

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

**“ESTUDIO DE CONTACTORES BIOLÓGICOS
ROTATORIOS (BIODISCOS) COMO TRATAMIENTO
SECUNDARIO DEL EFLUENTE DE UN UASB”.**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO SANITARIO

ELABORADO POR:
GUSTAVO ALONSO DELGADO SANDOVAL

ASESOR:
ING. OTTO BRUNO ROSASCO GERKES

LIMA – PERÚ

2019

DEDICATORIA

A mis padres, por su constante motivación, amor, y que gracias a su ejemplo pude realizar este trabajo de investigación.

Gustavo Delgado

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Otto Rosasco Gerkes, por su incondicional apoyo, asesoramiento y motivación para desarrollar mi investigación.

A la Dra. Ing. Rosa Yaya Beas, por brindarme la oportunidad y el espacio de realizar mi proyecto de investigación en el CITRAR-UNI.

Al Sr. Manuel Romero Mananí personal de mantenimiento de CITRAR-UNI por el apoyo permanente.

A la Sra. Margarita Andreu Rivera, al Sr. Oscar y al Sr. Raúl, personal de apoyo del Laboratorio N 20, por su amable atención e incondicional.

ÍNDICE

<i>CAPÍTULO I – INTRODUCCIÓN</i>		15
1.1	Antecedentes	15
1.2	Formulación del Problema	20
1.3	Justificación	20
1.4	Objetivos	21
1.4.1	Objetivo General	21
1.4.2	Objetivos Específicos	21
1.5	Hipótesis	22
1.6	Variables de la Investigación	22
1.6.1	Variables Independientes	22
1.6.2	Variables Dependientes	23
1.6.3	Variables Intervenientes	23
<i>CAPÍTULO II – MARCO TEÓRICO</i>		24
2.1	Principio de Funcionamiento de los Biodiscos	24
2.2	Ventajas y Desventajas	26
2.2.1	Ventajas	26
2.2.2	Desventajas	27
2.3	Factores que Afectan el Rendimiento	28
2.3.1	Velocidad Rotacional	28
2.3.2	Carga Hidráulica y Orgánica	29

2.3.3	Tiempo de Retención Hidráulico _____	31
2.3.4	Medio de Soporte _____	31
2.3.5	Número de Etapas _____	32
2.3.6	Temperatura y pH _____	34
2.3.7	Características del Agua Residual _____	36
2.3.8	Características de la Biopelícula _____	37
2.3.9	Oxígeno Disuelto _____	38
2.3.10	Recirculación de efluente y sólidos _____	40
2.3.11	Porcentaje de Sumergencia _____	40
2.4	Microbiología en el Proceso de Biodiscos _____	41
2.4.1	Principales Microorganismos en la Biopelícula _____	41
2.4.2	Biopelícula _____	47
2.4.3	Remoción Biológica de Materia Orgánica Carbonosa _____	53
2.4.4	Nitrificación _____	55
2.5	Problemas Operacionales _____	56
2.6	Modelos Matemáticos para Biodiscos _____	57
2.6.1	Modelos Empíricos _____	58
2.6.2	Modelos Descriptivos _____	60
	<i>CAPÍTULO III – MARCO NORMATIVO _____</i>	65
	<i>CAPÍTULO IV – METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN _____</i>	66
4.1	Escenario de la Investigación _____	66
4.2	Descripción de la Investigación _____	66
4.2.1	Tanque de Almacenamiento _____	68

4.2.2	Reactores _____	68
4.2.3	Sistema Mecánico _____	70
4.3	Diseño de la Investigación _____	71
4.3.1	Características del Agua Residual Afluyente _____	71
4.3.2	Etapas _____	71
4.3.3	Caudal de Ingreso _____	72
4.3.4	Superficie y Medio de Soporte _____	72
4.3.5	Velocidad Rotacional de los Discos _____	74
4.3.6	Tiempo de Retención Hidráulico _____	75
4.1.1	Carga Orgánica Superficial _____	76
4.4	Plan de Monitoreo de la Investigación _____	76
4.4.1	Puntos de Monitoreo _____	76
4.4.2	Parámetros de Calidad del Agua Residual _____	77
4.4.3	Período de Operación de la Investigación _____	80
4.4.4	Frecuencia de Monitoreo _____	81
	<i>CAPÍTULO V – RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN _____</i>	83
5.1	Análisis de la Temperatura _____	85
5.2	Análisis del pH _____	87
5.3	Análisis del Oxígeno Disuelto _____	90
5.4	Análisis de la Turbiedad _____	93
5.5	Análisis de la Demanda Bioquímica de Oxígeno _____	96
5.6	Análisis de los Sólidos Suspendedos Totales _____	103

5.7	Características Físicas de la Biopelícula	111
5.8	Características Microbiológicas de la Biopelícula	118
5.8.1	Primera Etapa	119
5.8.2	Segunda Etapa	121
<i>CAPITULO VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</i>		125
7.1	Conclusiones	125
7.2	Recomendaciones	129
<i>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>		132
<i>ANEXO 1 – REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LA EVOLUCIÓN DE LA BIOPELÍCULA</i>		135
<i>ANEXO 2 – GALERÍA DE FOTOS</i>		142
<i>ANEXO 3 – CÁLCULOS Y TABLAS DE RESULTADOS</i>		148
<i>ANEXO 4 – ANÁLISIS DE ANOVA DE OD Y DBO₅</i>		161

ABREVIATURAS

- PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
- UASB: Del inglés Upflow Anaerobic Sludge Blanket que traducido al castellano es Reactor Anaeróbico de Manto de Lodos de Flujo Ascendente (REACTOR UASB).
- TRH: Tiempo de Retención Hidráulico
- CITRAR: Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos.
- AFLUENTE: Agua residual que ingresa a un proceso de tratamiento.
- EFLUENTE: Agua residual que sale de un proceso de tratamiento.
- pH: Potencial de Hidrogeno.
- PVC: Policloruro de Vinilo.
- RNE: Reglamento Nacional de Edificaciones.
- EPS: Empresas Prestadoras de Servicios de Saneamiento
- COT: Carbono Orgánico Total.
- DQO: Demanda Química de Oxígeno.
- DBO₅: Demanda Biológica de Oxígeno al quinto día.
- RBC: Rotating Biological Contactors (Contactores Biológicos Rotatorios)
- ARD: Agua Residual Doméstica.
- MO: Materia Orgánica.
- PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.
- OD: Oxígeno Disuelto.

- ST: Sólidos Totales.
- SS: Sólidos Sedimentables.
- SST: Sólidos suspendidos totales.
- SSF: Sólidos suspendidos fijos.
- SSV: Sólidos suspendidos volátiles.
- SDT: Sólidos disueltos totales.
- SDF: Sólidos disueltos fijos.
- SDV: Sólidos disueltos volátiles.

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 Esquema de una unidad RBC típica.....</i>	25
<i>Figura 2 Posibles mecanismos limitantes</i>	26
<i>Figura 3 Arreglos típicos de etapas en un RBC</i>	33
<i>Figura 4 Evolución del pH en un RBC.....</i>	36
<i>Figura 5 Eliminación de DQO con atmósfera de aire y con atmósfera de oxígeno del 99.5% de pureza Fuente: José Bezanilla, 1993.....</i>	39
<i>Figura 6 Ciliados Reptantes y Nadadores Ciliado reptante</i>	44
<i>Figura 7 Ciliados Fijos Epistylis sp. (izq) – Opercularia sp. (der)</i>	45
<i>Figura 8 Formación de la Biopelícula (Macedo).....</i>	48
<i>Figura 9 Modelo del canal de Agua.....</i>	49
<i>Figura 10 Modelo del Mosaico Heterogéneo.</i>	50
<i>Figura 11 Difusión del oxígeno en la biopelícula</i>	52
<i>Figura 12 Esquema del sistema de biodiscos.....</i>	67
<i>Figura 13 Esquema del sistema de biodiscos (vista transversal)</i>	68
<i>Figura 14 Reactores de vidrio</i>	69
<i>Figura 15 Características típicas de los discos</i>	70
<i>Figura 16 Motor y eje del sistema RBC</i>	71
<i>Figura 17 Área húmeda de los biodiscos</i>	74
<i>Figura 18 Puntos de Monitoreo, vista transversal</i>	77
<i>Figura 19-Biopelícula gris en la primera etapa</i>	114
<i>Figura 20-Biopelícula formada en discos, semana nueve</i>	114
<i>Figura 21-Bacterias filamentosas en disco de la primera etapa.....</i>	115
<i>Figura 22-Desprendimiento de Biopelícula.....</i>	116

<i>Figura 23-Formación de algas en biopelícula</i>	116
<i>Figura 24-Lodos depositados en la primera etapa</i>	118
<i>Figura 25-Observación de microorganismos, primera etapa.</i>	120
<i>Figura 26-Observación de microorganismos, primera etapa</i>	120
<i>Figura 27-Principales ciliados observados.</i>	121
<i>Figura 28-Observación de algas, segunda etapa.</i>	122
<i>Figura 29-Ciliados fijos formando colonias, segunda etapa.</i>	123
<i>Figura 30-Microorganismos observados, segunda etapa.</i>	123
<i>Figura 31-Rotíferos observados, segunda etapa.</i>	124
<i>Figura 32-Microorganismos observados en biosólidos, segunda etapa.</i>	124

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Parámetros experimentales del modelo de Kornegay</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 2-Frecuencia de monitoreo</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 3 Diámetros probables de los biodiscos</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 4 Área calculada, total y efectiva de los discos</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 5-Correlaciones para valores del pH</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 6-Correlación de OD entre E-2 y E-1</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 7- Correlación de turbiedad</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 8-Valores de la DBO5.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 9-Correlación de la DBO5</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 10-Valores de los SST.....</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 11-Características y desarrollo de la Biopelícula.....</i>	<i>111</i>
<i>Tabla 12-Peso de lodos</i>	<i>117</i>

RESUMEN

Se diseñó un sistema de biodiscos a escala de laboratorio como tratamiento secundario de un efluente de un reactor UASB. Se implementó un sistema de biodiscos con dos etapas conectadas en serie. Cada etapa con un volumen efectivo de 81 litros. Como medio de soporte de la biopelícula, se utilizaron 14 discos de PVC (siete en cada etapa) de 60 cm de diámetro, que hacían un área efectiva total de 7.48 m². El sistema funcionó a un caudal constante de 432 l/día (TRH de 4.50 horas por etapa). La operación del sistema se dividió en tres períodos variando la velocidad de rotación de los discos (3 rpm durante 3 meses y 5 rpm durante 2 meses).

Se estudió la eficiencia de remoción de materia orgánica midiendo los parámetros de DBO₅, SST, SSF, SSV con una frecuencia semanal y se realizaron mediciones diarias de Temperatura, pH, Oxígeno Disuelto y Turbiedad. Además se registró la evolución de la biopelícula, sus características físicas y se observaron los principales microorganismos que habitaron la biopelícula. Finalmente, los resultados del sistema de biodiscos mostraron un alto grado de oxigenación, alcanzando solo en la primera etapa un valor promedio de 5.21 mg O₂/l. En términos de remoción de materia orgánica, la eficiencia de remoción promedio de la DBO₅ fue del 90% para una velocidad de rotación de 3 rpm y del 78% para 5 rpm, demostrando un mejor desempeño para una velocidad de 3 rpm. También se comprobó que dos etapas en serie tuvieron un mejor rendimiento que una sola etapa. Los microorganismos más representativos de la biopelícula de la primera etapa fueron protozoarios ciliados nadadores libres y las bacterias filamentosas que tuvieron un crecimiento excesivo para el segundo período. En la segunda etapa, fueron los protozoarios ciliados fijos, rotíferos y algas unicelulares y filamentosas.

ABSTRACT

Laboratory model RBC system was designed as secondary treatment of UASB reactor effluent. RBC System was built with two stages connected in series, each stage with effective volume of 81 liters. The attach media support for biofilm were 14 PVC disks of 60 cm diameter having a 7.48 m² of total effective area. RBC system was operated at a constant flow rate of 432 l/day (HRT of 4.50 hours per stage). RBC system operation was divided in three periods at different disk rotational speed (3 rpm for 2 months and 5 rpm for 2 months).

Organic matter removal efficiency was studied measuring parameters like BOD₅, TSS, FSS, VSS weekly and daily measurements of Temperature, pH, Dissolved Oxygen and Turbidity. Moreover, biofilm evolution, its physical characteristics and main microorganisms from the biofilm were observed. Finally, results showed a high degree of oxygenation, reaching an average value of 5.21 mg O₂/l just in the first stage. In terms of organic matter removal, average BOD₅ removal efficiency was 90% for 3 rpm rotational speed and 78% for 5 rpm, demonstrating better performance for 3 rpm. Also, was found that two stages in series had a better performance than a single stage. The most representative biofilm microorganisms in first stage were protozoa ciliated free-swimming and filamentous bacteria that had an excessive growth at second period. In the second stage, it was ciliated attached protozoa, rotifers and unicellular and filamentous algae.

CAPÍTULO I – INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Si bien es cierto, los contactores biológicos rotatorios, también llamados biodiscos, son una tecnología aún joven en el Perú, a nivel internacional ya se han realizado pruebas y estudios desde el año 1900 en Alemania, la primera de ella concebida por Weigand, utilizando como medio de soporte giratorio planchas de madera (Castillo y Vivas, 1996).

En este período preliminar, los medios de soporte más utilizados fueron la madera y el hierro, que evidentemente se deterioraban rápidamente. Lo cual puso un freno al avance de esta tecnología. La disponibilidad de poliestireno marcó el inicio de la aplicación comercial de biodiscos con el primer sistema a gran escala que se instaló en Alemania en 1958 (Rodgers y Zhan 2003).

Luego en 1965 se utilizó un sistema de discos para la transferencia de oxígeno dentro de un proceso de aireación. Posteriormente se hicieron estudios con biomasa adherida y sin recirculación lo que confirmaron buenos resultados. A este proceso lo denominaron “Rotating Biological Contactor (RBC)”. Después se desarrolló un nuevo material para los discos construidos con hojas corrugadas de polietileno. (Castillo y Vivas, 1996).

En los años 1980-81 numerosos trabajos fueron publicados abarcando diversos aspectos de la teoría, diseño y experiencia operacional, distribuidos en diferentes áreas. Así Hittlebaugh y Miller (1981), discuten los problemas operacionales del RBC. Dehkordi (1980) y Keihani (1980), describen los efectos de los metales pesados en el

funcionamiento de los RBCs. Trinh (1981), Allen (1980), Bauer y otros (1981) aseveran la aplicabilidad del RBC para utilizaciones en zonas lejanas de los núcleos poblacionales o “in situ”. Muller y otros (1980), discuten el impacto de las consideraciones de transferencia de masa en el diseño de un lecho bacteriano y RBC. Los factores a considerar al escalar una planta fueron identificados por Wilson et al (1980). Las cinéticas para el tratamiento de aguas residuales domésticas fueron estudiadas por Pano (1981).

Posteriormente otros trabajos aparecieron sobre la aplicabilidad del RBC en el tratamiento secundario de aguas residuales municipales. Regent (1980), publicó los datos de varios años de funcionamiento del RBC en Yugoslavia. Remarcando la no existencia de fallos mecánicos. Spink (1980), describió el comportamiento del RBC en la provincia de Alberta, Canadá. Rushbrook y Wilke (1980), describieron un fácil tratamiento innovador en Hillsborough, N. H. que incluirá, digestión anaerobia con calentamiento solar y metano recuperado en el RBC. La distribución de sólidos en un RBC fue estudiada por Munch y otros (1980).

Gutarra Comun y Rogers Hugo, investigadores de la Universidad Peruana Los Andes (2016) realizan la comparación entre las dos propuestas de PTAR, las cuales comprenden: una PTAR-01 convencional con Tanque Imhoff, Filtro Biológico, Lecho de Secado y Cámara de Contacto, el diseño de PTAR-02 incluye Tanque Imhoff, Biodisco, Lecho de Secado y Cámara de Contacto. Verificaron el ahorro de costos en la construcción, asimismo la eficiencia en los tratamientos esencialmente en la reducción de DBO por parte de los biodiscos y la reducción de espacio para poder construir la PTAR ya que el municipio de Sapallanga no cuenta con muchos recursos ni terrenos para poder construir la infraestructura.

Jurado de la Cruz et al, 2015 trataron aguas residuales domésticas, haciendo uso de un sistema convencional y moderno el de biodiscos. Por lo que, el objetivo del trabajo de tesis fue la remoción de materia orgánica en el reactor de biodiscos para el tratamiento de aguas residuales urbanas de los efluentes “Las Vírgenes”- Huancayo - Perú, a nivel de laboratorio, con tal fin se caracterizó el agua residual urbana a través de muestras compuestas en base al tiempo. Siguiendo el proceso de remoción óptima de materia orgánica en función de DBO5. Así mismo los parámetros considerados como flujo

continuo, velocidad de giro de los discos de cuatro RPM, tiempo de residencia menores a un día, pH (6.5 a 8.5) y temperatura óptima (12 y 16 °C); fueron medidos experimentalmente en el reactor de biodiscos, a escala piloto. De acuerdo a los resultados obtenidos, el mejor tratamiento se alcanza a condiciones de concentraciones mayores y bajos caudales, es decir se determinó como mejor tratamiento al experimento cuatro tanto normal y réplica, en el cual alcanzó niveles de rendimiento de 89.50% y 92.40% en DBO5, respectivamente.

En el año 2010, Juan David Pérez Aristizábal construyó un sistema de Biodiscos a escala de laboratorio para tratar una pequeña fracción de aguas lixiviadas del Relleno Sanitario La Pradera ubicado en Medellín - Colombia y se evaluó el comportamiento del reactor mediante el seguimiento del OD, pH, temperatura a una determinada carga de diseño (18 g DQO/m².d), la cual sería óptima para obtener las máximas remociones de acuerdo al rango especificado. Por lo tanto se evaluó el desempeño determinando las eficiencias en remoción con diferentes parámetros DQO, DBO, SST, NTK, Nitrógeno Total (siendo éste la última de todas sus especies) y Fósforo Total (P) y se determinó la asentabilidad de los lodos, evaluando la conveniencia de utilizar este tipo de sistema para tratar líquidos con alta carga contaminante, de tal manera que su resultado pueda ser aplicado a escala real en el relleno sanitario La Pradera y sea una herramienta provechosa para el dimensionamiento de otros sistemas de tratamiento de Biodiscos en el entorno local, nacional e internacional. De acuerdo con el monitoreo realizado, los resultados fueron satisfactorios pues se obtuvieron eficiencias de 68% en remoción de DQO, 95% en DBO5, 70% en SST, 90% en NTK, 74% de eliminación de Nitrógeno y 38% en Fósforo. Para el caso del fosforo, se hacen recomendaciones para mejorar su eficiencia hasta un 64% el cual fue alcanzado. Se evidenciaron unas buenas características de sedimentabilidad del lodo generado al obtenerse un IVL de 106 y buena resistencia del reactor a fluctuaciones del pH y del oxígeno disuelto, pues las condiciones variaron y a pesar de ello las eficiencias permanecieron constantes lo cual lo convierte en un sistema eficaz, estable y apropiado para implementarlo con tratamiento secundario de lixiviados jóvenes propio de rellenos sanitarios en operación.

A. Tawfik et al, 2006 trataron aguas residuales domésticas a una temperatura de 12-24°C mediante un sistema de Contactores Biológicos Rotatorios. El RBC consistía en dos etapas conectadas en serie. El sistema fue operado a diferentes tasas de carga

orgánica y tiempos de retención hidráulico (10, 5 y 2.5 horas) con el fin de optimizar el rendimiento del CBR. La eficiencia general de remoción para la DQO decreció significativamente cuando decreció el TRH total de 10 a 2.5 horas y se incrementó la tasa de carga orgánica de 11 a 47 g DQO/m².d. Sin embargo, la calidad del efluente en términos de DQO soluble no fue afectada. La mayor parte de DQO fue removida en la primera etapa y la nitrificación se dio en la segunda etapa de las dos etapas del sistema. La eficiencia general de la nitrificación fue 49% para una tasa de carga orgánica de 11 g DQO/m².d. En un TRH de 10, 5 y 2.5 horas, la concentración de Escherichia Coli fue reducida con valores cercanos de 1.6, 1.5 y 0.8 log₁₀ respectivamente. El rendimiento de una sola etapa versus dos etapas operadas para una misma carga orgánica de 22 g DQO/m².d y el mismo TRH de 5 horas fue examinado. Los resultados obtenidos muestran que la concentración de DQO y E. coli contenidos en el efluente de dos etapas fueron menor que en el efluente de una sola etapa de RBC.

En su tesis doctoral, Bezanilla Revilla José Antonio (2005), realizó un estudio comparativo del funcionamiento de una planta de biodiscos (RBC) convencional y de otra planta RBC con alternancia en el sentido del flujo, analizando la cinética de crecimiento de la biopelícula, la eliminación de la materia orgánica y del nitrógeno y la incidencia de la alternancia sobre las variables de control de la planta. Diseñó dos plantas de iguales características con dos etapas cada una, que funcionaron con agua residual sintética y con tiempo de retención hidráulico de 90 minutos. Se estableció un plan experimental con cargas orgánicas afluentes de 11.66, 23.32 y 34.98 g DQO/m².d y períodos de alternancia de 24, 12 y 6 horas. La primera etapa de la planta convencional mostró en todo momento mayores espesores de biopelícula, alcanzando con altas cargas (34.98 g DQO/m².d), 6 mm, que colmataron los espacios entre discos, mientras en la planta con alternancia en el sentido de flujo no se alcanzaron nunca espesores mayores de 3.8 mm. El oxígeno disuelto fue siempre mayor en la planta con alternancia. Concluyendo que con esta planta, funcionando ambas plantas con igual carga orgánica afluente, podremos tratar aguas con cargas más elevadas, ejerciéndose menores cargas estructurales y alcanzando una mayor igualdad en la estandarización de las características de los ejes de discos. El análisis de la DQO y del COT muestra que no hay significativamente diferencia en su reducción, excepto en algunos casos con cargas medias (23.32 g DQO/m².d) y altas (34.98 g DQO/m².d) y largos períodos de

alternancia (24 horas), en las que en la planta con alternancia se produce una mayor reducción.

El color de la biopelícula en las etapas iniciales de un aparato de biodiscos, utilizado en el tratamiento de efluentes domésticos, es generalmente gris o gris amarronado y filamentoso, mientras que en etapas posteriores es amarronado o rojizo amarronado, gelatinoso y menos filamentoso. La biomasa de color gris es indicativo de biomasa que preferentemente remueve materia orgánica carbonosa mientras que la amarronada rojiza es característica de la predominancia de microorganismos nitrificantes. (Friedman et al., 1979; Alleman et al., 1982; Kinner et al., 1983; Lin et al., 1986)

Alleman et al (1982) afirma que en las etapas iniciales del proceso, cuando la concentración de materia orgánica es alta, la biopelícula generalmente es de mayor espesor que la que se observa en etapas posteriores en donde el afluente contiene menor cantidad de materia orgánica.

1.2 Formulación del Problema

El efluente de los reactores UASB aún no cumple con los valores óptimos de calidad para su vertimiento o reutilización. Por ello es necesario la implementación de un tratamiento secundario que permita alcanzar estos valores.

En esta investigación, se propone un tratamiento aerobio mediante el uso de biodiscos de PVC (Policloruro de vinilo) para estudiar el comportamiento y desempeño del mismo en términos de remoción de materia orgánica.

En líneas generales se quiere demostrar que se pueden obtener eficiencias que nos proporcionen un efluente con calidad adecuada para su disposición final.

Por otro lado, el Perú cuenta con la Norma de Saneamiento OS. 090 para las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, que reglamenta la tecnología de tratamiento convencionales de tratamiento preliminar, tanques imhoff, sedimentadores, filtros percoladores, lagunas de estabilización, lodos activados y reactores anaeróbicos. Esta norma no se actualiza desde 1989, por tanto, no ha incorporado nuevas tecnologías como los contactores biológicos rotatorios o biodiscos, por lo cual es sumamente necesario realizar nuevas investigaciones relacionadas con biodiscos, de acuerdo a la realidad peruana.

1.3 Justificación

La investigación se realizó con el fin de aportar información del comportamiento de este tratamiento de aguas residuales domésticas mediante RBCs o biodiscos como tratamiento secundario de un efluente de un reactor UASB. Considerando que las principales ventajas que ofrece esta tecnología son el bajo consumo de energía frente a otros sistemas aerobios, poca área de terreno requerido, fácil construcción y expansión y una alta remoción de compuestos orgánicos.

Los parámetros que influyen en un sistema de biodiscos son las características del agua residual a tratar, el caudal de aplicación, el sentido de flujo respecto al sentido de

rotación de los discos, el área superficial del medio de soporte (discos), el material del medio de soporte, el porcentaje de sumergencia de los discos, la velocidad de rotación de los discos, el número de etapas, la separación de los discos y las características hidrodinámicas. Es por ello la importancia de ir conociendo a través de investigación la influencia de estos parámetros y sus valores óptimos.

Esta investigación aporta información acerca de las características físicas y microbiológicas de la biopelícula, el comportamiento del sistema cuando se varía la velocidad de rotación y la eficiencia en términos de remoción de materia orgánica.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Estudiar el comportamiento de un sistema de Contactores Biológicos Rotatorios (Biodiscos) como tratamiento secundario de un efluente de un UASB.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Determinar la eficiencia total de remoción de la DBO_5 y sólidos suspendidos.
- Comparar el rendimiento de remoción de dos etapas y una etapa de biodiscos respecto a la DBO_5 y sólidos suspendidos.
- Evaluar la influencia de la velocidad de rotación de los discos en la concentración del oxígeno disuelto del agua.

- Evaluar la influencia de la velocidad de rotación de los discos en los parámetros de calidad del agua residual DBO₅ y sólidos suspendidos.
- Evaluar la influencia de la velocidad de rotación de los discos en el desarrollo de la biopelícula.
- Comparar el desarrollo y características físicas (color, espesor y erosionabilidad) de la biopelícula de la primera y segunda etapa de biodiscos.

1.5 Hipótesis

Los discos de PVC de 60 cm de diámetro rotando a una velocidad de 3 RPM en el sistema de tratamiento secundario RBC permitirán una remoción mayor al 90% de la carga orgánica (DBO₅) y el aumento de la velocidad de rotación de los discos a 5 RPM incrementará la remoción a un valor mayor al 95%.

1.6 Variables de la Investigación

1.6.1 Variables Independientes

- La velocidad de rotación de los discos.
- Las características del agua residual del afluente.

1.6.2 Variables Dependientes

- La eficiencia de remoción de materia orgánica en términos de DBO5 a la salida de cada etapa de biodiscos.
- Los niveles de oxigenación medidos como la cantidad de oxígeno disuelto en el agua de cada etapa de biodiscos.
- Las características físicas y microbiológicas de la biopelícula.

1.6.3 Variables Intervinientes

- Las condiciones climatológicas como temperatura ambiente, temperatura del agua, humedad relativa, radiación solar, presión atmosférica.
- Condiciones hidráulicas de diseño: caudal de aplicación, pendiente de fondo de los reactores, tiempo de retención hidráulica, la homogeneidad de distribución y recolección del agua.
- Geometría de los reactores.
- Material de los discos.
- Área superficial efectiva de los discos.
- Porcentaje de sumergencia de los discos en el agua.
- Sentido de flujo respecto al sentido de rotación de los discos.
- Número de etapas de biodiscos.
- Distancia de separación de los discos.

CAPÍTULO II – MARCO TEÓRICO

2.1 Principio de Funcionamiento de los Biodiscos

Los biodiscos (RBC) son sistemas de tratamiento biológico aerobio de aguas residuales. En el caso de RBC, la biomasa se presenta simultáneamente en la forma de biopelícula fija (adheridas a los discos) y biopelícula en suspensión (como biomasa en el reactor). Aunque en mayor medida y la de mayor importancia es la biopelícula fija.

Consiste en un medio de soporte formado por discos de algún material en específico. Estos discos pueden estar parcial o totalmente sumergidos en el agua residual, y son montados paralelos entre sí y perpendicular al eje de soporte. El eje de soporte está unido a un motor mecánico que le da una velocidad de rotación a los discos.

Inmediatamente después del arranque del sistema, los microorganismos presentes en el agua residual comienzan a adherirse al medio en movimiento y a desarrollarse. Después de un corto periodo de tiempo se forma una delgada capa de biopelícula que cubre los discos.

El giro de los discos permite que la biopelícula esté en contacto con el agua residual y luego con la atmósfera alternadamente, de esta manera se promueve la transferencia de oxígeno manteniendo en condiciones aerobias a la biopelícula. Cuando la superficie está sumergida los microorganismos degradan los compuestos orgánicos depurando el agua, luego cuando gira el disco y queda expuesto a la atmósfera se presenta absorción de oxígeno a la biopelícula y posteriormente se transfiere al agua residual. La rotación de los discos también provee turbulencia en la superficie del licor de mezcla y sirve como mecanismo para la remoción de exceso de biopelícula en los discos (Patwardhan 2003; Rodgers & Zhan 2003). Posteriormente un clarificador es usado para remover este exceso de biomasa.

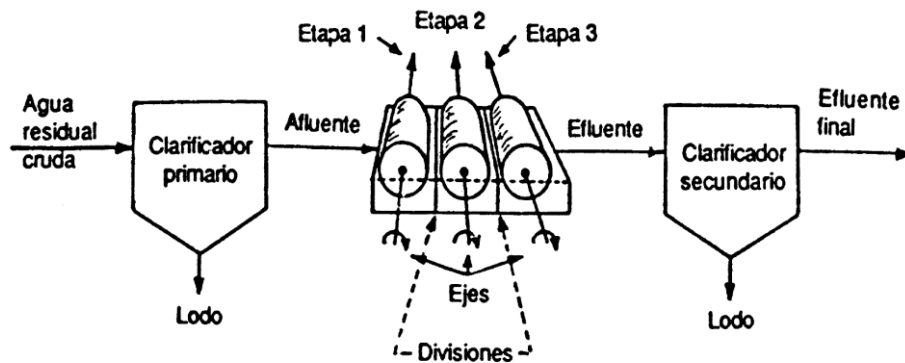


Figura 1 Esquema de una unidad RBC típica
Fuente: R.S Ramalho (1993)

El sistema de biodiscos en conjunto se comporta como un reactor de flujo pistón, mientras que cada etapa del mismo actúa como un reactor de mezcla completa en donde existe un equilibrio dinámico entre la velocidad del crecimiento de la biomasa y la velocidad de desprendimiento del exceso de ella. Así, el agua atraviesa las sucesivas etapas produciéndose un progresivo aumento del grado de depuración gracias a las diferentes especies biológicas que se desarrollan en la biopelícula adherida a los discos.

La rotación del sistema de biodiscos cumple los siguientes propósitos (Solario, 1988):

- Proporcionar contacto vigoroso entre la película y el agua residual.
- Mantener en condiciones aerobias el sistema.
- Ayudar a la distribución uniforme del oxígeno y del sustrato soluble en la biomasa.
- Crear un medio mecánico para establecer un equilibrio de la biomasa de organismos adheridos a los discos y la que se encuentra en suspensión en el licor del reactor.

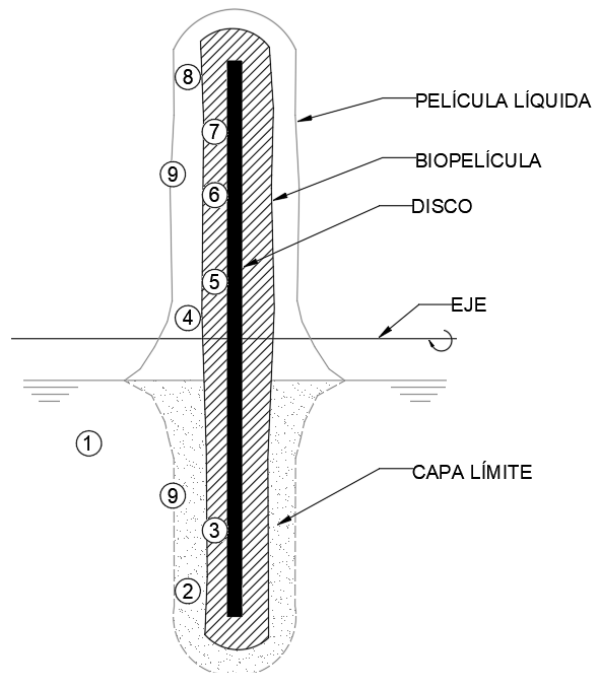


Figura 2 Posibles mecanismos limitantes
1. Licor de mezcla; 2. Difusión de sustrato a biopelícula en capa límite; 3. Difusión de sustrato de biopelícula a puntos de reacción; 4. Solución de oxígeno y difusión a través de la película líquida; 5. Difusión de oxígeno a través de biopelícula a puntos de reacción; 6. Tasas de reacción biológica; 7. Difusión de sub-productos metabólicos al exterior de la biopelícula; 8. Transporte de sub-productos metabólicos al licor de mezcla y a la atmósfera.

Fuente: A. A. Fiedman et al, 1978.

2.2 Ventajas y Desventajas

A continuación se nombran las principales ventajas y desventajas del proceso de tratamiento mediante biodiscos.

2.2.1 Ventajas

- Alta remoción de compuestos orgánicos carbonáceos y Nitrógeno amoniacal (Álvarez y Suárez, 2006)
- Alta sedimentabilidad de lodos (Borzacconi et al, 1996; Álvarez y Suárez, 2006)
- Resistencia a las variaciones de pH sin deteriorar su operación (Borzacconi et al, 1996).
- Eficiencia en metales pesados, donde se ha demostrado que puede darse remociones significativas de Cadmio, Cobre, Zinc (Costley y Wallis, 2000)
- Mínimo nivel de ruido (Welter et al, 2004)
- Bajo consumo de energía frente a otros sistemas aerobios.
- Poca área de terreno requerida debido al corto tiempo de retención hidráulica. (Susana Cortez et al, 2008)
- Resistencia frente a variaciones de cargas hidráulicas y orgánicas.
- Construcción modular y en compartimientos separados.
- Fácil construcción y expansión (Susana Cortez et al, 2008)
- Generalmente no requiere recirculación de efluentes ni lodos.
- Simplicidad en su operación, por lo tanto su mantenimiento es mínimo (Romero Rojas, 2008).
- Regulación de la tasa de aireación mediante variación de la velocidad de giro. (Welter Adriana et al)

2.2.2 Desventajas

- Dificultad al escalar. (Susana Cortez et al, 2008)
- Fallas en los discos, ejes y motores (Daños mecánicos)

- Fugas de lubricantes
- Criterios de diseño muy disímiles (Romero Rojas, 2008)
- Difícil fabricación del material de soporte – baja comercialización, lo que incrementa sus costos de inversión.
- Costos se comportan de manera lineal con respecto al caudal (viable en caudales relativamente bajos).
- Puede haber deterioro de los discos por exposición al calor, solventes orgánicos o radiación ultravioleta.
- Se puede tener olores si se presenta sobrecarga en la primera etapa del reactor (Alves, 2007)

2.3 Factores que Afectan el Rendimiento

El rendimiento de los RBCs depende de varios parámetros de diseño. Los de mayor importancia son: Velocidad rotacional de los discos, tasas de carga orgánica e hidráulica, tiempo de retención hidráulico (TRH), medio de soporte, etapas, temperatura, pH, características del agua residual y la biopelícula, niveles de oxígeno disuelto (OD), recirculación de lodos y efluente y sumergencia o inmersión de los discos.

2.3.1 Velocidad Rotacional

La velocidad rotacional de un RBC es un parámetro de suma importancia que afecta la transferencia de oxígeno y nutrientes en la biopelícula y consecuentemente la remoción del sustrato.

Usualmente un incremento en la velocidad de rotación incrementa la concentración de oxígeno disuelto disponible para los microorganismos y como resultado, pueden degradar el sustrato a una mayor tasa. (Israni et al, 2002)

Investigadores como Friedman et al 1979, encontraron que la rapidez de utilización del sustrato aumenta con la velocidad de rotación, ya que velocidades altas mejoran la transferencia de oxígeno.

Sin embargo, incrementando la velocidad de rotación conduce a un mayor consumo de energía. Que puede no ser económico para algunas aplicaciones de aguas residuales (Ramsay et al, 2006). Por otra parte, si la velocidad rotacional se pone muy alta, el esfuerzo cortante del agua y la turbulencia provoca el desprendimiento de la biopelícula del medio de soporte, deteriorando la calidad del efluente y bajando la tasa de biodegradación en el reactor. (Susana Cortez et al, 2008)

Por lo tanto, el principio del reactor es adoptar la velocidad mínima necesaria para un tratamiento aceptable. De acuerdo con Mathure and Patwardhan (2005), velocidades de rotación típicas son de 1-10 rpm para discos de 1-4 metros de diámetro montados en ejes de 5-10 metros de longitud.

