

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE REACTOR BIOLÓGICO SECUENCIAL A ESCALA PILOTO PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON CONTENIDO SALINO

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Lippo P. María D.,
Lorenzo R. David
Para optar al Título de
Ingeniero Químico

Caracas, Noviembre 2008

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE REACTOR BIOLÓGICO SECUENCIAL A ESCALA PILOTO PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON CONTENIDO SALINO

TUTORES: Prof. María Rincones
Prof. Eudoro López

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Lippo P. María D.,
Lorenzo R. David
Para optar al Título de
Ingeniero Químico

Caracas, Noviembre 2008

Caracas, Noviembre de 2008

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres María D. Lippo P. y David Lorenzo R., titulado:

“Evaluación de un sistema de reactor biológico secuencial a escala piloto para tratamiento de aguas residuales con contenido salino”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO.


Prof. Andrés Rosales
Jurado




Prof. Armando Vizcaya
Jurado

Prof. María Rincones
Tutor Académico

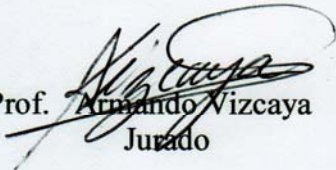


ACTA

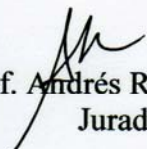
MENCIÓN HONORÍFICA

Los abajo firmantes, miembros del Jurado Examinador del Trabajo Especial de Grado titulado **“EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE REACTOR BIOLÓGICO SECUENCIAL A ESCALA PILOTO PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON CONTENIDO SALINO”**, presentado por los Bachilleres **MARÍA D. LIPPO P. C.I. 14351852** y **DAVID LORENZO R. C.I. 14033207**, queremos dejar constancia del excelente nivel del trabajo realizado, ya que el mismo en cuanto a su ejecución, presentación y utilidad de los resultados ameritó que se le asignara la calificación máxima de **VEINTE PUNTOS (20)**. Así mismo, hemos decidido por unanimidad, concederle **MENCIÓN HONORÍFICA** como un reconocimiento a la excelencia del trabajo realizado, el cual se considera una contribución al desarrollo tecnológico de sistemas de tratamiento de aguas residuales con contenido salino en Venezuela.

En Caracas, a los diecisiete días del mes de noviembre del año dos mil ocho.

Prof. 
Armando Vizcaya
Jurado



Prof. 
Andrés Rosales
Jurado


Profa. María Rincones
Tutor Académico

AGRADECIMIENTOS

A nuestra Gloriosa Universidad Central de Venezuela, la casa que vence las sombras, por habernos concedido el beneficio del saber y por darnos el privilegio de convertirnos en profesionales integrales.

A nuestros tutores, María Rincones y Eudoro López, por ser nuestra guía y por demostrarnos de forma incondicional y gentil, grandes principios para conseguir nuestras metas.

Al Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (FONACIT), Ministerio de Ciencia y Tecnología, por prestarnos su apoyo y haber hecho posible este Trabajo Especial de Grado.

David:

A mis padres (Nieves e Hipólito) porque todo esto se debe a ustedes, espero que estén orgullosos porque este triunfo es suyo. Papá, espero que me estés concediendo tus bendiciones y yo por mi parte, estar haciendo honor a tu memoria.

A mi hermana Neiby, por siempre ser un apoyo y consejo, parte de todo esto se debe también a ti. Enrique, Nicole y Rafael, gracias por ser mi inspiración

A mis abuelos, tíos, primos, gracias por tenerme siempre presente.

A la profesora María Rincones, por haber sido madre y maestra, siempre estaré agradecido de tanto cariño y disposición.

A mi querida novia Alicia, por ser siempre mi dulce aliento y amor incondicional, no dejaré de apreciar todo lo que has hecho por mí.

A mi compa Daniela, por darme la oportunidad cuando nadie la concedía, nunca faltó tu ánimo, paciencia y amistad.

A mis amigos, casi hermanos: Luispa, George, William Jonamet, Ricardo, Wilfredo sin olvidar a mi hermanita Sosi, gracias a todos por haber estado en las buenas y en las malas.

A mis queridos amigos de la Universidad, el Cocho, Ana María, Raquelisa, Leudith, Iraida, Eyra, Juan Carlos, Cesar, Janny, Katherine, Silvia, Rafita, Nela, Mariana, Rene, Alito, Neglin, Bianca, Gaby R., Eliana, Daniel, Ezequiel, Aura, Jolgen, Tomas, Gino, Toto, Madeleyne, Leonardo O. y Jackson.

A mis hijos de corazón, el mudo, Johan, Ramón, Arturo, Eduardo y Ariadna.

A mis amigos de SEIUCV, Javier, Eva, Alba, Therry y Jeison, siempre pude contar con su apoyo.

Y por último, a mis amigos de ANEIQIM, Gerardo, Francisco, Emily, Milena, Jesús, David, Carúpano y Gabriel. Gracias por tanta camaradería.

Daniela:

A mis padres: Aura y Carlos, a mis hermanos: Gaby y Augusto, a mis cuñados: Yanick y Aixa.

A mis tías, primas y primos, y muy especialmente a mi primo Carlos Eduardo.

A mis mejores amigas y prácticamente mis hermanas: Yre, Ma. Beatriz, Karina, Alejandra y Vanesa.

A mis amigas y amigos: Silvia, Raque, Leo, Fernando (el abuelo), Rhené, David, Kevin y Arturo.

Un especial agradecimiento a Yre y a Leo a través de los cuales conocí la PETA y a la Profe María; a Rhené y a Edgar por hacer una tesis cuya continuación es la mía y a mi amiga Silvia por haberme conseguido a mi compañero de tesis.

A mi Compa David!

A mis tutores: María Rincones y Eudoro López.

A los amigos de la PETA: Jackson, Cristian, Reina, Alejandro y Vidal.

A todos los amigos y compañeros que tuve la suerte de conocer a lo largo de mi carrera.

Y finalmente, más que un agradecimiento, una dedicatoria a mis abuelos: Pepa, Lippo y Trina; y a mis queridos sobrinos: Camila, Valeria y Marc.

**Lippo P., María D.
Lorenzo R., David**

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE REACTOR BIOLÓGICO SECUENCIAL A ESCALA PILOTO PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON CONTENIDO SALINO

**Tutores Académicos: Profa. María Rincones y Prof. Eudoro López.
Tesis. Caracas, Universidad Central de Venezuela. Facultad de
Ingeniería Escuela de Ingeniería Química. Año 2008, 111 p.**

Palabras Claves. Simulación de aguas residuales, adaptación, aclimatación.

Resumen. Las aguas residuales con contenido salino se generan por las actividades características de comunidades costeras, islas e islotes. El tratamiento de estas de aguas representan un problema complejo; ya que, las sales contenidas en el agua de mar inhiben los procesos de remoción de contaminantes orgánicos. Los SBR (Sequencing Batch Reactor) surgen como alternativa para el tratamiento de este tipo de aguas, por encima de otros métodos de tratamiento, por su comprobada eficiencia y fácil adaptación a innumerables tipos de afluentes. En este Trabajo Especial de Grado, se plantea la evaluación de un SBR a escala piloto para el tratamiento de aguas domésticas con contenido salino, haciendo una simulación que represente las condiciones de las aguas residuales típicas de islas e islotes. Esta simulación se logra al combinar el agua residual del Colector Marginal Izquierdo del Rio Valle con agua de mar, mezclando a diferentes proporciones de agua salada. En función de garantizar la aceptación del agua salada en el sistema, se plantea ir adicionando contenidos salinos de forma gradual, para motivar la aclimatación de los procesos biológicos e inducir la adaptación del sistema. Los SBR trabajan con generación de lodos, que son los responsables de la digestión biológica de la materia orgánica degradable contenida en las aguas residuales. Estos sistemas suelen ser susceptibles a los contenidos salinos; ya que, los microorganismos y bacterias que componen a los lodos sufren del efecto de plasmólisis y mueren por deshidratación. En tal sentido, se realizó una adaptación al sistema de SBR construido por Azuaje y Muñoz en el año 2006, para lograr alimentar el sistema de forma gradual con aguas residuales salinas. Para estudiar el comportamiento del sistema ante el contenido salino, se realizó la caracterización y comparación de afluentes y efluentes por pruebas de DBO_{5,20}, DQO, Sólidos en todas su formas, pH y conductividad. Luego del análisis se concluye que una adaptación adecuada de los lodos, hace posible el tratamiento de agua residual salina; el efecto de inhibición de la sal puede ser reducido significativamente después de un apropiado proceso de aclimatación de la biomasa y que los SBR pueden tratar efectivamente las aguas residuales con contenido salino, consiguiendo valores de remoción de DBO_{5,20} mayores a 86%.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	PÁG
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
CAPÍTULO I.....	14
INTRODUCCIÓN	14
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
OBJETIVOS	17
General:	17
Específicos:	17
CAPÍTULO II	18
MARCO REFERENCIAL	18
Reactor Secuencial por Cargas (SBR)	18
Criterios de diseño y construcción para un sistema SBR.....	22
Aplicabilidad de los sistemas SBR	25
Proceso de operación de los sistemas SBR.....	26
Efectividad de los sistemas SBR y efecto de la salinidad sobre su rendimiento	29
CAPÍTULO III.....	34
MARCO METODOLÓGICO.....	34
Revisión Bibliográfica	34
Construcción del Sistema.....	34
Adaptación del Sistema.....	38
Puesta en marcha y estabilización del sistema.....	43
Caracterización de afluentes y efluentes	44
Optimización de tiempos de operación.....	45
CAPÍTULO IV	46
PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	46
Simulación de las condiciones de las aguas residuales con contenido salino propias de actividades domésticas provenientes de islas e islotes.....	46
Generación y aclimatación de la biomasa a partir de las aguas residuales con contenido salino.	50
Caracterización de las aguas residuales con contenido salino.	59
Optimización de las condiciones de operación del SBR.....	78
Estudio de la viabilidad del uso de un SBR bajo condiciones de salinidad.....	79

CAPÍTULO V	86
CONCLUSIONES	86
CAPÍTULO VI	88
RECOMENDACIONES	88
CAPÍTULO VII	89
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
CAPÍTULO VIII	92
APÉNDICES.....	92
APÉNDICE A: CÁLCULOS TIPO	92
<i>Parámetros físico-químicos:</i>	92
<i>Eficiencia del Proceso:</i>	97
<i>Porcentajes y Tiempos de alimentación de cada componente en la mezcla:</i>	98
<i>Índice Volumétrico de Lodos</i>	100
APÉNDICE B: ETAPA DE ESTABILIZACIÓN DEL SISTEMA	101
APÉNDICE C: ETAPA DE ACLIMATACIÓN DEL SISTEMA	108
APÉNDICE D: DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO (DFP).....	116
APÉNDICE E: DIAGRAMA DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN.....	117
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS	118

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	PÁG
Figura 1: Reactor secuencial por cargas (SBR).	18
Figura 2: Diagrama de una planta típica de tratamiento de aguas residuales.	20
Figura 3: Planta de tratamiento de aguas residuales con sistema SBR.....	26
Figura 4: Etapas de proceso de un SBR típico.....	27
Figura 5: Flóculos del lodo activado.....	31
Figura 6: Representación del fenómeno de plasmólisis.....	32
Figura 7: Sistema de reacción.	35
Figura 8: Sistema de aireación.....	36
Figura 9: Sistema de válvulas, desagüe y tuberías.....	37
Figura 10: Sistema eléctrico y de control.	37
Figura 11: Sistema de Mezclado.....	39
Figura 12: Recolección de las muestras de agua salada..	40
Figura 13: Sistema de válvulas, bombas y tuberías.....	41
Figura 14: Esquema del sistema SBR ubicado en la PETA.....	41
Figura 15: Sistema de Automatización.	42
Figura 16: Parámetros de llenado del Sistema de mezclado para la simulación	47
Figura 17: Generación de la biomasa a partir de aguas residuales.	51
Figura 18: Variación de los Sólidos Sedimentables del SBR.....	51
Figura 19: Porcentaje de remoción en función a la DQO	52

Figura 20: Incremento de los Sólidos Sedimentables en el licor de mezcla.....	53
Figura 21: Porcentajes de remoción en función a la DQO	54
Figura 22: Valores de $DBO_{5,20}$ de los afluentes y efluentes del sistema.....	55
Figura 23: Porcentajes de remoción en función a la $DBO_{5,20}$	56
Figura 24: Variación de los Sólidos Suspendidos en el licor de mezcla	57
Figura 25: Incremento porcentual de agua salada en la mezcla.....	58
Figura 26: Valores de $DBO_{5,20}$ de los afluentes y efluentes del sistema.....	60
Figura 27: Porcentajes de remoción en función a la $DBO_{5,20}$	60
Figura 28: Valores de Sólidos Sedimentables en el licor de mezcla	61
Figura 29: Valores de $DBO_{5,20}$ de los afluentes y efluentes del sistema.....	63
Figura 30: Porcentajes de remoción en función a la $DBO_{5,20}$	63
Figura 31: Valores de Sólidos Sedimentables en el licor de mezcla	64
Figura 32: Valores de $DBO_{5,20}$ de los afluentes y efluentes del sistema.....	67
Figura 33: Porcentajes de remoción en función a la $DBO_{5,20}$	68
Figura 34: Valores de Sólidos Sedimentables en el licor de mezcla	69
Figura 35: Valores de $DBO_{5,20}$ de los afluentes y efluentes del sistema.....	70
Figura 36: Porcentajes de remoción en función a la $DBO_{5,20}$	71
Figura 37: Valores de Sólidos Sedimentables en el licor de mezcla	72
Figura 38: Valores de Oxígeno Disuelto en el licor de mezcla	75
Figura 39: Valores de pH en el licor de mezcla.....	76
Figura 40: Valores de Conductividad en el licor de mezcla	77
Figura 41: Valores de Sólidos Sedimentables	80
Figura 42: Valores de Sólidos Suspendidos.....	82

Figura 43: Valores de IVL durante las etapas de operación del sistema.	83
Figura 44: Porcentaje de remoción en función de la $DBO_{5,20}$	84

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	PÁG
Tabla 1: Parámetros base de diseño para tasas de carga convencionales.	23
Tabla 2: Ejemplos ilustrativos para varias instalaciones de SBR.	24
Tabla 3: Valores de DBO _{5,20} y Cloruros para los diferentes porcentajes de agua salada.....	47
Tabla 4: Valores de Sólidos Totales para el 25% de contenido salino.....	64
Tabla 5: Valores de Sólidos Suspendidos para el 25% de contenido salino.....	64
Tabla 6: Valores Cloruros para el 25% de contenido salino.....	65
Tabla 7: Valores de Sólidos Totales para el 50% de contenido salino.....	72
Tabla 8: Valores de Sólidos Suspendidos para el 50% de contenido salino.....	72
Tabla 9: Valores Cloruros para el 50% de contenido salino.....	73

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas que más preocupa a la humanidad es la gran cantidad de contaminantes que se descargan en el agua, por ende, el tratamiento de estas aguas residuales es de gran importancia ya que ofrece una alternativa de solución.

Para lograr disminuir los niveles de residuos contaminantes y la carga orgánica presente en el agua hasta niveles permisibles y aceptables por los seres vivos, se recurre a numerosos sistemas de tratamiento donde se destacan los que involucran microorganismos, debido a que son tratamientos económicos, eficientes y generan menor cantidad de subproductos contaminantes.

Entre estos sistemas resalta el empleo de los reactores secuenciales por cargas (SBR), los cuales son cada vez más aplicados como alternativa para el tratamiento de aguas residuales, debido a su capacidad para manejar flujos variables, su utilidad en áreas en donde se tienen limitaciones de terreno, su flexibilidad de operación y su bajo costo de construcción y operación, comparado con otros sistemas de tratamiento.

Los SBR son utilizados en todo el mundo y se han empleado aproximadamente desde el año 1920. Las mejoras en equipos y tecnología, especialmente en dispositivos de aireación y sistemas de control, han convertido a dicho sistema en una opción viable por encima de los sistemas convencionales.

Diversas investigaciones han indicado que los sistemas SBR han sido empleados con éxito para el tratamiento de agua residual tanto municipal como industrial, pero son pocas las que han reportado el uso satisfactorio de los SBR para el tratamiento de agua residual con contenido salino producto de actividades domésticas. Tomando en

cuenta que el tratamiento de agua residual salina, podría representar tanto como el 5% del requerimiento de tratamiento de efluentes alrededor del mundo, se propone evaluar el sistema SBR con el fin de determinar si también se lograría el tratamiento exitoso de estas aguas, a pesar de los efectos adversos producidos por los contenidos de sal.

Se plantea la evaluación de un sistema SBR para tratamiento de aguas residuales con contenido salino, mediante el estudio de un reactor biológico secuencial a escala, ubicado en la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas (PETA) de la UCV, al cual se le realizarán diversas adaptaciones para lograr que el afluente de alimentación al sistema, simule las condiciones de aguas residuales con contenidos salinos.

