períodos de llenado de estanques acuícolas y períodos de siembra, en los que podrían medirse los niveles de amonio total. En base a esta determinación, verificar si la tasa de aporte de agua a los estanques acuícolas no van a producir niveles altos de amonio que puedan afectar la carga inicial de peces.

- 6) Para asegurar la calidad bacteriológica de los estanques acuícolas, así como para evitar excesos de nutrientes y/o valores elevados de amonio total, las operaciones de llenado de estanques, deben contemplar la estabilización de los mismos antes de realizar la siembra correspondiente. Así mismo, con el mismo objetivo, las operaciones de aporte de agua de compensación a las pérdidas de evaporación-filtración en estanques, deben realizarse en tiempos prolongados para atenuar el impacto, de las características del efluente del sistema de tratamiento, sobre la calidad del agua de los estanques.

- 7) Es necesario orientar las investigaciones sobre lagunas de estabilización, para optimizar la remoción de parásitos y patógenos, y lograr de esta forma sistemas conjugados de tratamiento - reuso de efluentes, a un menor costo y compatibles con las necesidades de nuestros países en desarrollo. El esfuerzo realizado, con la aplicación de modelos orientados a este objetivo, como es el caso del modelo de flujo disperso, es una muestra de las grandes posibilidades futuras.

BIBLIOGRAFIA

1. Arceivala, S.; 1981 **Wastewater Treatment & Disposal**. Publisher Marcel Dekker, Inc., New York, USA.
2. Arthur, J., 1982 **Notes on design and operation of waste stabilization ponds in warm climates of developing countries**. World Bank Technical Paper Number 7. Washington DC.
3. Bartone, C. et al; 1985 **Monitoring and maintance of treated water quality in the San Juan lagoons supportin aquaculture**. Final report of phases I - II, CEPIS/OPS. Lima, Perú
4. Bartone, C.; 1986 **Waste stabilization ponds and reuse of effluents (summary)**. Trabajo presentado en el Seminario Regional de Investigación sobre Lagunas de Estabilización. CEPIS/OPS, Lima Perú.
5. Buras, N.; 1988 **Public health considerations for the Lima-San Juan de Miraflores waste water reuse for aquaculture project**, CEPIS/OPS - Banco Mundial.
6. Buras, N.; Dek, L.; Niv, S.; Hepher B. and Sandbank, E.; 1987. **Microbiological aspects of fish grown in treated wastewater**. Water Research IAWPRC, 21; 1-10 pp.

7. **Dissanayake, M.; 1981 Kinetics of bacterial die in waste stabilization ponds.** Doctoral dissertation N° EU-81-1, Asian Institute of Technology. Bangkok, Thailand.
8. **Edwards, P.; 1985 Aquaculture: A component of low cost sanitation technology.** World Bank Technical Paper N° 36, Washington DC.
9. **Edwards, P.; 1988 Reuse of human excreta in aquaculture a-state of the art review.** Pre publication, Asian Institute of Technology. Bangkok, Thailand.
10. **Edwards, P.; 1988 Mission to advise on the reuse of sewage for aquaculture in the San Juan,** CEPIS/OPS - Banco Mundial.
11. **Feachem, R.; Bradley, D.; Garelick, H. and Mara, D.; 1983 Sanitation and Disease: Health aspects of excreta and wastewater management.** Chichester: John Wiley and sons.
12. **International Committee of Microbiological Specifications for Food (ICMSF). Técnicas de análisis microbiológicos.** Editorial Acribia. 2da. Ed. España.
13. **Moscoso, J.; Nava H.; León G.; Egocheaga, L.; Gil, E.; González y Zumaeta, M.; 1991 Reuso en acuicultura de las aguas residuales tratadas en las lagunas de estabilización de San Juan.** Sección I: Resumen ejecutivo, CEPIS/OPS. Lima, Perú.

14. Mara, D. and Cairncross; 1990 **Directrices para el uso sin riesgos de aguas residuales y excretas en agricultura y acuicultura, medidas de protección de la salud pública.** Organización Mundial de la Salud, Ginebra.
15. Organización Mundial de la Salud; 1989 **Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura.** Serie de Informes Técnicos N° 778, OMS. Ginebra.
16. Polprasert, Ch.; Dissanayake, M. and Thanh, N.; 1983 **Bacterial die-off kinetics in waste stabilization ponds.** Journal of the Water Pollution Control Federation, 55(3), 285-296 pp.
17. Polprasert, Ch. and Bhattarai, K.; 1985 **Dispersion model for waste stabilization ponds.** Journal of the Environmental Engineering Division ASCE 111 (N1) 12.
18. Sáenz, R.; 1985 **Lagunas de estabilización y otros sistemas simplificados para el tratamiento de ags residuales.** Manual DTIAPA N° C-14, CEPIS/OPS.
19. Sáenz, F.; 1987 **Predicción de la calidad del efluente de lagunas de estabilización.** Hojas de Divulgación Técnica N° 3, CEPIS/OPS.

20. Shuval, H.; Adin. A.; Fattal, B.; Ravitz, E. and Yekutieli, P.; 1986 **Health Effects of Wastewater Irrigation.** Technical Report 51. World Bank, Washington DC.

21. Yáñez, F.; 1980 **Evaluation of the San Juan stabilization ponds.** Final research report of the first phase. Pan American Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences (CEPIS) and International Development Research Center of Canada (IDRC). Lima, Perú.

22. Yáñez, F.; 1983 **Indicator and pathogen organisms die away in ponds under tropical conditions.** 56th Annual Conference of the WPCF, Atlanta.

23. Yáñez, F.; 1986 **Reducción de organismo patógenos y diseño de lagunas de estabilización en países en desarrollo.** Trabajo presentado en el Seminario regional de Investigación sobre Lagunas de Estabilización. desarrollado en CEPIS/OPS en marzo de 1986. Lima, Perú.