Diferentes estudios indican que existe una relación entre las rpm y el rendimiento del sistema. Por ello es importante implementar una planta piloto o de laboratorio para la generación de información para que la planta a escala real sea operada a una velocidad óptima de rpm. (Selcuk Soyupak, 1976)

A mayor velocidad de giro se obtiene mayor oxigenación y mayores tasas de remoción, no obstante la rotación del disco no puede exceder una velocidad lineal de 0.33 m/s porque el esfuerzo cortante del agua y la turbulencia puede provocar el desprendimiento descontrolado de la biopelícula adherida al disco (Castillo y Vivas, 1996), además aumenta los costos operativos al consumirse mayor energía de la necesaria.

2.3.2 Carga Hidráulica y Orgánica

La carga orgánica de un reactor RBC debe ser definido con precisión durante la planificación y diseño. La variación de la tasa de carga orgánica es generalmente acompañada por variaciones de flujo del afluente o del tiempo de retención hidráulico (TRH), lo cual, también resulta en cambios de la carga hidráulica (Najafpour et al, 2005).

Años atrás, el rendimiento de los RBC fueron correlacionados con la carga hidráulica y fue utilizado como factor de diseño, sin embargo, este parámetro no incluye las características del afluente (sustrato) y por lo tanto fue cambiado por la carga orgánica como parámetro de mayor confiabilidad (Juan D. Pérez, 2010). La carga orgánica corresponde al contenido orgánico aplicado en un tiempo por unidad de superficie. La carga orgánica puede expresarse como la total o soluble para diferentes parámetros como DBO, DQO o COT. La carga orgánica es calculada por la siguiente expresión:

$$CO = \frac{S \times Q}{A}$$

Donde:

CO: Carga Orgánica (g DBO, DQO o COT / m².d)

S: Concentración de carga orgánica del afluente (g/l)

Q: Caudal del afluente (l/d)

A: Área de los discos (m²)

Experimentalmente, se ha encontrado que, cuando existe sobrecarga orgánica, el disco tiene problemas de operación: por una parte la concentración de oxígeno disuelto en la primera etapa alcanza niveles tan bajos que se presentan condiciones anaerobias. (Simón Gonzales & José G. Elías, 1989). Una elevada carga orgánica aplicada en la primera etapa incrementa la probabilidad de desarrollar problemas como un excesivo espesor de la biopelícula, aparición de olores de H₂O y excesivo

crecimiento de organismos nocivos para el proceso como la *Beggiatoa* (Tchobanoglous and Burton 1991; Grady et al, 1999).

Resultados experimentales sugieren que la tasa de nitrificación disminuye al aumentar la carga orgánica. Las primeras etapas son las más afectadas pues, al recibir cargas orgánicas altas, la población microbiana queda constituida prácticamente por organismos heterótrofos y la nitrificación es nula. Incluso puede ocurrir un aumento de la concentración de amoníaco, en las primeras etapas, como resultado del metabolismo heterótrofo. (Yu et al, 1984; Kincannon et al, 1984; Chung y Borchardt, 1984).

2.3.3 Tiempo de Retención Hidráulico

Estudios con sistemas RBC han revelado que largos tiempos de contacto mejoran la difusión del sustrato dentro de la biopelícula y su consecuente remoción del afluente (Hanhan et al, 2005; Najafpour et al, 2006).

TRH muy cortos resultará en bajas tasas de remoción, mientras que TRH muy prolongados no serán económicamente viables.

2.3.4 Medio de Soporte

El medio de soporte de los biodiscos ha evolucionado considerablemente desde su diseño original. Actualmente existen muchas variaciones, desde simples discos planos hasta corrugaciones a mallas celulares, todas ellas diseñadas para incrementar el área superficial por unidad de volumen. Sin embargo, a mayor complejidad del medio de soporte, los costos se incrementan. (Ware et al. 1990).

Las corrugaciones en el medio de soporte mejoran la estabilidad estructural de la biopelícula, promueve la transferencia de masa e incrementa el área superficial disponible. (Grady et al. 1999).

Se han realizado modificaciones del diseño convencional estudiadas a escala de laboratorio con resultados positivos en términos de remoción de materia orgánica.

Para poder incrementar el área y volumen de la biopelícula, Radwan y Ramanujam (1997) modificaron los discos de un RBC por mallas porosas de netlon (malla mosquitera). Guimaraes et al. (2005) también unieron espuma de poliuretano sobre discos de plásticos para incrementar la adhesión de organismos filamentosos.

En el laboratorio y a escala piloto, se han sustituido, satisfactoriamente, los discos por biocilindros conteniendo pequeños medios de soporte de plástico (RBC-Moving Bed) (Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Tales medios de soporte proveen mayor área superficial para la adherencia de la biopelícula que un RBC convencional de las mismas dimensiones, aumentando la eficiencia en la transferencia de masa debido al incremento de la turbulencia. Además tienen bajo consumo de energía y el costo de fabricación es de un tercio que los discos (Ware et al. 1990). Diferentes tamaños de los elementos de plástico y formas de anillos con paletas, sillas y cilíndricas han sido utilizados como medios de soporte dentro de los biocilindros presentando resultados atractivos. (Nahid et al. 2001; Mathure and Patwardhan 2005; Sirianuntapiboon 2006).

2.3.5 Número de Etapas

Las etapas consisten en subdivisiones que se le instalan al reactor mediante baffles o separando el volumen del reactor en diferentes tanques con el propósito de distribuir el material de soporte (biodiscos). Los arreglos típicos para la división de etapas se pueden observar en la Figura 3. Esta situación promueve el establecimiento de diferentes condiciones en cada etapa (carga orgánica, pH, oxígeno disuelto) y contribuyen al desarrollo de diferentes tipos de microorganismos. Las etapas en un reactor RBC es recomendado para maximizar la remoción de la DBO5 y el nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_4\text{-N}$) (Metcalf y Eddy, 1996).

El dividir el RBC en varias etapas permite adquirir la importante característica de una mayor especialización de los microorganismos al situarse en cada etapa los diferentes tipos de poblaciones microbianas especializadas en la degradación del sustrato correspondiente. (J. Bezanilla, 1993)

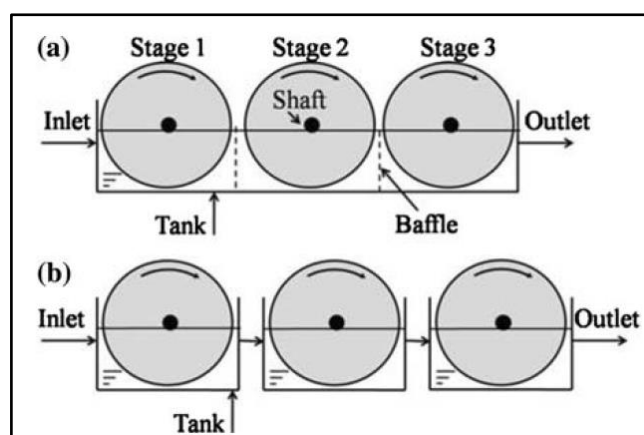


Figura 3 Arreglos típicos de etapas en un RBC
 (a) Mediante Pantallas; (b) Tanques en serie.

Fuente: *Rev. Environmental Science Biotechnology* (2008) 7:155-172

En aplicaciones para tratamientos secundarios, los RBC deben ser diseñados y operados en una serie de tres etapas. Para una remoción combinada de DBO₅ y NH₄⁺-N se recomienda un mínimo de cuatro etapas. Para plantas pequeñas, múltiples etapas se pueden colocar sobre un solo eje orientado en paralelo a la dirección del flujo. En grandes instalaciones, los ejes son montados perpendicular al flujo con varias etapas en serie (Tchbanoglous and Burton 1991).

El flujo del agua residual fluye a través del sistema pasando de una etapa a otra, donde la etapa siguiente recibe el efluente de la anterior etapa con una concentración orgánica más baja. Debido a que las bacterias heterotróficas crecen más rápidamente que las bacterias nitrificantes, la primera etapa tiende a ser principalmente un dispositivo de eliminación orgánica, a no ser que el contenido orgánico de agua residual sea muy bajo. A medida que el agua residual pasa a la segunda etapa y las subsiguientes, el RBC tiende a eliminar primero el amoníaco y luego el nitrito, y el producto final es el nitrato, suponiendo que es un RBC con un tamaño y funcionamiento adecuado (Hoccheimer and Wheaton 1998). Cuando el agua residual se recircula desde la última etapa a la primera etapa, la desnitrificación se puede lograr en la primera etapa, donde hay una alta carga orgánica y bajas concentraciones de oxígeno disuelto.

J. Bezanilla, 1993 en su tesis doctoral menciona que la acción de dividir el proceso en etapas contribuye a mejorar el comportamiento hidráulico, puesto que se dispone

de una serie de tanques perfectamente mezclados y la distribución del tiempo de residencia se aproxima al comportamiento de flujo pistón. Radwan y Ramanujam (1997) concluyeron que la división en etapas en el diseño de los sistemas RBC es especialmente importante en cargas orgánicas más altas y también si se requiere una alta calidad de tratamiento de efluentes. Además, según Tawfik et al. (2002) las etapas de un RBC disminuye el efecto perjudicial de los shocks o picos de carga en el rendimiento del sistema.

Antonie (1976), citado por Castillo y Vivas (1996) señala que, al experimentar con dos unidades de biodiscos de igual área superficial total, una dividida en dos etapas y la otra en cuatro, se obtuvo una remoción del 85% de DBO para la de más etapas mientras que la otra eliminó el 75%.

Clark y otros (1978) encontraron que en las dos primeras etapas no se llevan a cabo los procesos de nitrificación o se efectúan con poca intensidad. Sin embargo, en las finales, generalmente más del 80% del nitrógeno amoniacal es convertido en nitritos y nitratos.

2.3.6 Temperatura y pH

Juan Pérez Aristizábal (2010) menciona en su tesis de maestría que la temperatura influye en el desempeño del reactor debido a la afectación que puede ocurrir en los procesos biológicos. Un incremento de temperatura puede aumentar la actividad microbiana y por ende aumenta la tasa de remoción de contaminantes. Cuando la temperatura está por debajo de 13 °C los procesos de remoción de carbono y nitrógeno se ven muy afectados y por lo tanto se deben aplicar un factor de corrección de la superficie necesaria de discos para contrarrestar ese efecto. Aunque el aumento de temperatura contribuye a la actividad microbiológica, la temperatura no puede ser muy alta porque afecta la solubilidad del oxígeno disuelto en el agua y puede ser factor limitante para el proceso microbiológico.

La oxigenación del agua residual es función de la temperatura. Generalmente, la solubilidad de un gas en un líquido disminuye al aumentar la temperatura. Para el oxígeno atmosférico, se tienen valores de saturación de 14.6 mg/l a 0 °C, de 9.0 mg/l a 20 °C y de 6.8 mg/l a 30 °C en agua libre de cloruros y a 1 bar (APHA, 1981). A más de 30 °C, el valor disminuye hasta un punto en el cual la solubilidad casi desaparece.

La alteración de la actividad metabólica por efecto de la variación de la temperatura, de los microorganismos heterótrofos y autótrofos es diferente en cada uno de ellos. Comparativamente, el efecto de la temperatura es mayor sobre la rapidez de la nitrificación que sobre la rapidez de eliminación de carbono. Así, la primera decrece alrededor del 50% por cada 10 °C que se reduzca la temperatura del agua residual por debajo de los 30 °C (Hitdlenbaugh y Miller, 1981). Según Norouzian (1983) la actividad de las bacterias nitrificantes se acelera conforme la temperatura aumenta entre los 12 y 20 °C, pero con valores mayores que este último ya no se observa ningún incremento significativo de la actividad metabólica. Pano y Middlebrooks (1983) informan que se impide el desarrollo de bacterias nitrificantes si la temperatura está por debajo de 5 °C.

Autotrol (1978) menciona que cuando el agua residual es tratada entre los 12 y 32 °C, la operación se lleva a cabo en forma satisfactoria. Si la temperatura de proceso es menor a 12 °C, la eficiencia del tratamiento decrecerá significativamente. A más de 32 °C, la población bacteriana cambia de mesófila a termófila, y este último tipo de bacterias es menos eficiente en la eliminación de contaminantes.

Respecto a los valores del pH, Antoine (1976) menciona que una eficiencia óptima se obtiene con valores de pH entre 6.5 y 8.5. Painter afirma que el proceso de nitrificación cesa cuando el pH toma valores entre 6.3 y 6.7, mientras que Andrews muestra que los valores de pH entre 5.2 y 7.2 reducen marcadamente la oxidación del amoníaco (Hitdlenbaugh y Miller, 1981). Friedman y otros (1979) informan que el comportamiento del pH en un RBC tomó el perfil descrito en la Figura 4. Donde se observa dos caídas del valor del pH, la primera se debe probablemente a la producción de ácidos orgánicos y dióxido de carbono en las etapas iniciales y la segunda es ocasionada por el proceso de nitrificación.

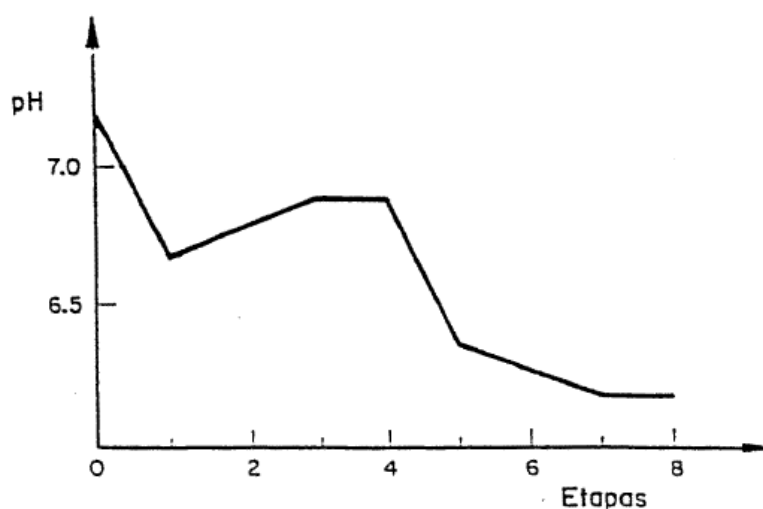


Figura 4 Evolución del pH en un RBC
Fuente: Friedman et al, 1979

2.3.7 Características del Agua Residual

Las sustancias del afluente y sus niveles de concentración pueden jugar un rol importante en la operación de los RBCs. Por ejemplo, El flujo hacia la biopelícula puede ser menor para compuestos grandes y lentamente biodegradables. La presencia de materia orgánica particulada puede reducir el flujo de sustrato soluble ya que la materia en partículas ocupa espacio dentro de la biopelícula, lo que disminuye la velocidad de biodegradación (Grady et al. 1999).

Cuando el sulfuro está presente, ya sea en las aguas residuales afluentes o por su producción en el interior de la biopelícula, bacterias oxidantes del sulfuro como la *Beggiatoa* crecerán en la superficie de la biopelícula. La producción de sulfuro dentro de la biopelícula es debido a la depletación de oxígeno. La *Beggiatoa* compite con organismos heterótrofos por oxígeno y en casos extremos poblará la primera etapa de un RBC sobrecargado, desplazando la carga a la siguiente etapa y poblando progresivamente todo del sistema (Mba et al. 1999).

Al igual que para cualquier tratamiento biológico, es importante considerar algunos constituyentes presentes en el agua residual que podrían afectar el proceso de degradación de la materia orgánica tales como los metales pesados y compuestos tóxicos que pueden inhibir la actividad biológica.

2.3.8 Características de la Biopelícula

Para optimizar la remoción de materia orgánica y compuestos de nitrógeno del agua residual en un RBC, se debe entender y conocer la naturaleza dinámica y las características de la biopelícula.

La biopelícula es un ecosistema compuesto de microorganismos, polímeros extracelulares y agua. La distribución espacial de esos componentes dentro de la matriz de la biopelícula puede influir en las funciones de la biopelícula y la relación con el entorno acuático inmediato. Esto a su vez, depende de las condiciones de funcionamiento. Por ejemplo, el espesor de la biopelícula depende de la carga orgánica aplicada y las fuerzas de corte (Griffin and Findlay, 2000).

Las observaciones de biopelículas de RBC a gran escala que tratan aguas residuales municipales informan que las biopelículas de las etapas iniciales tienen un aspecto gelatinoso, ya que suelen ser de color grisáceo y pueden presentar algunas zonas blancas probablemente debido a bacterias filamentosas como *Beggiatoa*. Las biopelículas de las últimas etapas parecen más compactas: siempre son más delgadas que en las primeras etapas y tienen un color marrón o algunas veces rojizo. Además, el principal factor limitante del crecimiento de la microfauna es el grado de contaminación en el afluente expresado en términos de DQO o DBO₅. Mientras este parámetro disminuya a lo largo del RBC, su efecto como factor limitante también disminuye, lo que resulta en un aumento en la mayoría de las especies existentes. Las etapas iniciales están constituidas casi en su totalidad por especies de ciliados, mientras que las últimas muestran comunidades más diversificadas, no solo en especies de ciliados sino también en flagelados, amebas y metazoos (Martín Cereceda et al. 2001; Salvadó et al. 2004).

Los estudios microscópicos revelan que la capa externa de biopelículas de un RBC a gran escala es muy heterogénea y compleja, compuesta principalmente por bacterias filamentosas, protozoos, algas eucariotas verdes y pequeños metazoos. La capa interior es más uniforme y compacta (Martín Cereceda et al. 2001).

Los organismos filamentosos frecuentemente presentes en la biopelícula son *Beggiatoa* sp. y *Sphaerotilus natans* (Galvan et al. 2000). El desarrollo de *Beggiatoa*,

como se mencionó anteriormente, siempre se toma como una advertencia para el rendimiento de las unidades de RBC debido a que su desarrollo evita el desprendimiento de biopelículas gruesas de los discos, lo que puede provocar una sobrecarga en los soportes de los medios (Rodgers y Zhan 2003). Se han encontrado biopelículas con un espesor de 0,5 a 4,5 mm en los discos de RBCs a gran escala que tratan aguas residuales municipales. El control del espesor de la biopelícula es muy importante para evitar la obstrucción o la fatiga del material (Griffin y Findlay 2000). Se debe proporcionar a las unidades de RBC un mecanismo positivo para eliminar el crecimiento excesivo de biopelículas de los medios, como las velocidades de rotación variables, la extracción de aire, aire o agua suplementarios o la capacidad de invertir la rotación del eje (Tchobanoglous and Burton, 1991).

2.3.9 Oxígeno Disuelto

En un sistema RBC aeróbico, la biopelícula se forma en el medio de soporte, que está parcialmente sumergido en las aguas residuales y parcialmente expuesto al aire. La rotación expone alternativamente esta biopelícula al oxígeno atmosférico y las aguas residuales. El oxígeno se transfiere del aire a la unidad de RBC de tres maneras: mediante la absorción de oxígeno en la película líquida sobre la superficie de la biopelícula cuando la biopelícula está en el aire; por transferencia directa de oxígeno en la interfaz aire-agua; y por la absorción directa de oxígeno por los microorganismos durante las exposiciones al aire (Grady, 1982).

Generalmente, como consecuencia de una respiración activa en las etapas iniciales, la concentración de oxígeno alcanza niveles mínimos, aumentando a lo largo del reactor donde la concentración de sustrato es baja.

José Bezanilla (1993) en su tesis doctoral menciona que uno de los principales problemas de funcionamiento de los RBCs es la aparición de condiciones anaerobias. Cuya presencia da lugar a la degradación de los polímeros que son los que dan consistencia a la biopelícula, y como consecuencia se desprende la biomasa de la superficie del disco.

El factor limitante. En un sistema RBC, de la degradación de la materia orgánica del agua residual es la velocidad de difusión del oxígeno hacia la biopelícula y dentro de ella, y no la rapidez de difusión del sustrato (Willianson y Mc Carty, 1976).

Bintaja y otros (1976) compararon dos sistemas de biodiscos, uno con atmósfera de aire y otro con oxígeno al 99.5% (Figura 5), y encontraron que en el segundo proceso la eliminación de DQO resultó ligeramente superior cuando la carga era baja (13.8 a 18.4 Kg DQO/d.1000 m²). Para cargas orgánicas tan bajas, los requerimientos de oxígeno de los microorganismos pueden ser cubiertos por cualquiera de los dos sistemas. Para cargas orgánicas tan altas (34.4 Kg DQO/d.1000 m²), la reducción de la DQO en el proceso con atmósfera de oxígeno fue aproximadamente el doble de la lograda por el proceso convencional.

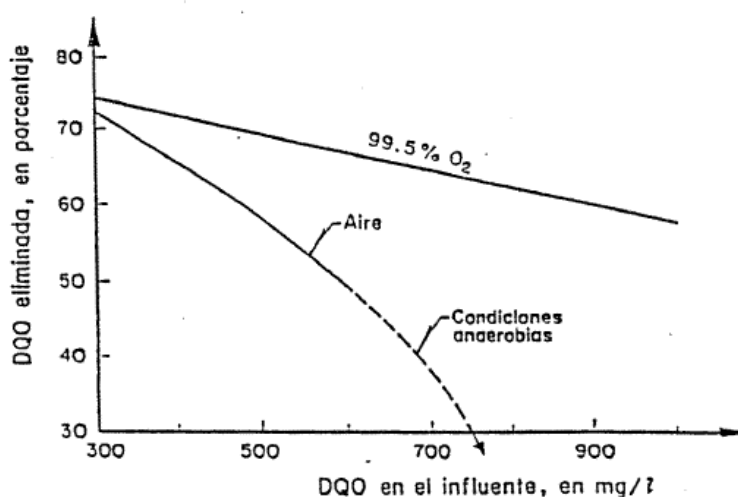


Figura 5 Eliminación de DQO con atmósfera de aire y con atmósfera de oxígeno del 99.5% de pureza

Fuente: José Bezanilla, 1993

En el mismo estudio, se informa que la producción de biomasa disminuye alrededor de un 40% en la unidad que opera con atmósfera de oxígeno. Un análisis comparativo muestra que, en dicha unidad los lodos están formados por flóculos con diámetros mayores y estructura más compacta que los del proceso convencional., lo que representa una ventaja en las propiedades de sedimentación del sistema operando con oxígeno.

El oxígeno disuelto es muy importante en la oxidación carbonosa y la nitrificación, siendo el factor de diseño más importante para los RBCs. Durante la operación, los niveles de oxígeno deben controlarse adecuadamente y, para evitar que se conviertan en un factor limitante, las etapas iniciales deben tener al menos 2 mg de OD/l (Nowak, 2000).

2.3.10 Recirculación de efluente y sólidos

La recirculación de efluentes o sólidos es una solución atractiva para las plantas de RBC existentes que deben actualizarse para cumplir con límites de efluentes más estrictos o para un mayor rendimiento. Se han reportado mejores eficiencias de eliminación de DQO, DBO5 y amoníaco cuando se aplica la recirculación, aumentando los índices de recirculación (Klees y Silverstein 1992; Neu 1994). La nitrificación mejorada con recirculación se ha atribuido a la dilución del carbono orgánico biodegradable influente. A pesar de ser opcional, la recirculación debe considerarse en el diseño de RBC para condiciones adversas. La tasa de recirculación recomendada es aproximadamente el 25% del flujo de diseño promedio (Le Groupe Teknika 1988).

2.3.11 Porcentaje de Sumergencia

El porcentaje de sumergencia o inmersión del medio de soporte de un RBC depende de varios factores a saber, el tipo de operación, los microorganismos y las características del efluente a tratar. Típicamente, en los procesos aeróbicos del tratamiento de aguas residuales municipales, la inmersión es aproximadamente del 40%, aunque en la eliminación de nutrientes puede alcanzar el 60%. Sin embargo, debido a la diversidad de las aguas residuales industriales, no existe un valor de referencia para la inmersión de discos. (Susana Cortez et al. 2008).

Los contactores biológicos sumergidos (SBC, por sus siglas en inglés), como se les llama, operan a una inmersión de 70 a 90%, lo que brinda las ventajas de un mayor volumen de medio disponible y menos unidades de SBC requeridas (Schwingle et al.

2005). La sumergencia en exceso del 50% disminuirá la tasa de transferencia de oxígeno en el sistema, por lo tanto, si el SBC se usa para tratar el agua residual de manera aeróbica, se deben usar unidades de impulsión de aire adicionales para proporcionar oxígeno y rotación (Rodgers y Zhan 2003).

Los RBCs muy sumergidos también pueden aplicarse como RBC anaeróbicos (Lu y Yeh 1995; Lu et al. 1997a, b) o utilizarse para la desnitrificación (Teixeira y Oliveira 2001). En estas aplicaciones, las unidades RBC están completamente cerradas para evitar la entrada de aire.

2.4 Microbiología en el Proceso de Biodiscos

Los RBC tienen como objetivo la remoción de la materia orgánica por procesos biológicos, por ello es importante conocer la dinámica de los microorganismos y el rol que desempeñan en la degradación de los compuestos orgánicos.

En esta sección se describirá de forma general el rol que desempeñan los principales microorganismos en los procesos RBC. Luego se explicará las principales características, formación y desarrollo de la biopelícula. Finalmente se describen los procesos que intervienen en la remoción de Carbono.

2.4.1 Principales Microorganismos en la Biopelícula

Los microorganismos pueden obtener energía de diferentes componentes. Los microorganismos que se encargan de remover el Carbono y Nitrógeno del agua

residual son llamados Organismos Quimiótrofos, es decir, organismos que obtienen energía a partir de reacciones químicas como la oxidación de compuestos orgánicos (Organismos Quimioheterótrofos) o inorgánicos (Organismos Quimioautótrofos) (Metcalf y Eddy, 1996).

Los principales microorganismos que intervienen en un proceso biológico RBC son las bacterias, bacterias filamentosas, protozoos y metazoos. A continuación se da una breve descripción del papel que juegan en la depuración de las aguas residuales.

a. Bacterias

Constituyen la población mayoritaria y más importante en los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Las distintas actividades bioquímicas de las bacterias como grupo, les permiten metabolizar la mayor parte de los compuestos orgánicos que se encuentran en las aguas residuales. Son microorganismos heterótrofos, es decir, utilizan la materia orgánica como fuente de carbono. (M. Vilaseca, 2001).

Su tamaño oscila entre 0.5 y 5 μm . Son los organismos más importantes en el sistema aerobio porque se desarrollan bien en el sistema y son excelentes en el sistema aerobio porque se desarrollan bien en el sistema y son excelentes oxidadores de la materia orgánica (Romero Rojas, 2008).

Una característica importante de algunas bacterias es su capacidad de flocular. Los flóculos que se forman están constituidos por bacterias unidas unas a otras y también por partículas orgánicas e inorgánicas. Gracias a la formación de estos flóculos, pueden ser retenidos en la unidad de sedimentación secundaria y de esta manera se obtiene un efluente final más claro y de mejor calidad. (Juan Pérez, 2010)

b. Bacterias Filamentosas

Juan D. Pérez (2010) en su tesis de maestría explica que las bacterias filamentosas se clasifican principalmente por su género y especie, sin embargo hay casos donde se utiliza una denominación alfanumérica. Algunas bacterias filamentosas encontradas

en los reactores de Biodiscos son: *Beggiatoa* sp., *Sphaerotilus natans*, Tipo 0041, Tipo 1701, *Nocardia* sp., Tipo 021N (Romero Rojas, 2008).

Antnie y Welch (1969) fueron de los primeros investigadores que identificaron los microorganismos asociados con la biopelícula de un sistema de biodiscos. Encontraron, como más importante a los organismos filamentosos *Getrichum candidum* y *Bacillus cereus*. Además mencionan que las bacterias filamentosas forman una especie de malla biológica sobre la cual otros microorganismos se pueden adherir.

c. **Protozoos**

Estos organismos son protistas unicelulares que pueden ser aerobios o anaerobios. Los protozoos se alimentan de bacterias y otros microorganismos, por lo tanto son muy importantes en el tratamiento biológico pues mejora la calidad del efluente (Romero Rojas, 2008).

La mayoría de los protozoos depende, para su alimentación, de la existencia de materia orgánica preformada, por lo que son considerados saprobios (Martín, 1980; Luna-Pabello et al, 1994)

Curds (1975) menciona que la mayoría de los protozoos requiere oxígeno libre para sobrevivir. Existen algunos de tipo anaerobio y un gran número de anaerobios facultativos, pero el número de especies aerobias obligadas es comparativamente mucho mayor. Requieren que el pH para crecer y sobrevivir esté en un rango de 3.8 y 12 unidades; siendo el intervalo más adecuado entre 6 y 8 unidades.

La importancia del papel que estos microorganismos tienen en los sistemas acuáticos se basa principalmente en que son consumidores directos de materia orgánica del medio, propician la formación de flóculos, a través de la excreción de productos mucilaginosos y son los principales consumidores de las poblaciones bacterianas que se desarrollan en el medio acuático (López, 19997).

Dentro de este grupo podemos identificar a los protozoos más importantes:

Ciliados

Los ciliados contribuyen directamente a la clarificación del efluente a través de dos mecanismos, que son la floculación y la depredación, siendo esta última la más importante. Existen diversos estudios que han demostrado experimentalmente que la presencia de protozoos ciliados en las plantas de tratamiento de aguas residuales mejora la calidad del efluente (M. Vilaseca, 2001).

Los ciliados se pueden clasificar en dos grandes categorías en función de su relación con el flóculo: Los ciliados asociados al flóculo (Pedunculados y reptantes) y los ciliados no asociados al flóculo (Nadadores o libres)

Los **ciliados nadadores libres** tienen formas ovales, redondeadas alargadas y se mueven mediante cilios. Viven fundamentalmente en el agua libre, desplazándose y alimentándose de las bacterias dispersas en el medio. Ejemplos de ellos son *Paramecium sp.*, *Paramecium caudatum*, *Chilodonella sp.*, *Holophrya sp.*, *Litonotus sp.*, *Paradileptus sp.*, *Spirostomum sp.*, *Tetrahymena sp.*, *Trachellophylum sp.*

Los **ciliados reptantes** se desplazan sobre las superficies y flóculos de lodos, alimentándose de las bacterias que se encuentran a su paso. Presentan estructuras ciliares llamadas cirros (cilios que aparecen agrupados en tufos o mechones). También se desplazan libremente a través del agua libre. Los más importantes son *Aspidisca sp.*, *Euplotes*, *Oxytricha sp.*, *Parurosoma sp.*



Figura 6 Ciliados Reptantes y Nadadores
Ciliado reptante Euplotes sp. (izq) – Ciliado nadador
Paramecium caudatum (der)
Fuente: Guía metodológica para la elaboración de análisis
microbiológicos de fangos activados de EDARs

Los **ciliados fijos o pedunculados** posee células que se fijan a sustratos mediante un pedúnculo, aunque existen también especies móviles. Se desarrollan de forma solitaria o formando colonias. Los individuos de este grupo se alimentan de bacterias. Ciliados fijos encontrados en estudios de Biodiscos están: *Carchesium sp.*, *Epistylis*, *Opercularia sp.*, *Vorticella*, *Zoothamnium sp.* (Martín-Cereceda et al, 2001)

Los **ciliados suctores** se caracterizan por poseer tentáculos al final de los cuales se hallan unos botones que se fijan a otros protozoos, disuelven la membrana y los vacían. Son organismos carnívoros que se alimentan de otros protozoos y pequeños metazoos. Entre ellos están *Acineta tuberosa*, *Periacineta sp.*, *Podophyra fixa*. (Juan Pérez, 2010)

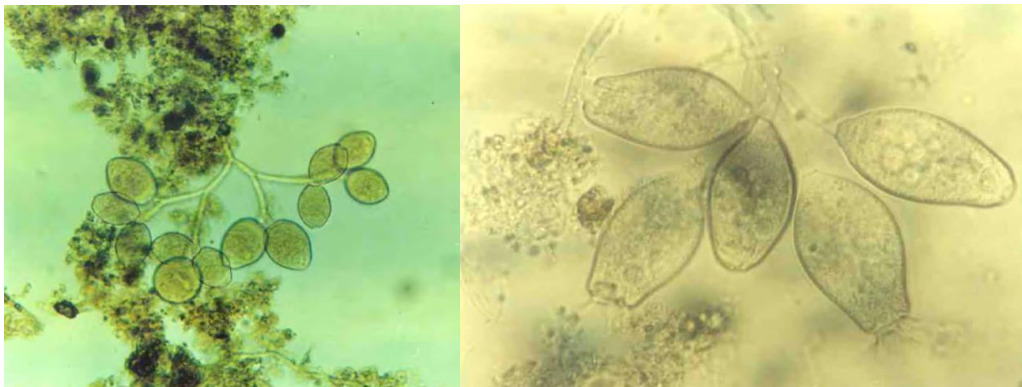


Figura 7 Ciliados Fijos
Epistylis sp. (izq) – Opercularia sp. (der)
Fuente: Guía metodológica para la elaboración de análisis
microbiológicos de fangos activados de EDARs

d. Metazoos

Los metazoos son organismos pluricelulares. Su presencia en el tratamiento de agua residual es menor que la de los protozoos. Los dos grupos que se pueden encontrar son los rotíferos y nemátodos.

Rotíferos

Los rotíferos presentan un órgano rotatorio, con cilios de movimiento giratorio creando fuertes corrientes de agua que le sirven para captar su alimento. Los rotíferos

frecuentemente se encuentran aferrados a partículas de floc en la superficie. Tienen diferentes formas y tamaños que pueden variar de 50 a 500 μm . Su función principal es remover partículas y bacterias suspendidas o libres, favoreciendo a la clarificación del agua residual.

La presencia de este organismo indica un buen proceso de tratamiento porque necesitan de buenos niveles de oxígeno disuelto (mayor a 1 ppm de OD), bajos niveles de toxicidad e indican un bajo contenido de DBO en el agua. (Juan Pérez, 2010)

Nemátodos

Los nemátodos son organismos pluricelulares de la clase Nematoda. Su tamaño oscila generalmente entre 100 y 500 μm . Ellos poseen un cuerpo no segmentado de forma cilíndrica y cubierto por una cutícula. La mayor parte de los que aparecen son predadores de bacterias dispersas y protozoos, pero también pueden aparecer formas saprozoicas capaces de alimentarse de la materia orgánica disuelta e incluso de la materia de los flóculos (Vilaseca, 2001)

Pueden vivir en cualquier ambiente y pueden desarrollarse aún en condiciones anóxicas. La presencia de los nemátodos es importante debido a que forma cavidades en la biopelícula cuando se mueve y de esta manera se mejora la transferencia de oxígeno hacia las capas más profundas. También previene el crecimiento excesivo de la biopelícula y evita su obstrucción (Spellman, 2003; Salvado et al, 2004).

Los reactores RBC generalmente son divididos en etapas para favorecer el crecimiento de las diferentes especies mencionadas anteriormente, dependiendo de las condiciones ambientales que se presentan en cada una de ellas. (Juan Pérez, 2010)

Kinner and Curds (1989), establece que la sucesión de microorganismos en las etapas de un RBC es similar a lo observado en un proceso de lodos activados. Primero inicia la colonización bacteriana, seguido por protozoos flagelados y pequeñas amebas, posteriormente ciliados libres bacteriófagos, luego nemátodos, ciliados fijos y termina en los rotíferos. Al igual como en cualquier ecosistema se presenta interacciones entre la comunidad biológica (en este caso entre los microorganismos)

tales como competición, predación, parasitismo, comensalismo y mutualismo, los cuales definen la diversidad y dominancia de las especies (Welter et al, 2004).

En las primeras etapas de un biodiscos se remueve principalmente los compuestos orgánicos (remoción de DBO) mientras que las etapas donde ya se ha reducido significativamente la DBO, se empieza a remover NH_4 por procesos de nitrificación. El desempeño de los biodiscos en la remoción de estos compuestos es afectado negativamente por niveles bajos de oxígeno disuelto y de pH (Bitton, 2005).

2.4.2 Biopelícula

A continuación se mencionan algunos conceptos de la biopelícula desarrollado por diversos autores.

(Eighmy & Maratea, 1983), describen la biopelícula como un ensamblado de bacterias que está adosada por un pegamento a una superficie húmeda por medio de una matriz extracelular de polisacáridos fibrosos. Esta matriz, llamada cápsula o glicocálix, es sintetizada por las bacterias y su función principal es sujetar las células adsorbidas al soporte.

(Waleed, 1993), describe el biofilm como un entramado complejo de microorganismos dotados de sustancias poliméricas extracelulares. La distribución espacial de estos componentes principales dentro de la matriz del biofilm, así como sus propiedades (físicas, químicas y biológicas) influyen la actividad en el mismo y su relación con el ambiente acuoso inmediato. Además el biofilm es muy dinámico; su composición y características cambian en el tiempo.

Según (Costerton, Philip, & Greenberg, 1999), los biofilms son comunidades bacterianas englobadas en una matriz de exopolisacáridos producida por las bacterias y adheridas a una superficie viva o inerte. En la naturaleza constituyen un modo de crecimiento protegido que permite la supervivencia de las bacterias en un medio hostil. Las estructuras que forman estas microcolonias contienen canales por los que circulan los nutrientes.