Se pretende precisar los niveles de sal que puede asimilar el reactor biológico y así obtener los rangos donde se pueda alcanzar la remoción y el funcionamiento del mismo de forma adecuada, para lo cual se procederá a la puesta en marcha y estabilización del equipo, y una vez lograda la aclimatación de la biomasa y la estabilidad del sistema, se opera a diferentes porcentajes de contenido salino.

Se efectúa la caracterización de afluentes y efluentes realizando los ensayos correspondientes y finalmente, se optimizarán los tiempos de operación con base en los resultados obtenidos al caracterizar la descarga del equipo. Se buscará la relación de tiempos mínimos de operación, para una remoción de contaminantes tal que sea reproducible en el tiempo.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Un reactor biológico secuencial (SBR) es un sistema de lodos activados alimentado por cargas, que procesa las aguas residuales por medio de un tratamiento biológico aerobio-anóxico, basado en la generación de biomasa por medio de aireación y disminución de materia orgánica biodegradable en etapa anóxica.

Azuaje y Muñoz, en el año 2006, realizaron el diseño, la construcción y la evaluación de forma preliminar, de un sistema de reactor biológico secuencial a escala, con aplicabilidad al tratamiento de aguas residuales municipales, optimizando los tiempos operacionales del proceso y estableciendo un sistema de control eficiente; utilizando como alimentación el sistema de aguas residuales de origen municipal conducidas por el Colector Marginal Izquierdo Río Valle, las cuales sirven como fuente de alimentación a las instalaciones de la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas (PETA), de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela.

Este sistema fue empleado con éxito para tratar aguas residuales municipales. Se evaluó la estabilidad y funcionamiento del sistema, obteniendo porcentajes de remoción con base en la Demanda Química de Oxígeno (DQO) mayores a 94% y porcentaje de remoción con base en la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) mayores a 95%.

Sin embargo, hasta el momento no se ha evaluado la viabilidad de su uso para tratar el agua residual producto de las actividades domésticas de comunidades establecidas en islas e islotes, cuya característica principal que la diferencia de las aguas residuales comunes, es la presencia de sales en ella.

Por esta razón, surge la necesidad de evaluar dicho sistema para este tipo de agua a tratar, con el fin de ajustar su funcionamiento ante estas condiciones fisicoquímicas y así lograr su óptimo desempeño. La aplicación de estos sistemas, implica el beneficio

y la mejora de calidad de vida de dichas comunidades; además de la preservación del ambiente; por lo cual se plantean los siguientes objetivos:

OBJETIVOS

General:

- Evaluar un sistema de reactor biológico secuencial (SBR) a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales producto de actividades domésticas con contenido salino.

Específicos:

- Simular las condiciones de las aguas residuales con contenido salino propias de actividades domésticas provenientes de islas e islotes.
- Generar y aclimatar la biomasa a partir de aguas residuales residenciales con contenido salino, obteniendo así las condiciones de operación del sistema.
- Caracterizar las aguas residuales con contenido salino, simuladas por medio de la mezcla de agua residual doméstica con muestras de agua de mar.
- Optimizar las condiciones de operación del SBR.
- Estudiar la viabilidad del uso de un SBR bajo condiciones de salinidad.

CAPÍTULO II

MARCO REFERENCIAL

Reactor Secuencial por Cargas (SBR)

De acuerdo a una publicación de tipo informativo de tecnología de aguas residuales acerca de los reactores secuenciales por carga suscrito por la Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency, EPA), en el año 1999, el reactor secuencial por cargas (Sequencing Batch Reactor, SBR) es un sistema de lodos activados para el tratamiento del agua residual que utiliza ciclos de llenado y descarga. En este sistema, como se ilustra en la figura 1, el agua entra en una carga en un reactor único, recibe tratamiento para remover materia orgánica biodegradable y luego se descarga.

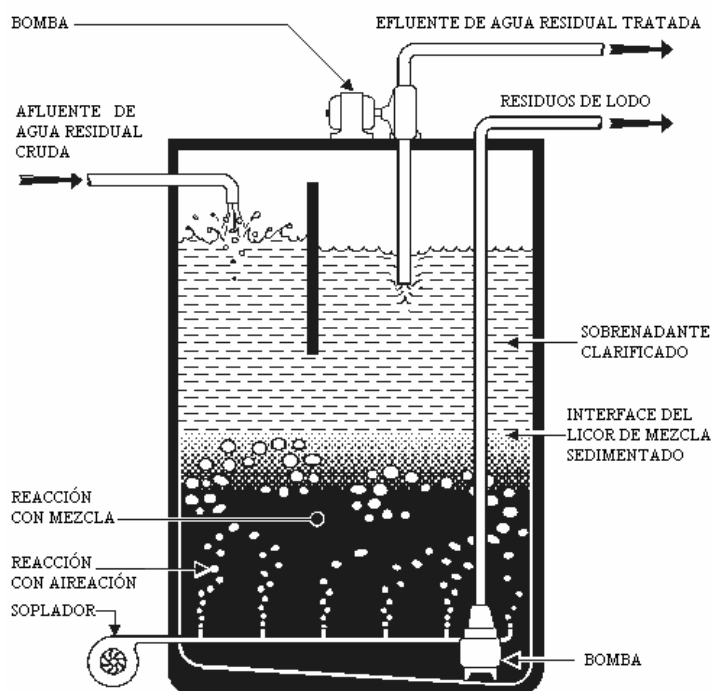


Figura 1: Reactor secuencial por cargas (SBR).

Fuente: www.pwgsc.gc.ca

Los procesos de llenado y descarga por tandas, similares a los de reactores SBR no son un desarrollo reciente como se cree comúnmente. Entre 1914 y 1920 varios sistemas de llenado y descarga se encontraban en operación. El interés en los SBR se revivió a finales de la década de 1950 e inicios de la década de 1960 con el desarrollo de nuevos equipos y tecnología. Las mejoras de los sistemas de aireación y de controles permitieron que los SBR compitieran con éxito con los sistemas convencionales de lodos activados.

Los procesos unitarios de los SBR y los sistemas convencionales de lodos activados son iguales. Un informe de la EPA de 1993 resumió esto al indicar que “los SBR son simplemente sistemas de lodos activados que operan en el tiempo en lugar del espacio”. La diferencia entre las dos tecnologías es que los SBR logran la homogenización de caudales, el tratamiento biológico y la sedimentación secundaria en un tanque único usando una secuencia de tiempo controlada. Este tipo de reactor realiza también, en algunos casos, la sedimentación secundaria. En un sistema convencional de lodos activados estos procesos serían realizados en tanques separados.

La figura 2 muestra un esquema típico de una planta municipal de tratamiento de aguas residuales que utiliza lodos activados y un esquema típico de una planta que utiliza reactores SBR.

La primera operación unitaria en las plantas de tratamiento de aguas residuales es la operación de desbaste. El agua residual afluyente generalmente pasa a través de una rejilla que es un dispositivo con aperturas de tamaño uniforme, utilizado para retener los sólidos de cierto tamaño que arrastra el agua residual. La función realizada por una reja se le denomina desbaste y al material separado por ella se le conoce como basura (desechos sólidos), (Metcalf y Eddy, 1977).

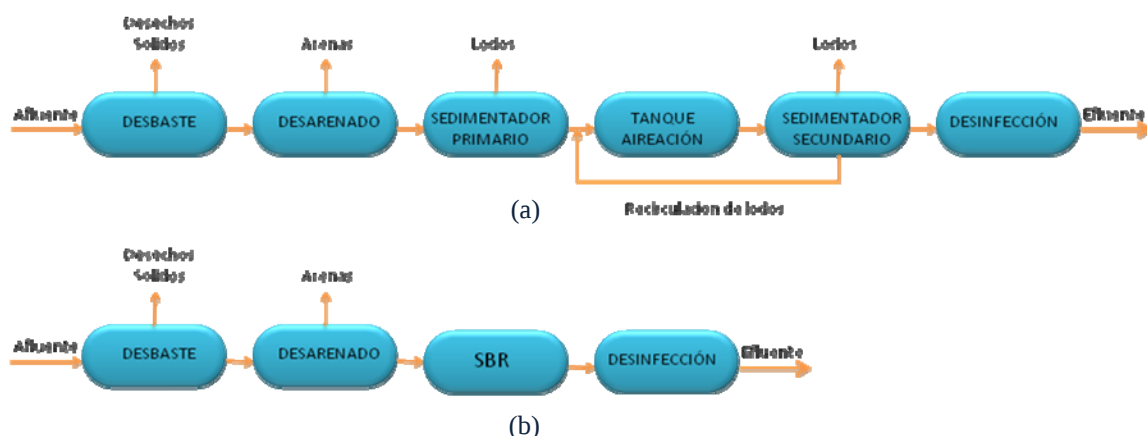


Figura 2: Diagrama de una planta típica de tratamiento de aguas residuales. (a) Empleando lodos activados. (b) Empleando SBR.

Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente el afluente pasa a través de un desarenador, cuya misión es separar arenas, término éste que engloba a las arenas propiamente dichas y a la grava, cenizas y cualquier otra materia pesada que tenga velocidad de sedimentación o peso específico superiores a los de los sólidos orgánicos putrescibles del agua residual. Los desarenadores protegen los equipos mecánicos móviles de abrasión y desgaste anormales; reduce la formación de depósitos pesados en las tuberías, canales y conductos y la frecuencia de limpieza de los equipos.

Para el caso de los lodos activados, el afluente continúa hacia los tanques de sedimentación primaria, cuya finalidad es eliminar los sólidos fácilmente sedimentables y el material flotante y, por tanto, reducir el contenido de sólidos suspendidos. Luego se dirige hacia el tanque de aireación, al sedimentador secundario y a una línea de retorno del lodo. La purga del lodo se puede realizar indistintamente desde la condición de licor mezclado o desde el retorno del lodo. Tanto el agua residual afluente sedimentada como el lodo recirculado entran en el tanque por un extremo y son aireados durante un período de tiempo determinado. Ambos son mezclados por la acción de la aireación, mecánica o por difusores de aire que permanece constante conforme el líquido mezcla se desplaza a lo largo del tanque.

Durante este período se produce la adsorción, floculación y oxidación de la materia orgánica. El líquido mezcla se hace sedimentar en el tanque de sedimentación y el lodo es recirculado en una proporción de aproximadamente el 25-50% del caudal influente (Metcalf y Eddy, 1977).

En el caso de la utilización de sistemas SBR, el agua residual afluyente luego de pasar por el desbaste y la desarenación, entra al reactor parcialmente lleno que contiene la biomasa ya aclimatada a los componentes del agua residual durante los ciclos anteriores. El reactor sirve como tanque de homogenización de caudales durante su llenado con agua residual, lo cual permite que el sistema tolere caudales o cargas máximas en el afluyente y los homogenice dentro del reactor. Una vez que el reactor se llena, éste opera como un sistema convencional de lodos activados pero sin el flujo continuo de afluyente o descarga de efluente. La aireación y la mezcla se descontinúan después de completarse las reacciones biológicas, se sedimenta la biomasa y se remueve el sobrenadante. El exceso de biomasa se purga en cualquier punto de este ciclo. La purga frecuente hace que de un ciclo al siguiente se mantenga una relación de masas casi constante entre el sustrato afluyente y la biomasa.

Como se ilustra en la figura 2, al utilizar SBR no se necesita la recirculación de lodos activados. Con el sistema SBR típicamente sólo se maneja un tipo de lodo. Normalmente los sedimentadores primarios no son requeridos con anterioridad al SBR en aplicaciones de agua residuales municipales. Sin embargo, el uso de estos puede ser recomendado por el fabricante del sistema SBR, si los sólidos suspendidos totales (SST) o la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) son mayores a valores entre 400 y 500 mg/l. El historial de datos debe ser evaluado para determinar si es recomendable el uso de sedimentadores primarios para aplicaciones municipales o industriales (EPA, 1999).

Finalmente, para ambos casos, el afluyente es llevado generalmente a desinfección. La desinfección consiste en la destrucción selectiva de los organismos causantes de

enfermedades. En el campo del tratamiento de las aguas residuales, la desinfección suele realizarse mediante agentes químicos, agentes físicos, medios mecánicos y radiación (Metcalf y Eddy, 1977).

Criterios de diseño y construcción para un sistema SBR

Para el diseño de cualquier planta de tratamiento de aguas residuales la EPA señala que, el primer paso es el determinar las características anticipadas del agua residual y los requerimientos para el efluente del sistema propuesto. Los parámetros del afluente incluyen típicamente el caudal de diseño, el caudal diario máximo, la DBO, los SST, el pH, la alcalinidad, el nitrógeno total, el nitrógeno amoniacal y el fósforo total. Pueden requerirse también otros parámetros para aguas residuales industriales y domésticas.

Con base en las características del afluente y el efluente, además de otros parámetros específicos para el sitio de tratamiento, tales como la temperatura, se seleccionan los parámetros base de diseño del sistema. Una vez se determinan los parámetros base de diseño, se puede calcular el número de ciclos por día, el número de tanques, el volumen de decantación, el tamaño del reactor y los tiempos de retención. Además, se puede dimensionar el equipo de aireación, el decantador y las tuberías asociadas. Otra información específica del sitio es necesaria para seleccionar el tamaño de los equipos de aireación, tal como la elevación del terreno sobre el nivel del mar, la temperatura del agua residual y la concentración total de sólidos disueltos.

Un ejemplo de los parámetros de diseño para la carga de un sistema de aguas residuales se señala en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros base de diseño para tasas de carga convencionales.

Parámetro	Municipal
Relación alimento-microorganismos (F/M), [d ⁻¹]	0,15 – 0,60
Duración del ciclo de tratamiento, [horas]	4 - 24
Concentración típica de sólidos suspendidos en el licor mezclado a nivel bajo de agua (MLSS), [mg/l]	2.000 – 4.000
Tiempo de retención hidráulico (TRH), [horas]	varía

Fuente: EPA, 1999.

La relación alimento-microorganismos (food-microorganism ratio, F/M) constituye un parámetro importante que mide la razón entre el alimento presente en las aguas residuales crudas y los organismos en el reactor. Una alta relación alimento-microorganismos crea un medio propicio para que los organismos crezcan en flóculos en vez de filamentos; esto da al lodo buenas características de sedimentación.

La concentración de sólidos en suspensión en el licor de mezcla (MLSS) en el reactor, es una variable importante que afecta a la velocidad de deposición de la biomasa y un factor que influye de manera considerable en el proceso. Si la alimentación está muy diluida, los microorganismos no tienen alimento suficiente para sobrevivir. Por el contrario una alimentación muy concentrada reduce la movilidad de las bacterias y, por tanto, la efectividad del proceso, al dificultar el acceso de éstas a su fuente de alimentación.

En relación a la duración del ciclo de tratamiento, el SBR puede ser secuenciado tan frecuentemente como sea posible dentro de las limitaciones de suministrar las necesarias paradas, decantaciones, alimentaciones y tiempos de reacción.

El tiempo de retención hidráulico definido como el volumen total del reactor dividido por el caudal de entrada, es un parámetro de diseño muy utilizado. Sin embargo, la variabilidad de los datos presentados por distintos autores es muy grande. Por tanto, el proyectista debe seleccionar cuidadosamente entre los diferentes datos existentes aquellos que se hayan deducido en las condiciones más similares a las de la planta que se proyecta.

Con respecto a los criterios de construcción, los sistemas SBR normalmente requieren una superficie menor a la de los sistemas convencionales de lodos activados porque con el uso de SBR a menudo se elimina la necesidad de sedimentadores primarios y nunca se requieren los secundarios, sin embargo no es fácil realizar una comparación directa. El tamaño de los tanques en sí mismos varía para cada situación específica, pero en general se tiene una ventaja con el uso de sistemas SBR cuando el sitio propuesto tiene limitaciones de terreno. La Tabla 2, presenta algunos ejemplos ilustrativos señalando dimensiones generales para diferentes caudales. El tamaño de estos sistemas es específico para cada caso y por eso los ejemplos no representan cada tipo posible de sistema para un tamaño dado.

Tabla 2: Ejemplos ilustrativos para varias instalaciones de SBR.

Flujo mgd (m³/d)	Reactores			Sopladores	
	No.	Tamaño, pies (m)	Volumen, 10⁶ galones (m³)	No.	Tamaño, hp
0,012 (45)	1	18×12 (6×4)	0,021 (80)	1	15
0,10 (380)	2	24×24 (7×7)	0,069 (260)	3	7,5
1,00 (3800)	2	58×58 (18×18)	0,479 (1800)	3	40
1,20 (4500)	2	80×80 (24×24)	0,908 (3400)	3	125
1,40 (5300)	2	69×69 (21×21)	0,678 (2600)	3	60
1,46 (5500)	2	78×78 (24×24)	0,910 (3400)	4	40
2,00 (7600)	2	82×82 (25×25)	0,958 (3600)	3	75
4,25 (16000)	4	104×80 (32×24)	1,556 (5900)	5	200
5,20 (20000)	4	87×87 (27×27)	1,359 (5100)	5	125

Fuente: EPA, 1999.