(Lewandowski et al, (1994)), citado por (Gálvez Rodríguez, 2001), describe la biopelícula o biofilm, como una estructura compleja formada por agregados celulares (grupos de células densamente empaquetados) y huecos intersticiales, adherida a un material que puede ser de origen natural o sintético. Su estructura es morfológica y fisiológicamente distinta a la de bacterias libres, utilizándose incluso mediadores químicos intercelulares para desarrollar la película (Davies et al, 1998; de Beer et al, 1996).

a. Formación de la biopelícula

Diversas teorías sobre la formación e la biopelícula han sido expuestas por diferentes autores, en esta tesis se cita la teoría propuesta por Notermans, et al (1991), que describe la formación de la biopelícula en tres etapas:

- Fijación de las bacterias.
- Consolidación de las bacterias a la superficie.
- Colonización de la bacteria en la superficie. En esta etapa ocurre la producción de material extracelular (glicocálix) que facilita la fijación de los microorganismos y evita que sean removidas por el flujo del agua.
- Colonización y crecimiento de la bacteria (Barros de Macedo, 2000)

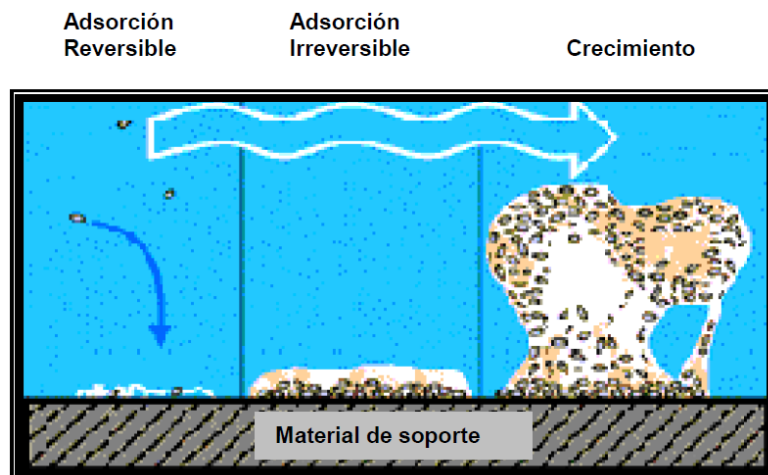


Figura 8 Formación de la Biopelícula (Macedo)
Fuente: La biopelícula en los procesos RBC, Welter.

b. Modelos Conceptuales de la Estructura de la Biopelícula

Gálvez Rodríguez, J. M (2001) en su tesis doctoral cita modelos conceptuales descritos por distintos investigadores a cerca del desarrollo y la estructura de la biopelícula.

Modelo del canal de agua

En este modelo, después del periodo de colonización en la superficie del soporte, las células sufren cambios fenotípicos y producen, entre otras moléculas estructurales, exopolisacáridos (EPS).

En determinados casos, algunas poblaciones adheridas, constituyen estructuras en forma de cono formando una biomasa filamentosa que soporta multitud de microorganismos (Okabe et al, 1998).

Esta fusión microorganismo-EPS deja una red de canales de agua que llega hasta la base de la biopelícula.

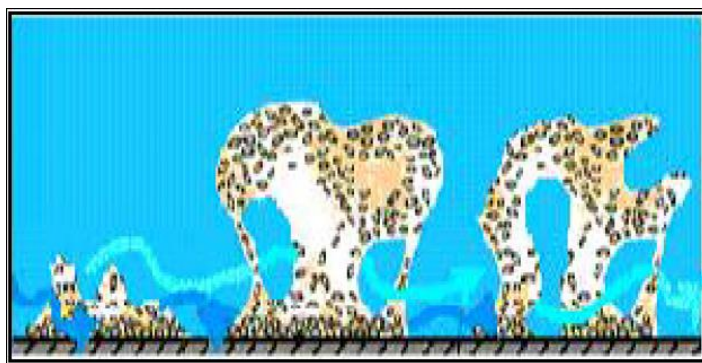


Figura 9 Modelo del canal de Agua - Gálvez Rodríguez, J. M
Fuente: La biopelícula en los procesos RBC, Welter.

Modelo del mosaico heterogéneo

Este modelo es típico de los sistemas de distribución de agua. Es un caso extremo del modelo del canal de agua. Consiste en microcolonias formando tallos unidos al soporte por la base pero generalmente bien separados de sus vecinos. Usualmente también puede haber una base muy fina de células individuales unidas a la superficie formando un film de 5 μm de espesor. La diferencia con el modelo de canales es que en este caso debido a la separación entre las torres microbianas no se llegan a formar los canales.

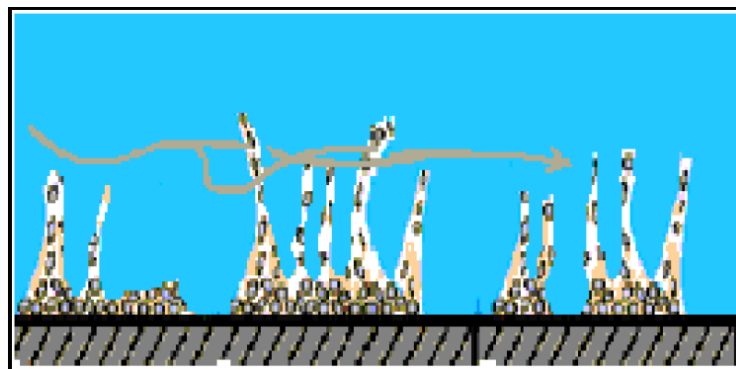


Figura 10 Modelo del Mosaico Heterogéneo - Gálvez Rodríguez, J. M.
Fuente: La biopelícula en los procesos RBC, Welter.

Gálvez Rodríguez, J. M (2001) afirma que estos modelos no son simples hipótesis. En 1994 (Beer et al, Gjaltema et al, Masson-Deya et al y Stoodley et al) demostraron mediante ensayo de imágenes con Resonancia Magnética Nuclear la existencia de canales de agua. Corroborándose por Stoodley et al. En 1997, con el uso de un microelectrodo que permite determinar el coeficiente de transferencia de masa. Midiendo este parámetro en distintas localizaciones dentro de la biopelícula se ha encontrado distintos valores de K , concluyéndose que eran debidos a la heterogeneidad estructural de la biopelícula biológica.

Otros factores que pueden afectar la heterogeneidad estructural de la biopelícula, según Grady et al, 1999; Loosdrecht et al, 1995 y Lazarova et al, 1992, pueden ser:

- Textura del material de soporte.
- Características hidrodinámicas del sistema.

- Tipo de microorganismos que lo componen.
- Naturaleza de la fase líquida.
- Geometría del biorreactor.

c. **Propiedades de la Biopelícula**

Waleed, Zahid (1993), en su tesis doctoral describe las propiedades más relevantes de la biopelícula.

Entre las **Propiedades Físicas**, se destacan el color y consistencia, densidad, erosión y espesor.

El **Color** de la biopelícula en las etapas iniciales de un sistema de biodiscos, utilizado en el tratamiento de efluentes domésticos, es generalmente gris o gris amarronado y filamentoso, mientras que en etapas posteriores es amarronado o rojizo amarronado, gelatinoso y menos filamentoso (Friedman et al, 1979; Alleman et al, 1982; Kinner et al, 1983; Lin et al, 1986). La biomasa de color gris es indicativo de biomasa que preferentemente remueve materia orgánica carbonosa mientras que la amarronada rojiza es característica de la predominancia de microorganismos nitrificantes. (Welter et al, 2004)

La **Densidad** de la biopelícula seca es una variable que se utiliza para correlacionarla con la difusividad relativa, fenómeno importante para la vida útil de la misma. La bibliografía cita densidades desde 8.14 mg/cm^3 (Wagner y Hempei, 1988) a 200 mg/cm^3 (Livingston y Chase, 1989). La concentración de oxígeno disuelto en el afluente tiene una influencia directa en la densidad de la biopelícula al igual que las fracciones de exopolímeros, de materia orgánica, de protozoos, de gusanos e insectos (Welter Adriana, s.f).

La **Erosión** se define como el proceso de remoción de partículas de biopelícula, en el biodisco que es altamente dependiente de las condiciones dinámicas del sistema dando origen al biosólido sedimentado, se refiere a la remoción masiva de porciones de biopelícula que caen por gravedad debido a la fuerza de corte.

El **Espesor** es un parámetro medible. El tamaño de los flóculos o el espesor de la película en estos procesos se miden en milímetros, mientras que los organismos

individuales se miden en micrones. Según Kinner, N.; Maratea, D.; Bishop, P. 1984, cuando se pone en funcionamiento un sistema de RBC, los microorganismos que naturalmente se encuentran en el afluente comienzan a adherirse a la superficie de los discos y en un plazo de una a cuatro semanas forman una biopelícula con un espesor de 1 a 4 mm. (Welter et al, 2004). En las etapas iniciales del proceso, cuando la concentración de materia orgánica es alta, la biopelícula generalmente es de mayor espesor que la que se observa en etapas posteriores en donde el afluente contiene menor cantidad de materia orgánica (Alleman et al, 1982).

Cuando el espesor de la biopelícula se incrementa, el oxígeno disuelto no es capaz de difundirse hasta el fondo del mismo, por lo tanto los microorganismos de la capa inferior, unidas al soporte, podrían cambiar alternativamente adaptándose a las nuevas condiciones ambientales (anaerobiosis).

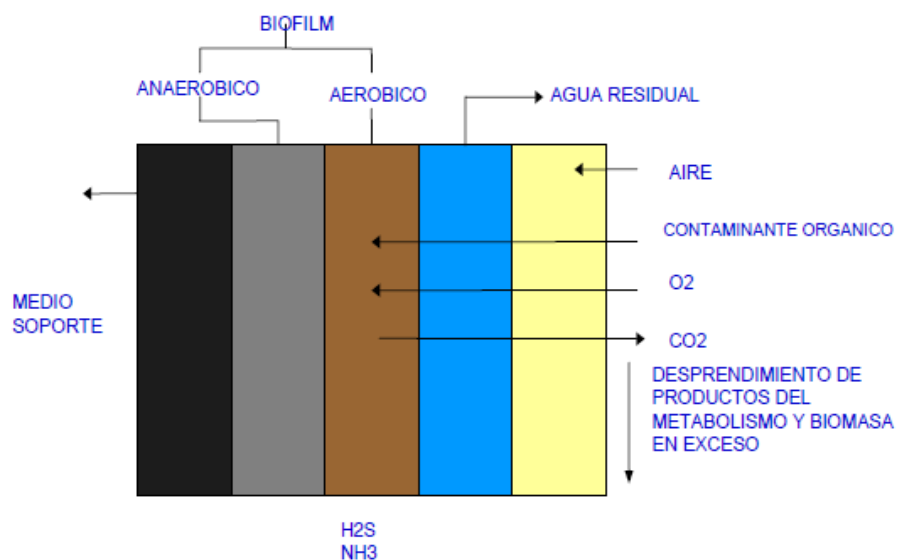


Figura 11 Difusión del oxígeno en la biopelícula.
Fuente: DEISA (2010)

El espesor de la biopelícula es inversamente proporcional a la velocidad de flujo del líquido, disminuyendo exponencialmente con los aumentos de la velocidad de rotación de los discos.

El crecimiento de la biopelícula continua hasta que llega un momento en que no reciben más oxígeno las capas profundas, entonces se produce el desprendimiento de la capa bacteriana. Dicho desprendimiento, se ve influenciado por diferentes factores,

entre otros, la velocidad de giro de los discos y el diámetro de los mismos. Después de dicho acontecimiento comenzará la formación de una nueva película, y así indefinidamente.

Entre las **Propiedades Químicas**, se destacan:

La biopelícula es generalmente viscosa e hidrofílica (Christenesen y Characklis, 1991) debido a la presencia de componentes poliméricos extracelulares que están constituidos por polisacáridos con residuos hidrofílicos y otros polímeros intracelulares.

Como se dijo anteriormente, la adsorción bacteriana al soporte ocurre en dos etapas: Inicialmente la célula bacteriana se mantiene unida a la superficie gracias a enlaces débiles intermoleculares, que resultan de las fuerzas entre la célula y el soporte, incluyendo: fuerzas de London – Van der Waals, interacciones electrostáticas, interacciones estéricas y puentes poliméricos. Posteriormente se consolida con la formación del glicocálix producida por las bacterias (Welter et al, 2004).

2.4.3 Remoción Biológica de Materia Orgánica Carbonosa

Como otros sistemas de tratamientos biológicos, los RBC tienen como objetivo principal estabilizar los compuestos orgánicos.

Para controlar las descargas de aguas residuales domésticas y optimizar la eficiencia de las plantas de tratamiento, se debe determinar la cantidad de materia orgánica. Los parámetros que se usan para tales determinaciones son la DBO₅, DQO y COT (Del Ángel M. M., 1994).

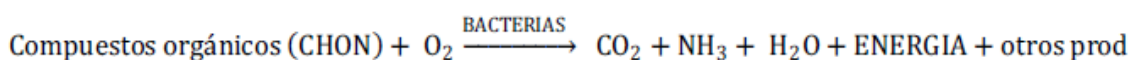
En esta investigación se utilizará la Demanda Bioquímica de Oxígeno al quinto día para evaluar la eficiencia de remoción de la materia orgánica. La DBO se define como la cantidad de oxígeno requerido para la respiración de los microorganismos responsables de la estabilización u oxidación de la materia orgánica a través de su actividad metabólica en medio aerobio.

La determinación de la DBO₅, es una prueba empírica en la que se utilizan métodos estandarizados de laboratorio para determinar requerimientos relativos de oxígeno de las aguas residuales, efluentes tratados y aguas contaminadas. La prueba mide el oxígeno utilizado durante el periodo de incubación especificado, para la degradación bioquímica de la materia orgánica, y el oxígeno utilizado para oxidar materia orgánica como los sulfuros y el ion ferroso (Del Ángel M. M., 1994).

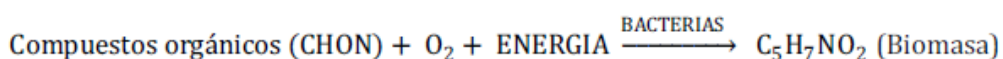
Según Romero Rojas (2008), la remoción de la materia orgánica carbonosa por vía aerobia se explica por dos procesos: la oxidación y la síntesis de los compuestos orgánicos. La oxidación es un proceso exotérmico mediante el cual los organismos producen energía necesaria para el crecimiento, degradando el sustrato. En la oxidación biológica aerobia, el oxígeno libre es esencial para los organismos aerobios como agente para oxidación de compuestos orgánicos en CO₂. La síntesis es el proceso endotérmico donde se asimila la materia orgánica para la obtención de nuevas células bacterianas (biomasa) mediante el consumo de energía generada en la oxidación. Adicionalmente ocurre otra reacción en ausencia de materia orgánica que se denomina Respiración Endógena, en el cual el tejido celular se convierte en productos gaseosos y en energía para mantenimiento.

Estas tres reacciones ocurren simultáneamente con el objetivo de garantizar la vida de las bacterias o el sostenimiento de la misma y se representa de la siguiente manera:

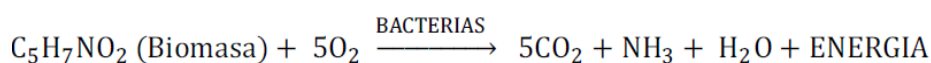
- **Oxidación:**



- **Síntesis:**



- **Respiración Endógena:**



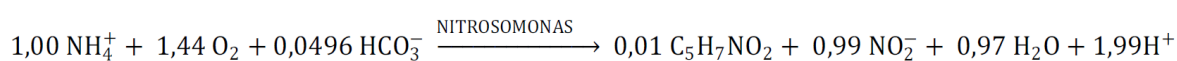
El tiempo crítico de retención hidráulica para la eliminación del sustrato carbonoso en los sistemas RBC es de aproximadamente 3-4 horas y los estudios han

revelado que un aumento adicional en el tiempo de retención tiene poco efecto en la mejora de los rendimientos. Para un sistema dado, a medida que aumenta la tasa de carga orgánica aplicada, la eficiencia de remoción disminuye. En condiciones normales de funcionamiento, el sustrato carbonoso se elimina principalmente en las etapas iniciales del RBC (Zur Erlangung, 2007)

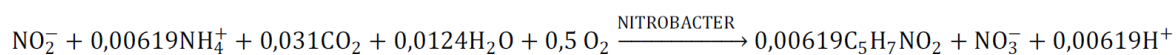
2.4.4 Nitrificación

La nitrificación es un proceso mediante el cual el nitrógeno amoniacal no asimilado es oxidado biológicamente por bacterias nitrificantes mediante dos conversiones, primero a nitritos y luego a nitratos, como se muestra en las siguientes ecuaciones:

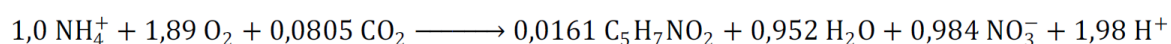
- **Conversión de amonio a nitrito:**



- **Conversión de nitrito a nitrato:**



- **Conversión de amonio a nitrato:**



A partir de estas reacciones se obtiene que para oxidar 1 mg de nitrógeno amoniacal y convertirlo a nitrato se necesitan 4.6 mg de O₂ y 7.1 mg de alcalinidad, lo que evidencia la necesidad de tener buen nivel de oxígeno disuelto y buena alcalinidad en el agua para que no se ralentice el proceso (Kapoor et al, 2003). Adicionalmente para favorecer estas transformaciones es necesario que el pH se sitúe entre 7.2 y 9, concentraciones de OD por encima de 1 mg/l y las temperaturas no debe ser tan bajas para que no se inhiba la tasa de nitrificación (Metcalf y Eddy, 1996; Crites y Tchobanoglous, 2000). Temperaturas por debajo de 13°C debe aplicarse factor de corrección a la superficie necesaria de discos. (Metcalf y Eddy, 1996).

La transformación del nitrógeno amoniacal en nitrato no supone la eliminación de nitrógeno, aunque si permite eliminar su demanda de oxígeno (José Pérez 2010)

La oxidación del amoníaco es una característica importante en la evaluación del rendimiento de un reactor biológico. Las bacterias heterotróficas ofrecen una fuerte competencia a los nitrificadores en las etapas iniciales de los biodiscos donde hay altas concentraciones de DBO. Por lo tanto, la tasa máxima de nitrificación ocurre cuando la carga de DBO soluble se reduce suficientemente. Los estudios sugieren que la nitrificación completa solo se puede lograr cuando la tasa de carga orgánica es inferior a $5 \text{ g DBO} / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (WEF y ASCE 1998). La tasa de carga inicial recomendada de DBO_5 según el estándar ATV-DVWK (2001) es de $8\text{-}10 \text{ g} / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$. Por lo tanto, la nitrificación siempre ocurre prominentemente en las últimas etapas de la configuración de RBC. La tasa de nitrificación más alta depende de la concentración de oxígeno en la capa límite y de la concentración de oxígeno disuelto en el licor de mezcla, donde el oxígeno no debe ser una sustancia limitante. Además, la concentración de nitrógeno amoniacal no debe ir por debajo de $3\text{-}5 \text{ mg} / \text{l}$ en el licor de mezcla para obtener mejores resultados (Zur Erlangung, 2007).

2.5 Problemas Operacionales

En los sistemas RBC es común que existan fallas. Las más comunes son las fallas del eje, las fallas de los cojinetes y las fallas de la estructura del medio de soporte. Esto puede surgir debido a las condiciones de sobrecarga debido a la alta tasa de carga hidráulica, el crecimiento excesivo de la biopelícula, la corrosión influida por los microbios, la fatiga por corrosión, el engrase incorrecto y el torque inadecuado de las tuercas y tornillos (Mba et al. 1999). Si la unidad de RBC no se aloja correctamente, los discos pueden exponerse a las radiaciones UV y al mal tiempo en climas tropicales, lo que puede dañar el material del disco. Otro problema asociado con esto es el crecimiento excesivo de algas que pueden obstruir el movimiento del eje y el disco. Por lo tanto, las unidades de RBC deben estar adecuadamente cubiertas (Zur Erlangung, 2007).

2.6 Modelos Matemáticos para Biodiscos

El propósito de los modelos es el ser capaces de predecir cómo cambian los parámetros operacionales que afectan al funcionamiento del RBC. Los modelos pueden ser de tipo empírico o descriptivo. Los modelos empíricos simplemente relacionan variables de funcionamiento de entrada y salida con otras a través de correlaciones y leyes. Los modelos mecanicistas expresan la influencia e interrelación de fenómenos mecánicos a través de la aplicación al reactor de principios de ingeniería (José A. Bezanilla, 1993).

Para satisfacer un modelo en estado estacionario se debería tomar en cuenta los siguientes factores: Tasa de consumo y transferencia del sustrato, tasa de consumo y transferencia de oxígeno, velocidad de rotación de los biodiscos, tamaño de la unidad, grado de sumergencia de los biodiscos, competencia entre poblaciones microbianas, crecimiento de la biopelícula, temperatura, pH y las condiciones de mezcla o si se prefiere de oportunidades de contacto entre el cultivo fijo y el oxígeno del aire y el sustrato (José M. Romero et al, s.f).

La mayor parte de estos modelos reducen la complejidad del sistema en varias componentes esenciales, la biopelícula, el transporte de materiales en la fase líquida, el transporte de materiales entre la fase líquida y la biopelícula, etc.

Los primeros modelos sobre RBC estaban lejos de considerar todos los parámetros antes mencionados. La mayoría eran modelos empíricos, desarrollados en base al análisis estadístico de los datos de funcionamiento, con propósito de diseño (José M. Romero et al, s.f).

Los modelos descriptivos para RBC se basan en el planteo de balance de masa de los reactantes, sustrato y oxígeno, y la cinética de la reacción para describir la eliminación del sustrato. La mayoría se han desarrollado como modelos de estado estacionario. Los modelos descriptivos reportados en la literatura, se diferencian, de acuerdo a la forma más o menos detallada con la que describen el sistema. Los más simples, consideran la cinética global del reactor, mientras que los modelos más avanzados distinguen las partes características del RBC y se basan en la cinética de la reacción de la biopelícula (José M. Romero et al, s.f).

En la presente tesis, se presenta un resumen de los principales modelos empíricos y descriptivos sobre RBC efectuados por investigadores de los años 60 hasta la fecha de hoy.

2.6.1 Modelos Empíricos

Los primeros sistemas de RBC, tal como se utilizan en la actualidad, fueron desarrollados en Alemania, por **Popel y Hartmann (1955)**. **Popel (1964)** fue uno de los primeros en sugerir una relación matemática para el sistema RBC, relacionando la concentración del DBO₅ efluente en la etapa *i* (*S_i*) con el DBO₅ afluente (*S₀*), el área total de los biodiscos (*A*) y el caudal de aplicación (*Q*) (José M. Romero et al, s.f).

$$A = \frac{0.022Q(S_0 - S_i)^{1.4}}{S_i^{0.4}}$$

Edeline y Van de Venne (1979) propusieron la siguiente fórmula expresada en términos de la eficiencia (*E*) del sistema y la tasa de carga orgánica por unidad de superficie en g/m².día (*R_c*):

$$\frac{1}{E} \left(\frac{1}{E} - 1 \right)^{0.4} = 0.022R_c$$

Donde $E = \frac{(S_0 - S_i)}{S_i}$ y $R_c = \frac{Q}{A} S_0$

Joost (1969) encuentra que la eficiencia del sistema RBC (E) es función de los siguientes parámetros: la temperatura (T), el tiempo de retención hidráulica (t) y las características físicas de la unidad (diámetro del disco, espacio entre discos, espesor de los discos y profundidad de inmersión. Joost considera todas las características físicas mediando un único parámetro, que llama “constante de configuración física” (P). Joost propuso la siguiente expresión:

$$E = f(S_0)^a(T)^b(t)^c(P)^d$$

Donde f es una constante de regresión, llamado factor de tratabilidad del agua residual y a , b , c y d son coeficientes de regresión.

Existen modificaciones de esta ecuación donde se introducen otros factores como el área de disco efectiva y la velocidad de rotación de los discos (José M. Romero et al, s.f).

Kniff y Wu (1978) modificaron la ecuación anterior y desarrollaron un modelo para estima el porcentaje de DBO removida en un sistema de biodiscos. El modelo incluye la concentración de DBO afluente (S_i), la carga hidráulica (q) que es equivalente al caudal (Q) dividido por el área de la superficie eficaz del disco (A), el número de etapas (N) y la temperatura (T).

$$\frac{S_e}{S_i} = \frac{14.2 q^{0.05579}}{S_i^{0.6837} T^{0.02477} e^{0.32N}}$$

Las variables tiempo de retención, profundidad del disco sumergido, velocidad de rotación de los discos y área de la superficie efectiva del disco se omitieron en la ecuación, puesto que de acuerdo a los resultados del test “t”, no contribuyen significativamente en la regresión (José M. Romero et al, s.f).

2.6.2 Modelos Descriptivos

Los modelos descriptivos para los sistemas RBC se basan en la cinética de la reacción de los contaminantes de las aguas residuales con el cultivo. Los modelos más básicos consideran al reactor en forma integral, de tal manera que la remoción o estabilización de los constituyentes se efectúa mediante una cinética similar a la de los modelos para lodos activados o filtros percoladores. Estos modelos se formulan tomando como base la ecuación de balance de masa del sustrato (José M. Romero et al, s.f).

Pike (1978) sugiere que la cinética de remoción del sustrato en una serie de biodiscos, operados en etapas, puede aproximarse mediante la cinética de un reactor de flujo pistón, tal como se aplica en sistemas de lodos activados y filtros percoladores. El modelo propuesto se aplica a la remoción de DBO₅, en condición de estado estacionario ($\partial S/\partial t = 0$) y supone una cinética de reacción de primer orden. La aplicación de la ecuación de balance de masa, a través de un elemento diferencial, del reactor de flujo pistón supuesto, y la integración entre los límites del tren de RBC, da como resultado:

$$S = S_0 e^{-R_c \theta^{(T-15)} \frac{A}{Q}}$$

Donde: S=Concentración de materia orgánica en el líquido del tanque; S₀= Concentración de materia orgánica afluente; R_c= Constante de la tasa de remoción superficial de materia orgánica de primer orden; $\theta^{(T-15)}$ = Factor de corrección por la temperatura (José M. Romero et al, s.f).

Antonie (1976) y Ouano y Pescod (1976), asumieron un flujo del tipo continuo en tanque agitado, para cada etapa del sistema RBC. El modelo sugerido se basa sobre el tiempo de retención del líquido en el reactor (TRH), similar a los modelos de flujo continuo en tanque agitado que se aplican en lodos activados. Para condiciones de estado estacionario y cinéticas de reacción e primer orden para la remoción de la DBO₅, la ecuación de balance de masa, en el reactor toma la forma:

$$S = \frac{S_0}{1 + R_v(TRH)}$$

Donde: R_v = Constante de la tasa de reacción de primer orden para la remoción de DBO_5 y TRH es el tiempo de retención hidráulico.

La suposición de condiciones de mezcla completa en el tanque, es más realista que las de flujo pistón para cada etapa del modelo previo. Sin embargo, la cinética de primer orden, supuesto para el reactor implica un grado constante de remoción de forma lineal a lo largo de las etapas del RBC. Esto no está de acuerdo con la experiencia en plantas de RBC, donde el grado de remoción de DBO_5 es alto en las primeras etapas y gradualmente declina en las siguientes etapas, a medida que el sustrato se reduce (José M. Romero et al, s.f).

Kornegay (1975) fue el primero que aplicó la cinética de Monod a la reacción, en un modelo de remoción de DBO_5 mediante el proceso de biodiscos. Como en los modelos previos, no consideró, la resistencia a la difusión para la transferencia de los reactantes de la biopelícula. El modelo partió de la hipótesis de una estructura homogénea para el sistema líquido-biopelícula. En comparación con los modelos cinéticos previos, el uso de una expresión del tipo Monod para la remoción se ve más realista, ya que impone un límite superior a la tasa de remoción de sustrato para concentraciones altas del mismo. La estructura homogénea para la biopelícula, Howland (1958), Atkinson et al (1963), supone que la biomasa activa de la biopelícula está completamente mezclada con el líquido en todo su espesor, constituyendo la capa activa de la biopelícula. Por lo tanto, se considera que la transferencia de los reactantes disueltos en el líquido al cuerpo de la biopelícula no queda afectada por resistencias a la difusión. Esta suposición simplifica notablemente el modelo de la biopelícula, puesto que elimina algunos de los parámetros no medibles del sistema. Los efectos de la resistencia a la difusión se toman en cuenta de manera indirecta en la cinética de Monod, mediante los valores del coeficiente de saturación media K_s , que resultan por ello, más altas que las correspondientes a sistemas de crecimiento suspendido. Debido a que la cinética de Monod relaciona la tasa de remoción del sustrato con el crecimiento bacteriano, el modelo de Kornegay considera las características del crecimiento y la cantidad de biomasa activa en el reactor (José M. Romero et al, s.f).

R. S. Ramalho (1983) describe paso a paso el modelo desarrollado por Kornegay, el cual fue un procedimiento de diseño racional basado en un balance de materia para el sustrato que entra y abandona el biodisco tal y como se describe a continuación:

$$\begin{array}{cccc}
 \text{[Velocidad neta} & \text{[Velocidad a la} & \text{[Velocidad a la} & \text{[Velocidad a la} \\
 \text{de cambio de} & \text{que el sustrato} & \text{que el sustrato} & \text{que el sustrato} \\
 \text{sustrato en el} & \text{entra al reactor} & \text{deja el reactor} & \text{es oxidado en el} \\
 \text{reactor]} & \text{(en el afluente)]} & \text{(en el efluente)]} & \text{reactor]}
 \end{array} =$$

En condiciones de equilibrio la concentración del sustrato en el reactor permanece constante y por lo tanto la velocidad neta de cambio de sustrato en el reactor (primer miembro de la ecuación) se hace igual a cero. Los dos primeros términos del segundo miembro se refieren a la disminución neta de sustrato debido a la acción hidráulica, mientras que el tercer término (velocidad a la que el sustrato es oxidado en el reactor) se refiere a la velocidad de utilización de sustrato por los microorganismos por unidad de volumen de biopelícula formado en el medio de soporte (discos) como la de utilización de sustrato utilizado por unidad de volumen de biomasa activa en suspensión.

Kornegay desprecia la biomasa suspendida en el líquido del tanque, ya que su contribución a la remoción total es despreciable.

Finalmente Kornegay llega a la siguiente expresión:

$$Q (S_0 - S_e) = \frac{\mu_m}{Y} \times A \times X \times e \times \frac{S_1}{K_s + S_1}$$

Donde:

Q = Caudal de agua residual.

S₀ = Concentración de sustrato en el afluente.

S_e = Concentración de sustrato en el efluente.

μ_m = Máxima tasa de crecimiento específica.

Y = Coeficiente de producción celular

A = Superficie efectiva

X = Concentración de biomasa adherida a los discos

e = Espesor de biopelícula activa

K_s = Constante de semisaturación.

José A. Bezanilla (1993) menciona en su tesis doctoral que de experimentos llevados a cabo a 25°C, se han obtenido los siguientes valores cinéticos:

Y=0.26 g SV/g de glucosa

$\mu_m = 0.28 \text{ h}^{-1}$

$K_s = 121 \text{ mg/l}$ de glucosa

e = 70 μm

Andreadakis (1987) analizó los datos de performance de un sistema de ocho plantas de RBC multi-etapas, utilizando el modelo de Kornegay. Su análisis, lo conduce a concluir que el modelo simula satisfactoriamente el rendimiento de un sistema RBC con respecto a la remoción de materia orgánica carbonosa, siempre que las etapas operen con una DBO_5 efluente superior a 20 mg/l, y que la nitrificación no sea el proceso predominante (José M. Romero et al, s.f).

Pano y Middlebrooks (1983) aplican el mismo modelo a un sistema RBC, a escala de laboratorio de cuatro etapas operando bajo variadas condiciones ambientales. Los valores estimados para los coeficientes cinéticos de la primera etapa de sus unidades de pequeña escala, fueron considerablemente diferentes de los encontrados por Clark y otros (1978) en su RBC de gran escala (discos de 2 m de diámetro). Se atribuye, en general, como causa de la discrepancia a diferentes concentraciones de oxígeno disuelto en el licor de mezcla. Aunque algunos también mencionan la temperatura y el tamaño de los discos. La mayor limitación de este modelo radica en la suposición de que el único factor limitante para el crecimiento

microbiano, es la concentración del sustrato, ignorando el hecho de que, cuando la tasa de carga orgánica es comparativamente alta, el oxígeno suministrado a los microorganismos se torna insuficiente y por lo tanto limitante, como ocurre frecuentemente en los primeros discos de una gran unidad de tratamiento RBC. Por lo tanto el modelo Kornegay deja de ser confiable para una alta tasa de carga orgánica o, en cualquier caso, para concentraciones de oxígeno disuelto menores que 1-2 mg/l. Sin embargo, un gran avance del modelo es su simplicidad. **Paolini y otros (1979, 1982)** muestran que, cuando la velocidad de los discos no es un factor limitante del proceso, el modelo simula el rendimiento de estado estable del RBC tan bien como el más avanzado modelo de Grieves (1972) (José M. Romero et al, s.f).

En la presente investigación se hace uso del modelo de Kornegay para realizar el diseño del prototipo, por su simplicidad y precisión ya reportadas por los autores mencionados anteriormente.

CAPÍTULO III – MARCO NORMATIVO

- DS N° 003-2010-MINAM. Límites Máximos Permisibles (LMP) para efluentes de PTAR (Publicado el 17 de marzo del 2010).
- DS N° 004-2010-MINAM. Aprueban disposiciones para implementación de los estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua (Publicado el 7 de Junio del 2017)
- Norma OS-090. Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.
- Resolución Ministerial N° 273-2013-MVCS. Protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales.
- Decreto Supremo N° 021-2009-VIVIENDA. Aprueban Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario.

CAPÍTULO IV – METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Escenario de la Investigación

El presente trabajo de investigación estuvo delimitado por su ubicación geográfica y las condiciones climáticas del lugar durante el periodo de investigación. La investigación se desarrolló en el Centro de Investigación de Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos (CITRAR) de la Universidad Nacional de Ingeniería, la cual está ubicada en el distrito del Rímac, provincia de Lima, el cual posee un clima templado y sin variaciones extremas de temperatura. El desarrollo de la investigación fue entre junio de 2017 hasta diciembre de 2017 con una variación de temperatura de 15 °C hasta los 25 °C

El sistema de biodiscos se encuentra armado en la parte posterior del CITRAR y ubicado en las coordenadas UTM 8'671,428.99 m S y 27,6701.09 m E, a una elevación de 100 m.s.n.m. aproximadamente.

4.2 Descripción de la Investigación

Para el tratamiento secundario del efluente de un reactor UASB, la investigación empleó un tratamiento biológico aerobio llamado contactores biológicos rotatorios (RBC), también conocidos como biodiscos. El sistema estuvo conformado por dos

etapas conectadas en serie, donde cada etapa tenía un volumen efectivo de 80 litros. Como medio de soporte para la biopelícula, se utilizaron 14 discos de PVC (Policloruro de vinilo) que hacían un área efectiva total de 7.48 m². Como afluente se utilizó el agua residual efluente de un Reactor Anaerobio de Manto de Lodos de Flujo Ascendente (UASB), ubicado también en las instalaciones del CITRAR-UNI. Es importante mencionar que las aguas residuales tratadas en el CITRAR-UNI son de origen doméstico proveniente de los AA.HH El Ángel y El Milagro que se encuentran en las zonas aledañas. Esta agua residual ingresa a la planta piloto CITRAR a una unidad de captación que luego recibe un pre-tratamiento conformado por una cámara de rejillas y un desarenador. Posteriormente esta agua residual pre-tratada recibe un tratamiento primario mediante el reactor UASB. Después de recibir el tratamiento primario, parte de este efluente, fue conducido mediante una bomba y un sistema de mangueras hacia un tanque de almacenamiento. A partir de este punto, inicia el proceso de la investigación.

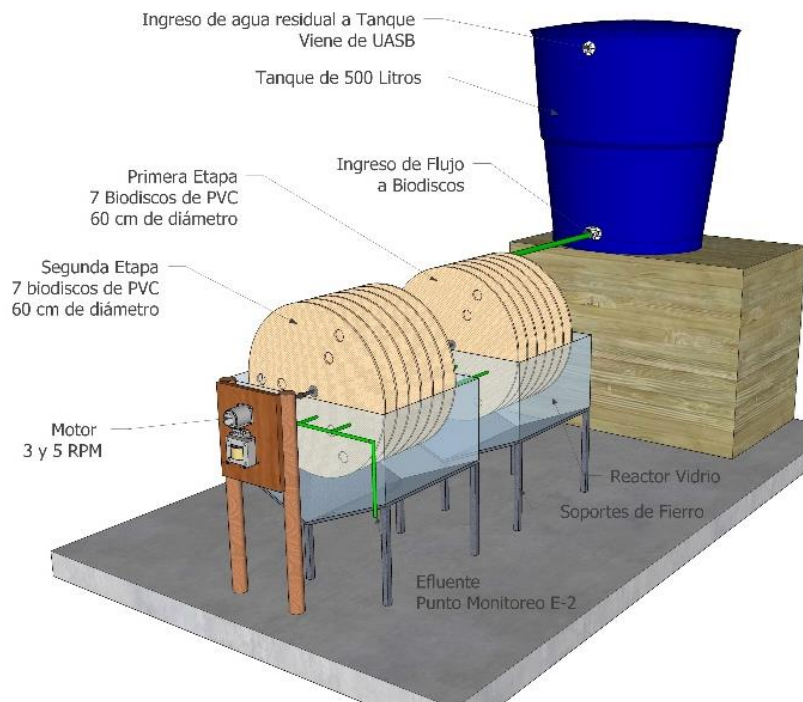


Figura 12 Esquema del sistema de biodiscos.