La construcción de un tanque de SBR y los equipos, es en realidad comparable o más simple que la de un sistema convencional de lodos activados, sin embargo, el sistema de control operativo del SBR es más complejo que el del sistema convencional de lodos activados e incluye interruptores automáticos, válvulas automáticas e instrumentación.

Como se señaló anteriormente, los SBR típicamente eliminan la necesidad de usar sedimentadores primarios y secundarios separados en la mayor parte de los sistemas municipales, y además no requieren bombas de recirculación de lodos, reduciendo así los requisitos de operación y mantenimiento. Sin embargo, dado que los elementos críticos de un sistema SBR son los controles, las válvulas automáticas y los interruptores automáticos, estos sistemas pueden necesitar un mantenimiento más sofisticado que para las plantas convencionales (Bretti, 2002).

Aplicabilidad de los sistemas SBR

Los sistemas SBR son especialmente efectivos para aplicaciones de tratamiento de agua residual caracterizadas por caudales reducidos o intermitentes. Son utilizados típicamente para caudales iguales o menores a 5 millones de galones por día (20.000 m³ aproximadamente). La operación más sofisticada requerida para las plantas de SBR de mayor tamaño tiende a desestimular el uso de ese tipo de plantas para caudales mayores (EPA, 1999).

Debido a que estos sistemas tienen una superficie relativamente pequeña, son muy útiles en áreas donde se tiene limitaciones de terreno. Según Artan, Orhon y Tasli (2002), en una investigación acerca del diseño de sistemas SBR para la remoción de nutrientes de aguas residuales sujetas a fluctuaciones, el SBR es una de las tecnologías preferidas en las comunidades pequeñas por ser económicos y sencillos de operar para la remoción de parámetros convencionales, además ofrece gran flexibilidad de operación para la remoción efectiva de nutrientes.

Una flexibilidad operativa muy significativa está asociada a los SBR. Un SBR puede ser ajustado para simular cualquier proceso de un sistema convencional de lodos activados, y además, como este sistema opera en el tiempo en lugar del espacio, el número de ciclos por día puede ser modificado para obtener condiciones aeróbicas, anaeróbicas y anóxicas con el fin de lograr la remoción biológica de nutrientes, incluyendo nitrificación, desnitrificación y la remoción de fósforo, para controlar los límites deseados del efluente y adaptarse a los cambios en las normas regulatorias (EPA, 1999).

La figura 3 es un ejemplo de la aplicación de un sistema de reactores SBR para el tratamiento de aguas residuales, ubicado en la comunidad de Grangemouth, Escocia.



Figura 3: Planta de tratamiento de aguas residuales con sistema SBR.

Fuente: www.lifesciences.napier.ac.uk/.../kinneil.htm

Proceso de operación de los sistemas SBR

Según la EPA (1999), la operación de un reactor SBR se basa en el principio de llenado-descarga, el cual consiste de los siguientes cinco pasos básicos: Inactividad, Llenado, Reacción, Sedimentación y Descarga.

La figura 4 muestra las etapas básicas de funcionamiento de un SBR.

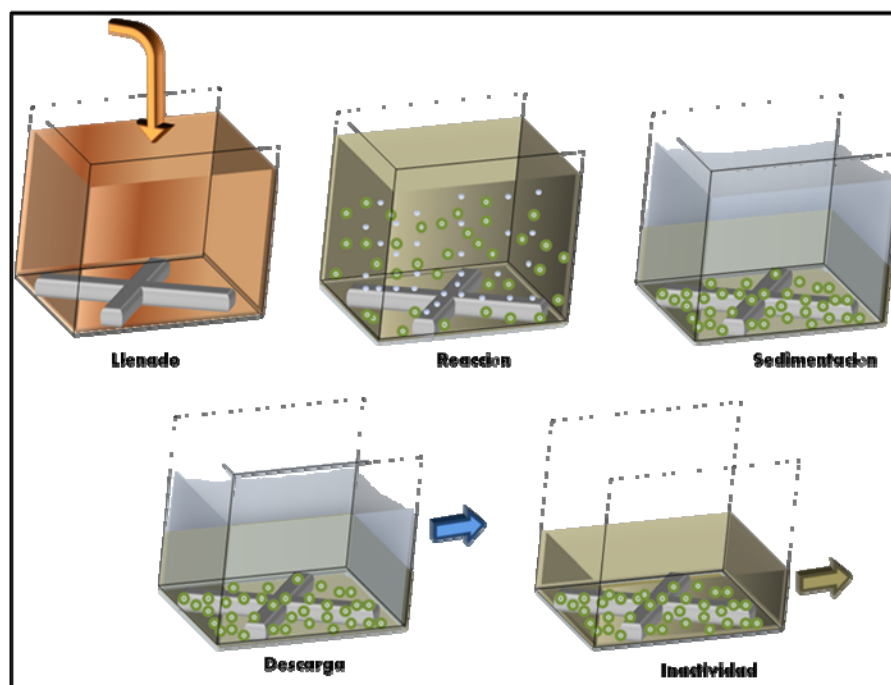


Figura 4: Etapas de proceso de un SBR típico.

El paso de Inactividad tiene lugar entre los pasos de Descarga y Llenado, durante los cuales se hace la remoción del efluente tratado y se adiciona el afluente de agua residual. La duración del paso de Inactividad varía dependiendo del caudal afluente y la estrategia de operación. La homogenización de caudales puede hacerse durante este paso si se utilizan tiempos variables de inactividad. La mezcla para acondicionar la biomasa y la purga del lodo también pueden ser llevados a cabo durante el paso de Inactividad dependiendo de la estrategia operacional.

El agua afluente se añade al reactor durante el paso de Llenado. Las siguientes modalidades son utilizadas en el paso de Llenado, y cualquiera de ellas puede ser usada dependiendo de la estrategia operacional: llenado estático, llenado con mezclado y llenado con aireación. En el caso de esta investigación la estrategia operacional que se utiliza, es el llenado estático, durante el cual el agua residual afluente se añade a la biomasa ya presente en el reactor. El llenado estático no tiene

mezcla ni aireación, lo cual significa que se tendrá una alta concentración de sustrato (alimento) una vez se inicie la mezcla.

Las reacciones biológicas se completan en el paso de Reacción, en el cual se presentan las modalidades de reacción con mezcla, y reacción con aireación. Durante las reacciones con aireación, que es la modalidad empleada en este estudio, se completan las reacciones metabólicas por las cuales la biomasa consume la materia orgánica en presencia de oxígeno.

El paso de Sedimentación ocurre normalmente durante condiciones de reposo en el reactor SBR. En algunos casos una agitación moderada durante las fases iniciales de la sedimentación puede producir un efluente mejor clarificado y lodo sedimentado de mayor concentración. En un reactor SBR no existen corrientes de afluente o efluente que interfieran con el proceso de sedimentación, como sí es el caso de los sistemas convencionales de lodos activados.

El paso de Descarga usa un decantador para remover el efluente tratado. Se produce luego de un tiempo suficiente para obtener una buena separación entre el lodo sedimentado y el agua sobrenadante (Bretti, 2002).

Cada etapa de operación de un sistema SBR se realiza en un tiempo determinado. Para el caso del sistema SBR a evaluar en esta investigación se tiene: 15 minutos de llenado, dado que el caudal de entrada es de 2,4 l/min., 1 hora de sedimentación por las condiciones del lodo y 30 minutos de descarga para no producir agitación que desestabilice el sistema sedimentado. El tiempo de reacción es de 4 horas y 15 minutos, dando como resultado un ciclo de operación de 6 horas (Azuaje y Muñoz, 2006).

Efectividad de los sistemas SBR y efecto de la salinidad sobre su rendimiento

La efectividad de un sistema SBR depende del diseño del sistema y de criterios específicos del sitio de la planta. Los sistemas SBR logran una buena remoción de DBO, DQO y nutrientes dependiendo del modo de operación. Para los SBR la eficiencia de remoción de DBO y DQO generalmente es del 85 al 95 por ciento (EPA, 1999).

Sin embargo, diversas investigaciones han determinado que el tratamiento biológico de agua residual salina usualmente resulta en un bajo rendimiento, por los efectos adversos de la sal sobre la actividad de los microorganismos. Debido a los cambios en la concentración de sal, la eficiencia de remoción del sistema SBR disminuye y el proceso no opera satisfactoriamente para cumplir las regulaciones de los efluentes.

La mayoría de los problemas encontrados en el tratamiento biológico de aguas residuales salinas se pueden resumir como sigue: limitado alcance de adaptación, sensibilidad a los cambios en las fuerzas iónicas, reducción de la tasa de degradación y alta concentración de sólidos suspendidos en los efluentes (Kargi y Dincer, 1997; Kargi y Dincer, 1999).

La principal razón para la reducción de la eficiencia en la remoción de contaminantes es el deterioro de la actividad biológica y las propiedades de sedimentación, debido fundamentalmente a la presencia de cationes (Kargi y Dincer, 1999; Lefebvre et al., 2007). Ambos, el Na^+ y el Cl^- , son considerados inhibidores de la remoción de materia orgánica biodegradable (Intrasungkha, Keller y Blackall, 1999).

Sin embargo, al investigar la remoción biológica de nutrientes en agua residual salina utilizando un SBR, Uygur y Kargi (2004), observaron una satisfactoria remoción de nutrientes a bajos contenidos de sal. Bajos contenidos de sal ($< 1\%$) se encuentra que

son estimulantes para los organismos obteniendo un incremento en la tasa de remoción de DQO.

No obstante, los mismos investigadores observaron que el incremento del contenido de sal, causa una severa disminución en la tasa de remoción de nutrientes específicos (DQO, $\text{NH}_4\text{-N}$ y $\text{PO}_4\text{-P}$), debido al impacto desfavorable de la sal en los microorganismos.

Aparentemente, los contenidos de sal por encima de 1% causan la desintegración de las células, obteniéndose una baja tasa de remoción específica y por lo tanto, las concentraciones de DQO, $\text{NH}_4\text{-N}$ y $\text{PO}_4\text{-P}$ en el efluente aumentan.

Moon, Seo, Lee, Kim y Yoon (2003), observaron que al aumentar la concentración de la sal, la eficiencia de remoción orgánica (en términos de DQO) disminuye, pero eventualmente alcanza un estado estable. El tamaño del flóculo mostró una tendencia similar. El flóculo es la unidad ecológica y estructural del lodo activo formada por una agrupación de bacterias y otros microorganismos que permiten la oxidación de la materia orgánica. El estudio del flóculo (estructura, compactación, etc.) genera información sobre su desarrollo y sobre la población de bacterias, lo que permite diagnosticar y prever el estado y rendimiento del proceso.

La figura 5 muestra distintos estados de formación del flóculo de los lodos activados. La estrecha observación muestra que el incremento de la concentración de la sal en la alimentación afecta la eficiencia de remoción de DQO primero que al tamaño y dimensión del flóculo. Estos hechos implican que la abrupta elevación de la concentración de la sal en la alimentación afecta primero la actividad de oxidación orgánica de los microorganismos y luego la estructura de los flóculos.

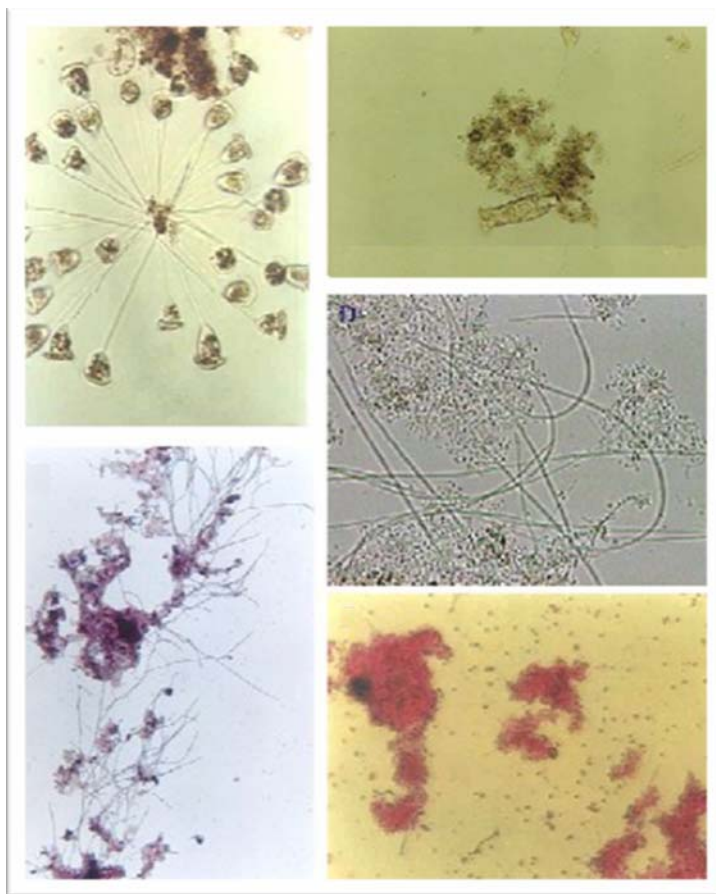


Figura 5: Flóculos del lodo activado.

Fuente: <http://www.biologia.org>

Después de un cierto período de recuperación para la actividad de oxidación orgánica, el tamaño y la dimensión del flóculo empieza a incrementarse. Comparando los tiempos totales de recuperación, el tiempo total de recuperación para la DQO es menor que el del tamaño y dimensión. La actividad de oxidación orgánica en términos de eficiencia de remoción de DQO es más sensible a las concentraciones de sal, sin embargo se adaptan rápidamente.

La tasa y el alcance de la remoción de DQO, $\text{NH}_4\text{-N}$ y $\text{PO}_4\text{-P}$ disminuyen mientras las concentraciones de los nutrientes del efluente y el índice de lodos (IVL) aumentan con el incremento del contenido de sal. La baja concentración de biomasa a altos contenidos de sal causa una baja en el volumen de lodos sedimentados y los altos

valores de IVL (Uygur y Kargi, 2003). Este índice da una idea de las características de decantación del lodo.

La presencia de altas concentraciones de sal en las aguas residuales afecta las especies microbianas, produciendo estrés salino, dando como resultado la inhibición de algunas enzimas, disminución de la actividad celular y eventualmente lleva a la plasmólisis (Uygur, 2006). La plasmólisis es el fenómeno mediante el cual las células pierden su contenido de agua, hasta que la presión osmótica del medio y de la célula sean iguales. La célula se contrae y puede llegar a morir por deshidratación (figura 6).

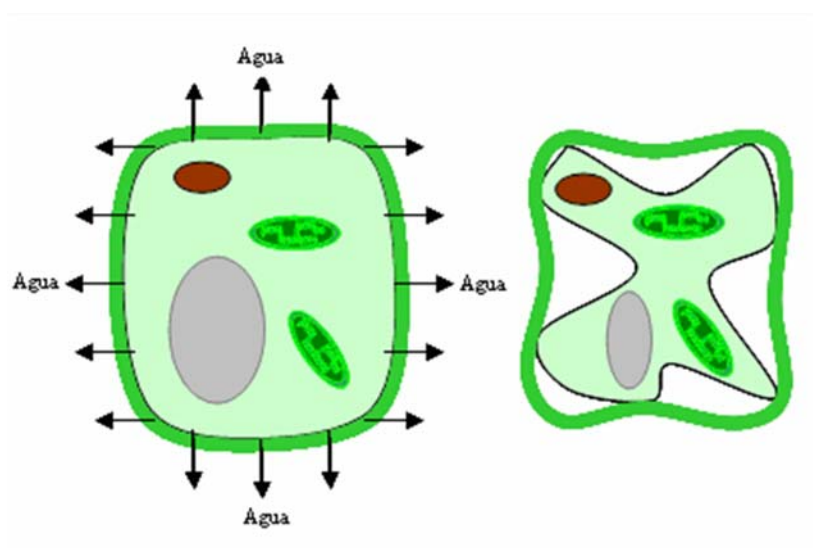


Figura 6: Representación del fenómeno de plasmólisis.

Fuente: <http://www.steve.gb.com>

Los microorganismos luchan en primer lugar para resistir la presión osmótica para lograr la retención de agua en sus células y en segundo lugar para degradar el sustrato (Moon et al., 2002). El consumo de oxígeno es utilizado para sobrevivir más que para la degradación, y la sal acumulada en las células reduce la eficiencia en la utilización del oxígeno (Panswad y Anan, 1999).

Sin embargo, aunque la inhibición del rendimiento se sabe que ocurre a altos contenidos de sal, el sistema es capaz de reanudar su funcionamiento luego de un apropiado período de aclimatación. Se observa una mejora en la remoción de carbono y nitrógeno en sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales con alto contenido salino cuando se trabaja con cultivos aclimatados a la sal (Uygur, 2006).

Parece que una adaptación adecuada de los lodos hace posible el tratamiento de agua residual salina. Desde el punto de vista de la ecología microbiana, la adaptación de un lodo no salino a alta salinidad implica la aclimatación de microorganismos halotolerantes a altos contenidos de sal. Los organismos halotolerantes son aquellos capaces de crecer en la presencia de NaCl pero que no lo requieren. Algunos estudios sugieren que la aclimatación es posible, dependiendo de la naturaleza y la adaptación progresiva del lodo a alta salinidad (Lefebvre et al., 2007).