El sistema estuvo compuesto por un tanque de almacenamiento, dos reactores de biodiscos conectados en serie y el sistema mecánico para la rotación de los discos. El tanque de almacenamiento cumplió la función de asegurar un caudal permanente al sistema. Los dos reactores tuvieron las mismas características de diseño.

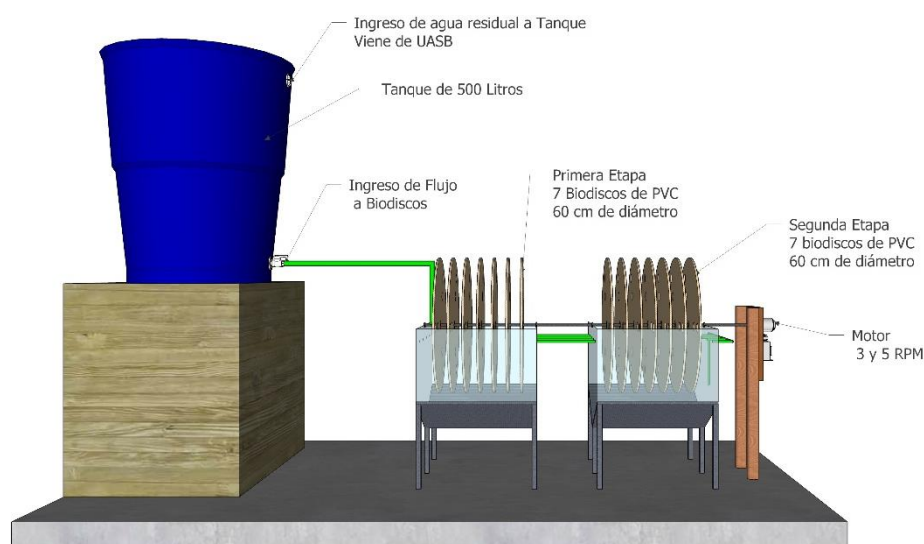


Figura 13 Esquema del sistema de biodiscos (vista transversal)

A continuación se describen cada uno de los componentes de la investigación

4.2.1 Tanque de Almacenamiento

El tanque de polietileno de 500 litros de capacidad almacenaba el agua residual proveniente del reactor UASB por un período de 24 horas. El tanque era llenado por un sistema de bombeo y mangueras. Esto aseguraba un caudal permanente para abastecer de agua residual al sistema de biodiscos. El tanque fue colocado sobre una estructura de madera a una altura adecuada para el funcionamiento del sistema. Dentro del tanque se colocó una pequeña bomba el cuál aseguraba un caudal constante al sistema.

4.2.2 Reactores

El sistema de biodiscos estaba conformado por dos reactores conectados en serie (dos etapas) las estructuras de los reactores fueron dos cajas de vidrio de dimensiones: 0.70 m de ancho, 0.50 m de largo y 0.30 m de alto y un sistema de evacuación de lodos en forma de imhoff en la parte baja con 15 cm de alto. Estas cajas de vidrios eran soportadas por dos estructuras metálicas. Como medio de soporte para la biopelícula, cada reactor contenía siete (07) discos de PVC de 0.60 m de diámetro y 4 mm de espesor en promedio.



Figura 14 Reactores de vidrio

Los discos inicialmente presentaban una superficie lisa, por ello, antes de su instalación y montaje fueron lijados en toda su superficie con una amoladora. De esta forma se logró una rugosidad adecuada para favorecer la adherencia de la biopelícula. Adicionalmente a cada disco se le hizo 6 hoyos de 3 cm de diámetro distribuidos uniformemente con el fin de promover la turbulencia y oxigenación del sistema. Los discos fueron instalados de tal forma que estén sumergidos el 40% de su superficie.

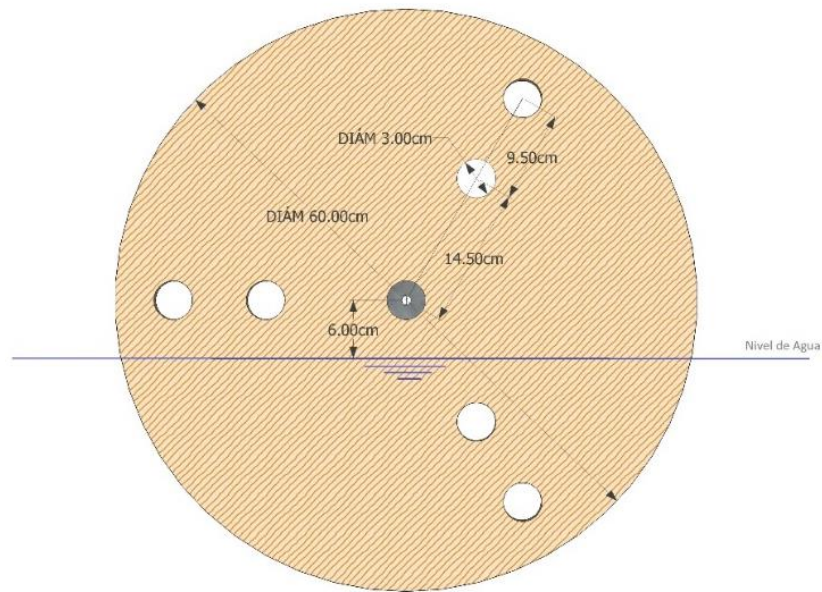


Figura 15 Características típicas de los discos

4.2.3 Sistema Mecánico

Los 14 discos de PVC se mantienen paralelos entre sí y unidos mediante tuercas y arandelas a un eje horizontal que consistía en un espárrago de acero inoxidable de 3/8" de diámetro el cual pasaba a través de sus centros; y al extremo estaba conectado a un motor eléctrico el cual le transmitía el torque para el giro continuo a una velocidad constante. El motor tenía un control para regular la velocidad de rotación, el cual proporcionaba 3 velocidades de giro: 3 rpm, 5 rpm y 8 rpm.

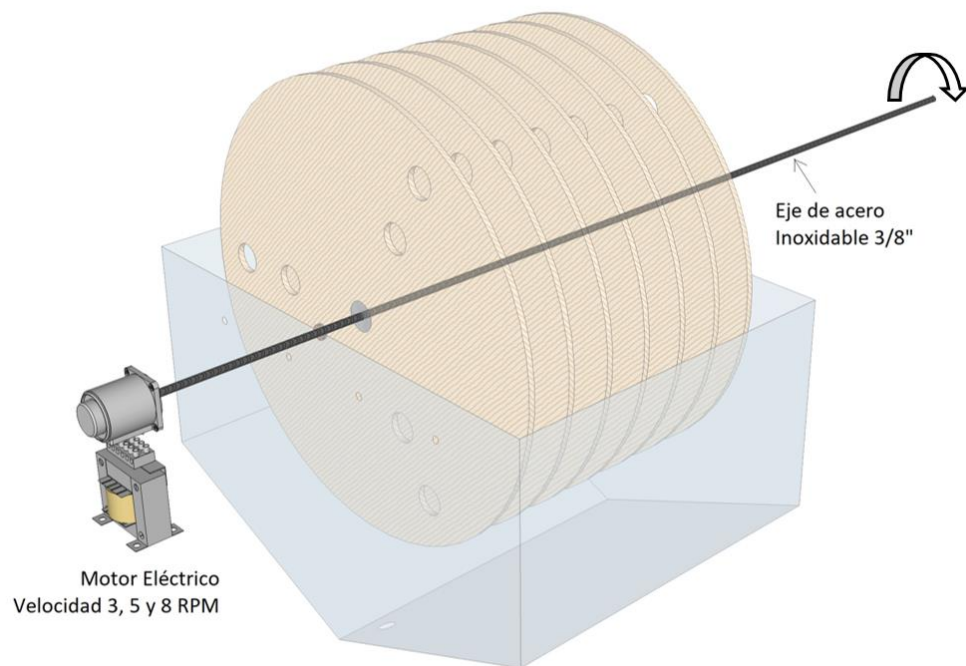


Figura 16 Motor y eje del sistema RBC

4.3 Diseño de la Investigación

4.3.1 Características del Agua Residual Afluente

Para esta investigación se ha utilizado como afluente, el agua residual efluente proveniente del reactor UASB del CITRAR-UNI. El agua residual al provenir de un proceso anaerobio tuvo un valor promedio de oxígeno disuelto de 0 mg/l. El agua residual presentó un valor promedio de DBO₅ de 125 mg/l.

4.3.2 Etapas

Para esta investigación se ha propuesto dos etapas usando tanques en serie. Además el eje que soporta los discos se orientó de forma paralela al sentido de flujo.

Los discos se colocaron a una separación promedio entre sí de 6 cm. Esta separación se dio con el fin de tener espacio suficiente para ajustar las tuercas de los discos.

4.3.3 Caudal de Ingreso

El caudal de ingreso considerado fue de 432 l/día equivalente a 5 ml/s. El caudal de ingreso se controlaba diariamente, realizando aforo volumétrico con la ayuda de un cronómetro y una probeta graduada.

4.3.4 Superficie y Medio de Soporte

El procedimiento del cálculo de la superficie requerida, se basó en el supuesto de una reducción de la DBO del sistema de 150 mg/l a 15 mg/l (eficiencia de 90%). Para ello se utilizó el modelo matemático semi-empírico y descriptivo basado en el balance masas y cinética de Monod propuesto por Kornegay (1975) para dos reactores conectados en serie:

$$Q_0(S_0 - S_2) = PA \frac{S_1}{K_s + S_1} + PA \frac{S_2}{K_s + S_2}$$

Donde:

Q_0 : Caudal de aplicación (l/día)

S_0 : DBO de ingreso (mg/l)

S_1 : DBO a la salida de la primera etapa (mg/l)

S_2 : DBO a la salida de la segunda etapa (mg/l)

K_s : Constante de saturación media (mg/l)

A: Superficie de contacto total requerida (m²)

El Parámetro experimental P (mg/m².d) se puede calcular de la siguiente forma:

$$P = \mu_m \times Y \times X \times d$$

Donde:

μ_m : Máxima de tasa de crecimiento específica (día⁻¹)

Y: Coeficiente de producción celular (g/g)

X: Concentración de biomasa adherida (mg/m³)

d: Espesor de biopelícula activo (m)

Para el cálculo de las ecuaciones de Kornegay, se utilizaron los valores de la **Tabla 1** los cuales han sido extraídos de la tesis doctoral “Depuración de Aguas Residuales en un Contactor Biológico Rotativo (RBC) con Alternancia en el Sentido de Flujo” por José A. Bezanilla Revilla (1993) y de la tesis doctoral “Mathematical Modeling of the Performance of a Rotating Biological Contactor for Process Optimisation in Wastewater Treatment” por Sanjay Dutta, M. Tech (2007).

Tabla 1 Parámetros experimentales del modelo de Kornegay

Parámetros experimentales		Valor Asumido	Referencia
Máxima de tasa de crecimiento específica (día ⁻¹)	μ_m	4.0	Sanjay Dutta, M. Tech (2007) Tesis doctoral.
Coeficiente de producción celular (g/g)	Y:	0.26	José A. Bezanilla Revilla (1993) Tesis doctoral.
Concentración de biomasa adherida (Kg/m ³)	X:	40	Sanjay Dutta, M. Tech (2007) Tesis doctoral.
Espesor de biopelícula activo (µm)	d:	70	José A. Bezanilla Revilla (1993) Tesis doctoral.

Constante de saturación media (mg/l)	K_S	121	José A. Bezanilla Revilla (1993) Tesis doctoral.
--------------------------------------	-------	-----	--

Como medio de soporte para el crecimiento de la biopelícula se utilizaron siete discos de PVC por cada etapa, haciendo un total de 14 discos. Inicialmente los discos presentaban una superficie lisa, por lo cual se lijó toda la superficie y por ambos lados con una amoladora. Esto se realizó con el fin de incrementar el área superficial disponible y mejorar la adherencia de la biopelícula a la superficie de los discos y por consiguiente su estabilidad estructural. Los discos fueron de 60 cm de diámetro con un espesor promedio de 4 mm. Además a cada disco se le hicieron seis agujeros de 3 cm de diámetro con el fin de disminuir el peso de los discos y para promover la transferencia de oxígeno de la fase gaseosa a la fase líquida. Los discos tenían una separación entre sí de 6 cm. Los discos se posicionaron con un porcentaje de sumergencia en el medio líquido del 40% de su superficie

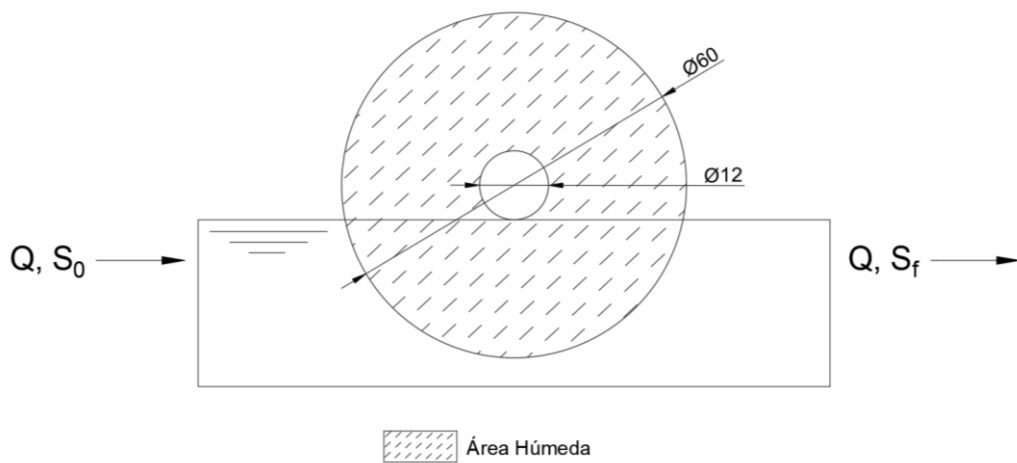


Figura 17 Área húmeda de los biodiscos

4.3.5 Velocidad Rotacional de los Discos

Para esta investigación se estudió el comportamiento del RBC para tres velocidades de rotación: 3 rpm y 5 rpm. Con un sentido de giro perpendicular al sentido de flujo.

Las velocidades de rotación reales medidas fueron las siguientes:

Velocidad de diseño del motor	Velocidad Real
3 RPM	3.25 RPM
5 RPM	5.75 RPM

Inicialmente la investigación contempló evaluar una velocidad de rotación de 8 rpm después del periodo de 5 rpm. Debido a constantes problemas de rotura del eje y sobre-calentamiento del motor para una velocidad de 8 rpm, se tuvo que paralizar el estudio a la segunda semana de operación con esta velocidad.

4.3.6 Tiempo de Retención Hidráulico

El tiempo de retención hidráulico (TRH) es la relación del volumen del líquido dentro del reactor sobre el caudal promedio del RBC.

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

Donde:

V: Volumen efectivo de agua residual del reactor.

Q: Caudal promedio.

4.1.1 Carga Orgánica Superficial

La carga orgánica superficial ($\text{g/m}^2\cdot\text{día}$) es la relación de la carga orgánica por unidad de superficie. En biodiscos este parámetro es importante ya que la carga orgánica lo aplicamos al medio de soporte (donde se adhiere la biopelícula) y este lo medimos en unidades de superficie.

$$COS = \frac{Q \times DBO_5}{A}$$

Donde:

DBO₅: Demanda Bioquímica de Oxígeno al quinto día (g/m^3)

Q: Caudal promedio ($\text{m}^3/\text{día}$)

A: Área superficial efectiva (m^2)

4.4 Plan de Monitoreo de la Investigación

Se diseñó un plan de monitoreo de la investigación para el análisis de los parámetros de calidad del agua residual según los objetivos propuestos. Este plan contempla los puntos de monitoreo, el período y la frecuencia de medición de dichos parámetros.

4.4.1 Puntos de Monitoreo

Se establecieron tres puntos para el monitoreo de los parámetros de calidad de agua residual, con el fin de evaluar la eficiencia del sistema y estudiar el comportamiento de cada

etapa de biodiscos. El primer punto de monitoreo, denominado E-0 fue en el punto de ingreso del agua residual a la primera etapa del sistema de biodiscos. El segundo punto de monitoreo, denominado E-1 fue a la salida de la primera etapa de biodiscos. Finalmente, el tercer punto denominado E-2 fue a la salida de la segunda etapa.

El ingreso del agua residual fue puntual y cada etapa de biodiscos contaba con cuatro puntos de ingreso y cuatro puntos de salida, el agua residual efluente era recolectada de los cuatro puntos y mezclada.

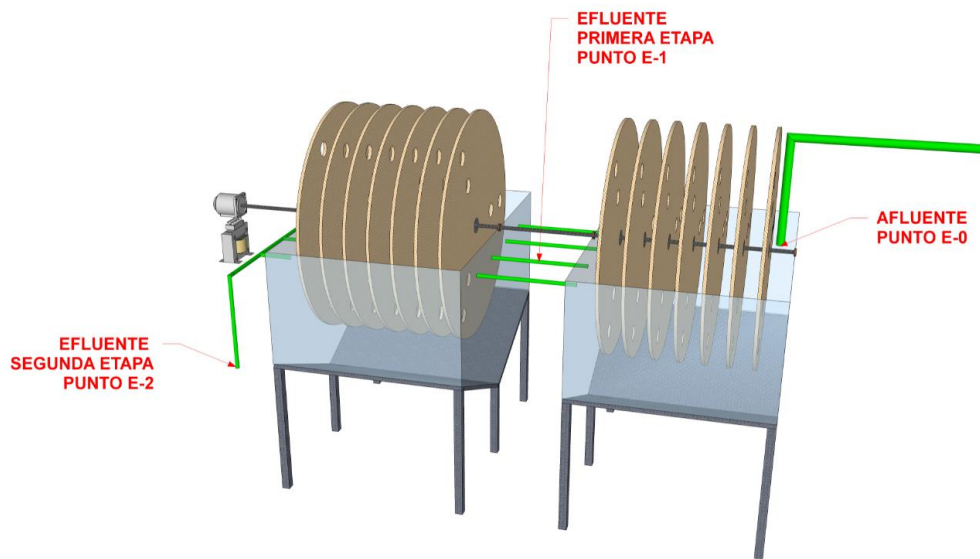


Figura 18 Puntos de Monitoreo, vista transversal

4.4.2 Parámetros de Calidad del Agua Residual

De acuerdo a los objetivos propuestos, para esta investigación se propuso estudiar los siguientes parámetros: Temperatura, pH, oxígeno disuelto, turbiedad, demanda bioquímica de oxígeno, sólidos suspendidos totales, sólidos suspendidos fijos y sólidos suspendidos volátiles.

- **Temperatura**

La temperatura del agua fue medida al ingreso y salida de cada etapa de biodiscos. La temperatura se midió desde el día 07 de julio del 2017 hasta el día 29 de noviembre del 2017. Se tomó una a dos mediciones durante el día, la primera alrededor de las 10.00 a.m. y la segunda entre la 1.00 p.m. y las 3.00 p.m. aproximadamente.

Para la medición de la temperatura, se tomaron muestras de los tres puntos señalados y fueron analizados in-situ con un equipo medidor de oxígeno disuelto con una sonda multiparámetro que pertenece al laboratorio del CITRAR.

- **pH**

El potencial de hidrógeno (pH) del agua fue medido al ingreso y salida de cada etapa de biodiscos. El pH se midió desde el día 07 de julio del 2017 hasta el día 29 de noviembre del 2017. Se tomó una a dos mediciones durante el día, la primera alrededor de las 10.00 a.m. y la segunda entre la 1.00 p.m. y las 3.00 p.m. aproximadamente.

Para la medición del pH, se usó el método electrométrico. Se tomaron muestras de los tres puntos señalados y fueron analizados in-situ con un medidor de pH que pertenece al laboratorio del CITRAR.

- **Turbiedad**

La turbiedad del agua fue medida al ingreso y salida de cada etapa de biodiscos. Se midió desde el día 07 de julio del 2017 hasta el día 29 de noviembre del 2017. Se tomó una a dos mediciones durante el día, la primera alrededor de las 10.00 a.m. y la segunda entre la 1.00 p.m. y las 3.00 p.m. aproximadamente. Debido a labores de mantenimiento del equipo turbidímetro, no fue posible medir el parámetro de turbiedad durante los meses de agosto y setiembre (semanas del 7 al 12) y un nuevo mantenimiento del equipo en la semana 16.

Para la medición de la turbiedad se usó el método nefelométrico. Se tomaron muestras de los tres puntos señalados y fueron analizados in-situ con un Turbidímetro que pertenece al laboratorio del CITRAR. El equipo estuvo

inoperativo durante 2 meses de la investigación por lo que no se pudieron realizar estos análisis durante ese período.

- **Oxígeno Disuelto**

El oxígeno disuelto (OD) del agua fue medido al ingreso y salida de cada etapa de biodiscos. El OD se midió desde el día 07 de julio del 2017 hasta el día 29 de noviembre del 2017. Se tomó una a dos mediciones durante el día, la primera alrededor de las 10.00 a.m. y la segunda entre la 1.00 p.m. y las 3.00 p.m. aproximadamente.

Para la medición del oxígeno disuelto, se usó el método electrométrico. Se tomaron muestras de los tres puntos señalados y fueron analizados in-situ con un medidor de oxígeno disuelto de sonda multiparámetro que pertenece al laboratorio del CITRAR.

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)**

La demanda bioquímica de oxígeno al quinto día del agua fue medida al ingreso y salida de cada etapa de biodiscos. Se midió desde el día 10 de julio del 2017 hasta el día 10 de noviembre del 2017, con una frecuencia semanal realizado generalmente los días miércoles. Hubo semanas donde no fue posible realizar la medición de la DBO₅, ya que durante la operación del sistema se presentaron muchos inconvenientes como fallas mecánicas del eje o problemas con el motor, por lo cual se tuvo que parar la operación entre 1 a 3 días.

La determinación de la demanda bioquímica de oxígeno al quinto día (DBO₅) se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Investigación del Agua de la Universidad Nacional de Ingeniería. Para esta medición se utilizó el método de diluciones según estándar 5210 B Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA, WEF.

- **Sólidos Suspendidos (SST)**

Los sólidos suspendidos totales (SST) del agua fueron medidos al ingreso y salida de cada etapa de biodiscos. Se midió desde el día 10 de julio del 2017 hasta el día 10 de noviembre del 2017, con una frecuencia semanal realizado generalmente los días miércoles. Hubo varias semanas donde no fue posible realizar la medición de los sólidos suspendidos, ya que durante la operación del sistema se presentaron muchos inconvenientes como fallas mecánicas del eje o problemas con el motor, por lo cual se tuvo que parar la operación entre 1 a 3 días.

La determinación de los sólidos suspendidos se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Investigación del Agua de la Universidad Nacional de Ingeniería. Para esta medición se utilizó el método gravimétrico según estándar 2524 D Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA, WEF.

- **Volumen de Lodos**

El volumen de lodos generados en el fondo de cada reactor tanto de la primera etapa como la segunda etapa, fueron medidos después de 03 meses del inicio de la investigación. Durante el mantenimiento de los reactores se vaciaron los reactores y se medía el volumen (en litros) utilizando baldes graduados.

4.4.3 Período de Operación de la Investigación

Se realizaron dos periodos de operación variando las velocidades de rotación de los discos:

- 3 RPM: Por un período de 03 meses
- 5 RPM: Por un período de 02 meses

El sistema inició su operación el 20 de junio de 2017 y se finalizó el día 01 de diciembre de 2017. A partir de la semana 03 se pudo observar un crecimiento de la biopelícula muy fino en los discos de PVC, a partir de esa fecha se comenzó a monitorear. Sin embargo los valores de DBO_5 indican una estabilización del sistema a partir de la semana 08.

Como será explicado más adelante, inicialmente la tesis contempló estudiar tres velocidades (3, 5 y 8 RPM), pero durante la investigación se presentaron constantes problemas o fallas del sistema como rotura del eje y sobre-calentamiento del motor para velocidades de rotación de los discos iguales y mayores a 5 rpm, por tal motivo no se realizó el estudio para una velocidad de 8 rpm.

4.4.4 Frecuencia de Monitoreo

De acuerdo a los objetivos planteados, se han seleccionado los siguientes parámetros de calidad del efluente residual para el monitoreo y su posterior evaluación. La frecuencia de monitoreo estuvo en función de los parámetros de calidad del agua residual, la disponibilidad de los equipos de medición y horarios de uso del laboratorio.

Los parámetros temperatura, pH, oxígeno disuelto y turbiedad tuvieron una frecuencia de monitoreo diaria e In Situ. Se realizó de lunes a viernes, alrededor de las 10 de la mañana y/o tres de la tarde.

Los parámetros DBO_5 y los sólidos suspendidos (SS) tuvieron una frecuencia semanal. El monitoreo se realizó los días viernes de cada semana por las mañanas.

El volumen de lodos generados en los reactores de la primera y segunda etapa del RBC se midió de forma trimestral.

Tabla 2-Frecuencia de monitoreo

PUNTO	Parámetros In Situ	Frecuencia	Parámetros de carga orgánica	Frecuencia
INGRESO E-0	Temperatura (°C)	<i>Diaria</i>	DBO5	<i>Semanal</i>
	PH	<i>Diaria</i>	Sólidos Suspendidos	<i>Semanal</i>
	OD (mg/l)	<i>Diaria</i>		
	Turbiedad (NTU)	<i>Diaria</i>		
SALIDA PRIMERA ETAPA E-1	Temperatura (°C)	<i>Diaria</i>	DBO5	<i>Semanal</i>
	PH	<i>Diaria</i>	Sólidos Suspendidos	<i>Semanal</i>
	OD (mg/l)	<i>Diaria</i>		
	Turbiedad (NTU)	<i>Diaria</i>		
	Lodos (litros)	<i>Trimestral</i>		
SALIDA SEGUNDA ETAPA E-2	Temperatura (°C)	<i>Diaria</i>	DBO5	<i>Semanal</i>
	PH	<i>Diaria</i>	Sólidos Suspendidos	<i>Semanal</i>
	OD (mg/l)	<i>Diaria</i>		
	Turbiedad (NTU)	<i>Diaria</i>		
	Lodos (litros)	<i>Trimestral</i>		

CAPÍTULO V – RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

Los resultados de los parámetros medidos durante la investigación se han analizado uno a uno, evaluando su comportamiento a través del tiempo y cuando se modificó la variable velocidad de rotación de los discos. Se registraron valores de temperatura, pH, turbiedad, sólidos suspendidos (SS) y demanda bioquímica de oxígeno al quinto día (DBO₅) indicando su magnitud, fecha y hora. Además se ha evaluado las características físicas de la biopelícula y se registró imágenes fotográficas de su evolución y comportamiento durante todo el periodo de operación. También se ha registrado imágenes de las vistas al microscopio con el fin de identificar a los principales microorganismos presentes en la biopelícula.

Por medio de las expresiones matemáticas mencionadas en el punto 4.3.4 se puede calcular la superficie **A** requerida para alcanzar la reducción de DBO deseada de **S₀** a **S₂** para el caso de un sistema de dos etapas. Mediante un proceso iterativo se obtuvo como resultado una superficie requerida **A** de 6.62 m².

Tabla 3 Diámetros probables de los biodiscos

Diámetro del Disco (cm)	Número de Discos (und)	Área Superficial (A) (m ²)
40	14	3.519
50	14	5.498
60	14	7.917
70	14	10.776
80	14	14.074

De acuerdo a la **Tabla 3** se escoge un diámetro de 60 cm para cada disco de esta manera estamos cumpliendo en mayor medida al área requerida según los cálculos.

Los discos se posicionaron con un porcentaje de sumergencia en el medio líquido del 40% de su superficie. En consecuencia, cada disco tenía un área superficial húmeda efectiva de 0.57 m^2 , lo que nos da un área superficial de 3.74 m^2 por etapa y un total de 7.48 m^2 de área superficial disponible. La densidad superficial media fue de $47.41 \text{ m}^2/\text{m}^3$, considerando que cada etapa tenía un tanque reactor con una capacidad efectiva de 81 litros.

Tabla 4 Área calculada, total y efectiva de los discos

Área Calculada (m ²)	Área Superficial Total (m ²)	Área Superficial Efectiva (m ²)
6.62	7.92	7.48

Las dimensiones de cada reactor fueron de 0.50 m de largo x 0.70 m de ancho x 0.24 m de tirante de agua. Lo cual nos dio un volumen de 0.084 m^3 . Los discos dentro del reactor ocupaban un volumen de 0.003 m^3 por lo cual se obtuvo como volumen disponible dentro del reactor de 0.081 m^3 .

Debido a que se utilizó un caudal de ingreso de 18 l/h, se tuvo un TRH de cada etapa de 4.50 h con un TRH total de 9.00 h. El tiempo de retención hidráulico fue constante durante todo el desarrollo de la investigación.

Para una DBO_5 de ingreso de 150 mg/l, un caudal de $0.432 \text{ m}^3/\text{día}$ y un área superficial efectiva de 7.48 m^2 se obtiene una carga orgánica superficial del sistema RBC de $8.66 \text{ g}/\text{m}^2.\text{día}$.

La tesis de investigación tenía como uno de sus objetivos iniciales estudiar el comportamiento del sistema a velocidades de rotación de los discos de 3, 5 y 8 rpm. Al momento de arrancar el tercer periodo para 8 rpm, durante dos semanas el eje de los discos comenzó a fallar y sufrir roturas constantemente, además del recalentamiento excesivo del motor. Por ese motivo se decidió ponerle fin a la investigación y solo se evaluó con dos velocidades de rotación, 3 y 5 rpm.

5.1 Análisis de la Temperatura

Para el período de evaluación con velocidad de rotación de 3 rpm el afluente, punto de monitoreo E-0, alcanzó valores máximo de 20.7 °C, mínimo de 15.9 °C y promedio de 18.4 °C; la desviación estándar fue de 1.0 °C. El efluente de la primera etapa, punto de monitoreo E-1, alcanzó valores máximo de 20.6 °C, mínimo de 15.1 °C y promedio de 17.3 °C; la desviación estándar fue de 1.1°C. Finalmente, El efluente de la segunda etapa, punto de monitoreo E-2, alcanzó valores máximo de 20.4 °C, mínimo de 15.3 °C y promedio de 17.0 °C; la desviación estándar fue de 1.2°C.

Para el período de evaluación con velocidad de rotación de 5 rpm, el afluente alcanzó valores máximo de 24.7 °C, mínimo de 17.6 °C y promedio de 20.8 °C; la desviación estándar fue de 1.6 °C. El efluente de la primera etapa alcanzó valores máximo de 23.8 °C, mínimo de 16.9 °C y promedio de 19.1 °C; la desviación estándar fue de 1.6°C. Finalmente, El efluente de la segunda etapa alcanzó valores máximo de 23.7 °C, mínimo de 16.5 °C y promedio de 18.9 °C; la desviación estándar fue de 1.8°C.

Gráfico 1-Variación de la temperatura en el tiempo

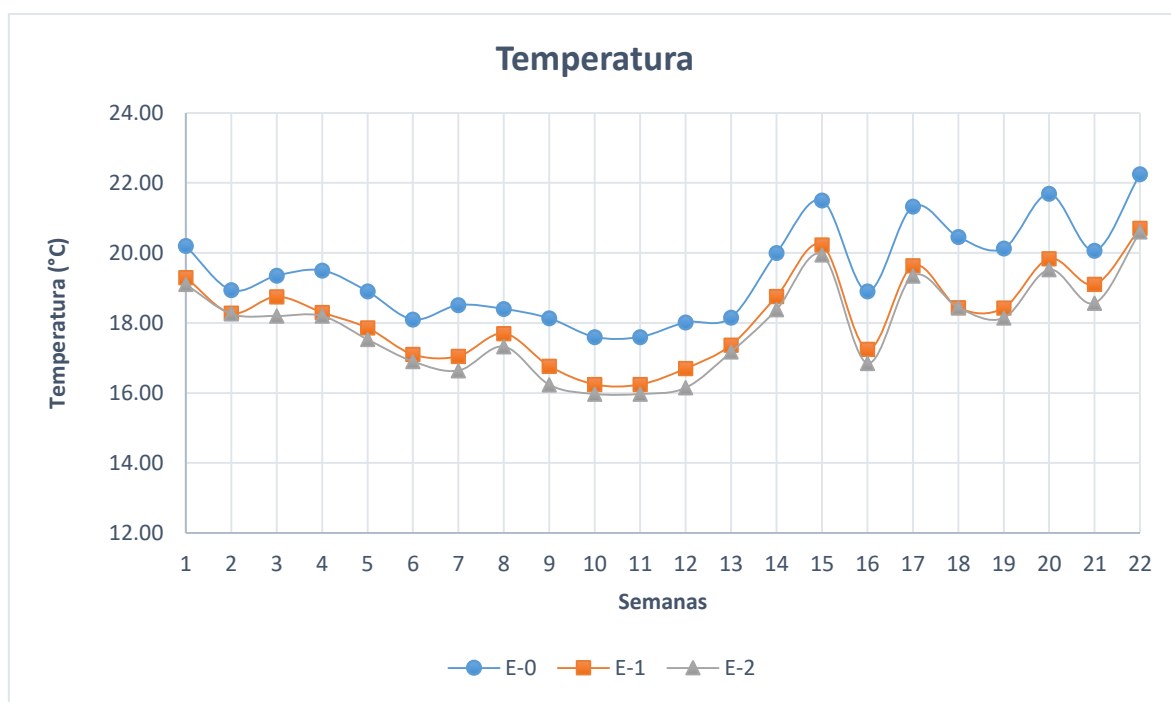
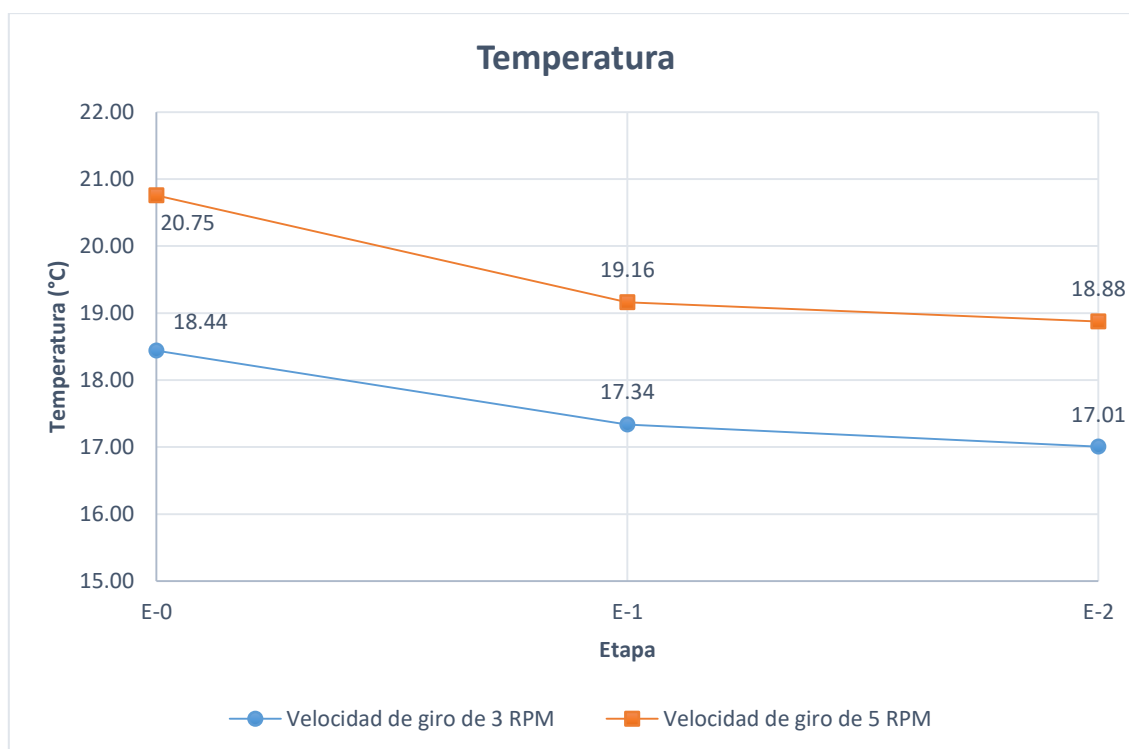


Gráfico 2-Variación de la temperatura por etapas con la velocidad de rotación de los discos



En el primer periodo (3 rpm), se obtuvo una tendencia al descenso de 1.6 °C de temperatura debido a que se inició en la transición estacional de otoño a invierno hasta el inicio de la primavera.