Rene, Kim & Park (2007) y Panswad & Anan (1999), indican en sus respectivas publicaciones que el efecto de inhibición de la sal puede ser reducido significativamente después de un apropiado proceso de aclimatización de la biomasa.

A pesar de los obstáculos creados por la alta salinidad, un cierto número de procesos han sido empleados exitosamente para el tratamiento de agua residual salina. Ya se ha demostrado que el método por cargas facilita la adaptación de los organismos a altas concentraciones de sal y muchos SBR podrían tratar con éxito las aguas residuales con contenido salino (Lefebvre et al., 2007).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

A continuación, se realiza la descripción de los diversos pasos a seguir para cumplir con los objetivos propuestos en este trabajo de investigación.

Revisión Bibliográfica

Se realizó una revisión bibliográfica para investigar y recopilar toda la información referente al tratamiento de aguas residuales mediante el uso de los sistemas SBR, los requerimientos en los niveles de descarga de los efluentes, la descripción del sistema, los criterios de diseño, de construcción, los principios básicos de operación de un reactor SBR, su aplicabilidad y desempeño, efectividad del sistema, mantenimiento; entre otros.

Se examinó la información específica referente al sistema SBR instalado en la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas (PETA), Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, la descripción detallada del equipo, ciclo óptimo de operación, sistemas de control, porcentajes de remoción, rendimiento.

Adicionalmente, se llevó a cabo una investigación detallada acerca de los efectos de la salinidad sobre el tratamiento biológico de las aguas residuales y específicamente el efecto de los contenidos salinos sobre el rendimiento de los sistemas SBR.

Construcción del Sistema

Se procedió a la construcción del sistema, siguiendo los mismos parámetros de diseño y construcción que se utilizaron anteriormente (Azuaje y Muñoz, 2006).

El reactor biológico secuencial a escala, al igual que el anterior, está ubicado debajo del sedimentador de la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas (PETA) y está conformado por los siguientes sistemas:

El *Sistema de reacción* (figura 7), el cual está constituido por un tanque de vidrio de una capacidad total de 72 litros con paredes de 6mm., cuyas dimensiones son 40×45×40 cm.



Figura 7: Sistema de reacción.

El *Sistema de aireación* (figura 8), conformado por un distribuidor de aire dentro del reactor, las tuberías y un compresor. El distribuidor de aire consiste en un difusor en forma de “X” colocado en el fondo del reactor de manera tal que los cuatro vértices del rectángulo son abarcados garantizando la aireación uniforme, la distribución homogénea de la biomasa en todo el cuerpo de agua y su sustentación, lo cual representa una biomasa suspendida. Los difusores están cubiertos por una membrana de celulosa resistente al agua, la cual es permeable a las burbujas de agua pero impide el paso del agua hacia las tuberías de aire. En el centro de la “X” está la conexión de entrada de la tubería de aire que proviene del compresor, la cual consiste de una manguera de alta presión de 3/8”. El compresor suministra de manera continua el aire, consta con un motor de 2 hp y que funciona para 110 voltios.



Figura 8: Sistema de aireación.

Un *Sistema de válvulas, desagüe y tuberías* (figura 9), integrado por dos electroválvulas de 3/8", de bronce, marca ASCO, de acción directa on/off y falla cerrada, las cuales están fijadas en la parte trasera de la mesa y cubiertas de tal manera de hacerlas impermeables. Las tuberías están conformadas por mangueras transparentes de 3/8" que conectan las entradas y salidas de las electroválvulas. En la línea de entrada se encuentra una malla dentro de la conexión, cuya función es retener todas aquellas partículas cuyo tamaño afectan el correcto funcionamiento de la electroválvula de entrada. Se encuentran adheridas a las paredes del reactor unas canales de PVC, que cumplen la función de orificios de rebose, en el caso de existir variaciones que incrementen el caudal y rebose el contenido del reactor. Se tiene una bomba colocada en paralelo con la electroválvula de la descarga, para lograr la salida el agua tratada en un lapso de tiempo consistente con la sensibilidad del temporizador, de manera que ambas reciban la señal de activación al mismo tiempo, esta señal tiene un tiempo de duración de 30 minutos, tiempo suficiente para vaciar el reactor.

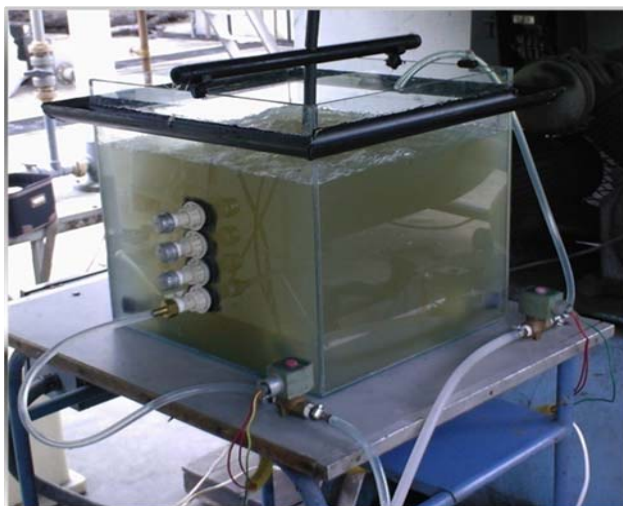


Figura 9: Sistema de válvulas, desagüe y tuberías.

Finalmente, el *Sistema eléctrico y de automatización* (figura 10), el cual consta de un cajetín ubicado debajo de la mesa, exactamente en uno de los bordes que da al frente del equipo, de tal manera que la visualización del frente del reactor también sea el cajetín de control. En el interior del cajetín se encuentra la instalación eléctrica correspondiente y los sistemas que controlan las dos electroválvulas y el compresor. El sistema de control está constituido por relojes controladores (timer), marca CAMSCO, con una exactitud de 15 minutos y un monitoreo diario. Todo el montaje está alimentado por una línea principal de corriente alterna de 110 Voltios, la cual tiene un interruptor de seguridad que enciende y apaga todo el sistema.



Figura 10: Sistema eléctrico y de control.
Fuente: Azuaje y Muñoz, 2006.

Adaptación del Sistema

Se efectuó la adaptación del sistema para lograr que el afluente de alimentación al SBR instalado en la Planta, fuera una mezcla de aguas residuales con agua de mar, con el objeto de simular las condiciones de aguas residuales de islas e islotes donde se presentan contenidos salinos.

Para lograr la simulación de las aguas residuales con contenido salino, fue necesario añadir un Sistema de mezclado previo a la entrada del reactor y un Sistema de automatización, los cuales están conformados de la siguiente manera:

El *Sistema de mezclado*, constituido por un tanque de almacenamiento de agua residual, un tanque de almacenamiento de agua de mar, un tanque para el mezclado, sistemas de tuberías, dos electroválvulas y cinco bombas.

El tanque de almacenamiento de agua residual (figura 11(e)), es un recipiente cilíndrico con capacidad de 500 litros, el cual es llenado con agua residual de origen municipal procedente del Colector Marginal Izquierdo Río Valle, a través de una bomba sumergible de 2,5 hp (figura 11(d)) ubicada en el colector, y un sistema de tuberías de plástico de 3/8". El bombeo se hace a partir del pozo que se encuentra ubicado paralelo al colector y que es llenado por vasos comunicantes gracias al caudal de agua que este arrastra (figura 11(a), 11(b)).



Figura 11: Sistema de Mezclado. (a) Pozo de Bombeo. (b) Colector Marginal Izq. Río Valle. (c) Tanque de Mezclado. (d) Bomba sumergible. (e) Tanque de almacenamiento de agua residual. (f) Tanque de almacenamiento de agua de mar.

El tanque de almacenamiento de agua de mar (figura 11(f)), es también un recipiente cilíndrico pero a diferencia del anterior posee una capacidad de 1.000 litros. Es llenado con muestras de agua salada recolectadas del litoral central venezolano. La recolección se llevo a cabo en el Estado Vargas, específicamente en Playa Escondida, ubicada en Caraballeda, por su cercanía y fácil acceso (figura 12).



Figura 12: Recolección de las muestras de agua salada. (a) Playa Escondida. (b) Transporte de la PETA.

El tanque de mezclado (figura 11(c)), es un recipiente rectangular, posee dimensiones de 52×95×70 cm., tiene una capacidad total de 346 litros y es alimentado con el agua residual y con el agua de mar, proveniente de los tanques de almacenamiento.

Se implementó un sistema de tuberías de 3/8", una electroválvula y una bomba sumergible de ¼ hp para llevar el agua residual al tanque de mezclado tal como se observa en la figura 13(a), 13(b) y 13(d); y un sistema de tuberías de 3/8", una electroválvula y una bomba de ½ hp para llevar el agua de mar hasta el tanque de mezclado (figura 13(c) y 13(e)). Se instaló además, una bomba de ½ hp (figura 12(f)), para realizar la recirculación de la mezcla, con el fin de evitar estancamiento y homogeneizar la mezcla antes de la alimentación al reactor. Posterior a la etapa de mezclado se dispuso de una red de tuberías también de 3/8" y otra bomba sumergible de ¼ hp para llevar la mezcla a la entrada del reactor y así ser procesada por éste.



Figura 13: Sistema de válvulas, bombas y tuberías. (a) Tuberías, electroválvula y bomba sumergible. (b) Tanques y tuberías. (c) Electroválvula para la alimentación de agua de mar. (d) Electroválvula para la alimentación de agua residual. (e) Bomba de recirculación. (f) Bomba de alimentación de agua de mar.

La figura 14 muestra un esquema del sistema SBR instalado en la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas (PETA) con las respectivas modificaciones realizadas y el Diagrama de Flujo del Proceso se puede observar en el Apéndice D.

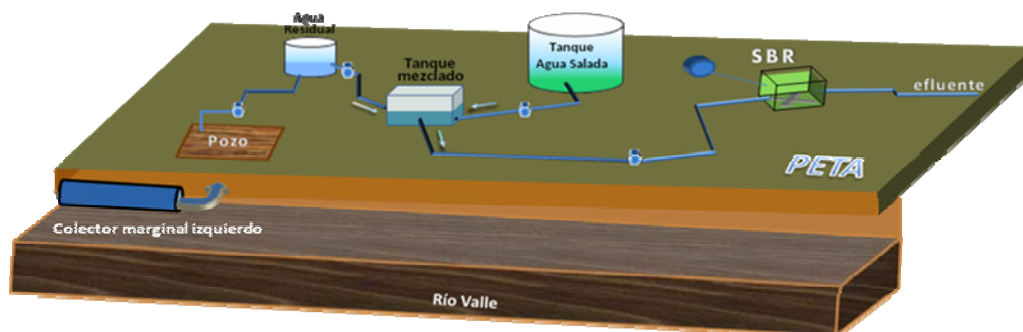


Figura 14: Esquema del sistema SBR ubicado en la PETA.

El *Sistema de automatización*, formado por un módulo de control, está constituido por un cajetín eléctrico con los siguientes componentes: un termo magnético para la bombas de $\frac{1}{4}$ hp, dos termo magnéticos para las bombas de $\frac{1}{2}$ hp, un termo magnético para sistema inteligente EASY, que protegen los equipos de bombeo de algún fallo en el tramo eléctrico, además de un Sistema Inteligente Programable EASY 512 – DC-RC que permite automatizar el funcionamiento de los equipos que conforman la adaptación del sistema. Adicionalmente de una fuente de poder EASY POW200, cuatro contactores DILM9 110vac, un térmico para $\frac{1}{4}$ hp, dos térmicos para $\frac{1}{2}$ hp además de un Tablero de Montaje (ver Apéndice E).

Dicho sistema está programado de tal manera que permite la realización de manera automática de los procesos de recirculación y mezclado. La figura 14, muestra el cajetín de control del impulso eléctrico y el módulo de control que conforman el sistema de automatización.



Figura 15: Sistema de Automatización. (a) Cajetín eléctrico. (b) Módulo de control.

El software del módulo, permite efectuar automáticamente la alimentación del agua residual y del agua de mar procedentes de los respectivos tanques de almacenamiento hacia el tanque de mezclado, y de igual forma, la recirculación de la mezcla previo al ingreso al reactor secuencial por cargas.

El sistema controla los tiempos de alimentación de los componentes de la mezcla al tanque de mezclado mediante un mecanismo de encendido y apagado, donde las bombas se encuentran conectadas en paralelo con las electroválvulas. Las alimentaciones se llevan a cabo una vez al día y la duración de éstas depende de las proporciones de cada componente en la mezcla. Las proporciones se obtuvieron estableciendo una relación entre las dimensiones del tanque de mezcla, el volumen de operación del reactor y los caudales de alimentación de los componentes de la mezcla, obteniendo así los valores de tiempo de alimentación requerido para conseguir los porcentajes deseados de cada elemento en la mezcla.

El sistema controla adicionalmente el tiempo de duración de la recirculación, establecido como una hora, a través del mecanismo de encendido y apagado de la bomba y es efectuada de acuerdo a los ciclos de operación que realiza el SBR diariamente.

El módulo de control permite visualizar el proceso por medio de una pantalla en donde el operador puede variar los parámetros de funcionamiento del sistema, así como también puede obtener información del sistema.

Puesta en marcha y estabilización del sistema

Se llevó a cabo la puesta en marcha y estabilización del sistema. Inicialmente se alimentó el equipo con afluente proveniente del Colector Marginal Izquierdo Río Valle y se procedió a la generación de la biomasa donde una vez lograda la formación de la biomasa y la estabilización del sistema, se operó y evaluó, caracterizando el afluente y el efluente de tal forma que los valores de remoción de contaminantes fueron reproducibles. Esto se realizó con la finalidad de garantizar el correcto funcionamiento del sistema antes de comenzar a evaluarlo bajo las condiciones adversas de salinidad.

Luego de corroborar el buen funcionamiento del sistema, se procedió a la aclimatación de la biomasa y se alimentó gradualmente el equipo con efluente proveniente del sistema de mezclado, compuesta por agua residual y agua de mar.

Una vez lograda la aclimatación de la biomasa y la estabilización del sistema, se procedió a integrar paulatinamente los diferentes porcentajes de contenido salino (25, 50 y 75 por ciento) y se evaluó, para luego caracterizar los afluentes y efluentes de manera tal que los valores de remoción de contaminantes fueran reproducibles.

Es preciso resaltar, que el aumento del contenido de sal entre un porcentaje y otro, se realizó gradualmente, para lograr una adecuada aclimatación y se esperó a la estabilización del sistema para poder evaluarlo y continuar con el siguiente nivel de contenido salino.

Caracterización de afluentes y efluentes

Para cada condición de salinidad, una vez lograda la aclimatación de la biomasa y la estabilidad del sistema, se realizó la caracterización de afluentes y efluentes del sistema, realizando ensayos correspondientes a la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos en sus diferentes formas, Presencia de Cloruros, Conductividad y Oxígeno Disuelto; de acuerdo a los procedimientos normalizados por la American Public Health Association, American Water Works Association y Water Pollution Control Facility (APHA-AWWA-WPCF).

Al realizar los ensayos de Demanda Química de Oxígeno (DQO) se debió agregar suficiente cantidad de Sulfato de Mercurio (HgSO_4) en las muestras diluidas, para precipitar los iones Cloruro en forma de Cloruro de Mercurio (HgCl_2), con el fin de evitar la interferencia del ión Cloruro sobre la medición de la DQO a las diferentes

concentraciones de sal (Uygur y Kargi, 2003). Sawyer y McCarty, han reportado que la interferencia puede ser eliminada siempre y cuando se mantenga una relación de 10:1 en peso de sulfato de mercurio y cloruro (Lefebvre et al., 2007).

Se llevó a cabo un programa de análisis de tres muestreos para cada condición de salinidad, necesarios para la caracterización y de esta forma validar su reproducibilidad en el tiempo.

Optimización de tiempos de operación

Se optimizaron los tiempos de operación con base a los resultados obtenidos al caracterizar la descarga del sistema. Con el sistema operando de manera estable, se estudiaron los resultados de los análisis de DQO puntuales para cada porcentaje de salinidad y con esto se determinó el tiempo óptimo de operación del sistema para cada concentración de sal.

Después de determinar el tiempo óptimo de operación del sistema para cada nivel de concentración de sal, se buscó la relación de tiempos mínimos de operación, para una remoción de contaminantes tal que sea reproducible en el tiempo. Se procedió a operar el sistema bajo el ciclo óptimo y se realizó un programa de caracterización tomando muestras de afluente, efluente y licor mezclado durante el desarrollo de los ciclos de operación en días y a condiciones diferentes, con el fin de confirmar que se mantuvieran los niveles de remoción.

CAPÍTULO IV

PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados y análisis producto de la evaluación del sistema de reactor biológico secuencial a escala piloto para tratamiento de aguas residuales con contenido salino.

Simulación de las condiciones de las aguas residuales con contenido salino propias de actividades domésticas provenientes de islas e islotes.

Mediante las adaptaciones realizadas al sistema de reactor biológico secuencial, se produjo con éxito la simulación de las aguas residuales con contenido salino.

Se logro de manera satisfactoria la mezcla de las aguas residuales producto de actividades domésticas con las muestras de agua salada recolectadas, con la cual se obtuvo una representación de las condiciones fisicoquímicas de estas aguas.

Se consiguió simular los diferentes porcentajes de contenido salino, para así operar y evaluar el sistema. Se estableció una relación entre las dimensiones y el volumen de operación del tanque de mezcla, el volumen de operación del reactor y los caudales de alimentación de los componentes de la mezcla, obteniendo los valores de tiempo de alimentación requerido y los porcentajes deseados de cada elemento en la mezcla.

La figura 16, muestra los tiempos de alimentación necesarios de cada componente de la mezcla para obtener los porcentajes requeridos para la aclimatación y la evaluación del sistema.

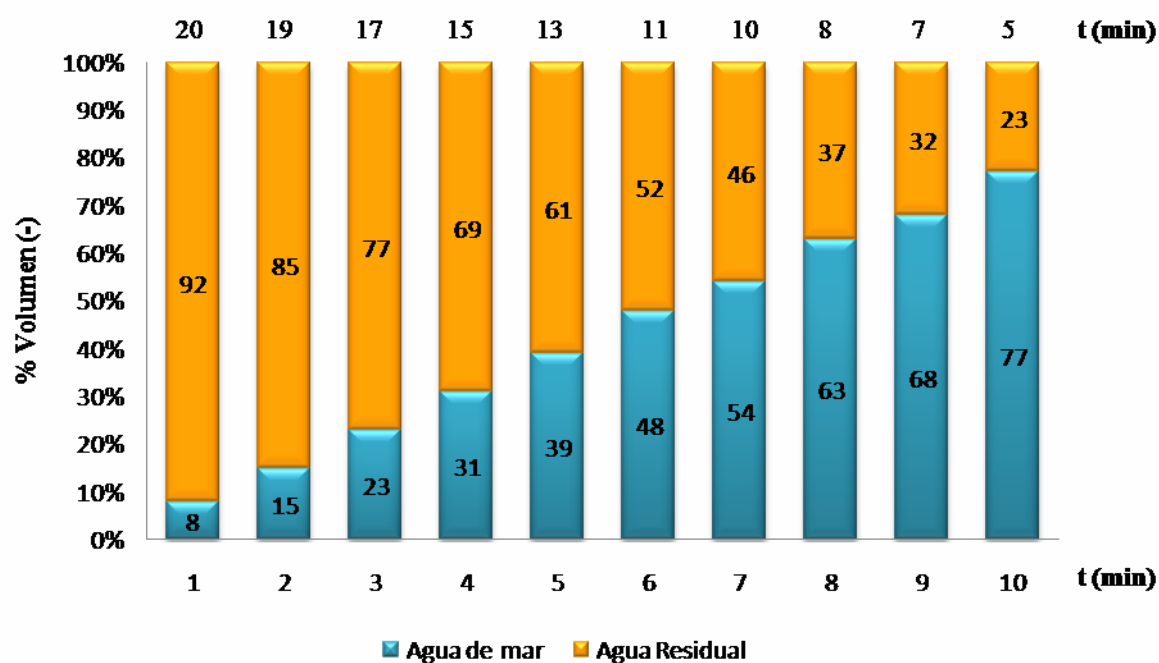


Figura 16: Parámetros de llenado del Sistema de mezclado para la simulación del agua residual con contenido salino.

Así por ejemplo se puede observar, que 1 minuto de alimentación de agua de mar combinado con 20 minutos de agua residual daban una composición de 8% de contenido salino en el afluente, lo que es equivalente a 1 minuto de funcionamiento de la bomba de $\frac{3}{4}$ hp que impulsa el agua contenida en el tanque de almacenamiento de agua residual y 20 minutos de funcionamiento de la bomba de $\frac{1}{2}$ hp que impulsa el agua contenida en el tanque de almacenamiento de agua salada. En ambos casos, las bombas fueron operadas a su máximo caudal, por lo que, los tiempos mostrados en la figura 16 implican los tiempos mínimos de llenado para los flujos que aportan las bombas operando con las válvulas 100% abiertas.

Con el fin de ajustar los caudales obtenidos por minuto de operación de cada bomba y lograr porcentajes de mezcla en agua salada con base en 25, 50 y 75% respectivamente, se planteó una combinación de 3 minutos de alimentación de agua salada y 17 minutos de agua residual, obteniendo así el 23% de contenido salino, aproximadamente igual a tener el 25%. Una combinación de 6 minutos de agua de

mar y 11 minutos de agua residual resulta en 48% de contenido salino, aproximadamente igual a tener el 50%; y finalmente combinando 10 minutos de agua de mar con 5 minutos de agua residual, se obtenía un 77% aproximadamente igual a tener 75% de contenido salino presente en el afluente al sistema.

Asimismo, puede apreciarse en la figura, la alimentación gradual del sistema con afluente que contenía porcentajes cada vez mayores de agua salada, para ir acostumbrando a la biomasa generada solo con agua residual, a la presencia de contenidos salinos, hasta alcanzar los porcentajes de salinidad fijados para la evaluación.

Para caracterizar los afluentes salinos logrados con la simulación, se llevaron a cabo análisis de $\text{DBO}_{5,20}$ y presencia de Cloruros. La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos para los porcentajes de contenido salino determinados para la evaluación y adicionalmente la caracterización del afluente sin contenido salino, a fines de comparación.

Tabla 3: Valores de $\text{DBO}_{5,20}$ y Cloruros para los diferentes porcentajes de agua salada.

% Contenido Salino	DBO (mg/l)	Cloruros (mg/l)
0	81 - 169	60 - 100
25	64 - 77	4200
50	15 - 21	9600

La Tabla 3, muestra los rangos de valores de $\text{DBO}_{5,20}$ de entrada al SBR expresada en mg/l para cada porcentaje de salinidad (incluyendo cero por ciento, es decir agua residual sin contenido salino). Se puede observar que estos rangos van disminuyendo a medida que se incrementa el contenido salino. Este comportamiento era de esperarse tomando en cuenta que al realizar la mezcla de agua residual con agua de mar se estaba diluyendo paulatinamente el afluente de agua residual proveniente del

Río Valle, por tanto a medida que se aumentaba el porcentaje de agua salada en la mezcla se esperaba menor carga orgánica como afluente al reactor. Lo que no se esperaba, era obtener rangos tan bajos de $DBO_{5,20}$ y tan variables, los cuales fueron consecuencia del prolongado e intenso período de lluvias que se produjo en la ciudad durante los días de experimentación. Bajo estas circunstancias, se sugiere realizar una comparación de los rangos de valores de carga orgánica obtenidos con la simulación, con los valores de carga orgánica que se obtendrían al analizar muestras conseguidas directamente de las aguas residuales con contenido salino procedentes de islas e islotes, como por ejemplo, los Monjes, Coche o los Roques, áreas en donde se encuentran sistemas SBR instalados, con la finalidad de verificar que la simulación realmente se ajusta a las características reales que presentan estas aguas.

Al obtener valores tan bajos de concentración de materia orgánica biodegradable en el afluente del sistema, hizo que la evaluación del sistema con el 75% de contenido salino no tuviera sentido. Como puede apreciarse en la Tabla 3, para 50% de contenido salino se presentaba un rango de $DBO_{5,20}$ que oscilaba entre 15 y 21 mg/l. Tomando en cuenta que el valor permitido por la *Gaceta Oficial de la República de Venezuela* (N° 5021. Decreto 883) para vertidos líquidos a cuerpos de agua es de 60 mg/l y que el rango obtenido en el afluente del sistema se encontraba por debajo de dicho valor, el tratamiento de la mezcla de agua residual con porcentajes mayores a 50% de agua salada no tenía sentido. Siendo así, la evaluación se llevó a cabo hasta el 50% de contenido salino.

Dada estas condiciones, se propone la realización de la evaluación en período de sequía, para evitar el efecto desfavorable de las lluvias sobre la concentración de materia orgánica biodegradable en el afluente al sistema y de esta manera poder llevar a cabo la evaluación hasta el 75% de contenido salino, tal y como se había planteado desde un principio.

En la Tabla 3 también se muestra el contenido de Cloruros presente en el afluente del sistema para cada nivel de salinidad. Se puede apreciar que la cantidad de Cloruros aumenta a medida que se incrementa el porcentaje de agua salada en la mezcla y es consistente con el valor de concentración de Cloruros en el agua salada, el cual, para las muestras tomadas en este caso tiene un valor promedio de 20.000 mg/l. En este sentido, si se comparan los valores de 25% y 50% con respecto a su proporción de Cloruros de agua salada, se puede indicar que para el primer caso, se tiene 21% de los Cloruros que se contenían en el agua salada y en el segundo caso un 49% de los Cloruros contenidos del agua salada. Estos valores coinciden con el orden de los porcentajes de dilución en volumen de agua salada y con un error porcentual respecto de estos menor al 8%.

Del mismo modo se puede observar que los niveles de Cloruros se encuentran por encima de los 2000 mg/l, valor límite de presencia de Cloruros en una muestra para poder realizar análisis de DQO sin que ocurra interferencia, por lo tanto la caracterización de afluentes y efluentes en términos de DQO para el agua residual con contenido salino, se hizo imposible.

Sin embargo, existen otros métodos de determinación de DQO para aguas salobres, que aunque no están estandarizados, no presentan interferencia con valores mayores a los 2000 mg/l en concentración de Cloruros.

Generación y aclimatación de la biomasa a partir de las aguas residuales con contenido salino.

Se realizó la generación de la biomasa alimentando inicialmente el sistema sólo con agua residual. Se llevó a cabo la puesta en marcha del equipo y al cabo de varias semanas de operación se obtuvo la estabilización del sistema (figura 17).

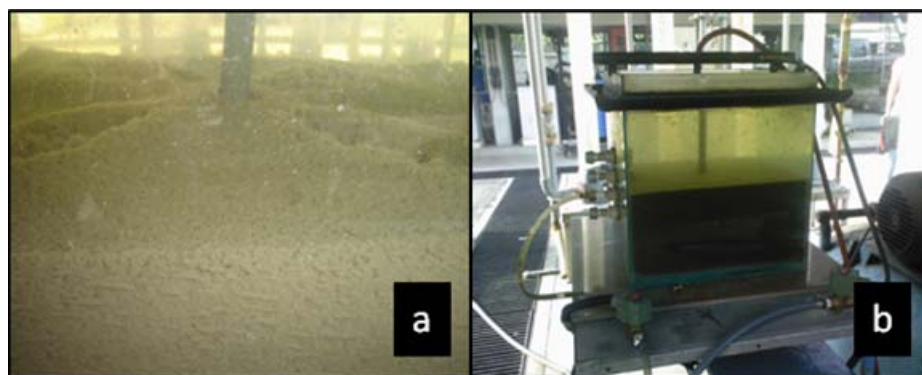


Figura 177: Generación de la biomasa a partir de aguas residuales. (a) Biomasa generada. (b) Sistema SBR en etapa de estabilización.

A continuación, en la figura 18, se puede observar la generación progresiva de la biomasa en el transcurso de cada semana. A medida que se fue formando, se fue evaluando el sistema, para hacerle seguimiento detallado y constante.

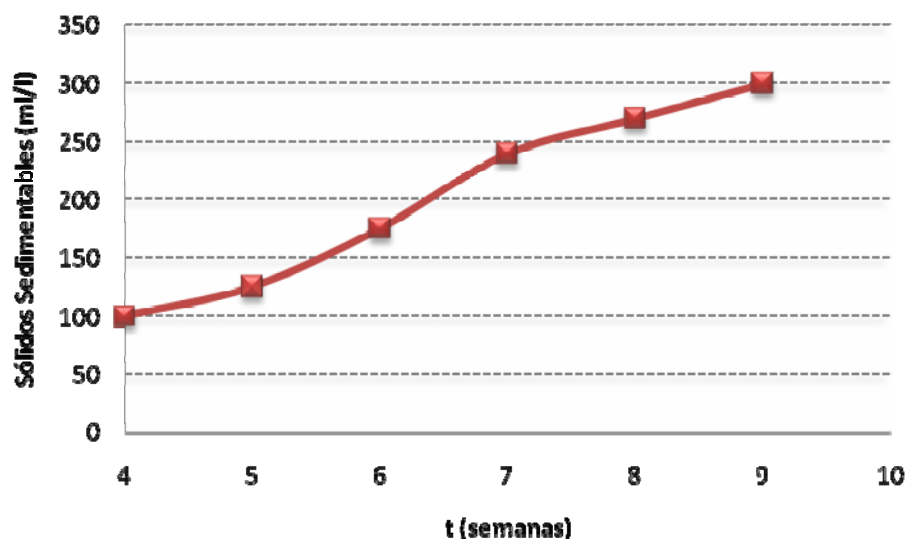


Figura 18: Variación de los Sólidos Sedimentables del SBR durante la etapa de estabilización del sistema.

A partir de la cuarta semana se observó una cantidad significativa de biomasa, razón por la cual se procedió a evaluar el sistema para definir la concentración de la misma.

Se evidenció el incremento gradual de la concentración de Sólidos Sedimentables hasta alcanzar un máximo de 300 ml/l, valor en el cual la cantidad de biomasa permaneció constante.

Al mismo tiempo se realizaron análisis de DQO para precisar el nivel de remoción alcanzado hasta ese momento. Los resultados de dicha evaluación, pueden apreciarse en la figura 19.

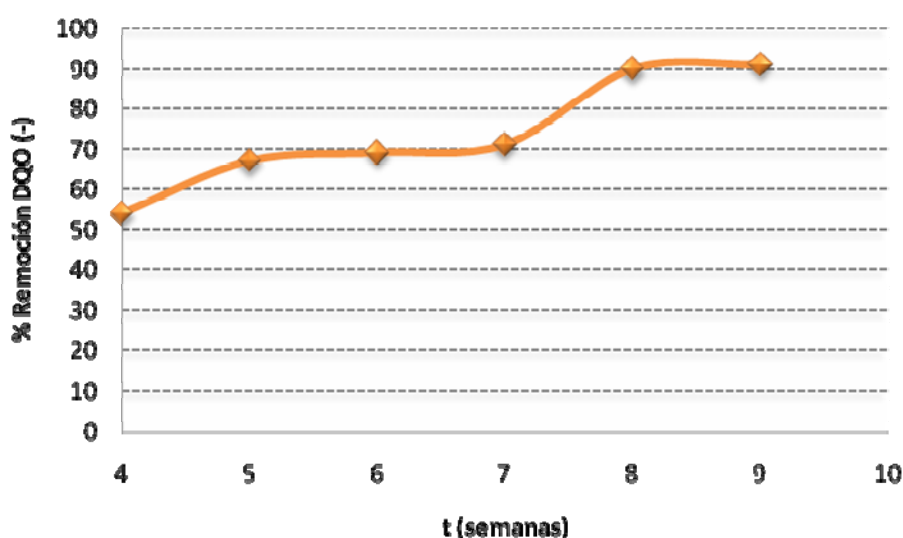


Figura 19: Porcentaje de remoción en función a la DQO para la etapa de estabilización del sistema.

El factor de remoción en términos de DQO presentó la misma tendencia al aumento progresivo que presentaron los Sólidos Sedimentables. El porcentaje de remoción del sistema fue aumentando gradualmente durante cada semana, hasta alcanzar valores reproducibles y aproximados a los obtenidos en el Trabajo Especial de Grado de Azuaje y Muñoz (porcentajes de remoción mayores a 90%), con lo cual se pudo determinar la estabilidad del sistema.

La estabilización del sistema se consiguió entre la octava y novena semana de operación, durante las cuales se llevó a cabo un programa de análisis de tres muestreos validando así su reproducibilidad en el tiempo.

Los resultados de los análisis de Sólidos Sedimentables para tres muestreos realizados durante la octava y novena semana respectivamente, se exponen a continuación:

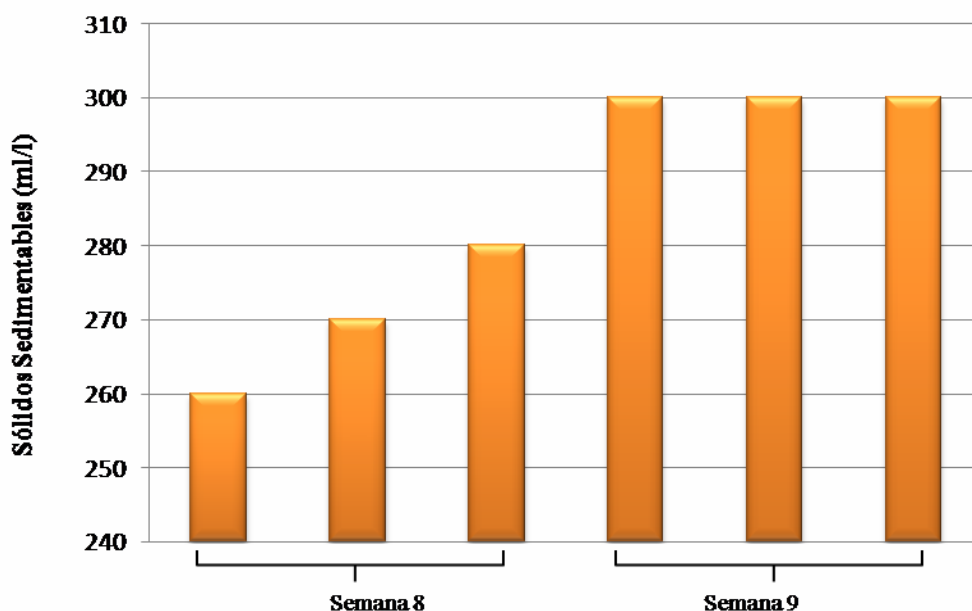


Figura 20: Incremento de los Sólidos Sedimentables en el licor de mezcla para el período final de estabilización del sistema.