En el segundo periodo (5 rpm), se obtuvo una tendencia al incremento de 1.0 °C de temperatura debido a que se inició en la transición estacional de invierno a primavera hasta el inicio del verano.

Durante todo el periodo de investigación la temperatura del afluente, punto de monitoreo E-0, fue mayor que la temperatura del efluente de la primera etapa, punto de monitoreo E-1, por 1.3 °C en promedio y este a su vez fue mayor que la temperatura del efluente de la segunda etapa, punto de monitoreo E-2, por 0.3 °C en promedio. Esto se debe a que el afluente estuvo retenido en un tanque cerrado de almacenamiento de polietileno con un periodo de retención de 24 horas, el cual estaba expuesto a los rayos solares. Por otro lado el agua residual en los reactores de la primera y la segunda etapa

era a lámina libre y contenida en estructuras de vidrio con un periodo de retención de 4 horas y media en cada etapa, por lo cual después de salir del tanque de almacenamiento pierde temperatura tratando de equilibrarse con la temperatura ambiental.

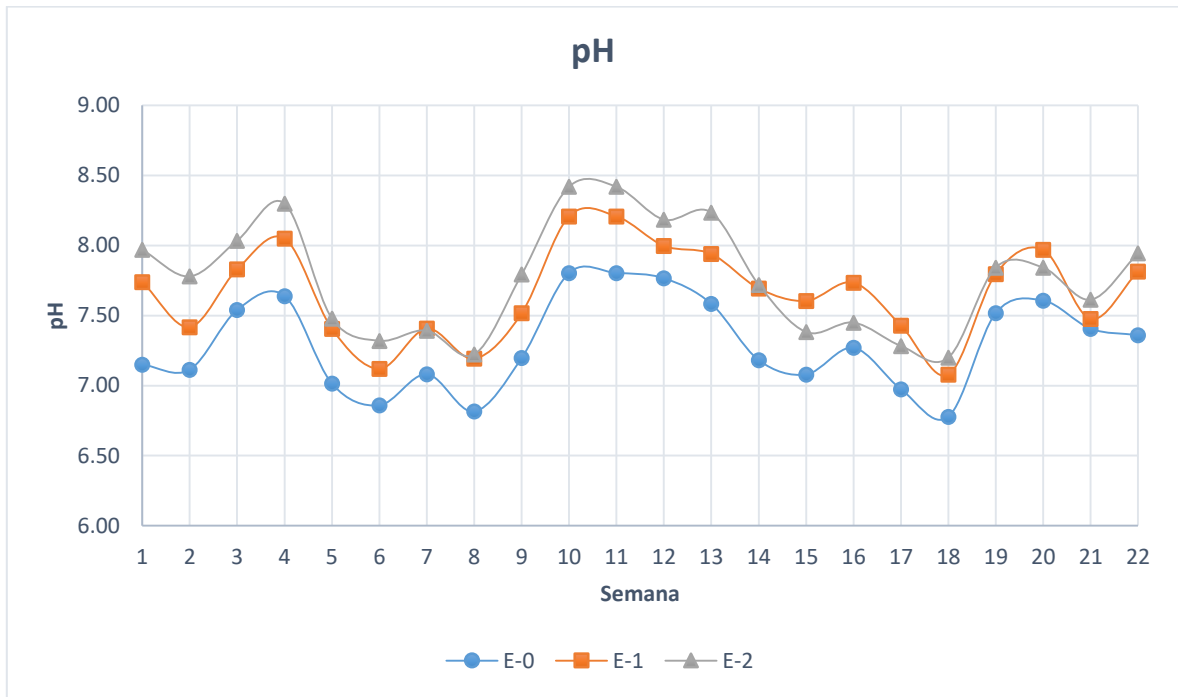
De los datos analizados, se observó que la temperatura no tuvo una variación significativa entre el afluente y los efluentes de la primera y segunda etapa de biodiscos y que el clima fue el único factor que alteró los valores de la temperatura de una etapa a otra. Otros factores como las reacciones endotérmicas o exotérmicas que se dan en los reactores a partir de los procesos biológicos, fueron insignificantes para la variación de la temperatura.

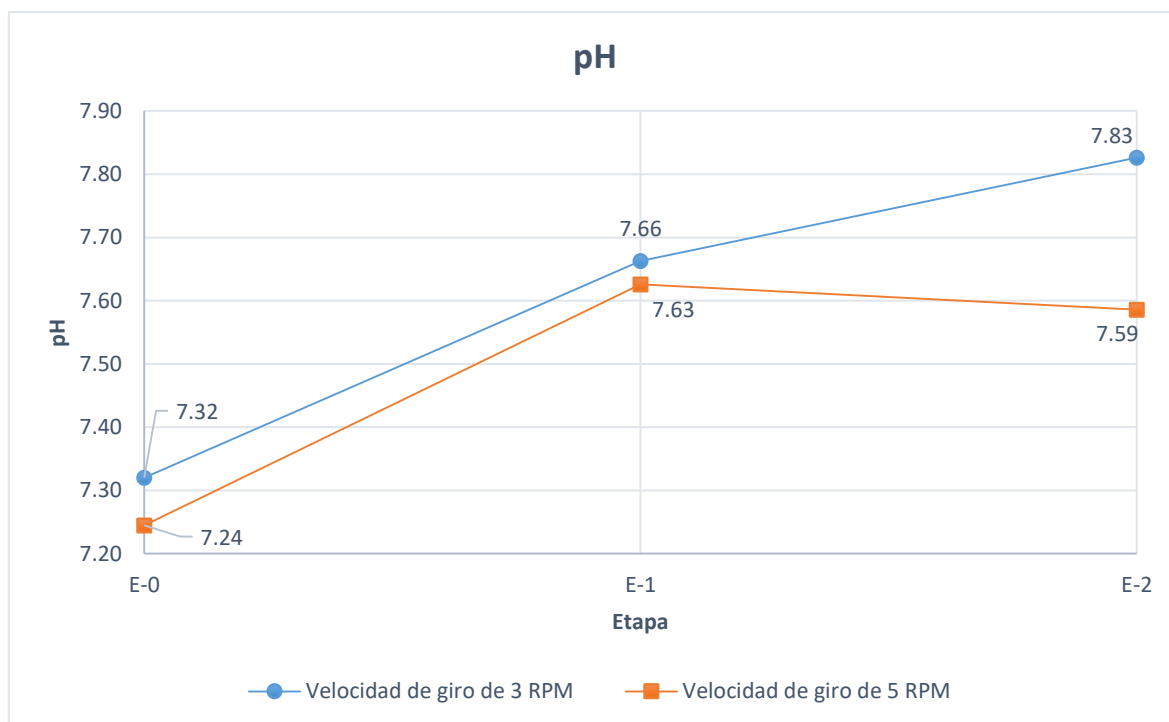
5.2 Análisis del pH

El afluente, punto de monitoreo E-0, para todo el período de evaluación, tuvo un pH promedio de 7.29 y alcanzó un valor máximo de 8.72 y un mínimo de 6.19; la desviación estándar fue de 0.5.

Para el período de evaluación con velocidad de rotación de 3 rpm, el efluente de la primera etapa, punto de monitoreo E-1, tuvo un pH promedio de 7.66 y alcanzó un valor máximo de 8.93 y un mínimo de 6.67; la desviación estándar fue de 0.49. Finalmente, El efluente de la segunda etapa, punto de monitoreo E-2, tuvo un pH promedio de 7.83 y alcanzó un valor máximo de 8.93 y un mínimo de 6.78; la desviación estándar fue de 0.52.

Para el período de evaluación con velocidad de rotación de 5 rpm, el efluente de la primera etapa, punto de monitoreo E-1, tuvo un pH promedio de 7.63 y alcanzó un valor máximo de 8.44 y un mínimo de 6.24; la desviación estándar fue de 0.39. Finalmente, El efluente de la segunda etapa, punto de monitoreo E-2, tuvo un pH promedio de 7.59 y alcanzó un valor máximo de 8.48 y un mínimo de 6.76; la desviación estándar fue de 0.37.

Gráfico 3-Variación del pH en el tiempo**Gráfico 4-Variación del pH por etapas con la velocidad de rotación de los discos**



La velocidad de rotación de los discos no tuvo una influencia significativa en los valores del pH de la primera etapa, y se observa que el pH del agua aumenta ligeramente en la primera etapa de biodiscos, como se puede observar en el Gráfico 4. Esto puede haber ocurrido debido a la degradación de los ácidos grasos volátiles (AGV) remanentes del UASB.

Durante el periodo de evaluación inicial de 3 rpm, se puede observar un incremento de pH en la segunda etapa respecto a la primera. Esto se puede atribuir a la mayor presencia de algas que crecieron en la segunda etapa y que durante el día realizan la fotosíntesis, incrementando el pH. Sin embargo, durante el periodo de evaluación con una velocidad de rotación de los discos a 5 rpm, los valores de pH en la segunda etapa disminuyeron ligeramente. Una de las razones puede ser atribuida al inicio de la nitrificación en la segunda etapa.

Tabla 5-Correlaciones para valores del pH

	E2	E1
E1	0.881	
	0.000	

	90	
E0	0.871	0.906
	0.000	0.000
<u>Contenido de la celda</u>		
Correlación de Pearson		
Valor $p < 0.05$		

De los datos analizados, se observó que existe una correlación fuerte entre los valores del pH del afluente (E-0), la primera etapa (E-1) y la segunda etapa (E-2) lo cual nos dice que las variaciones de pH dentro de los reactores fueron consecuencia de las variaciones del pH en el afluente. De igual manera se puede verificar en el **Gráfico 3** que los valores de pH de los tres puntos de monitoreo guardan el mismo patrón.

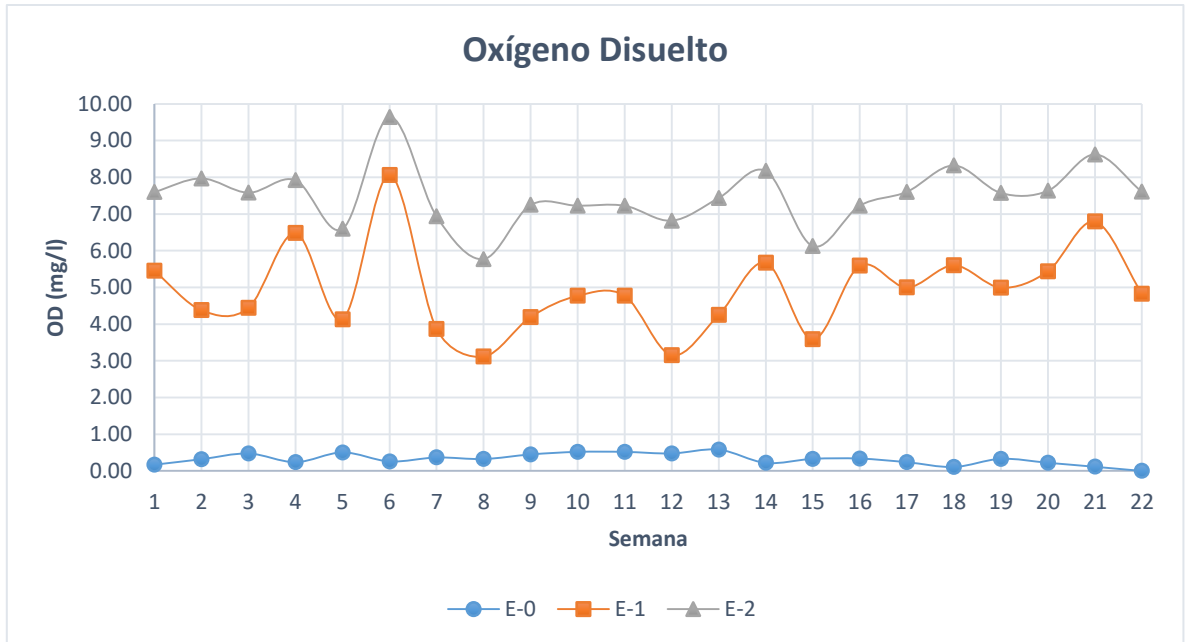
5.3 Análisis del Oxígeno Disuelto

En el punto de monitoreo E-0, por tratarse de un afluente proveniente del UASB, reactor anaerobio, tuvo un valor promedio cercano a 0.0 mg/l.

Para el período de evaluación con velocidad de rotación de 3 rpm, el efluente de la primera etapa, punto de monitoreo E-1, tuvo un valor de OD promedio de 4.18 mg/l y alcanzó un valor máximo de 8.06 mg/l y un mínimo de 2.75 mg/l; la desviación estándar fue de 1.13 mg/l. Finalmente, El efluente de la segunda etapa, punto de monitoreo E-2, tuvo un valor de OD promedio de 7.10 mg/l y alcanzó un valor máximo de 9.64 mg/l y un mínimo de 5.12 mg/l; la desviación estándar fue de 1.13 mg/l.

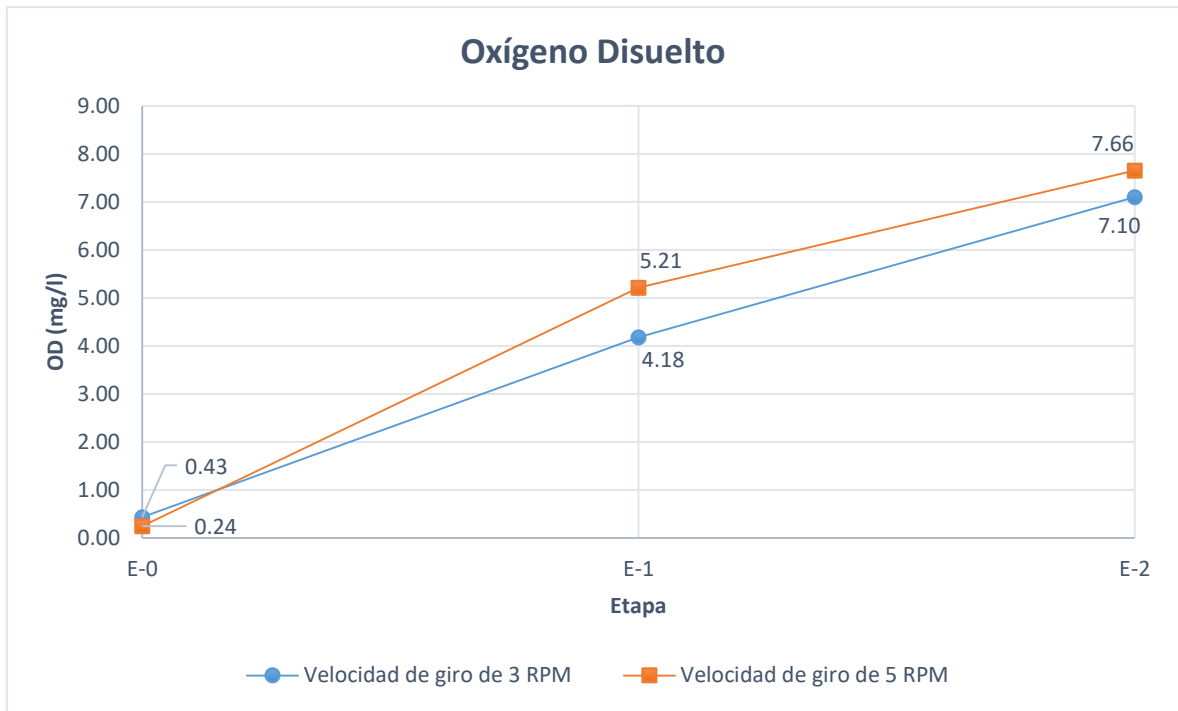
Para el período de evaluación con velocidad de rotación de 5 rpm, el efluente de la primera etapa, punto de monitoreo E-1, tuvo un valor de OD promedio de 5.21 mg/l y alcanzó un valor máximo de 7.56 mg/l y un mínimo de 2.78 mg/l; la desviación estándar fue de 1.33 mg/l. Finalmente, El efluente de la segunda etapa, punto de monitoreo E-2, tuvo un valor de OD promedio de 7.66 mg/l y alcanzó un valor máximo de 9.86 mg/l y un mínimo de 5.80 mg/l; la desviación estándar fue de 0.97mg/l.

Gráfico 5-Variación del Oxígeno Disuelto en el tiempo



Del Gráfico 5 se pueden observar valores picos, de los cuales los valores máximos alcanzados se deben a la gran generación de algas dentro del reactor, que durante los días soleados la actividad fotosintética se incrementa considerablemente. Valores extremos mínimos pueden ser producto del alto consumo de oxígeno por la degradación (oxidación) de los compuestos orgánicos, las variaciones en la carga orgánica del afluente o baja actividad fotosintética debido a paradas por fallas mecánicas del sistema.

Gráfico 6- Variación del OD por etapas con la velocidad de rotación de los discos



La rotación de los discos produjo una oxigenación sustancial de la masa de agua en los reactores. Incrementando su valor conforme atraviesa las etapas de biodiscos. Del **Gráfico 6**, podemos ver que cuando se aumentó la velocidad de rotación, el valor promedio de oxígeno disuelto se incrementó.

Como se puede observar, en un tiempo de retención de 4 horas y media se logró una buena oxigenación de la masa de agua, con una cantidad de oxígeno suficiente para que se lleve a cabo un proceso aerobio.

La tasa de oxigenación para una velocidad de rotación de 5 rpm, disminuye en la segunda etapa. Esto puede ser debido a que en ese período de evaluación la temperatura ambiental era mayor y por lo tanto el valor de saturación estaba más cerca. Además, también puede ser atribuida, a un incremento en la tasa de consumo de oxígeno por las bacterias nitrificantes y otros microorganismos como rotíferos que aparecieron cuando se incrementó la velocidad de rotación a 5 rpm.

Tabla 6-Correlación de OD entre E-2 y E-1

Correlación de Pearson	0.684
Valor p<0.05	0.000

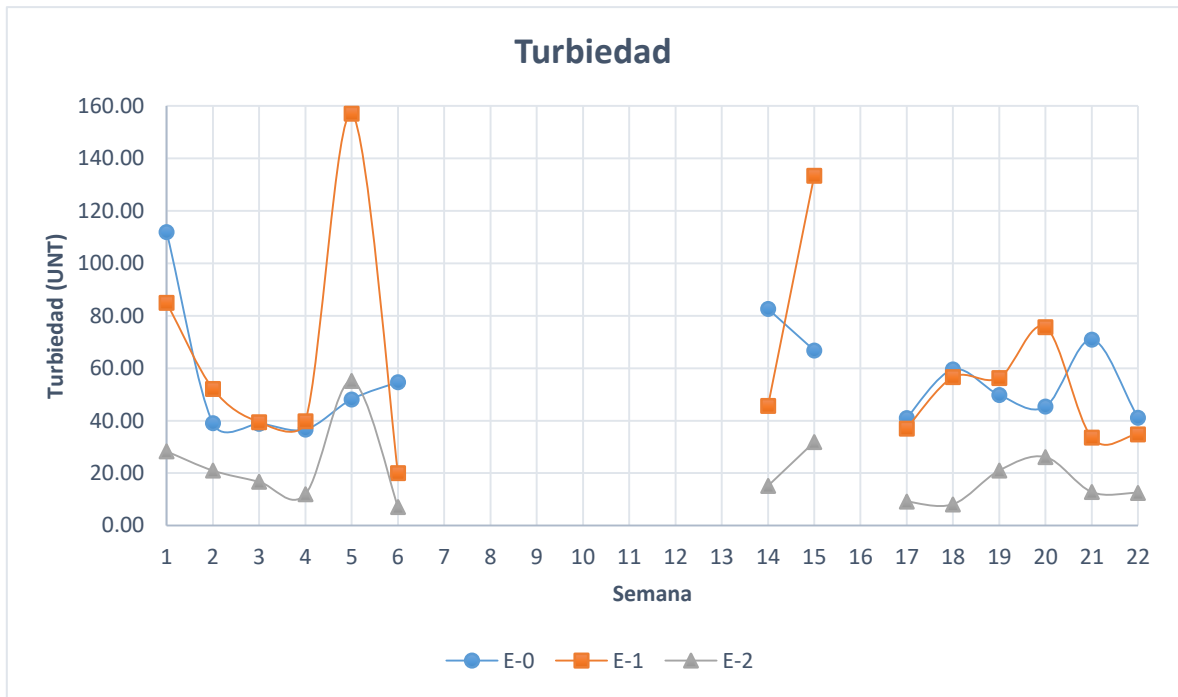
En la **Tabla 6** se muestra el análisis de correlación entre los valores de oxígeno disuelto de la primera y segunda etapa muestra una correlación de 0.684 lo cual nos quiere decir que las variaciones de oxígeno disuelto en la segunda etapa son consecuencia de las variaciones de la primera etapa. De igual manera en el **Gráfico 5** podemos observar que los valores de oxígeno disuelto de los dos últimos puntos de monitoreo guardan el mismo patrón.

Se realizó un análisis estadístico de ANOVA para verificar la hipótesis planteada si la velocidad de rotación de los discos influye en la oxigenación de la masa de agua. Este análisis estadístico confirmó nuestra hipótesis y se concluye que la velocidad de rotación de los discos influyó en el aumento de los niveles de oxígeno disuelto. El análisis se puede consultar en el Anexo 4

5.4 Análisis de la Turbiedad

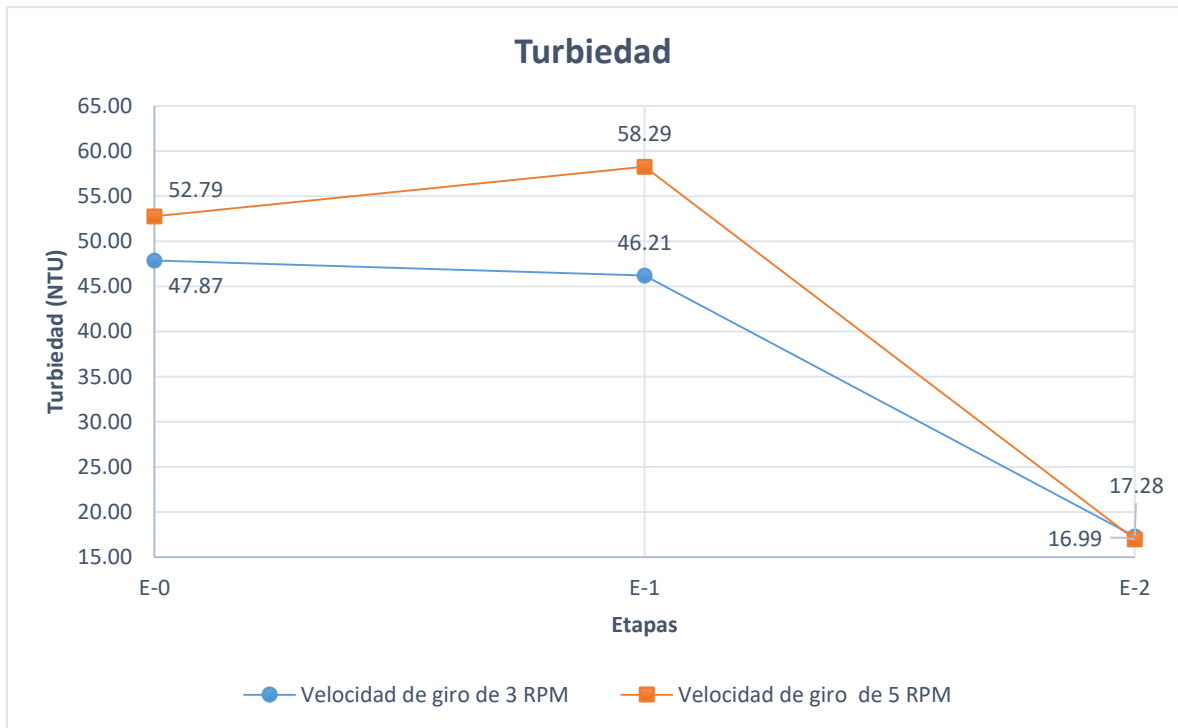
En el afluente, punto de monitoreo E-0, se obtuvo un valor promedio de 51.27 UNT, con un valor máximo de 112.00 UNT y un valor mínimo de 28.90 UNT; la desviación estándar fue de 17.04 UNT. El efluente de la primera etapa, punto de monitoreo E-1, tuvo un valor de turbiedad promedio de 69.08 UNT y alcanzó un valor máximo de 236.00 UNT y un mínimo de 12.10 UNT; la desviación estándar fue de 53.43 mg/l. Finalmente, El efluente de la segunda etapa, punto de monitoreo E-2, tuvo un valor de turbiedad promedio de 22.15 UNT y alcanzó un valor máximo de 81.70 UNT y un mínimo de 1.84 UNT; la desviación estándar fue de 18.57 UNT. Los datos muestran una alta dispersión tanto en la primera como en la segunda etapa.

Gráfico 7- Variación de la turbiedad en el tiempo



Como se puede apreciar en el **Gráfico 7**, los valores del afluente (proveniente del reactor UASB) tuvieron una distribución uniforme, pero los valores de la primera etapa son irregulares y de mayor magnitud, como por ejemplo en la semana 5 y en la semana 15 donde se presentan picos elevados. Esto se debe a la actividad de la biopelícula, que al desprenderse constantemente genera sólidos suspendidos en el agua aumentando los valores de la turbiedad. Este aumento promedio fue del 53.38% respecto al valor inicial de la turbiedad.

Gráfico 8- Variación de la turbiedad por etapas con la velocidad de rotación de los discos



La turbiedad presenta valores picos muy altos en la primera etapa (236 UNT) durante el periodo de operación de 3 rpm, esto se debe a que durante la primera semana de Agosto, se dio el primer desprendimiento de la biopelícula de los discos. Esto se corroboró con los altos niveles de sólidos y una alta DBO₅ en el efluente. En general un descenso de la eficiencia del sistema.

Del **Gráfico 8**, podemos observar que un incremento en la velocidad de rotación de los discos originó una mayor turbulencia y agitación de la masa de agua, por lo tanto se puso en suspensión una mayor cantidad de sólidos, producto del desprendimiento de la biopelícula de los discos o de los lodos depositados en el fondo del reactor. Como será explicado más adelante (punto 5.8), el crecimiento excesivo de las bacterias filamentosas en la primera etapa también contribuyeron al aumento de la turbiedad. Todos estos sólidos en suspensión originaron un ligero incremento de la turbiedad en la primera etapa. En la segunda etapa el efecto de velocidad no fue el mismo debido a que la biopelícula era menos densa y la acumulación de lodos era mucho menor. Se podría decir que la segunda etapa si removió turbiedad del agua, llegando incluso a turbiedades

de 1.84 UNT. La segunda tuvo una eficiencia de remoción de la turbiedad del 65.68% respecto a la primera etapa, y la eficiencia total del sistema fue del 53.51%.

Tabla 7- Correlación de turbiedad

	E0	E1
E1	-0.007	
	0.959	
E2	-0.088	0.793
	0.521	0.000

Contenido de la celda

Correlación de Pearson

Valor $p < 0.05$

**Valores picos por desprendimiento de biopelícula no fueron considerados par el análisis.*

Tal como lo muestran los valores del análisis de correlación, se puede concluir que la segunda etapa fue fuertemente influenciada por las variaciones de la primera etapa. De igual manera en el **Gráfico 7** podemos observar que los valores de turbiedad de los dos últimos puntos de monitoreo guardan el mismo patrón. Por el contrario la primera etapa no tuvo ninguna influencia de las variaciones de turbiedad que tenga el afluente.

5.5 Análisis de la Demanda Bioquímica de Oxígeno

Las mediciones de la DBO₅ para el afluente (proveniente del UASB), punto de monitoreo E-0, muestran valores promedios constantes durante todo el período de operación. El efluente de la primera etapa de biodiscos, punto de monitoreo E-1, presenta un cambio en el valor promedio de 27.32 mg/l para el periodo de 3 rpm a 52.50 mg/l para el periodo de 5 rpm. Las desviaciones estándar para estos periodos fueron de 6.23 mg/l y 2.16 mg/l respectivamente, esto quiere decir que los datos presentan poca dispersión y que el proceso es estable. El efluente de la segunda etapa de biodiscos, punto de monitoreo E-2, también presenta un cambio en el valor promedio de 13.81

mg/l para el periodo de 3 rpm a 27.62 mg/l para el periodo de 5 rpm. Las desviaciones estándar para estos periodos fueron de 4.71 mg/l y 7.94 mg/l respectivamente, lo que también indica un proceso estable.

Tabla 8-Valores de la DBO5

Fecha de medición	Velocidad de rotación de los discos	DBO-E1 (mg/l)	DBO -E2 (mg/l)	DBO -E3 (mg/l)	Eficiencia 1era Etapa	Eficiencia Total
<i>n</i>	3 RPM	8	6	6		
<i>min</i>		101.24	21.22	7.90	74%	85%
<i>max</i>		153.16	37.24	21.73	82%	93%
<i>prom</i>		123.79	27.32	13.81	79%	90%
<i>desv.</i>		17.70	6.23	4.71	3%	3%
<i>n</i>	5 RPM	6	6	6		
<i>min</i>		107.85	49.26	16.17	52%	66%
<i>max</i>		144.83	54.95	37.11	65%	88%
<i>prom</i>		127.11	52.50	27.62	58%	78%
<i>desv.</i>		12.95	2.16	7.94	5%	7%
14/7/2017	3 RPM	105.88	90.64	41.26	14%	61%
21/7/2017	3 RPM	101.24	62.1	69.34	39%	32%
4/8/2017	3 RPM	138.67	24.93	16.7	82%	88%
10/8/2017	3 RPM	108.36	21.75	7.9	80%	93%
16/8/2017	3 RPM	117.7	21.22	8.61	82%	93%
15/9/2017	3 RPM	123.66	24.27	13.57	80%	89%
20/9/2017	3 RPM	141.63	37.24	21.73	74%	85%
22/9/2017	3 RPM	153.16	34.49	14.34	77%	91%
29/9/2017	5 RPM	135.58	54.01	16.17	60%	88%
4/10/2017	5 RPM	135.21	54.95	34.67	59%	74%
13/10/2017	5 RPM	107.85	51.44	37.11	52%	66%
27/10/2017	5 RPM	113.64	54.67	17.83	52%	84%
3/11/2017	5 RPM	144.83	50.68	30.37	65%	79%
10/11/2017	5 RPM	125.53	49.26	29.58	61%	76%

*: Estos valores no se tomaron en cuenta para los cálculos estadísticos.