En la figura 20, se evidencia claramente la estabilización de la biomasa durante la novena semana de operación del sistema, alcanzando un valor de 300 ml/l. Mientras transcurría la octava semana, aún se podía observar el crecimiento progresivo de la concentración de los Sólidos Sedimentables en el licor de mezcla.

De la misma forma, se realizaron los análisis de DQO para tres muestreos realizados durante la octava y novena semana respectivamente. Los resultados de los muestreos en términos de factor de remoción de DQO se muestran en la siguiente figura.

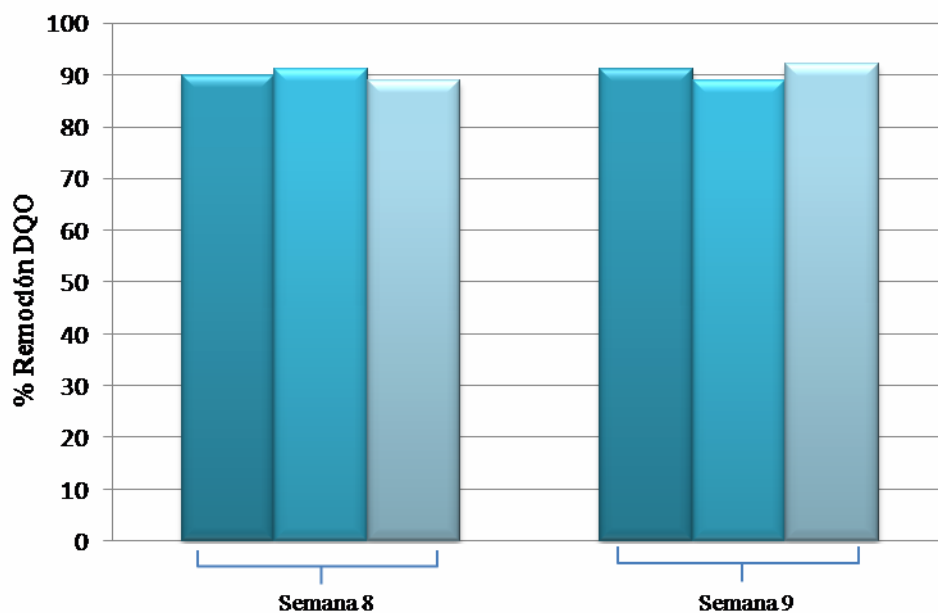


Figura 21: Porcentajes de remoción en función a la DQO para el período final de estabilización del sistema.

En la figura 21, se aprecia notablemente que los factores de remoción en términos de DQO se mantuvieron estables y reproducibles tanto en la semana 8 como en la semana 9, alcanzando porcentajes de remoción promedio de 90 y 91% respectivamente.

Además de los análisis de DQO y Sólidos Sedimentables, se realizaron análisis de $\text{DBO}_{5,20}$ y de Sólidos Suspendidos para confirmar la estabilización del sistema, siguiendo el mismo programa de análisis de tres muestreos para validar su reproducibilidad en el tiempo.

La figura 22, muestra la $\text{DBO}_{5,20}$ en mg/l de las entradas y salidas del sistema para los tres muestreos correspondientes a la semana 8 y a la semana 9.

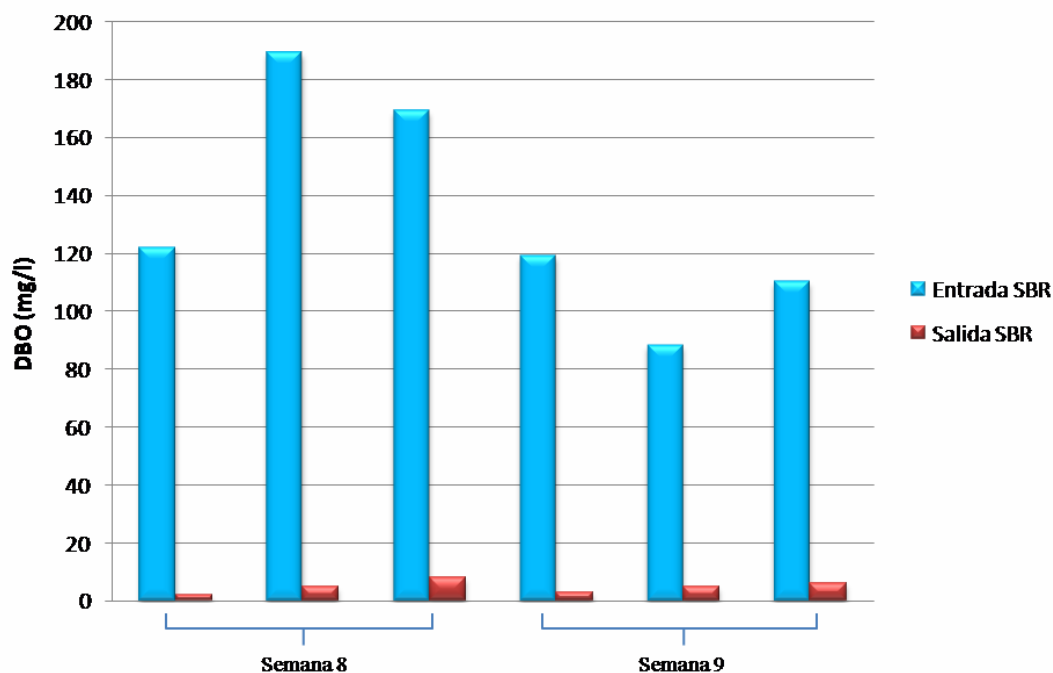


Figura 222: Valores de $DBO_{5,20}$ de los afluentes y efluentes del sistema para el periodo final de estabilización.

Se puede observar la variación de la carga orgánica entrante, de 81 mg/l a 169 mg/l, producto del efecto de las lluvias que provocaron la variabilidad y la dilución de las concentraciones de materia orgánica biodegradable en el afluente al sistema. Sin embargo, a pesar de las fluctuaciones de la carga orgánica en la entrada, el efluente tratado mantiene una $DBO_{5,20}$ con valores en promedio igual a 4 mg/l.

Con estos valores de entrada y salida, se determinó el factor de remoción del sistema en términos de $DBO_{5,20}$.

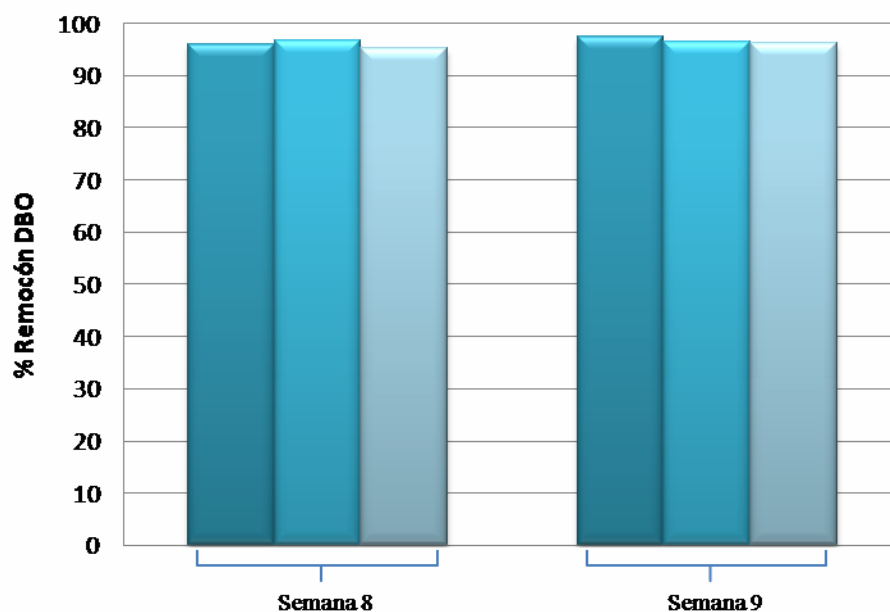


Figura 23: Porcentajes de remoción en función a la $DBO_{5,20}$ para el período final de estabilización del sistema.

En la figura 23, se observa que el porcentaje de remoción en términos de $DBO_{5,20}$, siguió la misma tendencia que el porcentaje de remoción en términos de DQO. Se puede notar claramente que los factores de remoción en términos de $DBO_{5,20}$, se mantuvieron estables y reproducibles tanto en la semana 8 como en la semana 9, alcanzando porcentajes de remoción promedio de 96 y 97% respectivamente, rango que corresponde con los valores obtenidos en el Trabajo Especial de Grado de Azuaje y Muñoz (porcentajes de remoción mayores a 90%).

Finalmente, se realizaron análisis de Sólidos Suspendidos en el licor de mezcla, para los tres muestreos correspondientes a la semana 8 y a la semana 9 y los resultados se muestran en la Figura 24.

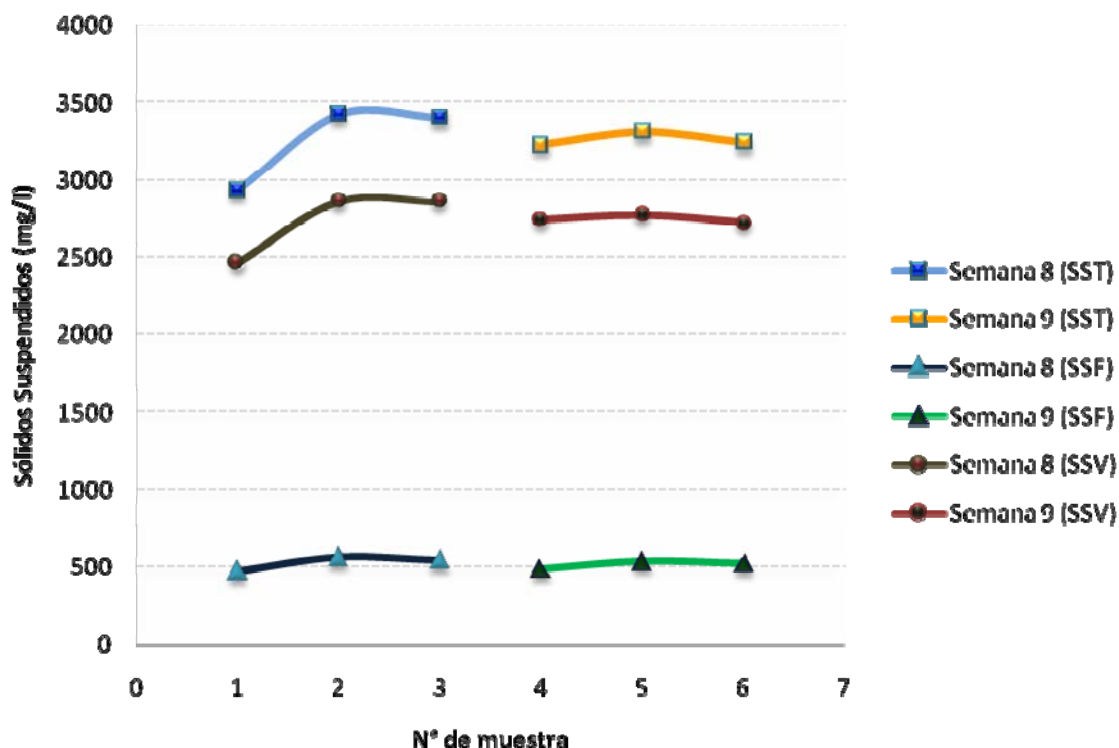


Figura 24: Variación de los Sólidos Suspensos en el licor de mezcla para el período final de estabilización del sistema.

Se puede observar que los valores de Sólidos Suspensos Volátiles en el licor de mezcla para la semana 8 y para la semana 9, se encuentran dentro del rango de 2.000 a 5.000 mg/l, reportado en la bibliografía para los sistemas de reactor biológico secuencial por cargas (Metcalf y Eddy, 2003). Adicionalmente, se logra apreciar que para la novena semana los valores se mantienen prácticamente constantes.

Con los resultados obtenidos al caracterizar el afluente, el efluente y el licor de mezcla del sistema, además de determinar la estabilidad, se corroboró el correcto funcionamiento del sistema antes de comenzar a evaluarlo bajo condiciones de salinidad.

Además de estos análisis, se puede agregar por apreciación visual, que el sistema durante el inicio del período de estabilización, generaba una gran cantidad de espumas derivadas de los compuestos fosforados que son descargados al río Valle por las actividades domésticas que implican el uso de sustancias jabonosas. Estas espumas, a medida que se generó el lodo, fueron desapareciendo paulatinamente, hasta el punto en que se dejaron de percibir totalmente, lo que ratifica la estabilización definitiva del SBR. Esto sugiere que el sistema está propiciando la remoción de estos compuestos fosforados, pero que por alcance de este trabajo de investigación no se puede señalar su veracidad.

Una vez estabilizado el sistema se procedió a la aclimatación de la biomasa. Se inició la alimentación del sistema con efluente proveniente del tanque de mezclado, compuesto por agua residual y agua de mar.

La figura 25, muestra el aumento gradual de los porcentajes de agua salada en la mezcla en función del tiempo.

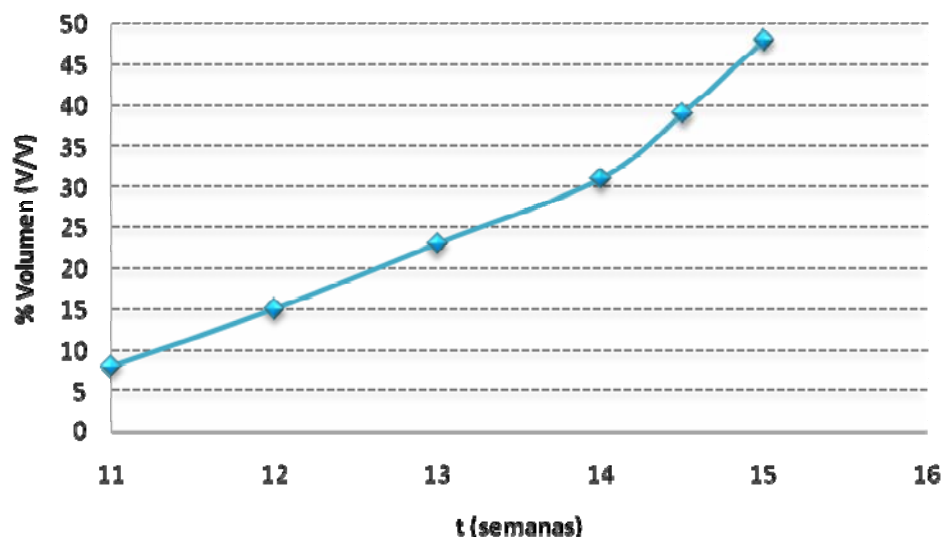


Figura 25: Incremento porcentual de agua salada en la mezcla durante la etapa de estabilización del sistema.

La aclimatación resultó efectiva, debido a que como se puede apreciar en la figura, la alimentación se realizó de manera gradual, iniciando con porcentajes menores de agua salada en la mezcla hasta llegar a los porcentajes de contenidos salinos propuestos para la evaluación.

Para aumentar el contenido de agua salada entre un porcentaje y otro, se efectuó la caracterización de las aguas residuales con contenido salino con el propósito de evaluar el sistema, verificar su estabilidad y de esta manera poder continuar con el siguiente nivel de contenido salino.

Caracterización de las aguas residuales con contenido salino.

Para cada condición de salinidad se realizaron los ensayos correspondientes para obtener la caracterización de los afluentes y efluentes del sistema. Se escogió el primer ciclo de la mañana (el cual inicia a las 6 de la mañana y culmina a las 12 del medio día) para captar las muestras de afluente y efluente del sistema, así como también del licor de mezcla y así realizar la descripción físicoquímica del sistema.

Para los niveles de contenido salino correspondientes a 8% y 15%, se efectuaron análisis de $DBO_{5,20}$ y de Sólidos Sedimentables.

La figura 26, muestra la $DBO_{5,20}$ en mg/l de las entradas y salidas del sistema para cuatro muestras correspondientes al 8% y 15% de contenido salino. Se puede observar la variación de la carga orgánica entrante, de 86 mg/l a 55 mg/l, y una disminución de la concentración de materia orgánica en el afluente al sistema, debido al efecto de dilución del afluente con las muestras de agua de mar, así como también al efecto de las intensas lluvias que provocaron la variabilidad y la dilución de las concentraciones del afluente al sistema. Sin embargo, el efluente tratado mantiene una $DBO_{5,20}$ aproximadamente igual a 2 mg/l y prácticamente constante.

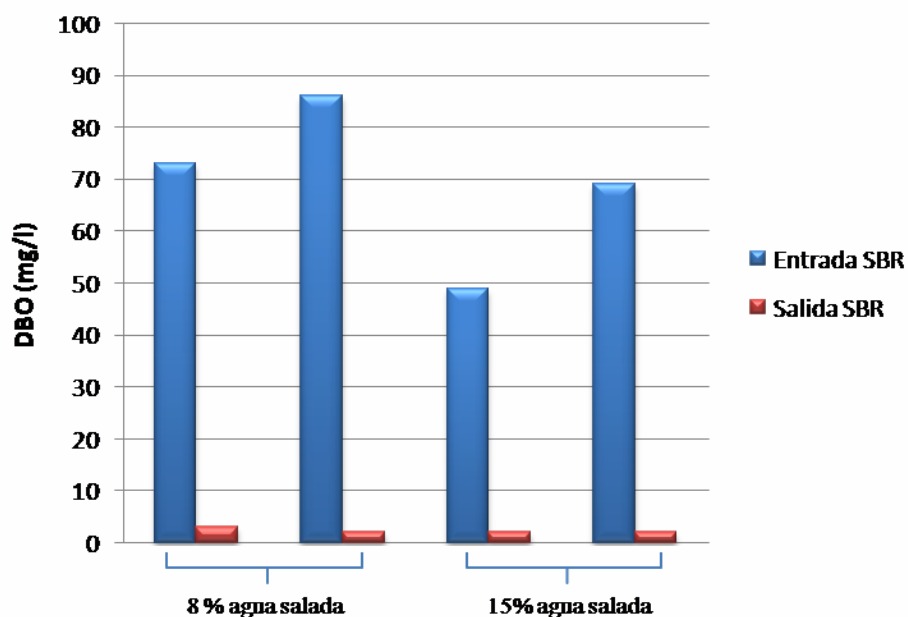


Figura 26: Valores de DBO_{5,20} de los afluentes y efluentes del sistema para el período inicial de aclimatación.

Con base en estos valores de entrada y salida de la DBO para 8% y 15%, se determinó el factor de remoción del sistema, en términos de DBO_{5,20}, para cada nivel de contenido salino.

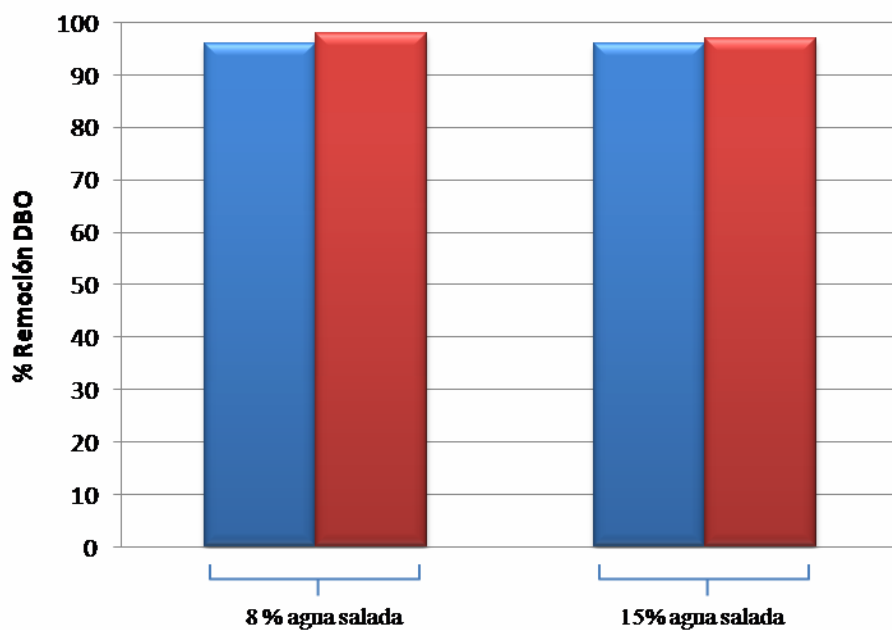


Figura 27: Porcentajes de remoción en función a la DBO_{5,20} para el período inicial de aclimatación del sistema.

En la Figura 27, se evidencia claramente que a pesar de la inclusión de contenidos salinos en el afluente, el sistema respondió a la perturbación de manera exitosa y mantuvo la eficiencia del proceso, en promedio igual a 97% de remoción en términos de $\text{DBO}_{5,20}$. Esto se debe en gran parte, al tiempo de aclimatación equivalente a una semana y al pequeño porcentaje agregado de agua de mar, menor al 10% del total de la mezcla.

Conjuntamente a los análisis de $\text{DBO}_{5,20}$, se realizaron análisis de Sólidos Sedimentables, con la finalidad de verificar la concentración de biomasa en el sistema. Los resultados de dichos análisis son mostrados en la figura 28.

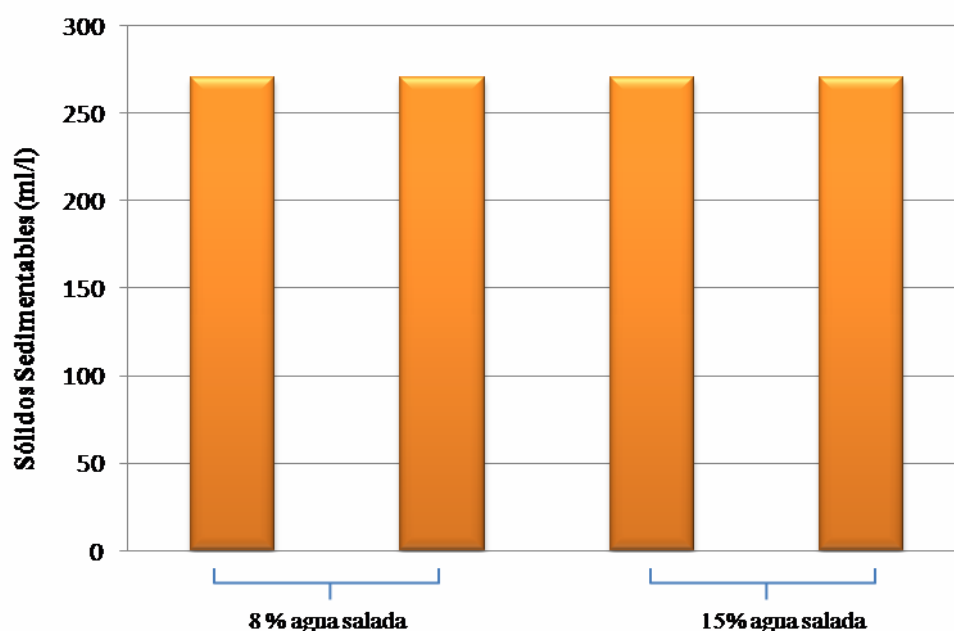


Figura 28: Valores de Sólidos Sedimentables en el licor de mezcla para el período inicial de aclimatación del sistema.

Se puede apreciar una disminución de la concentración de la biomasa con respecto a la concentración alcanzada al estabilizar el sistema sin la presencia de agua salada (300 ml/l). Esto ocurrió por la adición de contenidos salinos al afluente del sistema, por la cual se produjo la pérdida de microorganismos que no toleraron la existencia

de contenidos salinos. Esta pérdida de microorganismos, se pudo evidenciar durante todo el periodo de aclimatación, donde parte de la biomasa muerta se encontraba en la superficie del sobrenadante en la etapa de sedimentación. No obstante, a pesar de la pérdida, se puede observar que la concentración de sólidos sedimentables se estabiliza en un valor igual a 270 ml/l, lo que representa una disminución de 10% del volumen de estos.

Al observar que el sistema mantuvo el porcentaje de remoción, o lo que es lo mismo, mantuvo la eficiencia del proceso en términos de $DBO_{5,20}$ y asimismo se comprobó la estabilidad de la biomasa, se procedió a realizar la evaluación del sistema para la siguiente condición de salinidad, llegando al primer nivel pautado para este estudio.

Para el 25% de contenido salino, se efectuaron análisis correspondientes a la $DBO_{5,20}$, Sólidos en sus diferentes formas y presencia de Cloruros. Se realizaron tres muestreos necesarios para la caracterización y para validar la reproducibilidad de los resultados.

La figura 29, muestra la $DBO_{5,20}$ en mg/l de las entradas y salidas del sistema de tres muestreos correspondientes al 25% de contenido salino. Se puede observar la variación de la carga orgánica entrante, de 77 mg/l a 64 mg/l, y la persistencia de concentración bajas de materia orgánica en el afluente al sistema, debido a la dilución del efluente con agua de mar, además de las lluvias, que provocaron la variabilidad y la dilución de las concentraciones de materia orgánica biodegradable del afluente al sistema. Pese a esta condición, el efluente tratado mantiene una $DBO_{5,20}$ aproximadamente igual a 3 mg/l y prácticamente constante.

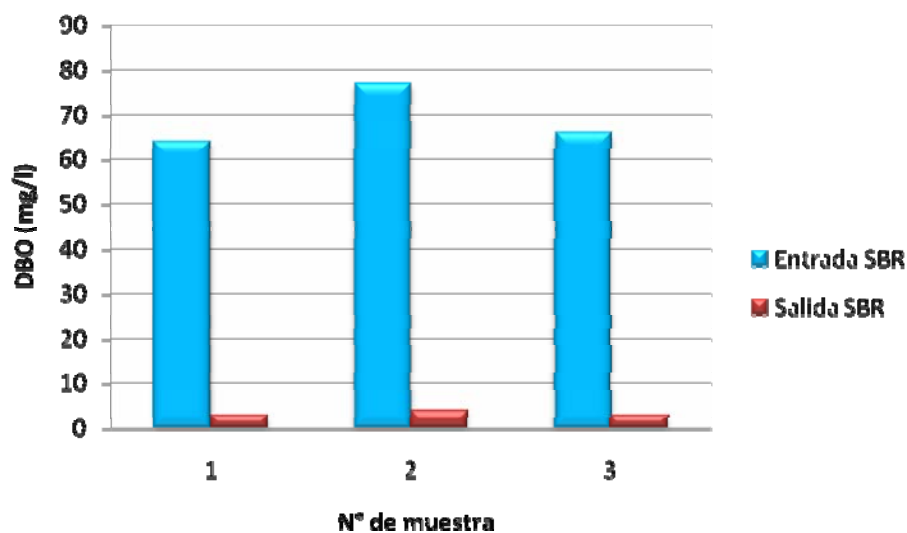


Figura 29: Valores de $DBO_{5,20}$ de los afluentes y efluentes del sistema para el 25% de contenido salino.

Fundamentándose en los resultados obtenidos de las entradas y salidas del sistema, se estableció el factor de remoción en términos de $DBO_{5,20}$, para el 25% de contenido salino, los cuales se pueden observar en la figura 30.

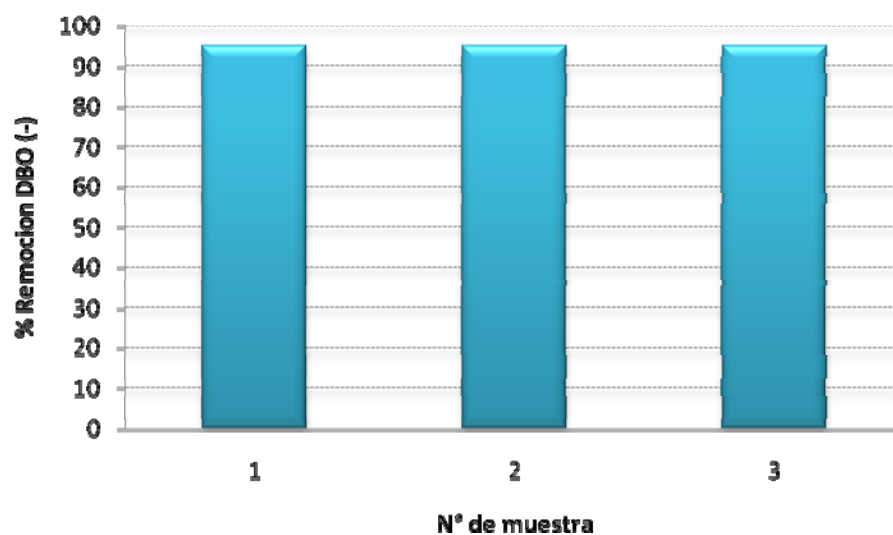


Figura 30: Porcentajes de remoción en función a la $DBO_{5,20}$ para el 25% de contenido salino.

Se obtuvo un factor de remoción promedio en términos de $DBO_{5,20}$ igual a 95%. Al compararlo con el factor de remoción alcanzado con las condiciones de salinidad anteriores, se puede evidenciar una pequeña baja, debida a la disminución de la carga orgánica en el afluente al sistema. Sin embargo, a pesar de la disminución, se puede notar la reproducibilidad del mismo, por lo cual se puede decir que la eficiencia del proceso en términos de $DBO_{5,20}$ es estable.

Al obtener factores de remoción estables y reproducibles en términos de $DBO_{5,20}$, se procedió a evaluar los sólidos en sus diferentes formas, los cuales constituyen una de las características físicas más importantes del agua residual y con los cuales se logró verificar la estabilidad del sistema para poder avanzar con el siguiente nivel de contenido salino.

Los resultados de los análisis de Sólidos Sedimentables se presentan en la figura 31.

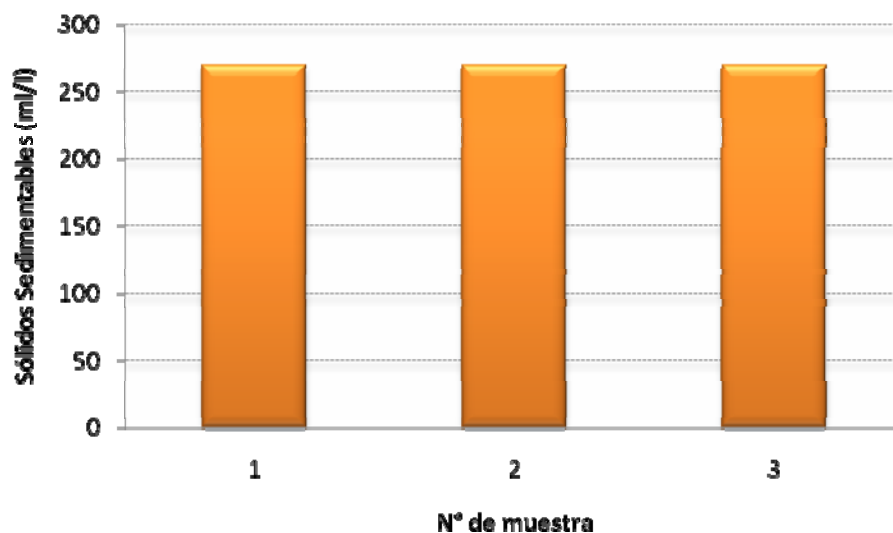


Figura 31: Valores de Sólidos Sedimentables en el licor de mezcla para el 25% de contenido salino.

Se puede observar que el nivel de Sólidos Sedimentables se mantiene constante y reproducible en el tiempo, con lo cual se puede afirmar que el nivel de biomasa se ha mantenido igual (270 ml/l), pese a los efectos adversos de los contenidos de sal en el afluente al sistema SBR.

La siguiente Tabla muestra los resultados obtenidos al realizar los análisis de Sólidos Totales.

Tabla 4: Valores de Sólidos Totales para el 25% de contenido salino.

% Contenido Salino	Sólidos Totales (mg/l)	Sólidos Totales Fijos (mg/l)	Sólidos Totales Volátiles (mg/l)
25	13203	9749	3454
	13345	9040	4305
	13270	8560	4710

En la Tabla 4, se puede observar que los valores de los Sólidos Totales en promedio tienen un valor de aproximadamente 13.000 mg/l. Al compararlo con el valor promedio de sólidos totales para agua residual sin contenido salino igual a 4.044 mg/l (Azuaje y Muñoz, 2006) se puede deducir que el gran aporte a los sólidos totales proviene de las sales disueltas contenidas en el agua de mar. Los iones disueltos son los que ocasionan las determinaciones tan altas de sólidos totales, lo cual podría ser una fuente de error; sin embargo, los valores de Sólidos Suspendidos Volátiles se mantienen en el orden de 2.500 mg/l, como puede apreciarse en la siguiente Tabla.

Tabla 5: Valores de Sólidos Suspendidos para el 25% de contenido salino.