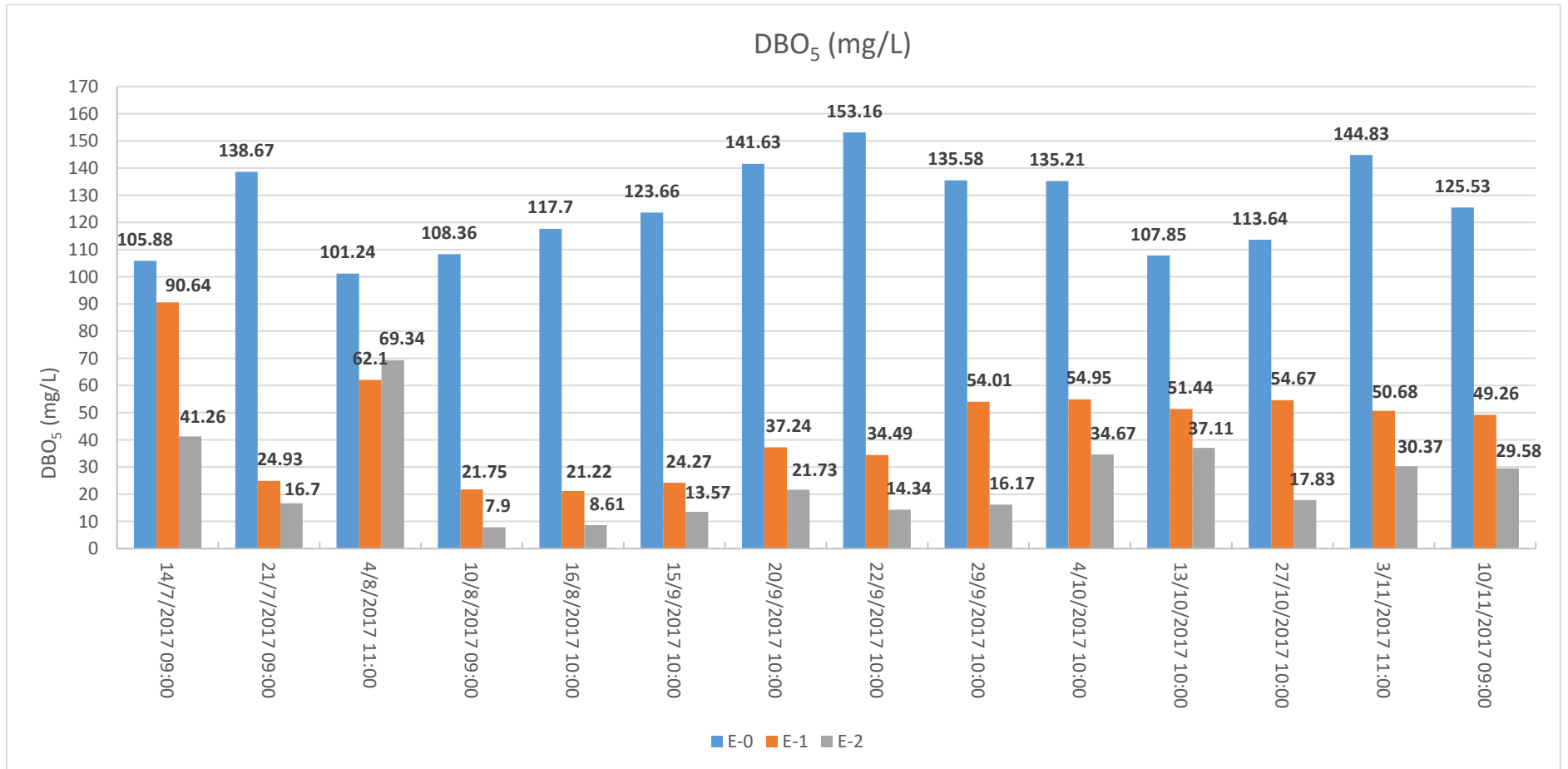


Gráfico 9-Valores de la DBO₅ vs Tiempo

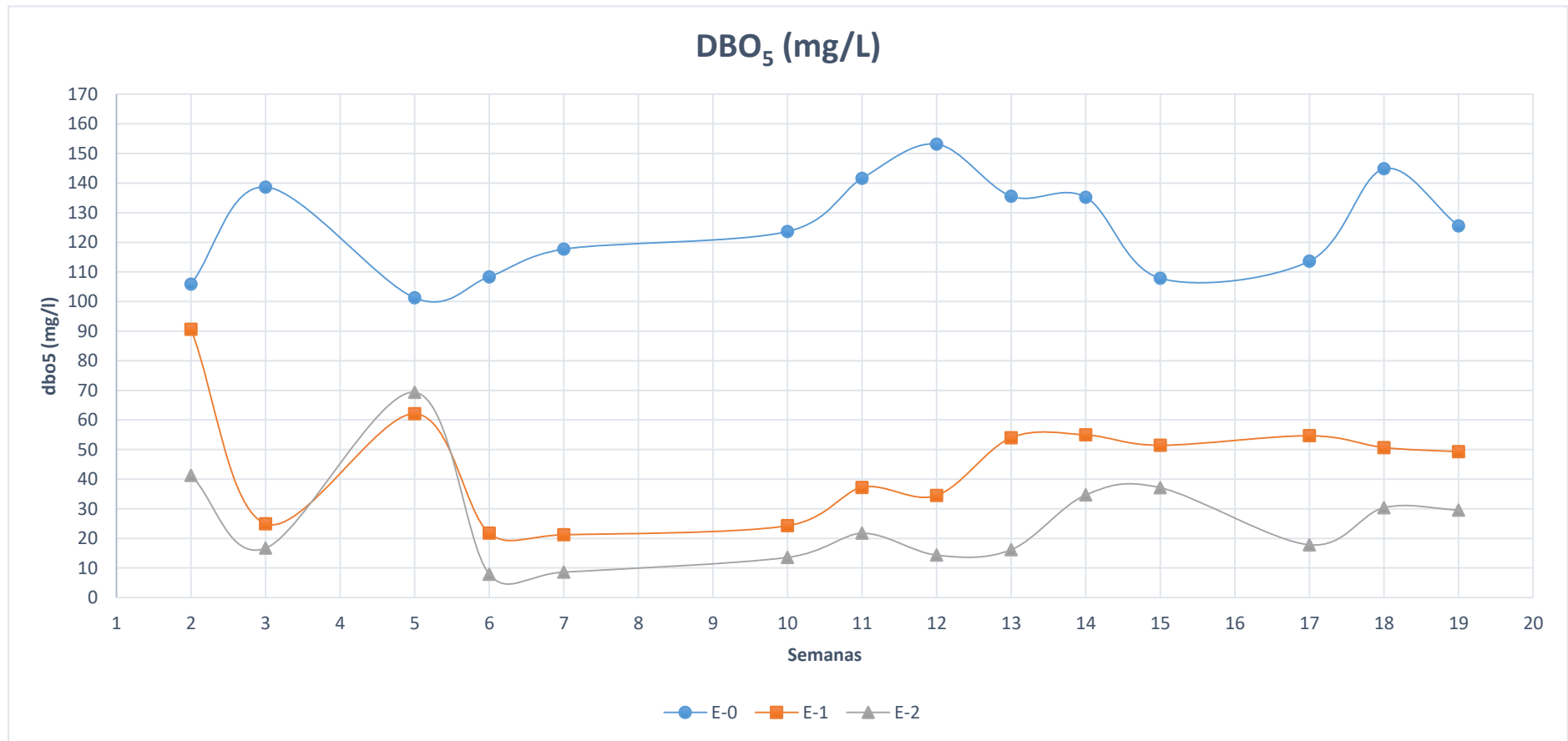


Gráfico 10- Variación de la DBO₅ en el tiempo

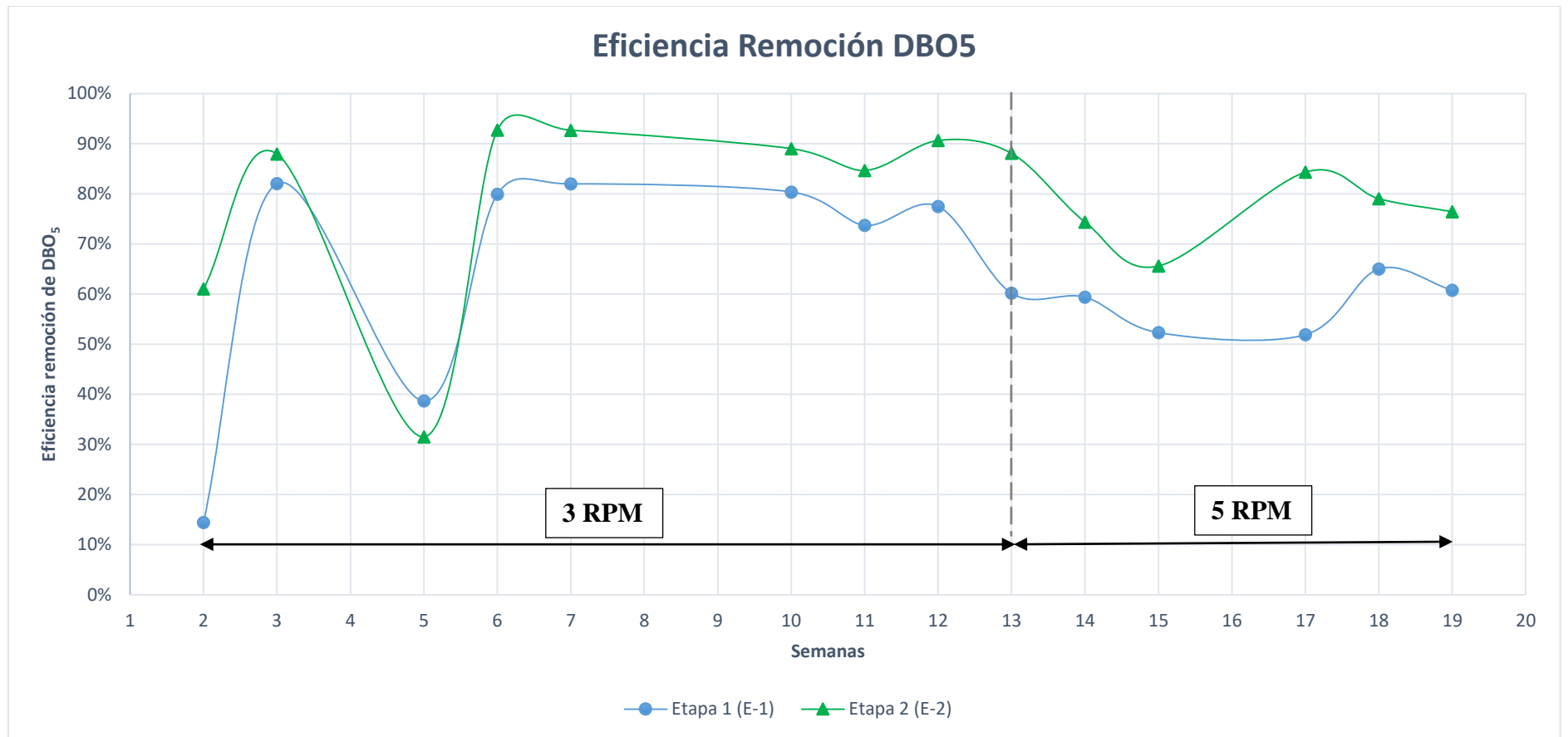
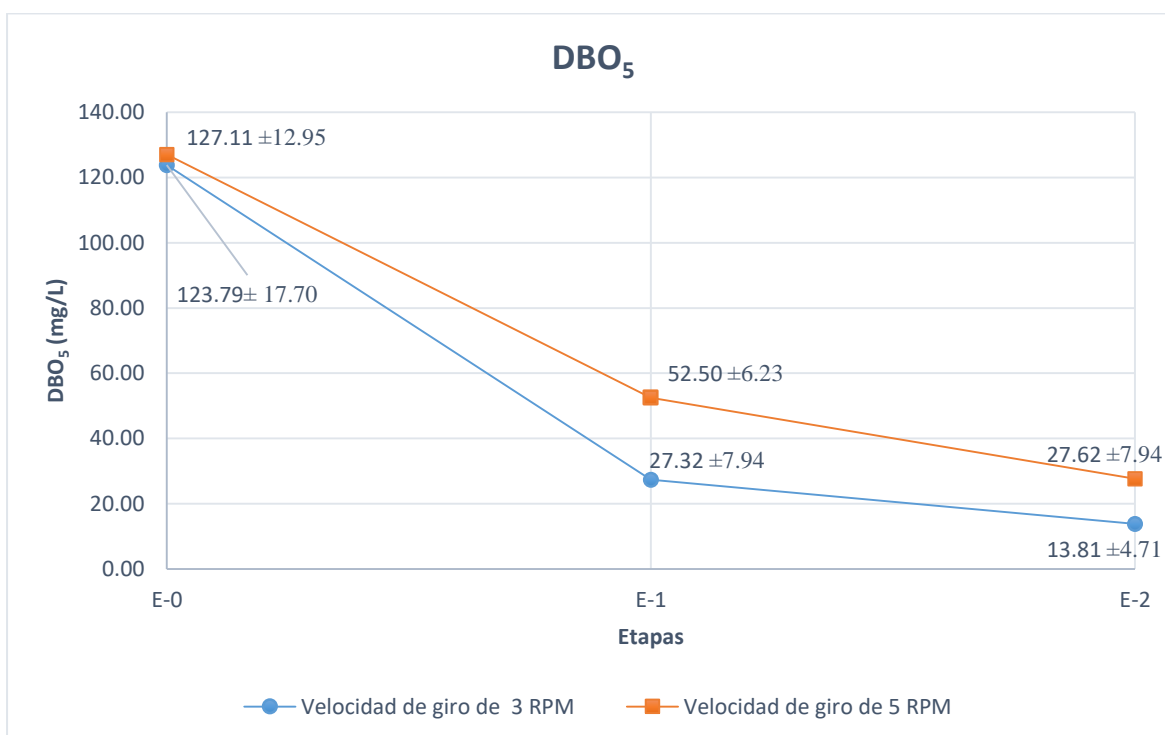


Gráfico 11- Eficiencia de remoción de la DBO₅ Vs tiempo

Como se puede observar en el **Gráfico 11**, la primera etapa es la que remueve la mayor parte de la DBO₅, alcanzando una eficiencia máxima del 82%. Esto se debe a que en la primera etapa hay una mayor cantidad de materia orgánica y nutrientes disponibles, por lo cual se forma una mayor densidad de biopelícula y por lo tanto una mayor remoción. A la segunda etapa llega una concentración mucho menor de materia orgánica, por ello la biopelícula fue de menor densidad y la remoción fue en menor magnitud. La eficiencia total del sistema tuvo un valor promedio del 90% para una velocidad de rotación de 3rpm, mientras que para una velocidad de 5 rpm la eficiencia promedio descendió a 78%. El sistema tuvo una alta eficiencia llegando a alcanzar un valor máximo del 93% y con un valor mínimo de DBO₅ en el efluente final de 7.90 mg/l.

Gráfico 12- Variación de la DBO₅ por etapas con la velocidad de rotación de los discos



La velocidad de rotación de los discos provocó un cambio significativo en los valores promedios de la DBO₅ para ambas etapas de biodiscos. Realizando un análisis estadístico de ANOVA, se comprueba la hipótesis planteada concluyendo que la velocidad de rotación de los discos influyó en la remoción de la DBO₅. A mayor velocidad de rotación, la eficiencia del sistema decrece. Una de las razones de que sucediera esto es que a mayor velocidad de rotación de los discos, la adherencia de la

biopelícula a estos se hace más difícil, reduciendo el área efectiva. Además se pone en suspensión los lodos depositados en el fondo de los reactores. Esto se corroboró con el aumento de los valores de turbiedad y de sólidos suspendidos.

El análisis estadístico de ANOVA de la DBO₅ puede ser consultado en el Anexo 4.

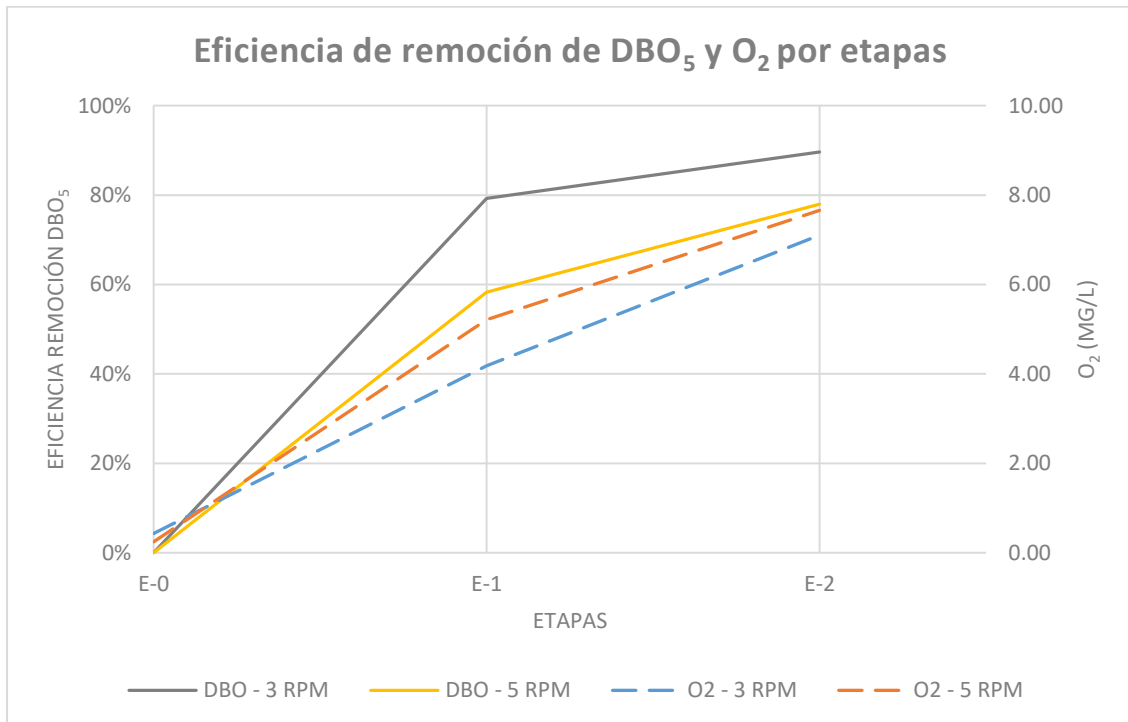
Tabla 9-Correlación de la DBO₅

	BDO-E0	DBO -E1
DBO -E1	0.093	
	0.774	
DBO -E2	0.083	0.746
	0.797	0.005

Contenido de la celda
Correlación de Pearson
Valor p

Tal como lo muestra el **Gráfico 10** y los valores del análisis de correlación de la **Tabla 9**. La segunda etapa fue fuertemente influenciada por las variaciones de la primera etapa y estas guardan el mismo patrón.

Gráfico 13- Eficiencia de remoción de DBO₅ y O₂ por etapas y velocidad de rotación.



Como se puede observar en el **Gráfico 13**, la eficiencia de remoción de DBO_5 en vez de aumentar con el incremento de oxígeno disuelto, este se disminuye de un 90% a un 78%, mostrando una relación inversamente proporcional. Esto puede ser por el incremento de sólidos en suspensión por desprendimiento de la biopelícula debido al aumento de la velocidad rotacional de los discos de 3 RPM a 5 RPM.

5.6 Análisis de los Sólidos Suspendidos Totales

Dentro de los sólidos suspendidos totales, se realizó la medición de los sólidos suspendidos fijos totales y los sólidos suspendidos volátiles totales.

Para el período de evaluación con velocidad de rotación de 3 rpm, el afluente, punto de monitoreo E-0, tuvo un valor de SST promedio de 26.18 mg/l y alcanzó un valor máximo de 30.00 mg/l y un mínimo de 23.50 mg/l; la desviación estándar fue de 2.97 mg/l. El efluente de la primera etapa, punto de monitoreo E-1, tuvo un valor de SST promedio de 16.40 mg/l y alcanzó un valor máximo de 18.50 mg/l y un mínimo de 14.90 mg/l; la desviación estándar fue de 1.42 mg/l. Finalmente, el efluente de la segunda etapa, punto de monitoreo E-2, tuvo un valor de SST promedio de 13.23 mg/l y alcanzó un valor máximo de 17.50 mg/l y un mínimo de 8.30 mg/l; la desviación estándar fue de 3.34 mg/l.

Para el período de evaluación con velocidad de rotación de 5 rpm, el afluente de la, punto de monitoreo E-0, tuvo un valor de SST promedio de 24.73 mg/l y alcanzó un valor máximo de 27.30 mg/l y un mínimo de 21.30 mg/l; la desviación estándar fue de 2.31 mg/l. El efluente de la primera etapa, punto de monitoreo E-1, tuvo un valor de SST promedio de 20.65 mg/l y alcanzó un valor máximo de 25.90 mg/l y un mínimo de 15.40 mg/l; la desviación estándar fue de 5.25 mg/l. Finalmente, El efluente de la segunda etapa, punto de monitoreo E-2, tuvo un valor de SST promedio de 12.35 mg/l y alcanzó un valor máximo de 13.30 mg/l y un mínimo de 11.40 mg/l; la desviación estándar fue de 0.95 mg/l.

Tabla 10-Valores de los SST

PUNTO	Velocidad de rotación de los discos	PUNTO E-01 (Afluente)			PUNTO E-02 (Primera Etapa)			PUNTO E-03 (Segunda Etapa)		
		SST (mg/l)	SSF (mg/l)	SSV (mg/l)	SST (mg/l)	SSF (mg/l)	SSV (mg/l)	SST (mg/l)	SSF (mg/l)	SSV (mg/l)
<i>n</i>	3 RPM	5			4			4		
<i>min</i>		23.50	1.30	14.40	14.90	0.20	13.60	8.30	1.60	5.30
<i>max</i>		30.00	9.10	23.80	18.50	3.30	16.20	17.50	6.00	11.50
<i>prom</i>		26.18	5.32	20.68	16.40	2.08	14.65	13.23	3.60	9.13
<i>desv</i>		2.97	2.53	3.55	1.42	1.15	0.96	3.34	1.59	2.45
<i>n</i>	5 RPM	3			2			2		
<i>min</i>		21.70	1.60	20.10	15.40	2.00	13.40	11.40	1.40	10.40
<i>max</i>		27.30	3.00	24.30	25.90	3.10	22.70	13.30	3.30	11.00
<i>prom</i>		24.73	2.47	22.27	20.65	2.55	18.05	12.35	2.35	10.70
<i>desv</i>		2.31	0.62	1.72	5.25	0.55	4.65	0.95	0.95	0.30
14/7/2017	3 RPM	46.6*	11.1*	35.5*	30.5*	8.8*	21.8*	25.7*	9.4*	16.3*
4/8/2017	3 RPM	24.3	1.3	23	52.4*	9*	43.4*	33.2*	3.7*	29.7*
10/8/2017	3 RPM	29.6	5.9	23.8	15.3	2.6	14.2	14.5	3.8	8.7
16/8/2017	3 RPM	30	5.9	23.1	14.9	0.2	14.6	17.5	6	11.5
15/9/2017	3 RPM	23.5	4.4	19.1	18.5	2.2	16.2	12.6	1.6	11
22/9/2017	3 RPM	23.5	9.1	14.4	16.9	3.3	13.6	8.3	3	5.3
29/9/2017	5 RPM	27.3	3	24.3	25.9	3.1	22.7	13.3	3.3	11
13/10/2017	5 RPM	21.7	1.6	20.1	21.1*	1.9*	19.3*	55.3*	6.4*	48.9*
3/11/2017	5 RPM	25.2	2.8	22.4	15.4	2	13.4	11.4	1.4	10.4

*: Estos valores no se tomaron en cuenta para los cálculos estadísticos.

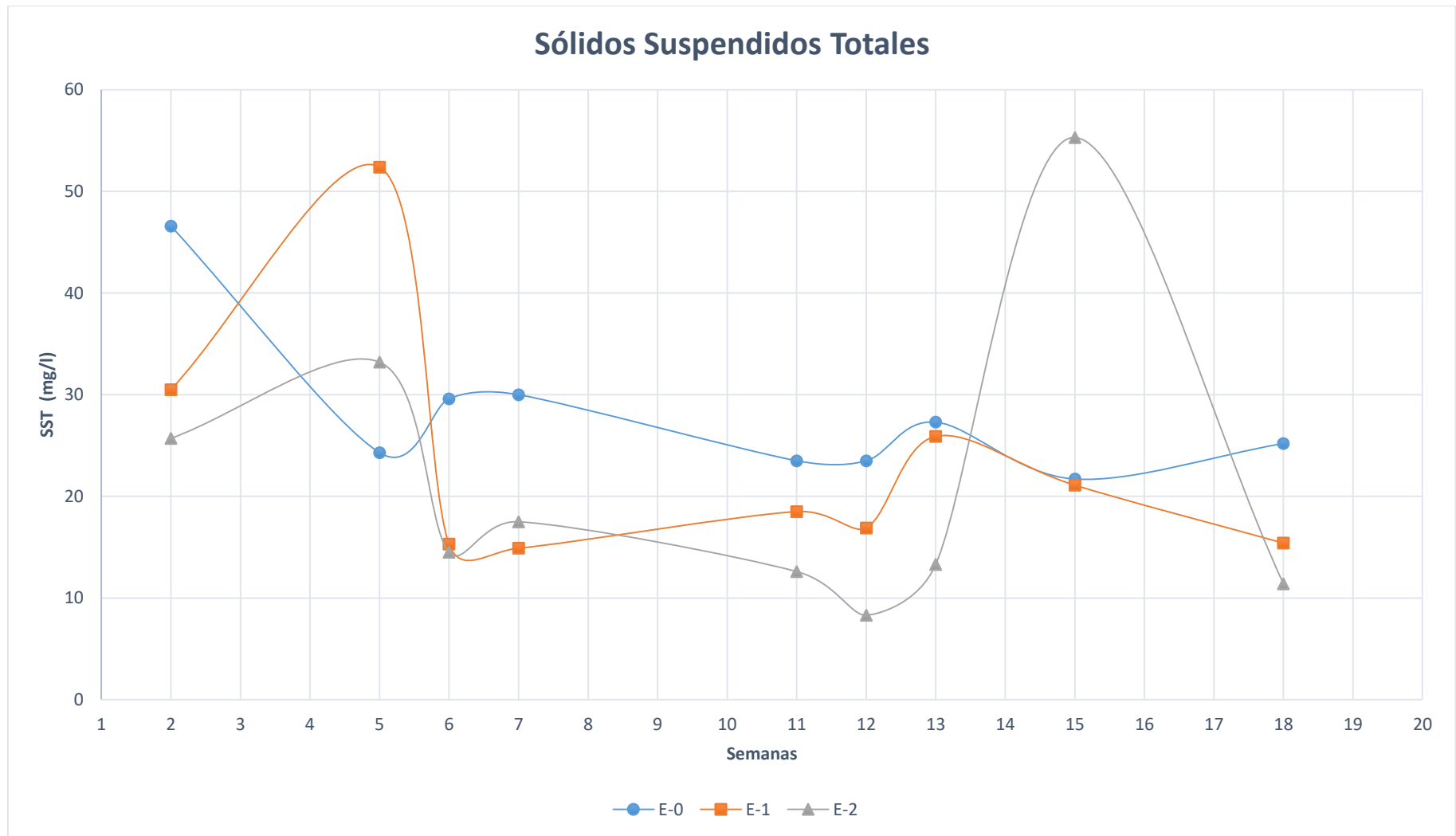


Gráfico 14-Variación de los SST en el tiempo

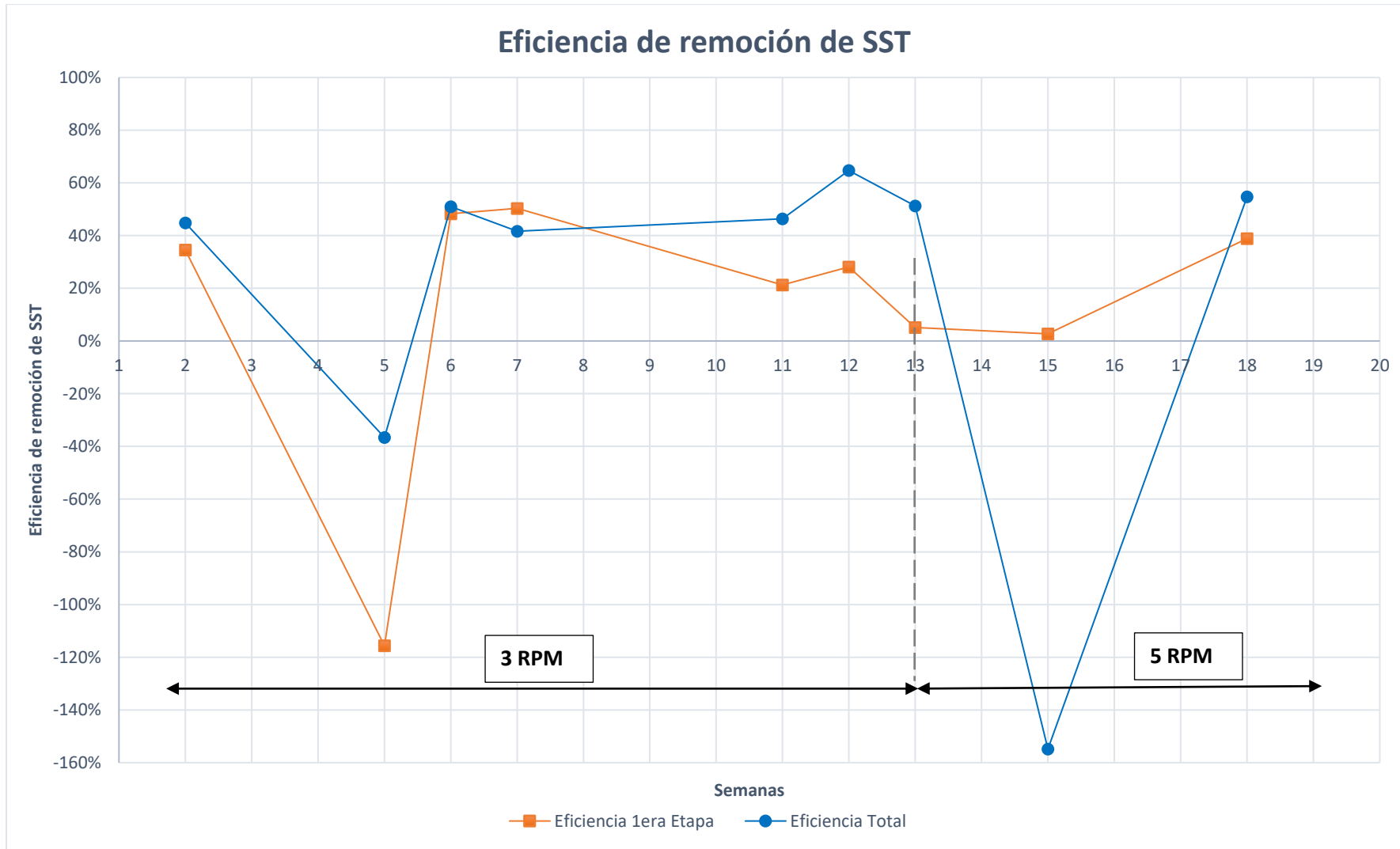


Gráfico 15- Variación de la eficiencia de remoción de SST en el tiempo

De acuerdo al **Gráfico 14** y al **Gráfico 15** mostrados, existen dos valores atípicos de SST en los efluentes de la primera y segunda etapa que son muy elevados, con un valor mayor al afluente. Estos valores picos coinciden con las fechas de desprendimientos masivos de la biopelícula que al caer en forma de biosólidos elevan los valores de sólidos suspendidos. La investigación muestra que un incremento en la velocidad de rotación de los discos, produce un aumento de los valores de SST en la primera etapa. Esto debido a que una mayor velocidad periférica en los discos provoca un ligero desprendimiento de la biopelícula, otra de las razones es que una mayor agitación y turbulencia pone en suspensión los lodos sedimentados en el fondo del reactor. También, durante el período de evaluación de 5 rpm las bacterias filamentosas colonizaron en mayor magnitud la primera etapa lo cual aumenta los valores de SST. La eficiencia del sistema de biodiscos en la remoción de SST para el período de 3 rpm y 5 rpm fue de 51% y 53% respectivamente, lo que muestra que la eficiencia total no fue afectada significativamente por el incremento de la velocidad de rotación de los discos. Si bien es cierto que la primera etapa disminuyó su eficiencia, la segunda etapa absorbió esta deficiencia.

Gráfico 16- Variación de los SST por etapas con la velocidad de rotación de los discos



Debido a que el tiempo de retención hidráulico de cada etapa fue de 4.50 horas, es probable que uno de los mecanismos de remoción de sólidos suspendidos fue a través de la sedimentación. Otros probables mecanismos fueron la adsorción de los sólidos por la biopelícula y por absorción mediante procesos biológico como degradación de pequeñas sustancias orgánicas o por ingestión del material suspendido por microorganismos como los protozoarios y rotíferos. Del *Gráfico 16* podemos observar que el aumento en la velocidad de rotación mejoró ligeramente la eficiencia de remoción de SST en la segunda etapa. Una de las razones, puede ser que el aumento de la velocidad de rotación, incrementó los valores de oxígeno disuelto a niveles óptimos para el probable crecimiento de rotíferos que ingerían este material en suspensión.

Gráfico 17- Variación de los SST por etapas con la velocidad de rotación de los discos

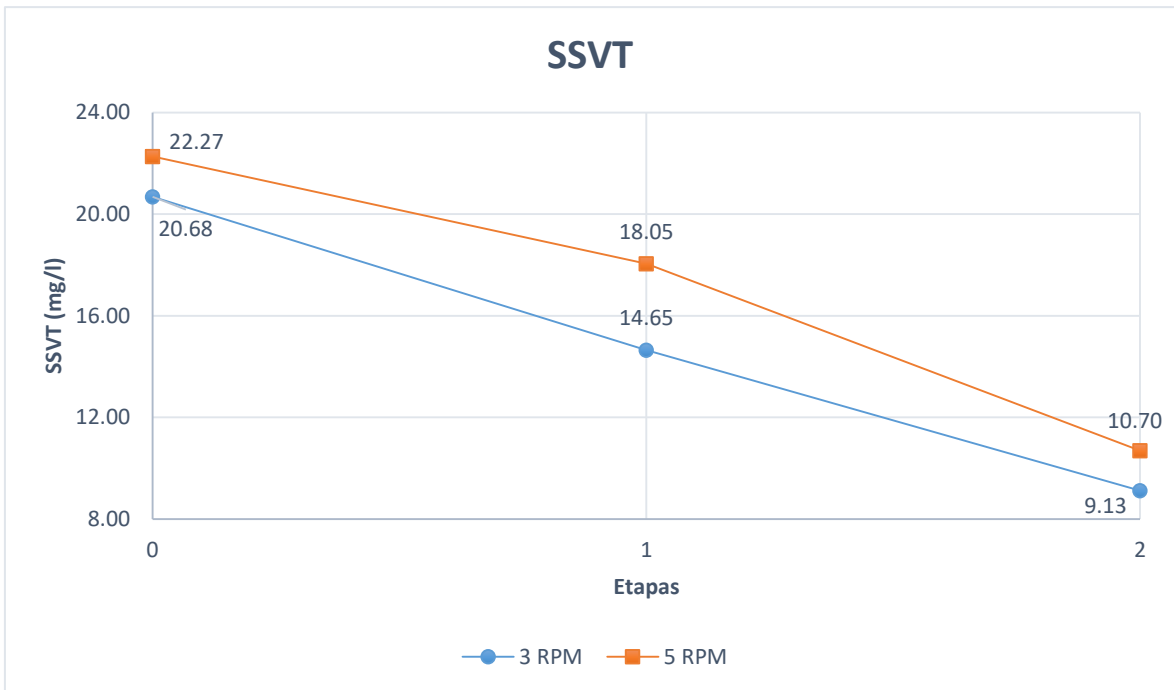
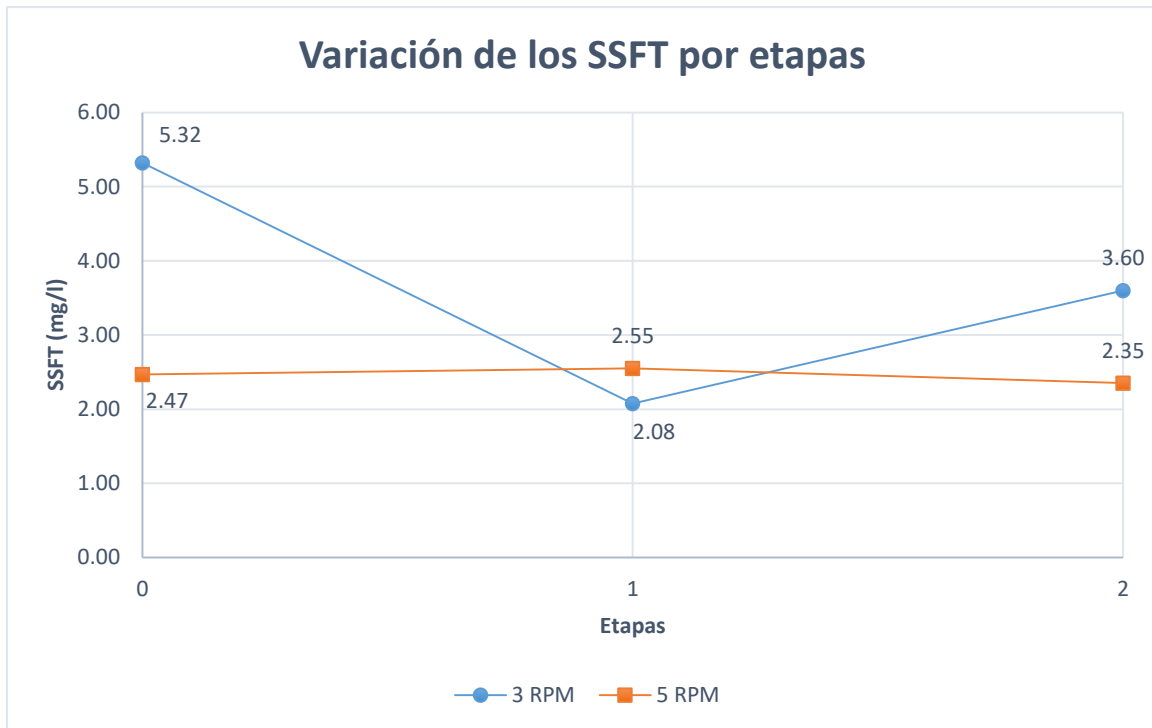


Gráfico 18- Variación de los SSFT por etapas con la velocidad de rotación de los discos



La relación de los sólidos suspendidos volátiles respecto a los sólidos suspendidos totales (SSV/SST) estuvo en un rango para el afluente (E-0) del 61% al 95%, para la primera etapa (E-1) del 80% al 98% y para la 2da etapa (E-2) del 60% al 90%. Lo cual muestran valores típicos de los procesos biológicos. La primera etapa tuvo valores altos de relación SSV/SST, esto es porque la mayor cantidad de sólidos son producto de los desprendimientos de la biopelícula. Por otro lado los SSFT mantuvieron un valor prácticamente constante sin grandes variaciones.

5.7 Características Físicas de la Biopelícula

El desarrollo y evolución de la biopelícula fue observada y documentada con fotografías de forma diaria. La biopelícula normalmente tuvo una consistencia gelatinosa y acuosa con unas características físicas como color, forma, densidad y erosionabilidad que variaban de acuerdo con las condiciones de cada etapa. Según la literatura estas características son propias de una biopelícula activa. La biopelícula en dos oportunidades se tornó de un color negro brillante y después se desprendía parcialmente, las referencias bibliográficas indican características propias de una biopelícula no activa. A continuación, en la *Tabla 11*, se describen las principales características y eventos ocurridos durante el desarrollo de la biopelícula.

Tabla 11- Características y desarrollo de la Biopelícula

SEMANAS	OBSERVACIONES
SEMANA 01	Se comenzaron a formar las primeras pequeñas colonias en la superficie de los discos. Inicialmente comenzaron a poblar los primeros discos de la primera etapa. Estas conglomeraciones tenían forma de pequeños puntos.
SEMANA 02	Se pudo notar un mayor número de colonias en la primera etapa. En la primera etapa las colonias tenían forma de puntos o manchas irregulares de mayor tamaño y de un color gris. Mientras que en la segunda etapa, las colonias tenían forma de puntos o círculos regulares de menor tamaño y de color pardo. Estas características fueron en las caras interiores o no expuestas del disco. Las caras expuestas directamente a los rayos solares tuvieron colonias de forma de puntos o circulares de color pardo y amarillo, que generalmente empezaron poblando los extremos del disco, también presentaron crecimiento de algas en forma irregular y moteada con un color verde.
SEMANA 03	En la primera etapa, las colonias que anteriormente se encontraban aisladas, poblaron casi en su totalidad la superficie de las caras interiores de los discos por una capa muy delgada, el color gris se fue tornando color marrón, mientras que en las caras expuestas, aún se presentaban, aunque en mayor cantidad que en las semanas anteriores, colonias aisladas de color pardo y amarillas con manchas moteadas de color verde. En la segunda etapa el crecimiento era mucho más lento en las caras interiores y no se había desarrollado la biopelícula, aún seguía habiendo esas pequeñas colonias en forma de pequeños parches.

SEMANAS	OBSERVACIONES
SEMANA 04	<p>La biopelícula de la primera etapa ya estaba bien conformada por una capa delgada pero de mayor espesor, de contextura gelatinosa en ambas caras del disco, con un color marrón en las caras interiores y color pardo-marrón en las caras expuestas. Se pudo apreciar los primeros desprendimientos de la biopelícula, esto ocurrió en los primeros dos discos, se pudo notar que estas zonas de desprendimientos tenían un color negro previo a su caída. En la segunda etapa la biopelícula solo se había formado en las caras expuestas y en las zonas donde incidían los rayos solares. Esto se explica debido a que la biopelícula de las caras expuestas estuvo formado en su mayoría por algas y por eso solo se formada en las áreas que tenían exposición directa a los rayos solares.</p>
SEMANA 06	<p>Se tuvo un problema eléctrico con el motor y los discos estuvieron sin girar por un día. Esta parada del sistema produjo cambios en la población de la biopelícula en la superficie expuesta, el color pardo-marrón cambio a un verde brillante. Esto se debe a que la superficie que quedó expuesta no tenía contacto con el agua y se secó, predominando algas de color verde.</p>
SEMANA 07	<p>El color verde brillante de la biopelícula, producto de la parada del motor, desapareció y tornó nuevamente su color característico en ambas etapas. En la primera etapa gris en las caras interiores y pardo-marrón en las caras expuestas. El espesor de la biopelícula en la primera etapa era notablemente mayor que la segunda. En esta semana también se produjo el primer desprendimiento masivo de biopelícula que antes de desprenderse se tornaban de un color negro brillante. Estos desprendimientos producían sólidos flotantes en el agua lo cual generaron un incremento notable de la turbiedad y los sólidos suspendidos.</p>
SEMANA 08	<p>Comenzaron a aparecer en los tres primeros discos de la primera etapa filamentos de color blanco con una apariencia vellosa. Estos filamentos fueron aumentando en su densidad al pasar las semanas y fueron poblando los demás discos pero solo de la primera etapa.</p>
SEMANA 10 SEMANA 11	<p>El sistema permaneció paralizado debido a fallas en el eje y la rotura de unos de los estanques de vidrio. Durante todo este tiempo de para de aproximadamente 9 días, la biopelícula se secó en su totalidad adquiriendo la textura de una hoja seca que desprendía con facilidad. Los discos de la segunda etapa tomaron un color blanco en las áreas expuestas directamente a los rayos solares. Esto se debe a que existió una gran población de algas diatomeas y al morir quedó su cápsula o esqueleto de sílice.</p>
SEMANA 12	<p>Se puso en marcha el sistema. En este nuevo arranque la biopelícula tardó una semana en aparecer. Tomando los colores característicos mencionados líneas arriba para las caras interiores. En las caras expuestas el color predominante fue el verde. Este color permaneció hasta la semana 16, donde el color verde se tornó de un color muy oscuro.</p>

SEMANAS	OBSERVACIONES
SEMANA 14	Las caras interiores de los discos de la primera etapa fueron poblados rápidamente por las bacterias filamentosas de color blanco y apariencia vellosa. Esta vez con mayor presencia y predominancia en la primera etapa a tal punto de quedar como material suspendido en el agua.
SEMANA 15	En esta semana se hizo el cambio de velocidad de rotación de los discos de 3 RPM a 5 RPM. Se comenzó a desprender la biopelícula de la primera etapa dejando superficies descubiertas del disco que con el correr de las semanas no pudieron recuperarse. Es posible que el cambio de velocidad haya afectado la fuerza de adherencia de la biopelícula a los discos, el cual fue mucho más notorio en la primera etapa, quizá por la gran presencia de bacterias filamentosas y por el mayor peso a comparación con la segunda etapa.
SEMANA 17	Se comenzó a desprender la biopelícula de la segunda etapa, previamente también la biopelícula se tornó de un color negro brillante. En la primera etapa comenzó a desarrollarse la biopelícula de color marrón en las caras interiores pero solo se desarrolló en aproximadamente la mitad de la superficie y con baja presencia, aún predominaban las bacterias filamentosas de color blanco y apariencia vellosa. Esto continuó de la misma forma hasta la semana 21. La segunda etapa también presentaba parches desnudos en la superficie del disco aunque en menos magnitud que la primera etapa.
SEMANA 18	Se pudo notar en el fondo del reactor de la primera etapa, el crecimiento de bacterias de color púrpura.
SEMANA 21 a la SEMANA 24	Se hizo el cambio de velocidad de rotación de los discos de 5 RPM a 8 RPM. Este nuevo cambio de velocidad origino constantes fallas en el eje del disco y en el desempeño del motor, casi inter diarias. Por tal motivo, el mismo procedimiento de reparación del eje generó importantes pérdidas de biopelícula y se puso fin al trabajo de investigación.

De acuerdo a la *Tabla 11- Características y desarrollo de la Biopelícula* en esta investigación la biopelícula tuvo un rápido desarrollo en el arranque del sistema, comenzando a formarse en la primera semana.

Se pudo evidenciar que la primera etapa de biodiscos tenía un color gris y un color amarronado en la segunda etapa. Estos colores se dieron en las caras interiores de los discos, ya que las caras que estaban expuestas a los rayos solares tenían un color verde y marrón por las algas. Estas observaciones confirman lo evidenciado en investigaciones previas (Friedman et al., 1979; Alleman et al., 1982; Kinner et al., 1983; Lin et al., 1986)

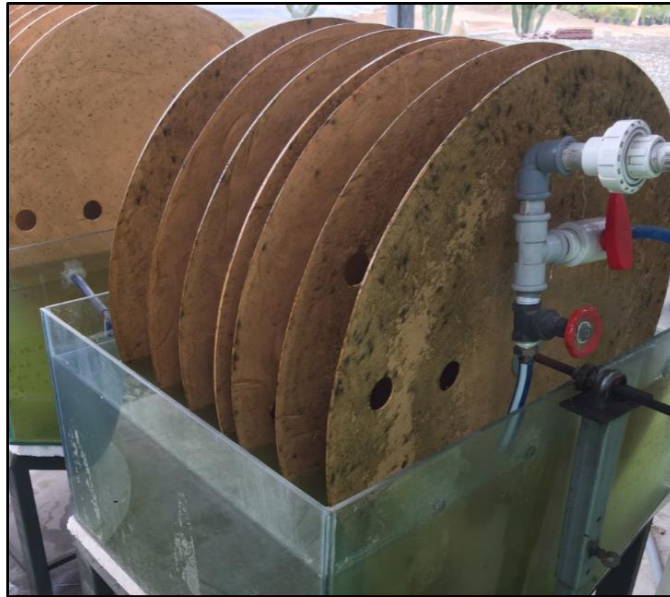


Figura 19-Biopelícula gris en la primera etapa



Figura 20-Biopelícula formada en discos, semana nueve

También se pudo notar que la primera etapa tuvo una biopelícula de mayor espesor que la segunda etapa durante toda la operación del sistema, esto debido a que la concentración de la materia orgánica es alta en la primera etapa y el espesor en las siguientes etapas disminuye conforme el efluente va disminuyendo de concentración.



Figura 21-Bacterias filamentosas en disco de la primera etapa

El incremento de la velocidad de rotación de los discos de 3 rpm a 5 rpm produjo un cambio importante en las características de la biopelícula. La biopelícula ya no era uniforme en toda la superficie de los discos, si no que se presentaba en forma de paños o parches que no lograron ocupar el 100% del disco. Este aumento de velocidad disminuyó el área efectiva y por consiguiente la eficiencia del sistema.

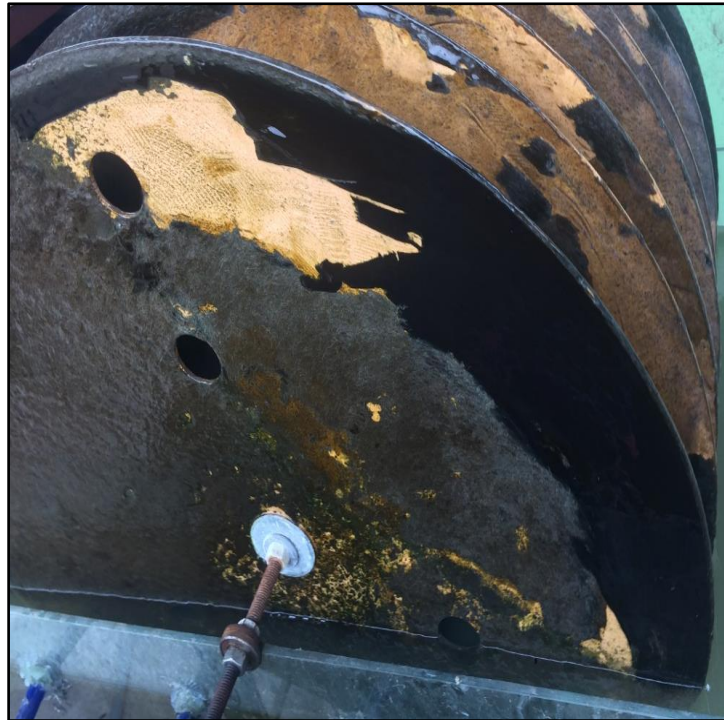


Figura 22-Desprendimiento de Biopelícula



Figura 23-Formación de algas en biopelícula

Al culminar la investigación del sistema se midió la cantidad de lodos acumulados en el fondo de los reactores y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 12-Peso de lodos

Etapa	Peso Lodos
Primera etapa	23.68 Kg.
Segunda etapa	9.07 Kg.

Gráfico 19-Peso de lodos por etapas



Esta acumulación fue de prácticamente tres meses de operación, ya que en el mes de agosto (semana 10 de la investigación) se tuvo una rotura en uno de los estanques de vidrio y se tuvo que vaciar los estanques, a partir de esa fecha se acumularon los lodos.

Los lodos carecían de una consistencia sólida, por el contrario eran muy acuosos, con una probable acumulación de las bacterias filamentosas de color blanco y un fuerte olor

característico del sulfuro de hidrógeno, lo cual indica que en el fondo del reactor se llevaba un proceso anaerobio.



Figura 24-Lodos depositados en la primera etapa

5.8 Características Microbiológicas de la Biopelícula

Se realizaron observaciones al microscopio de la biopelícula adherida en los discos para identificar los tipos de microorganismos más comunes y tener un mayor conocimiento acerca de la relación con las etapas de los biodiscos y cómo afecta la velocidad de rotación en las poblaciones de microorganismos. La estimación de la identificación de estos probables microorganismos fue hecha mediante la comparación con fotos y la descripción realizada en diferentes atlas de microorganismos.

La toma de muestra fue realizada de manera cuidadosa, con una pequeña espátula se hacía un raspado tanto en la primera como en la segunda etapa. Esta porción de biopelícula se diluyó con agua destilada y se observó directamente al microscopio.

La identificación de los microorganismos en la biopelícula no es tan detallada, en esta investigación no se pretende reconocer cada uno de ellos, tan solo estimar la

identificación de los principales grupos de microorganismos y evaluar el rol que desempeñan en cada etapa.

5.8.1 Primera Etapa

En esta etapa predominaron las bacterias unicelulares o de vida libre y las bacterias filamentosas. Tal y como se puede apreciar en la *Figura 21*, las bacterias filamentosas tenían un aspecto veloso de color blanco y conforme fue avanzando la investigación, fueron poblando más áreas de los discos. Debido a que el afluente proviene de un reactor anaerobio donde la concentración del oxígeno disuelto es cero y con concentraciones de sulfuro de hidrógeno H₂S, es probable que las bacterias filamentosas observadas en esta etapa sean microorganismos de la especie *beggiatoa*, *thiothrix*, *leptothrix*, *sphaerotilus natans*, que según la bibliografía y diversos autores evidencian su presencia en sistemas de biodiscos. Estos microorganismos se desarrollan en ambiente con bajos niveles de oxígeno y algunas filamentosas usan el sulfuro de hidrógeno como medio de obtención energía. Por ello, es probable que estas bacterias tuvieron mayor presencia en los primeros discos. En el fondo del reactor, donde existía acumulación de lodos, en la semana 18 se pudo apreciar manchas de color púrpura en las paredes del vidrio, que probablemente sea el crecimiento de colonias de bacterias púrpuras de azufre.

Las algas de la clase diatomeas también formaron parte de la biopelícula, creciendo en mayor medida en las áreas del disco con exposición directa a la luz solar.

Especies de mayor complejidad también tuvieron un desarrollo importante en la primera etapa de biodiscos. Se observó la probable presencia de protozoos y metazoos. Los protozoos que fueron identificados en mayor medida podrían ser los ciliados nadadores o libres del tipo paramecio, de diferentes características y tamaños. En menor cantidad se identificaron los ciliados sésiles o fijos del tipo vorticella. En los últimos discos los metazoos identificados fueron los nemátodos pero en baja cantidad.

El cambio de velocidad de rotación de los discos no produjo cambios notorios en cuanto a las especies identificadas en la biopelícula.

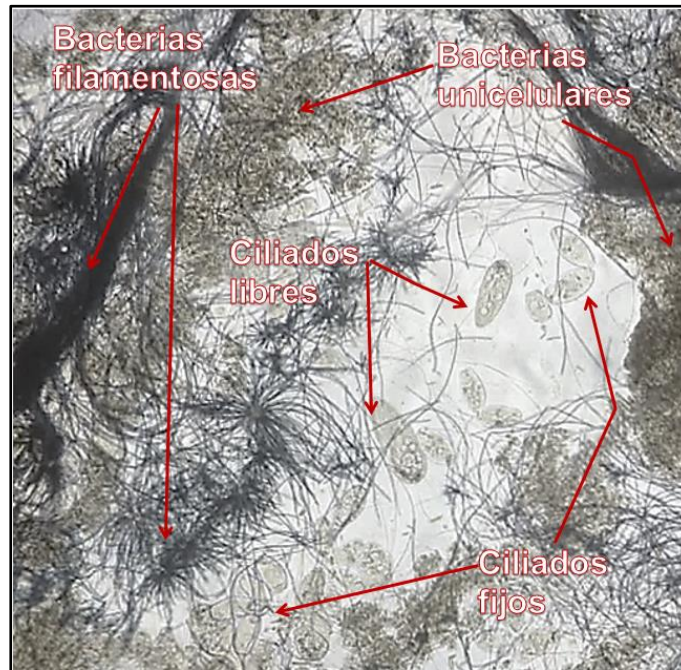


Figura 25-Observación de microorganismos, primera etapa.
Fuente: Elaboración propia (vista al microscopio).



Figura 26-Observación de microorganismos, primera etapa
Fuente: Elaboración propia (vista al microscopio).

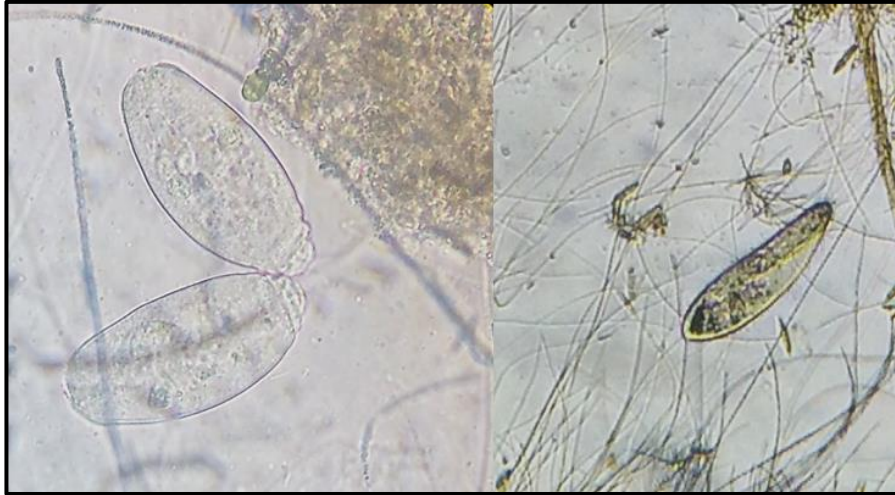


Figura 27-Principales ciliados observados.
Izquierda: Ciliado fijo. Derecha: Ciliado Libre
Fuente: Elaboración propia (vista al microscopio).

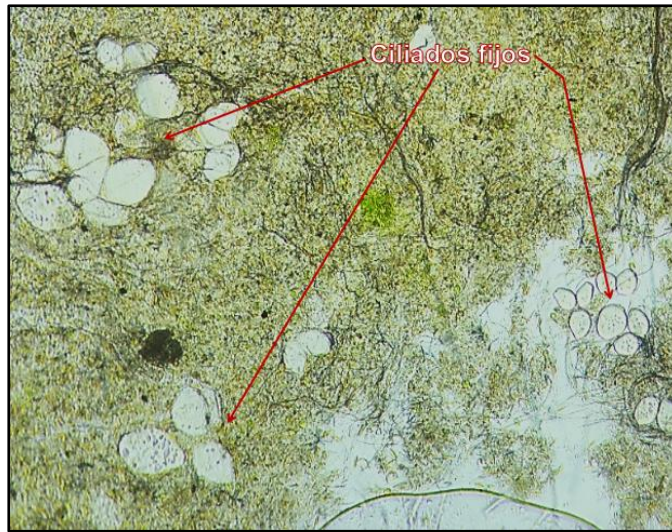
5.8.2 Segunda Etapa

Las algas de la clase diatomeas y las algas verdes unicelulares aparentemente tuvieron una gran presencia en la biopelícula, sobre todo en las áreas del disco con exposición directa a la luz solar. Dentro de esta capa gruesa de algas se pudo identificar la presencia de los protozoos y metazoos. A diferencia de la primera etapa, los protozoos identificados en mayor medida fueron los ciliados sésiles o fijos del tipo vorticella. Los ciliados nadadores o libres del tipo paramecio también se identificaron en gran número aunque con características diferentes a los de la primera etapa. Otros protozoos que se observó en la biopelícula fueron del género amebas. Los nemátodos también se identificaron en mayor número que en la primera etapa, de diversos tamaños y tipos.

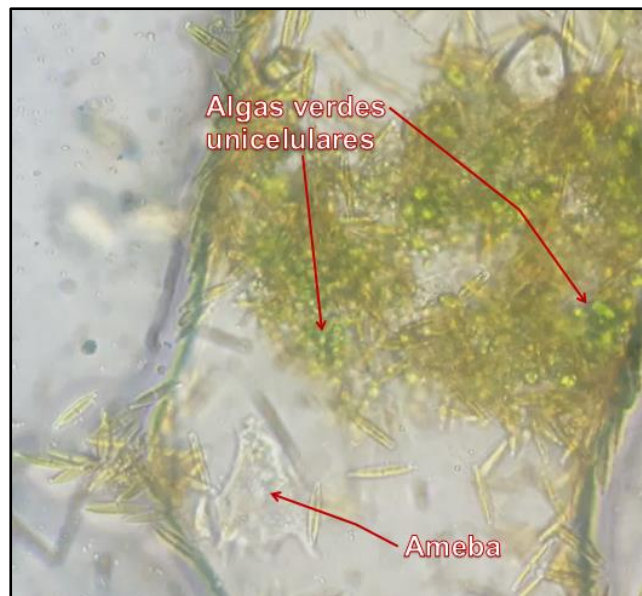
El cambio de velocidad de rotación de los discos si produjo un cambio en la población de la biopelícula. Después del cambio de velocidad se identificaron nuevos microorganismos, entre ellos los rotíferos, aunque en baja medida y también los protozoos reptantes. Esto puede explicarse por el aumento de los niveles de oxígeno disuelto (con un promedio de 7.66 mg/l) a causa del incremento de la velocidad de rotación de los discos. Estos niveles altos de oxígeno fueron favorables para el desarrollo de los rotíferos. Los rotíferos fueron favorables en la remoción de sólidos suspendidos y de bacterias unicelulares. Lo cual se demostró con los valores de SST y turbiedad.



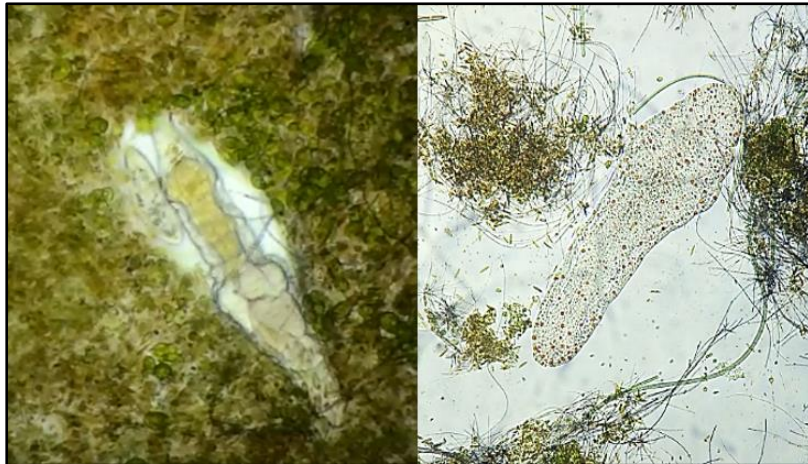
Figura 28-Observación de algas, segunda etapa.
Fuente: Elaboración propia (vista al microscopio).



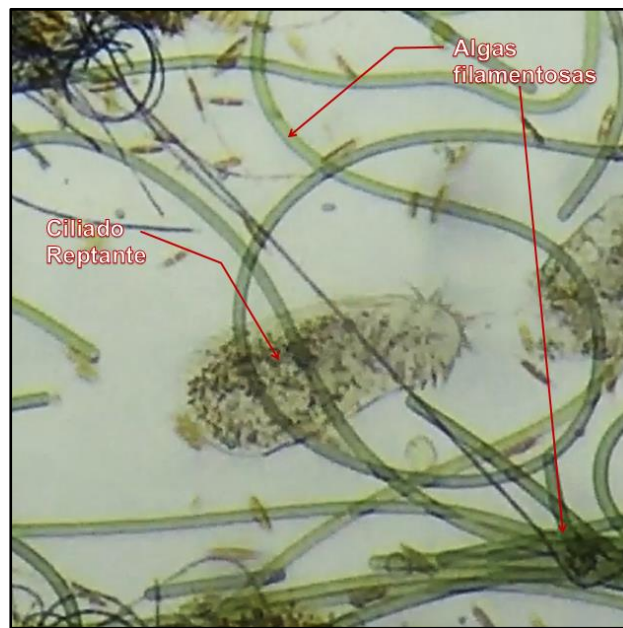
**Figura 29-Ciliados fijos formando colonias, segunda etapa.
Fuente: Elaboración propia (vista al microscopio).**



**Figura 30-Microorganismos observados, segunda etapa.
Fuente: Elaboración propia (vista al microscopio).**



**Figura 31-Rotíferos observados, segunda etapa.
Fuente: Elaboración propia (vista al microscopio).**



**Figura 32-Microorganismos observados en biosólidos, segunda etapa.
Fuente: Elaboración propia (vista al microscopio).**

CAPITULO VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

- Los contactores biológicos rotatorios (biodiscos) construido tuvieron una eficiencia máxima del 93% de remoción de la materia orgánica en términos de DBO_5 para una velocidad de rotación de 3 rpm. El valor de la DBO_5 en el efluente fue de 7.90 mg/l. Comprobándose de este modo la hipótesis formulada en esta investigación.
- La eficiencia de remoción de materia orgánica en términos de DBO_5 , turbiedad y sólidos suspendidos totales, muestran que dos etapas de biodiscos conectadas en serie tuvieron una mayor remoción que solo una etapa.
- Para las condiciones de operación de esta investigación, el proceso tuvo un mejor rendimiento y una mayor eficiencia con una velocidad de rotación de 3 rpm, respecto a la remoción de DBO_5 .
- El aumento de la velocidad de rotación de los discos de 3 rpm a 5 rpm, incrementó los valores de oxígeno disuelto en el agua de 4.18 mg/l a 5.21 mg/l para la primera etapa y de 7.10 a 7.66 mg/l para la segunda etapa. Lo cual demuestra que con la velocidad de rotación se puede controlar los niveles de oxígeno disuelto en los reactores. El oxígeno disuelto fue incrementando su valor, conforme atraviesa las etapas de biodiscos. En un tiempo de retención de 4.50 horas se logró una buena oxigenación de una masa de agua carente de oxígeno disuelto proveniente de un proceso anaerobio y solo en la primera etapa se logró un valor promedio de OD de 4.18 mg/l, cantidad suficiente para que se lleve a cabo un proceso aerobio.

- Para una velocidad de rotación de discos de 3 rpm, se logró una eficiencia de remoción promedio de la DBO₅ del 90%±3%. Mientras que para una velocidad de 5 rpm, se obtuvo una eficiencia promedio del 78%±7%. De esta manera se comprueba que la hipótesis planteada es falsa y que aumentos de velocidades de rotación influyen de forma negativa a la eficiencia del sistema.
- La primera etapa fue la que removió la mayor parte de la DBO₅, llegando a alcanzar una eficiencia máxima de remoción del 82% y una eficiencia promedio del 79% para una velocidad de rotación de 3 rpm. Un aumento en la velocidad de rotación de 3 rpm a 5 rpm influyó negativamente a la eficiencia, teniendo una eficiencia máxima de remoción del 65% y una eficiencia promedio del 58%.
- Los análisis de correlación de los parámetros pH, OD, turbiedad y DBO₅ muestran fuerte dependencia de la segunda etapa respecto a la primera etapa (PH = 0.88, OD = 0.68, turbiedad = 0.79, DBO₅ = 0.75) lo cual indica que se tiene que tener un mayor control del proceso de la primera etapa.
- Las características físicas y microbiológicas de la biopelícula fueron influenciadas por el aumento en la velocidad de rotación de los discos. Notándose una biopelícula más uniforme y estable con una velocidad de 3 rpm. Un aumento de velocidad originó pérdidas de biopelícula y por lo tanto disminuyó el área efectiva bajando el rendimiento del sistema. Por lo cual el crecimiento de la biopelícula se puede controlar con la velocidad de rotación de los discos.
- Las poblaciones identificadas en la biopelícula variaron de acuerdo a la etapa en que se encontraban. Predominando en la primera etapa, probablemente bacterias unicelulares, bacterias filamentosas y ciliados libres o nadadores. En la segunda etapa predominaron probablemente algas verdes unicelulares, diatomeas y ciliados fijos. El aumento de velocidad influyó en la aparición de nuevos microorganismos en la segunda etapa, como los rotíferos.
- La temperatura no tuvo una variación significativa entre el afluente y los efluentes de la primera y segunda etapa de biodiscos y el clima fue el único factor que alteró los valores de la temperatura de una etapa a otra. Otros factores como las reacciones endotérmicas o exotérmicas que se dan en los reactores a

partir de los procesos biológicos, fueron insignificantes para la variación de la temperatura.

- Para ambas velocidades de rotación, el comportamiento es muy parecido y los valores del pH tienden a subir ligeramente en la primera etapa de biodiscos. Para 3 rpm se incrementó de 7.32 ± 0.54 a 7.66 ± 0.49 . Para 5 rpm se incrementó de 7.24 ± 0.49 a 7.63 ± 0.38 . Como podemos observar los incrementos son menores a las desviaciones estándar, por lo cual podemos concluir que los valores de pH se mantienen prácticamente constantes.
- En la primera etapa no se removió turbiedad, y los valores se mantuvieron prácticamente constantes, para 3 rpm la turbiedad en la primera etapa disminuyó de 47.87 ± 18.05 UNT a 46.21 ± 19.04 UNT y para 5 rpm la turbiedad aumentó de 52.79 ± 16.30 UNT a 58.29 ± 39.9 UNT. Sin embargo, en la segunda etapa si hubo remoción de turbiedad con una eficiencia total del sistema del 63.90% para una velocidad de 3 rpm, con un valor de 17.28 ± 8.13 UNT y del 67.81% para 5 rpm con un valor de 16.99 ± 11.3 UNT.
- El sistema de biodiscos tuvo una eficiencia de remoción de SST del 51%. El aumento en la velocidad de rotación de los discos de 3 rpm a 5 rpm no tuvo un impacto significativo en la remoción de SST.
- El modelo matemático basado en el balance de masas y la cinética de Monod propuesto por Kornegay (1975) es solo un valor referencial para el dimensionamiento del área requerida de biodiscos. Para el diseño, el modelo se calculó que para lograr una eficiencia del 90% se requiere un área total efectiva de 6.62 m^2 de discos como medio de soporte. Finalmente se eligió un área de 7.48 m^2 de discos (13% adicional de área) obteniéndose una eficiencia promedio de remoción de DBO_5 durante todo el periodo de investigación del 83.8%, menor al valor estimado.
- Se corroboró que una de las desventajas de los biodiscos son las fallas del eje por rotura. Es de vital importancia realizar un diseño detallado del eje contemplando el peso de los discos, el peso de la biopelícula, la fricción del medio líquido, la velocidad de giro y la corrosión por contacto con las aguas residuales.

- Paradas repentinas del sistema origina cambios negativos en la biopelícula de las zonas expuestas que rápidamente es poblada por algas. Estas paradas originan la disminución del volumen de biopelícula debido a que la zona expuesta a la atmósfera se queda sin sustrato y la zona sumergida se queda sin oxígeno.
- Se observó que la eficiencia del sistema, respecto a DBO₅, SST y turbiedad disminuye durante la caída de la biopelícula inactiva produciendo sólidos flotantes en el efluente que disminuyen la calidad del agua.

7.2 Recomendaciones

- Para el diseño de biodiscos se debe considerar los esfuerzos a los que será sometido el eje. Entre ellos el peso de los discos, el peso de la biopelícula, la fricción del medio líquido, la velocidad de giro y la corrosión por contacto con las aguas residuales.
- En el diseño de biodiscos se debe de considerar un buen sistema de distribución del afluente y garantizar que la recolección sea homogénea, es conveniente que ello se realice aprovechando la gravedad a fin de reducir costos de O&M.
- En el diseño de biodiscos se debe de considerar al final del proceso una unidad que retenga los sólidos flotantes generados durante la muda o desprendimiento de la biopelícula y no se vea afectada la calidad del efluente.
- Debido a que no se pudo estudiar el sistema para una velocidad de 8 rpm, se recomienda seguir investigando sobre el efecto de la velocidad de rotación de los discos en la eficiencia del sistema.
- Se recomienda realizar investigaciones en las que se pueda estudiar el comportamiento del sistema con diferentes cargas orgánicas superficiales.
- Se recomienda investigar el comportamiento del sistema para diferentes caudales de aplicación.
- Se recomienda investigar si el sistema es capaz de amortiguar aplicaciones altas de carga orgánica.

- Se recomienda investigar un sistema biodiscos con tres a cuatro etapas y estudiar el proceso de nitrificación en las últimas etapas.
- Se recomienda realizar investigaciones sobre la remoción de coliformes termotolerantes en sistemas de biodiscos.
- Se recomienda investigar el comportamiento de los biodiscos bajo techo y sin exposición a los rayos solares y comparar los rendimientos y la población de microorganismos de la biopelícula con esta investigación.
- Se recomienda realizar estudios más detallados y estandarizados sobre la identificación de los microorganismos de la biopelícula y cómo usarlos como bioindicadores de la calidad del agua.
- Se recomienda realizar una investigación con el fin de obtener las constantes experimentales P y K_s de la fórmula de Kornegay (1975) para aguas residuales domésticas.
- Se recomienda investigar el comportamiento de los biodiscos con recirculación y el proceso de nitrificación.
- Se recomienda continuar los estudios de los biodiscos variando los valores de las variables intervinientes de esta investigación, como lo son el porcentaje de sumergencia, sentido flujo respecto al sentido de rotación y para temperaturas más bajas.

- Se recomienda realizar estudios de biodiscos a escala real como tratamiento secundario de tanques imhoff y realizar una comparación en rendimientos y costos vs humedales, lagunas de oxidación o filtros biológicos.

- Es conveniente seguir estudiando a los biodiscos para utilizarlos en los nuevos diseños de tratamiento de aguas residuales a fin de cumplir con las nuevas exigencias de la legislación peruana en cuanto a normativas de saneamiento vigentes: (La R.D. N° 056-2018-ANA y D.S. N° 004-2018-MINAM) que corresponden a clasificación de cuerpos de agua y los estándares de calidad de agua respectivamente. Estas normativas recientes son más estrictas en cuanto al control de parámetros contaminantes tales como DBO_5 , DQO, coliformes, etc.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Marcos von Sperling (2007). *Activate Sludge and Aerobic Biofilm Reactors*. Volumen Five. Iwa Publishing.
- Carlos Augusto de Lemos Chernicharo (2007). *Anaerobic Reactors*. Volumen Four. Iwa Publishing.
- Crites, R., & Tchobanoglous, G. (2000). *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados*. Santa Fé de Bogota: Mc. Graw Hill.
- Jimeno B. Enrique (1998). *Análisis de agua y desagües 2da edición*. Lima, Perú.
- Metcalf & Eddy (1991). *Wastewater engineering – treatment, disposal and reuse*. New york, USA.
- R.S. Ramalho (1993). *Tratamiento de aguas residuales, Ed. Reverte*. Quebec, Canadá.
- Rumana Riffat (2012). *Fundamentals of wastewater treatment and engineering*, Iwa publishing.
- Monges Henze et al (2017). *Tratamiento biológico de aguas residuales-principios, modelación y diseño*, Iwa publishing
- Gonzales M. Simón y Elías C. José. *Diseño de biodiscos*. Instituto de ingeniería, UNAM.
- Gabriel Bitton (2005). *Wastewater microbiology, third edition*, Florida, USA.
- *Water Environment Federation (2010). Biofilm reactors*. Virginia, USA. Mc Graw Hill
- Selvakumar D., Nehrukumar V. 2007 Effect of rotational speed of disc for treating sugar and dairy effluent streams in rotating biological contactors. Department of Civil Engineering, Annamalai University. *Jr. Of Industrial Pollution Control* 23(2) (2007) pp. 247-250.
- Tawfik A. et al 2005. Sewage treatment in a rotating biological contactor (RBC) system. *Water, Air and Soil Pollution* (2006) 175: 275-289.





- Lewandowski Z. et al 1993. Effects of biofilm structures on oxygen distribution and mass transport. Center for biofilm engineering, Montana State University.
- Friedman A. et al 1978. Effect of disk rotational speed on biological contactor efficiency. Department of Civil Engineering. Tennessee Technological University, Cookeville, Tenn.
- Vijoën-Bloom M. et al 2004. *Dynamics of a microbial biofilm in a rotating biological contactor for the treatment of winery effluent*. Department of Microbiology, Stellenbosch University, South Africa.
- Najafpour G.D. et al 2009. *Dairy wastewater treatment using three stage rotating biological contactor (NRBC)*. International Journal Engineering (IJE) Transactions B: Applications, Vol 22, No. 2, pp: 107-114.
- Stenstrom M. K. 1981. *Use of the rotating biological contactor for appropriate technology wastewater treatment*. Graduate Research Engineer. School of Engineering and Applied Science. University of California. L.A. USA.
- Sami Daif et al 2012. *Modeling of oxygen transfer in self-rotating biological contactors (sRBC)*. Sixteenth International Water Technology Conference, IWT 16 2012. Istanbul.Turkey.
- María del Ángel 1994. *Contribución al estudio de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO)*. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Martín Cereceda M. et al 2001. *Confocal and light microscope examination of protozoa and other microorganisms in the biofilms from a rotating biological contactor wastewater treatment plant*. Acta Protozoológica (2001) 40: 263-272.
- Abdel Kader, Amr M. 2011. *Studying the efficiency of grey water treatment by using rotating biological contactors system*. Fifteenth International Water Technology Conference, IWTC-15 2011, Alexandria, Egypt.
- Romero José María et al. *Modelos matemáticos para biodiscos*. Facultad de Ingeniería. Universidad Católica de Córdoba. Colombia.
- Romero José María et al. *La biopelícula en los procesos RBC*. Facultad de Ingeniería. Universidad Católica de Córdoba. Colombia.
- Jae-Chun Chung and Peter F. Strom 1991. *Microbiological study of ten New Jersey rotating biological contactor wastewater treatment plants*. Research Journal WPCF, Volume 63, Number 1, pp 35-43.





- V. Singh and A. K. Mittal 2012. *Characterization of biofilm of a rotating biological contactor treating synthetic wastewater*. IWA publishing 2012. Water Science & Technology 66.2 2012.
- B. Pérez-Uz et al 1998. *Biofilm characterization of several wastewater treatment plants with rotating biological contactors in Madrid (Spain)*. Water Science & Technological, vol 37, No 4-5, pp. 215-218.
- Abraham Pano et al 1981. *The kinetics of rotating biological contactors treating domestic wastewater*. Utah Water Research Laboratory. Utah State University.
- S. Ghazimoradi and A. E. James 2003. *A scale-up design procedure for rotating biological contactors*. IJE Transactions A: Basics Vol 16, No. 2, June 2003, pp. 133-146.
- S. Cortez et al 2008. *Rotating biological contactors: a review on main factors affecting performance*. Rev. Environment Science Biotechnology (2008) 7: 155-172.
- Paul L. Bishop, Tian C. Zhang and Yun-Chan Fu 1995. *Effect of biofilm structure, microbial distributions and mass transport on biodegradation processes*. Water Science & Technology, Vol 31, No. 1, pp. 143-152.
- A. Galván & F. de Castro 2006. *Relationships among filamentous microorganism in rotating biological contactors*. Indian Journal of Microbiology (March 2007) 47:15-25.
- Victor Luna Pabello (2006). *Atlas de ciliados y otros microorganismos frecuentes en sistemas de tratamiento aerobio de aguas residuales*. Departamento de Biología. Laboratorio de Microbiología Experimental. Universidad Autónoma de México.
- Eva Rodríguez Gonzáles. *Guía metodológica para la elaboración de análisis microbiológicos de fangos activados de EDARs*. Grupo Bioindicación Sevilla. España.
- American Water Works Association 2017. *Standard Methods for the examination of water and wastewater*.





**ANEXO 1 – REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LA EVOLUCIÓN DE
LA BIOPELÍCULA**





A continuación, se presenta el registro fotográfico, por semanas, de la evolución de la biopelícula en el medio de soporte. También se mencionan los principales eventos ocurridos como fallas en el eje y motor.




EVOLUCIÓN DE BIOPELÍCULA EN BIODISCOS			
MES	SEMANA	COMENT.	REGISTROS FOTOGRÁFICOS
JUNIO	SEM 01	DEL 19 AL 25 Arranque del sistema. Velocidad de rotación 3 RPM	
	SEM 02	DEL 26 AL 02	

EVOLUCIÓN DE BIOPELÍCULA EN BIODISCOS			
MES	SEMANA	COMENT.	REGISTROS FOTOGRÁFICOS
JULIO	SEM 03	DEL 03 AL 09	
	SEM 04	DEL 10 AL 16	
	SEM 05	DEL 17 AL 23	<p>Vaciado de tanque por fugas y parada de un día por falla eléctrica del motor</p> 
	SEM 06	DEL 24 AL 30	<p>Parada por rotura de acople del motor al eje</p> 

EVOLUCIÓN DE BIOPELÍCULA EN BIODISCOS			
MES	SEMANA	COMENT.	REGISTROS FOTOGRÁFICOS
AGOSTO	SEM 07	DEL 01 AL 06	
	SEM 08	DEL 07 AL 13	Aparición de filamentos en la primera etapa. (Vellos color blanco) 
	SEM 09	DEL 14 AL 20	
	SEM 10	DEL 21 AL 30	Nueva falla de adaptador del motor al eje. Al momento de reparar el eje, se rompió uno de los estanques de vidrio lo cual obligo el vaciado y parado del sistema por 1 semana 

EVOLUCIÓN DE BIOPELÍCULA EN BIODISCOS				
MES	SEMANA	COMENT.	REGISTROS FOTOGRÁFICOS	
SETIEMBRE	SEM 12	DEL 04 AL 10	Nuevo arranque del sistema el 01 de Setiembre	
	SEM 13	DEL 11 AL 17		
	SEM 14	DEL 18 AL 24		
	SEM 15	DEL 25 AL 30		

EVOLUCIÓN DE BIOPELÍCULA EN BIODISCOS			
MES	SEMANA	COMENT.	REGISTROS FOTOGRÁFICOS
OCTUBRE	SEM 16	DEL 01 AL 08	
	SEM 17	DEL 09 AL 15	Parada por unas 4 horas debido a rotura del eje. Se reparó con soldadura eléctrica. 
	SEM 18	DEL 16 AL 22	Parada de 4 horas por rotura del eje en el mismo punto de soldadura. Esta vez se reparó con un adaptador tipo unión. 
	SEM 19	DEL 23 AL 31	

EVOLUCIÓN DE BIOPELÍCULA EN BIODISCOS			
MES	SEMANA	COMENT.	REGISTROS FOTOGRÁFICOS
NOVIEMBRE	SEM 20	DEL 01 AL 05	
	SEM 21	DEL 06 AL 12	<p>Día 07/11 falla del eje, rotación irregular</p> 
	SEM 22	DEL 13 AL 19	

ANEXO 2 – GALERÍA DE FOTOS

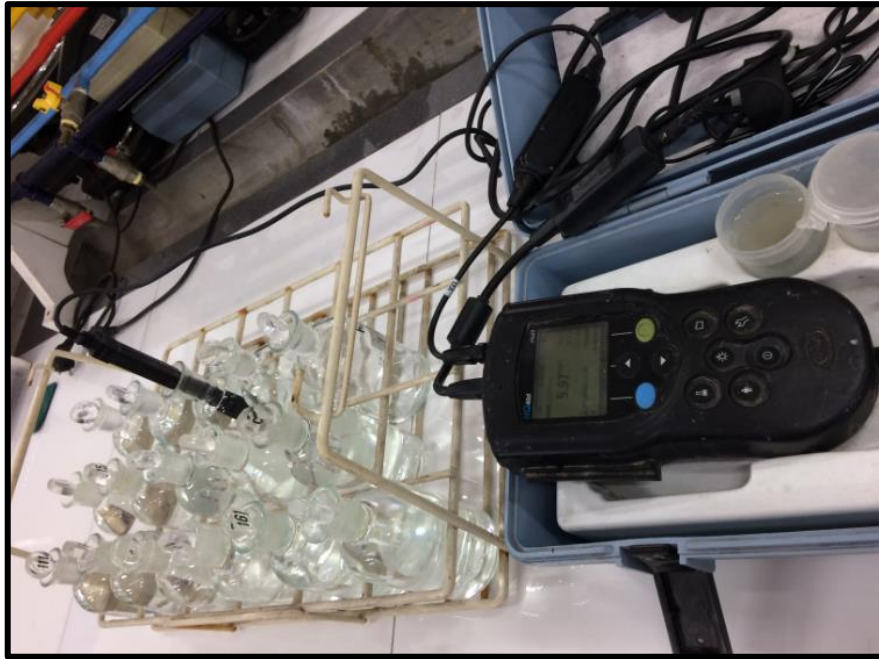


Figura 33 Oxímetro para medición de Oxígeno Disuelto



Figura 34 Microscopio para la observación de la biopelícula



Figura 35 Muestras del efluente de cada etapa, con presencia de algas

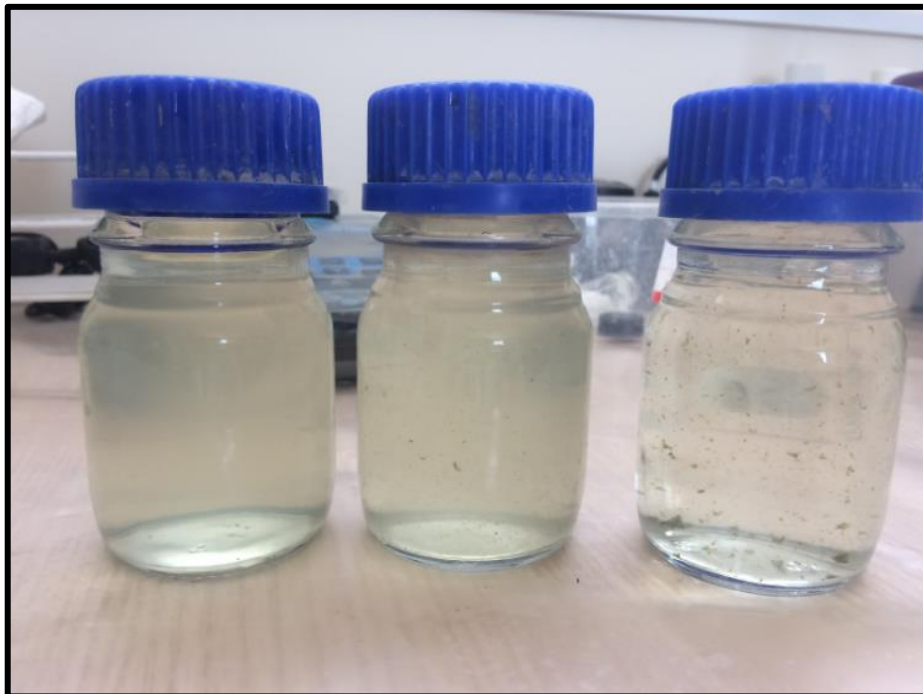


Figura 36 Muestras del Efluente de cada etapa, período de desprendimiento de biopelícula



Figura 37 Muestras del efluente de cada etapa, operación normal



Figura 38 Muestras del efluente de cada etapa, con presencia de bacterias filamentosas



Figura 39 Punto de monitoreo E-1



Figura 40 Montaje del RBC

ANEXO 3 – CÁLCULOS Y TABLAS DE RESULTADOS

3.1. Dimensionamiento de unidad RBC

Para un sistema RBC con una única etapa se toma la siguiente expresión:

$$A = \frac{Q_0(S_0 - S_e)}{P \left(\frac{S_e}{k_s + S_e} \right)}$$

Para el caso de una unidad RBC de dos etapas, suponiendo igual área húmeda en ambas etapas, la expresión a utilizar es la siguiente:

Para la etapa 1:

$$Q_0(S_0 - S_1) = PA \left(\frac{S_1}{K_s + S_1} \right)$$

Para la etapa 2:

$$Q_0(S_1 - S_2) = PA \left(\frac{S_2}{K_s + S_2} \right)$$

La suma de ambas ecuaciones conduce a:

$$Q_0(S_0 - S_2) = PA \left(\frac{S_1}{K_s + S_1} \right) + PA \left(\frac{S_2}{K_s + S_2} \right)$$

El área A, para el caso de una unidad de dos etapas, requerida para alcanzar la reducción de DBO deseada de S_0 a S_2 puede calcularse por un procedimiento iterativo de la siguiente manera:

Paso1. Primero calculamos el valor del área A como si fuera una solo etapa, luego se supone un valor igual a la mitad del área A requerida para una unidad de etapa única con objeto de alcanzar la misma reducción de DBO.

Paso 2. Luego calculamos el valor de S_1 con la siguiente ecuación:

$$S_1 = \frac{PA}{Q_0} \left(\frac{S_2}{k_s + S_2} \right) + S_2$$

Paso3. Se sustituye el valor de S_1 en la ecuación para la primera etapa y se computa su área húmeda. Este valor del área A debe coincidir con el valor supuesto en el paso 1, de no ser así se intenta de nuevo hasta alcanzar la convergencia.

$$A = \frac{Q_0(S_0 - S_1)}{PS_1 / (k_s + S_1)}$$

Resultados de la primera iteración:

Parámetro		Valor	Unidad
Caudal	Q	0.000005	m3/s
		432	l/dia
Concentración sustrato afluente	So	150	mg/l
Eficiencia del sistema	e	90	%
Concentración sustrato efluente	Se	15	mg/l
Parámetros experimentales	P	44,515.34	mg/m2.d
	Ks	126	mg/l
PARA UNA ETAPA			
Área Total	A	12.32	m2
PARA DOS ETAPAS			
Área 1era etapa	A1 supuesta	6.16	m2
Concentración al final de la 1era etapa	S1	82.50	mg/l
Área de la primera etapa	A1	1.66	m2
Área total	A	3.31	m2

Podemos observar que $A1 \text{ supuesta} > A1$, por lo tanto repetimos el procedimiento disminuyendo el valor de $A1 \text{ supuesta}$.

Resultados de la segunda iteración:

Parámetro		Valor	Unidad
Caudal	Q	0.000005	m3/s
		432	l/dia
Concentración sustrato afluente	So	150	mg/l
Eficiencia del sistema	e	90	%
Concentración sustrato efluente	Se	15	mg/l
Parámetros experimentales	P	44,515.34	mg/m2.d
	Ks	126	mg/l
PARA UNA ETAPA			
Área Total	A	12.32	m2
PARA DOS ETAPAS			
Área 1era etapa	A1 supuesta	4.00	m2
Concentración al final de la 1era etapa	S1	58.85	mg/l
Área de la primera etapa	A1	2.78	m2
Área total	A	5.56	m2

Podemos observar que $A1 \text{ supuesta} > A1$, por lo tanto repetimos el procedimiento disminuyendo el valor de A1 supuesta.

Resultados de la tercera iteración:

Parámetro		Valor	Unidad
Caudal	Q	0.000005	m3/s
		432	l/dia
Concentración sustrato afluente	So	150	mg/l
Eficiencia del sistema	e	90	%
Concentración sustrato efluente	Se	15	mg/l
Parámetros experimentales	P	44,515.34	mg/m2.d
	Ks	126	mg/l
PARA UNA ETAPA			
Área Total	A	12.32	m2
PARA DOS ETAPAS			
Área 1era etapa	A1 supuesta	3.31	m2
Concentración al final de la 1era etapa	S1	51.28	mg/l
Área de la primera etapa	A1	3.31	m2
Área total	A	6.62	m2

Podemos observar que A1 supuesta = A1, por lo tanto finalizamos el procedimiento y el valor del área húmeda requerida total es de 6.62 m².

3.2. Tablas de resultados

A continuación presentamos las tablas de resultados de la investigación de los parámetros: Temperatura, pH, turbiedad y Oxígeno Disuelto.

Resultados del Punto de Monitoreo E-0:

PUNTO	Fecha	INGRESO (E-0)			
		Temp (°C)	PH	OD (mg/l)	Turbiedad (NTU)
<i>min</i>	TOTAL	15.9	6.19	0.00	28.9
<i>max</i>		24.7	8.72	1.57	112
<i>prom</i>		19.52	7.29	0.34	51.27
<i>desv.</i>		1.74	0.50	0.27	17.04
<i>min</i>	3 RPM	15.9	6.26	0.13	28.9
<i>max</i>		20.7	8.72	0.99	112
<i>prom</i>		18.44	7.32	0.43	47.87
<i>desv.</i>		0.99	0.54	0.19	18.04
<i>min</i>	5 RPM	17.60	6.19	0.00	29.70
<i>max</i>		24.70	8.25	1.57	98.60
<i>prom</i>		20.75	7.24	0.24	52.79
<i>desv.</i>		1.58	0.43	0.31	16.34
3 RPM	7/7/2017 11:00	20.2	7.15	0.17	112
	11/7/2017 14:20	19.1	6.99	0.26	41.3
	12/7/2017 10:30	18.8	7.28	0.27	40
	13/7/2017 10:30	18.8	6.83	0.48	28.9
	13/7/2017 12:30	19.7	7.18	0.31	48.5
	14/7/2017 09:20	18.3	7.29	0.28	36.6
	21/7/2017 10:00	18.7	7.53	0.46	36.3
	21/7/2017 16:00	20	7.55	0.49	41.5
	27/7/2017 10:00	19.5	7.64	0.24	36.7
	31/7/2017 10:00	19.3	6.85	0.34	40.4
	1/8/2017 10:00	18.8	7.03	0.59	56.5
	1/8/2017 16:00	19	6.8	0.38	47
	2/8/2017 10:00	18.1	7.13	0.6	41.8
	2/8/2017 16:00	19.8	7	0.68	38.4
	4/8/2017 10:00	18.3	7.3	0.49	50.5

PUNTO	Fecha	INGRESO (E-0)			
Velocidad de Rotación		Temp (°C)	PH	OD (mg/l)	Turbiedad (NTU)
3 RPM	4/8/2017 10:26	19	6.99	0.45	62.7
	10/8/2017 10:00	18.1	6.86	0.26	54.7
	14/8/2017 09:20	19.4	6.95	0.24	-
	14/8/2017 10:00	18.6	6.99	0.4	-
	15/8/2017 16:00	18.8	6.87	0.41	-
	16/8/2017 09:00	19.3	6.89	0.28	-
	16/8/2017 10:00	17.8	7.46	0.52	-
	16/8/2017 16:00	19.2	7.85	0.37	-
	17/8/2017 10:00	18	8.39	0.47	-
	17/8/2017 16:00	19.1	6.3	0.6	-
	18/8/2017 10:00	15.9	6.85	0.13	-
	18/8/2017 16:00	19	6.26	0.25	-
	21/8/2017 16:00	20	6.3	0.57	-
	22/8/2017 16:00	18.6	7.21	0.16	-
	23/8/2017 10:00	17.7	7.34	0.2	-
	24/8/2017 10:00	17.3	6.41	0.37	-
	6/9/2017 10:00	18.8	6.98	0.46	-
	7/9/2017 10:00	17.3	7.52	0.39	-
	8/9/2017 10:00	18.3	7.09	0.5	-
	11/9/2017 10:00	17.4	7.5	0.69	-
	12/9/2017 10:00	17.4	7.73	0.55	-
	13/9/2017 10:00	17.2	8.01	0.46	-
	13/9/2017 16:00	17.6	7.5	0.84	-
	14/9/2017 10:00	17.5	8.1	0.4	-
	15/9/2017 10:00	17.7	7.84	0.39	-
	15/9/2017 16:00	18.4	7.95	0.31	-
	18/9/2017 10:00	18.8	7.29	0.86	-
	19/9/2017 10:00	17.8	7.96	0.49	-
	20/9/2017 10:00	17.6	7.75	0.47	-
	21/9/2017 10:00	18.6	8.49	0.18	-
	21/9/2017 16:00	18	7.47	0.53	-
	22/9/2017 10:00	17.3	7.64	0.33	-
	25/9/2017 10:00	16.8	8.46	0.17	-
26/9/2017 10:00	17.6	7.01	0.65	-	
26/9/2017 16:00	20.7	7.15	0.26	-	
27/9/2017 10:00	18.5	7.17	0.99	-	
27/9/2017 16:00	19.6	7.18	0.31	-	
28/9/2017 10:00	16.3	8.72	0.81	-	
29/9/2017 10:00	17.6	7.4	0.87	-	
5 RPM	2/10/2017 10:00	21.1	7.27	0.27	-
	3/10/2017 11:00	19.6	7.27	0.21	-
	4/10/2017 11:00	19.7	6.98	0.23	98.6
	5/10/2017 11:00	18.2	7.1	0.12	93.5

PUNTO	Fecha	INGRESO (E-0)			
		Temp (°C)	PH	OD (mg/l)	Turbiedad (NTU)
5 RPM	6/10/2017 16:00	21.4	7.29	0.27	55.8
	9/10/2017 11:00	20.4	7.02	0.73	64.9
	10/10/2017 11:00	19.4	7.2	0.24	78.3
	12/10/2017 11:00	23.9	7.17	0.18	57.2
	13/10/2017 11:00	22.3	6.93	0.17	-
	18/10/2017 09:00	18.8	7.26	0.21	-
	19/10/2017 09:00	-	-	0.21	-
	20/10/2017 09:00	19	7.28	0.59	-
	23/10/2017 09:00	21	6.89	0	36.5
	23/10/2017 16:00	22.8	6.98	0.8	38.9
	24/10/2017 09:00	20.9	7.02	0	40.1
	24/10/2017 16:00	21.1	6.76	0.22	36.2
	25/10/2017 09:00	19.5	6.98	0	47.7
	26/10/2017 09:00	20.2	7.34	0.33	39.3
	26/10/2017 16:00	23.3	6.92	0.35	35.7
	27/10/2017 09:00	20.2	6.91	0	61.5
	27/10/2017 16:00	22.9	6.97	0.45	33.1
	30/10/2017 09:00	20.3	6.99	0.15	68
	31/10/2017 09:00	20.5	6.86	0	46.6
	2/11/2017 09:00	20.2	6.64	0	64.7
	3/11/2017 09:00	20.7	7.21	0	76
	3/11/2017 15:00	20.6	6.19	0.39	42.5
	6/11/2017 09:00	19.6	7.09	0.17	69
	7/11/2017 09:00	18.2	7.78	0.61	29.7
	8/11/2017 09:00	19	7.43	0.72	51.3
	8/11/2017 15:00	21.9	7.24	0.63	46.4
	9/11/2017 09:00	20.8	8.25	0	53.8
	10/11/2017 09:00	18.8	7.66	0.18	51
	10/11/2017 15:00	22.6	7.18	0	47.6
	13/11/2017 09:00	20.8	8.25	0	45
	13/11/2017 11:00	22.4	7.21	0	46.2
	14/11/2017 15:00	21.7	7.45	0.21	42.6
	15/11/2017 09:00	19.8	7.89	1.57	33.4
	15/11/2017 10:30	22.6	7.36	0	49.7
	16/11/2017 09:00	21.2	8.22	0	58.4
	17/11/2017 09:00	20.3	7.79	0	42.5
17/11/2017 13:00	24.7	6.69	0	-	
20/11/2017 09:00	17.9	7.45	0.34	63.5	
20/11/2017 11:00	21.2	6.7	0	-	
21/11/2017 09:00	21.1	8.07	0	78.4	
28/11/2017 14:00	22.4	7.41	0	39.5	
29/11/2017 09:00	22.1	7.31	0	42.9	

Resultados del Punto de Monitoreo E-1:

PUNTO	Fecha	SALIDA REACTOR 1 (E-1)			
		Temp (°C)	PH	OD (mg/l)	Turbiedad (NTU)
<i>min</i>	TOTAL	15.1	6.24	2.75	12.1
<i>max</i>		23.8	8.93	8.06	236
<i>prom</i>		18.18	7.65	4.66	69.08
<i>desv.</i>		1.62	0.45	1.33	53.43
<i>min</i>	3 RPM	15.1	6.67	2.75	20
<i>max</i>		20.6	8.93	8.06	236
<i>prom</i>		17.34	7.66	4.18	93.19
<i>desv.</i>		1.12	0.49	1.13	69.55
<i>min</i>	5 RPM	16.90	6.24	2.78	12.10
<i>max</i>		23.80	8.44	7.56	187.00
<i>prom</i>		19.16	7.63	5.21	58.29
<i>desv.</i>		1.55	0.39	1.33	39.89
3 RPM	7/7/2017 11:00	19.3	7.74	5.45	85
	11/7/2017 14:20	18.5	7.45	3.3	38.5
	12/7/2017 10:30	18.2	7.55	4.39	70.7
	13/7/2017 10:30	18.4	7.28	5.65	65.9
	13/7/2017 12:30	18.8	7.32	4.96	42.4
	14/7/2017 09:20	17.5	7.49	3.59	43.5
	21/7/2017 10:00	18.7	7.53	4.06	33.1
	21/7/2017 16:00	18.8	8.13	4.83	45.9
	27/7/2017 10:00	18.3	8.05	6.48	39.8
	31/7/2017 10:00	18.4	7.04	5.59	23.5
	1/8/2017 10:00	17.6	7.41	3.11	123
	1/8/2017 16:00	17.9	7.39	5.06	216
	2/8/2017 10:00	17.5	7.36	4.35	193
	2/8/2017 16:00	18.4	7.62	3.76	236
	4/8/2017 10:00	17.1	7.59	3.1	143
	4/8/2017 10:26	18.1	7.43	3.95	165
	10/8/2017 10:00	17.1	7.12	8.06	20
	14/8/2017 09:20	17.8	7.25	4.01	-
	14/8/2017 10:00	16.7	7.13	4.4	-
	15/8/2017 16:00	16.9	7.31	4.27	-
	16/8/2017 09:00	17.6	7.42	4.17	-
	16/8/2017 10:00	16.5	7.94	3.63	-
	16/8/2017 16:00	17.7	8.14	4.05	-
	17/8/2017 10:00	16.7	8.38	3.57	-
	17/8/2017 16:00	17.5	6.79	3.05	-
	18/8/2017 10:00	15.6	7.04	3.47	-
18/8/2017 16:00	17.5	6.67	4.05	-	
21/8/2017 16:00	19.1	7.05	2.98	-	
22/8/2017 16:00	18.7	7.23	3.23	-	

PUNTO	Fecha	SALIDA REACTOR 1 (E-1)			
		Temp (°C)	PH	OD (mg/l)	Turbiedad (NTU)
Velocidad de Rotación					
3 RPM	23/8/2017 10:00	16.7	7.62	3.5	-
	24/8/2017 10:00	16.3	6.87	2.75	-
	6/9/2017 10:00	17	7.45	4.83	-
	7/9/2017 10:00	17	7.53	4.12	-
	8/9/2017 10:00	16.3	7.57	3.63	-
	11/9/2017 10:00	15.8	8.08	4.3	-
	12/9/2017 10:00	16.2	8.18	3.25	-
	13/9/2017 10:00	16.1	8.3	5.05	-
	13/9/2017 16:00	16.3	7.75	4.36	-
	14/9/2017 10:00	16.2	8.74	5.74	-
	15/9/2017 10:00	16.3	8.14	5.25	-
	15/9/2017 16:00	16.8	8.27	5.45	-
	18/9/2017 10:00	17.2	7.63	3.12	-
	19/9/2017 10:00	16.1	8.09	3.17	-
	20/9/2017 10:00	16.7	8.02	3.16	-
	21/9/2017 10:00	17	8.32	3.24	-
	21/9/2017 16:00	16.4	7.87	3.09	-
	22/9/2017 10:00	16.8	8.06	3.14	-
	25/9/2017 10:00	15.5	8.67	7.44	-
	26/9/2017 10:00	17.4	7.61	3.13	-
	26/9/2017 16:00	20.6	7.51	3.2	-
	27/9/2017 10:00	16.6	7.6	3.43	-
	27/9/2017 16:00	19.5	7.47	3.39	-
28/9/2017 10:00	15.1	8.93	5.17	-	
29/9/2017 10:00	16.9	7.79	3.99	-	
5 RPM	2/10/2017 10:00	19.4	7.8	6.33	-
	3/10/2017 11:00	18.2	7.65	6.07	-
	4/10/2017 11:00	18.6	7.62	5.09	71
	5/10/2017 11:00	17.8	7.62	6.88	13.5
	6/10/2017 16:00	19.8	7.78	4.01	52.4
	9/10/2017 11:00	19.6	7.49	3.46	59.3
	10/10/2017 11:00	18	7.65	2.95	187
	12/10/2017 11:00	22.4	7.67	3.94	154
	13/10/2017 11:00	20.9	7.61	3.99	-
	18/10/2017 09:00	17.3	7.65	5.38	-
	19/10/2017 09:00	-	-	6.36	-
	20/10/2017 09:00	17.2	7.82	5.03	-
	23/10/2017 09:00	19.6	7.36	6.57	27.5
	23/10/2017 16:00	20.3	7.33	4.04	24.3
	24/10/2017 09:00	19	7.51	5.32	40.9
	24/10/2017 16:00	18.8	7.25	4.92	37.8
	25/10/2017 09:00	18	7.47	6.4	41
26/10/2017 09:00	18.4	7.73	4.35	34.3	

PUNTO	Fecha	SALIDA REACTOR 1 (E-1)			
		Temp (°C)	PH	OD (mg/l)	Turbiedad (NTU)
5 RPM	26/10/2017 16:00	21	7.39	3.14	40.4
	27/10/2017 09:00	18.9	7.41	6.07	47.6
	27/10/2017 16:00	22.7	7.41	4.18	39.9
	30/10/2017 09:00	18.4	7.07	7.15	84.2
	31/10/2017 09:00	18.8	7.4	5.9	48.2
	2/11/2017 09:00	17.4	6.24	5.63	21.2
	3/11/2017 09:00	18.9	7.65	5.94	37.5
	3/11/2017 15:00	18.7	7.03	3.38	92.1
	6/11/2017 09:00	17.3	7.25	6.56	12.1
	7/11/2017 09:00	17.7	8.1	2.78	30.4
	8/11/2017 09:00	17.1	7.73	7.42	22
	8/11/2017 15:00	19.5	7.54	3.53	93
	9/11/2017 09:00	18.2	8.14	5.39	39.2
	10/11/2017 09:00	17.8	8.08	5.26	59.6
	10/11/2017 15:00	21.4	7.74	4.02	138
	13/11/2017 09:00	18.2	8.44	7.56	22.6
	13/11/2017 11:00	20.8	7.72	6.3	70.8
	14/11/2017 15:00	19.7	7.79	4.15	120
	15/11/2017 09:00	17.7	8.21	4.74	105
	15/11/2017 10:30	21	7.85	5.77	75.8
	16/11/2017 09:00	18.9	8.36	6.92	52.2
	17/11/2017 09:00	18.6	8.05	3.45	83.6
	17/11/2017 13:00	23.8	7.34	4.63	-
	20/11/2017 09:00	17.9	7.09	7.34	15.9
	20/11/2017 11:00	20	7.07	7.53	-
	21/11/2017 09:00	19.4	8.27	5.51	51.2
28/11/2017 14:00	20.3	7.78	5.63	14.4	
29/11/2017 09:00	21.1	7.85	4.03	55.2	

Resultados del Punto de Monitoreo E-2:

PUNTO	Fecha	SALIDA (E-2)			
		Temp (°C)	PH	OD (mg/l)	Turbiedad (NTU)
<i>min</i>	TOTAL	15.29	6.76	5.12	1.84
<i>max</i>		23.7	8.93	9.86	81.7
<i>prom</i>		17.88	7.71	7.36	22.15
<i>desv.</i>		1.78	0.47	1.09	18.57
<i>min</i>	3 RPM	15.3	6.78	5.12	4.32
<i>max</i>		20.4	8.93	9.64	81.7
<i>prom</i>		17.01	7.83	7.10	33.67
<i>desv.</i>		1.22	0.52	1.13	25.26
<i>min</i>	5 RPM	16.50	6.76	5.80	1.84
<i>max</i>		23.70	8.48	9.86	47.20
<i>prom</i>		18.88	7.59	7.66	16.99
<i>desv.</i>		1.80	0.37	0.97	11.30
3 RPM	7/7/2017 11:00	19.1	7.97	7.6	28.3
	11/7/2017 14:20	18.4	7.88	7.61	14
	12/7/2017 10:30	19.1	7.95	8.24	33.3
	13/7/2017 10:30	18.2	7.7	8.39	21.3
	13/7/2017 12:30	18.5	7.49	8.41	15.8
	14/7/2017 09:20	17.1	7.88	7.2	20.5
	21/7/2017 10:00	17.8	7.84	7.64	14.4
	21/7/2017 16:00	18.6	8.23	7.52	19
	27/7/2017 10:00	18.2	8.3	7.92	12
	31/7/2017 10:00	18	7.38	9.02	4.32
	1/8/2017 10:00	17.4	7.44	7.45	32.5
	1/8/2017 16:00	17.8	7.35	6.15	78.5
	2/8/2017 10:00	16.7	7.46	5.8	50.9
	2/8/2017 16:00	18.7	7.6	6.03	81.7
	4/8/2017 10:00	16.3	7.62	5.66	69.9
	4/8/2017 10:26	17.8	7.5	6.05	68.9
	10/8/2017 10:00	16.9	7.32	9.64	7.15
	14/8/2017 09:20	17.5	7.44	8.9	-
	14/8/2017 10:00	16.1	7.3	8.45	-
	15/8/2017 16:00	16.7	7.3	7.97	-
	16/8/2017 09:00	17.1	7.29	8.03	-
	16/8/2017 10:00	16	7.84	7.00	-
	16/8/2017 16:00	17	8.04	5.12	-
	17/8/2017 10:00	15.9	8.32	7.19	-
	17/8/2017 16:00	17	6.78	6.17	-
	18/8/2017 10:00	15.4	6.83	5.19	-
18/8/2017 16:00	17.7	6.79	5.32	-	
21/8/2017 16:00	19	7	5.57	-	
22/8/2017 16:00	18.5	7.22	5.93	-	

PUNTO	Fecha	SALIDA (E-2)			
		Temp (°C)	PH	OD (mg/l)	Turbiedad (NTU)
Velocidad de Rotación					
3 RPM	23/8/2017 10:00	16	7.71	5.8	-
	24/8/2017 10:00	15.8	6.96	5.79	-
	6/9/2017 10:00	16.6	7.77	7.92	-
	7/9/2017 10:00	16.3	7.79	6.75	-
	8/9/2017 10:00	15.8	7.82	7.07	-
	11/9/2017 10:00	15.3	8.22	8.99	-
	12/9/2017 10:00	15.5	8.49	7.12	-
	13/9/2017 10:00	16.1	8.3	7.11	-
	13/9/2017 16:00	16.2	8.06	6.38	-
	14/9/2017 10:00	16.1	8.83	7.58	-
	15/9/2017 10:00	16.2	8.52	7.28	-
	15/9/2017 16:00	16.4	8.52	6.12	-
	18/9/2017 10:00	16.6	7.85	5.98	-
	19/9/2017 10:00	15.29	8.28	6.55	-
	20/9/2017 10:00	16.3	8.1	7.63	-
	21/9/2017 10:00	16.4	8.44	7.29	-
	21/9/2017 16:00	15.9	8.13	5.66	-
	22/9/2017 10:00	16.4	8.31	7.8	-
	25/9/2017 10:00	15.4	8.79	9.47	-
	26/9/2017 10:00	17.1	8.01	6.86	-
	26/9/2017 16:00	20.4	8.02	6.85	-
	27/9/2017 10:00	15.8	7.87	6.83	-
	27/9/2017 16:00	19.4	8.02	6.07	-
28/9/2017 10:00	15.6	8.93	8.32	-	
29/9/2017 10:00	16.5	8.01	7.65	-	
5 RPM	2/10/2017 10:00	18.9	7.9	9.76	-
	3/10/2017 11:00	18.1	7.79	9.32	-
	4/10/2017 11:00	18.5	7.67	6.93	20.1
	5/10/2017 11:00	17.4	7.42	7.99	7.76
	6/10/2017 16:00	19	7.82	6.86	17.6
	9/10/2017 11:00	18.2	7.48	5.83	18.5
	10/10/2017 11:00	17.9	7.38	6.49	35.2
	12/10/2017 11:00	22.9	7.33	5.8	42
	13/10/2017 11:00	20.8	7.34	6.38	-
	18/10/2017 09:00	17	7.31	7.18	-
	19/10/2017 09:00	-	-	7.26	-
	20/10/2017 09:00	16.7	7.59	7.24	-
	23/10/2017 09:00	19.5	7.19	8.79	12.1
	23/10/2017 16:00	20.1	7.35	7.44	8.83
	24/10/2017 09:00	18.4	7.42	7.71	10.6
	24/10/2017 16:00	18.4	7.19	7.84	10
	25/10/2017 09:00	17.8	7.05	7.88	10.7
26/10/2017 09:00	17.5	7.55	6.89	7.68	

PUNTO	Fecha	SALIDA (E-2)			
		Temp (°C)	PH	OD (mg/l)	Turbiedad (NTU)
5 RPM	26/10/2017 16:00	20.7	7.39	7.01	7.37
	27/10/2017 09:00	19.1	6.99	7.75	7.64
	27/10/2017 16:00	22.6	7.42	7.12	8.01
	30/10/2017 09:00	18.9	7.6	9.86	8.26
	31/10/2017 09:00	19	7.16	8.73	7.44
	2/11/2017 09:00	16.5	6.76	8.21	2.65
	3/11/2017 09:00	19.1	7.45	8.27	12.9
	3/11/2017 15:00	18.7	7.03	6.54	9.48
	6/11/2017 09:00	16.5	7.73	9.07	1.84
	7/11/2017 09:00	16.9	8.02	7.87	9.54
	8/11/2017 09:00	16.7	7.67	7.26	26.1
	8/11/2017 15:00	19.9	7.65	6.6	23
	9/11/2017 09:00	17.7	8.19	8.05	25.1
	10/11/2017 09:00	17.4	8	7.14	14.5
	10/11/2017 15:00	21.9	7.64	7.02	47.2
	13/11/2017 09:00	17.2	8.48	8.97	17.8
	13/11/2017 11:00	21.2	7.65	8.67	19.4
	14/11/2017 15:00	19.2	7.74	6.62	39.4
	15/11/2017 09:00	17	8.01	6.9	24.7
	15/11/2017 10:30	21.5	7.58	7.58	41.1
	16/11/2017 09:00	18.5	8.25	8.66	23.4
	17/11/2017 09:00	17.9	7.95	6.97	17.2
	17/11/2017 13:00	23.7	7.08	6.69	-
	20/11/2017 09:00	17	7.45	8.86	8.21
	20/11/2017 11:00	20.2	7.3	9.02	-
	21/11/2017 09:00	18.5	8.09	7.99	17.4
28/11/2017 14:00	20.2	7.83	7.73	5.88	
29/11/2017 09:00	21	8.06	7.48	19.1	

ANEXO 4 – ANÁLISIS DE ANOVA DE OD Y DBO₅

PRUEBA DE ANOVA PARA OXIGENO DISUELTO

Este resumen de los análisis es un exportado del programa estadístico Minitab 2018.

ANOVA de un solo factor: OD –E1 vs. RPM

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
RPM	2	3; 5

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
RPM	1	28.11	28.109	18.39	0.000
Error	98	149.80	1.529		
Total	99	177.91			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
1.23636	15.80%	14.94%	12.28%

Medias

RPM	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
3	54	4.175	1.132	(3.841; 4.509)
5	46	5.239	1.349	(4.877; 5.601)

Desv.Est. agrupada = 1.23636

P (0.000) < nivel significancia (0.05) → Rechazamos Ho.

Conclusión: No todas las medias son iguales.

ANOVA de un solo factor: OD –E2 vs. RPM

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
RPM	2	3; 5

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
RPM	1	7.387	7.387	6.46	0.013
Error	98	112.006	1.143		
Total	99	119.393			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
1.06907	6.19%	5.23%	2.36%

Medias

RPM	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
3	54	7.112	1.134	(6.823; 7.401)
5	46	7.657	0.987	(7.344; 7.970)

Desv.Est. agrupada = 1.06907

P (0.013) < nivel significancia (0.05) → Rechazamos Ho.

Conclusión: No todas las medias son iguales.

PRUEBA DE ANOVA PARA LA DBO₅

Este resumen de los análisis es un exportado del programa estadístico Minitab 2018.

ANOVA de un solo factor: DBO-E0 vs. RPM

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$
Filas no utilizadas	1

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
RPM	2	3; 5

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
RPM	1	69.39	69.39	0.27	0.617
Error	9	2332.34	259.15		
Total	10	2401.73			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
16.0981	2.89%	0.00%	0.00%

Medias

RPM	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
3	6	130.53	16.76	(115.66; 145.40)
5	5	125.49	15.23	(109.20; 141.77)

Desv.Est. agrupada = 16.0981

P (0.617) > nivel significancia (0.05) → Aceptamos Ho.

Conclusión: Todas las medias son iguales.

ANOVA de un solo factor: DBO –E1 vs. RPM

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
RPM	2	3; 5

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
RPM	1	1902.9	1902.85	72.91	0.000
Error	10	261.0	26.10		
Total	11	2163.8			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
5.10872	87.94%	86.73%	82.63%

Medias

RPM	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
3	6	27.32	6.83	(22.67; 31.96)
5	6	52.502	2.363	(47.855; 57.149)

Desv.Est. agrupada = 5.10872

P (0.000) < nivel significancia (0.05) → Rechazamos Ho.

Conclusión: No todas las medias son iguales.

ANOVA de un solo factor: DBO –E2 vs. RPM

Método

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
RPM	2	3; 5

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
RPM	1	572.4	572.42	11.19	0.007
Error	10	511.5	51.15		
Total	11	1083.9			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
7.15191	52.81%	48.09%	32.05%

Medias

RPM	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
3	6	13.81	5.16	(7.30; 20.31)
5	6	27.62	8.70	(21.12; 34.13)

Desv.Est. agrupada = 7.15191

P (0.007) < nivel significancia (0.05) → Rechazamos Ho.

Conclusión: No todas las medias son iguales.