% Contenido Salino	Sólidos suspendidos totales (mg/l)	Sólidos suspendidos fijos (mg/l)	Sólidos suspendidos volátiles (mg/l)
25	2947	700	2247
	3780	853	2927
	3393	840	2553

En la Tabla 5, puede notarse que los valores siguen estando dentro del rango reportado en la bibliografía para los sistemas SBR (2.000 – 5.000 mg/l), lo cual indica el correcto funcionamiento del sistema, a pesar de los efectos adversos de la sal.

Adicionalmente para esta condición de salinidad, se analizó el contenido de Cloruros en la entrada y salida del sistema, cuyos resultados se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Valores Cloruros para el 25% de contenido salino.

Muestra	Cloruros (mg/l)
Entada	4.600
Salida	4.200

El Cloruro es un componente de preocupación en el agua residual ya que puede tener un impacto en las aplicaciones finales de reutilización del agua residual tratada, debido a que los métodos convencionales de tratamiento de aguas no remueven cloruros de manera significativa.

En el caso de esta evaluación, se observa una elevada presencia de cloruros en la entrada y la salida, debido a que el afluente al sistema es una mezcla de agua residual con muestras de agua de mar.

Habiendo logrado la aclimatación de la biomasa y la estabilización del sistema para los primeros contenidos salinos, se prosigue con los siguientes.

Para los niveles de contenido salino correspondientes a 31% y 39%, se efectuaron tanto análisis de $\text{DBO}_{5,20}$, como análisis de Sólidos Sedimentables.

En la figura 32 se muestra los resultados del análisis de $DBO_{5,20}$ para las entradas y salidas del sistema de cuatro muestras que corresponden al 31% y 39%, contenidos intermedios de salinidad establecidos para aclimatar la biomasa y así alcanzar el siguiente nivel de contenido salino propuesto para la evaluación (50%).

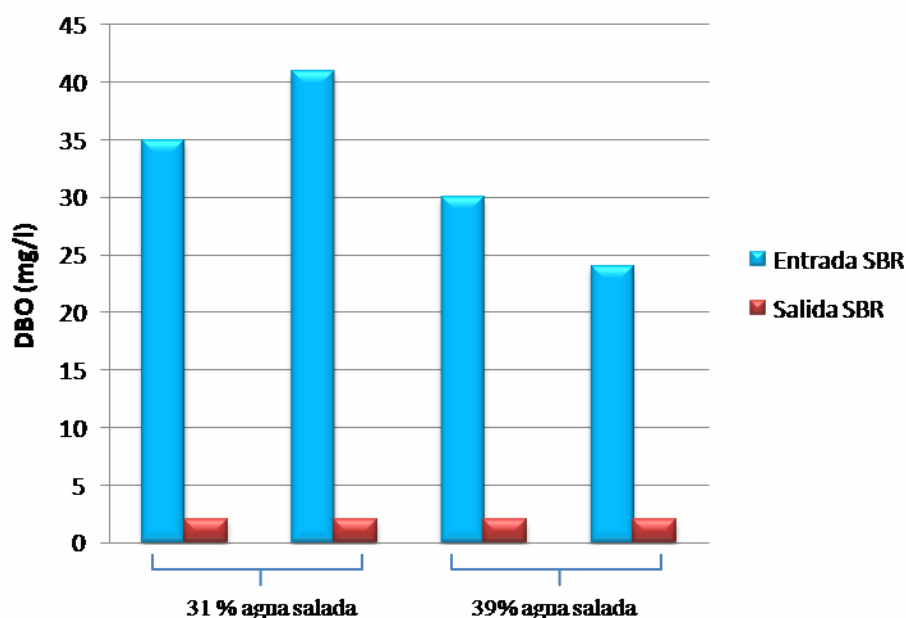


Figura 32: Valores de $DBO_{5,20}$ de los afluentes y efluentes del sistema para el período intermedio de aclimatación.

Se puede apreciar una disminución apreciable de la DBO de entrada en comparación con los contenidos salinos anteriores. Se observa un rango de 35 mg/l a 24 mg/l, lo cual indica que la concentración de materia orgánica biodegradable en el afluente al reactor sigue en continua disminución. Las constantes lluvias son las causantes de este comportamiento, produciendo la dilución y la variabilidad de las concentraciones de la materia orgánica, apartando el hecho de la dilución del afluente con agua de mar. Pese a dicho comportamiento, el sistema sigue respondiendo de manera favorable, logrando la disminución de la carga orgánica a niveles tan bajos como 2 mg/l.

Una vez obtenido los valores de las entradas y salidas, se logra establecer la eficiencia del sistema en términos de $DBO_{5,20}$, obteniendo así los porcentajes de remoción del sistema, para cada nivel de salinidad.

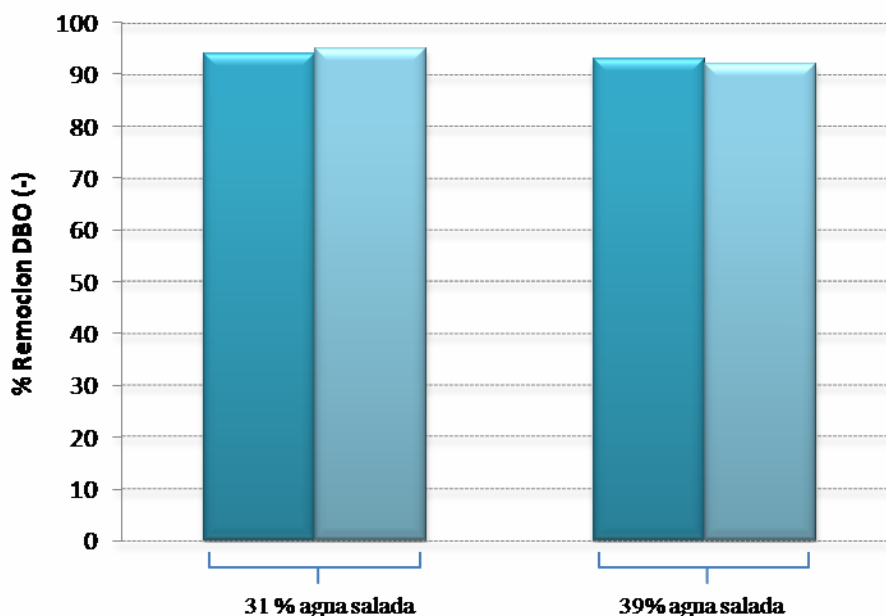


Figura 33: Porcentajes de remoción en función a la $DBO_{5,20}$ para el período intermedio de aclimatación del sistema.

En la figura 33, se observa que para el 31% de contenido salino se mantiene la eficiencia del proceso con un promedio de 95% de remoción de materia orgánica biodegradable en términos de $DBO_{5,20}$. Sin embargo, al aumentar al siguiente nivel de contenido salino, 39%, se aprecia una leve caída en la eficiencia del sistema dando como resultado un promedio de 93% de remoción en términos de $DBO_{5,20}$.

Observando estos resultados y los mostrados en la figura 32, no es fácil deducir, si la baja en la eficiencia del sistema se debe a la disminución de la carga orgánica en el afluente ó al efecto adverso de la salinidad sobre la eficiencia del proceso. Para verificar el estado de la biomasa, se realizaron análisis de Sólidos Sedimentables,

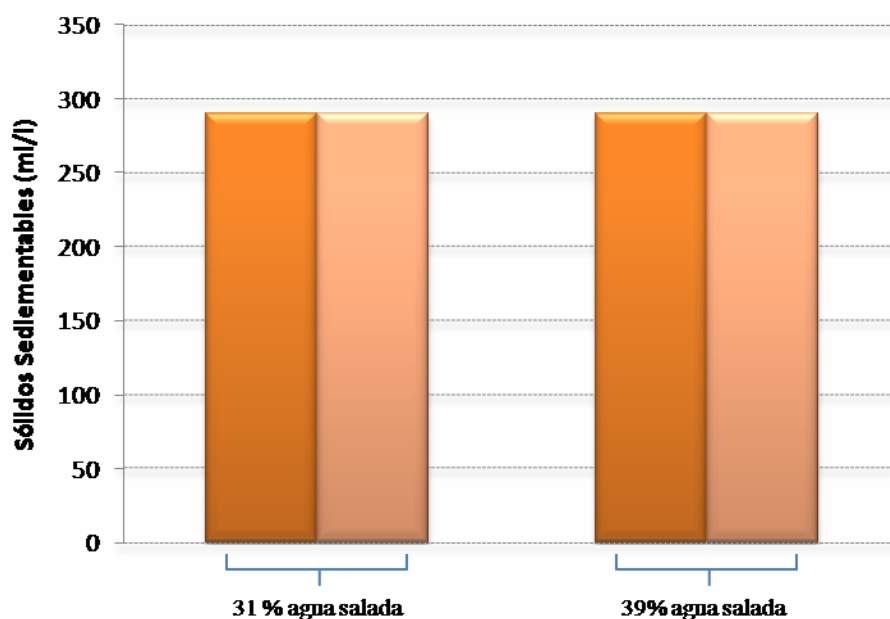


Figura 34: Valores de Sólidos Sedimentables en el licor de mezcla para el período intermedio de aclimatación del sistema.

La Figura 34, evidencia que el comportamiento de la concentración de la biomasa es estable para ambos niveles de salinidad y además se logra apreciar que hubo un crecimiento de la concentración de ésta en el sistema, en comparación con los niveles anteriores. La concentración de Sólidos Sedimentables aumentó de 270 ml/l a 290 ml/l. En este sentido, sería de gran utilidad realizar análisis biológicos para verificar la calidad de los lodos, y comprobar si a pesar de que hay mayor cantidad de microorganismos, estos han sido afectados por la presencia de altas concentraciones de sal, produciendo estrés salino y dando como resultado la inhibición de algunas enzimas, disminución de la actividad celular y eventualmente la plasmólisis.

Se lograría comprobar si la reducción de la eficiencia se debe específicamente a que el consumo de oxígeno es utilizado para sobrevivir más que para la degradación o se debe a la disminución de materia orgánica biodegradable en el afluente al sistema.

Aún así para esta condición, se comprueba la aclimatación de la biomasa y la estabilidad del sistema, pudiendo así continuar con el siguiente nivel de contenido salino propuesto para la evaluación del sistema.

Para el 50% de contenido salino, al igual que para la condición anterior establecida para la evaluación, se realizaron análisis correspondientes a la $DBO_{5,20}$, Sólidos en sus diferentes formas y presencia de Cloruros. Se efectuaron tres muestreos necesarios para la caracterización y de esta forma validar su reproducibilidad.

En la figura 35, se muestra los resultados obtenidos de la $DBO_{5,20}$ de la entrada y salida del sistema expresados en mg/l, para tres muestras que corresponden al 50% de contenido salino.

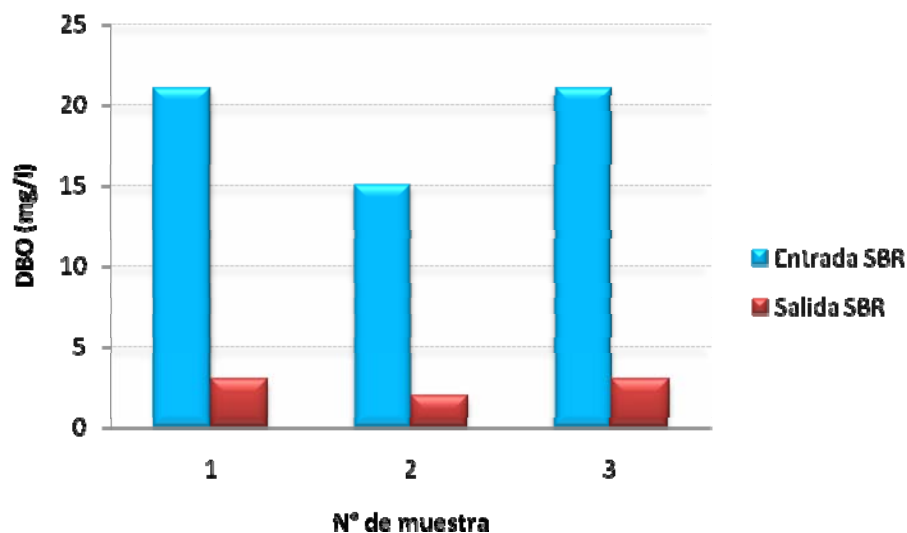


Figura 35: Valores de $DBO_{5,20}$ de los afluentes y efluentes del sistema para el 50% de contenido salino.

Se sigue observando la variabilidad y la disminución de la carga orgánica en el afluente al sistema. Las entradas varían de 21 mg/l a 15 mg/l. Aquí se ve reflejado el marcado efecto de las lluvias que han sido el factor determinante del comportamiento

observado en las concentraciones de materia orgánica biodegradable en la entrada al sistema, conjuntamente con el efecto de la dilución del afluente y el impacto desfavorable de la salinidad sobre los microorganismos, con un contenido de 50% agua residual y 50% agua de mar. No obstante, a pesar del comportamiento descrito anteriormente el sistema continua respondiendo de manera adecuada al presentar concentraciones de DBO en el efluente tratado de aproximadamente 3 mg/l.

Con base en estos valores de entrada y salida se determinó el factor de remoción del sistema, en términos de $DBO_{5,20}$, para el 50% de contenido salino.

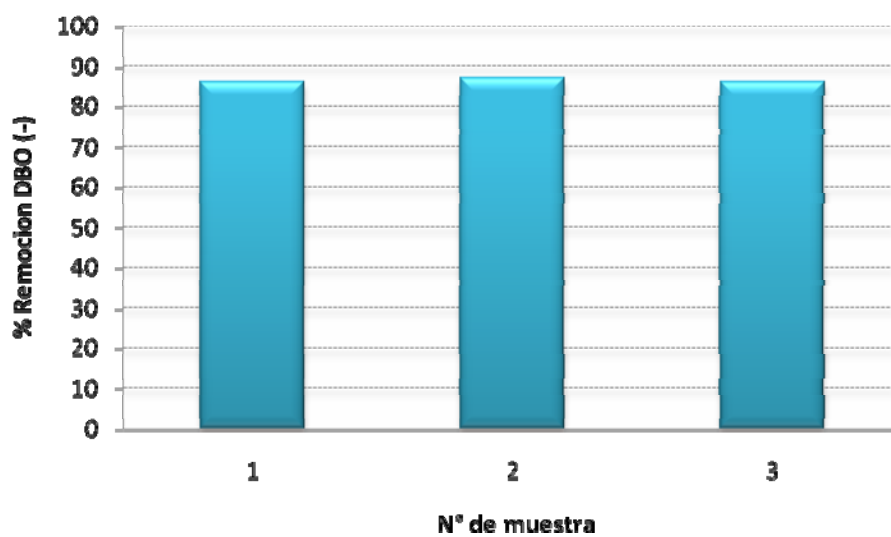


Figura 36: Porcentajes de remoción en función a la $DBO_{5,20}$ para el 50% de contenido salino.

En la figura 36, se puede apreciar una disminución considerable de la eficiencia del sistema. El porcentaje de remoción de $DBO_{5,20}$ es de aproximadamente un 86%. Sin embargo, pese a esta baja en la remoción, el sistema logra estabilizarse, ya que se obtienen resultados más bajos pero reproducibles.

Una vez alcanzado valores estables y reproducibles en términos de $DBO_{5,20}$, se procedió a evaluar los sólidos en sus diferentes formas. La figura 37, muestra el resultado de los análisis de Sólidos Sedimentables para el 50% de contenido salino.

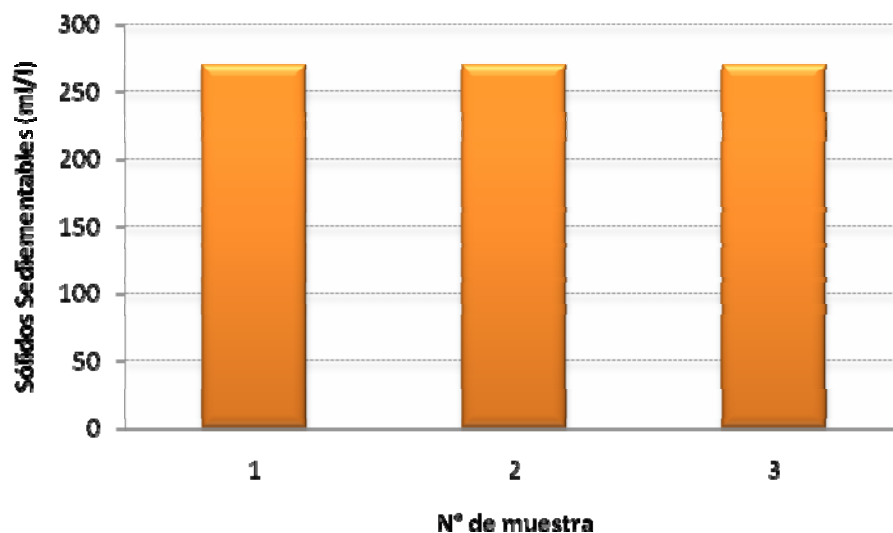


Figura 37: Valores de Sólidos Sedimentables en el licor de mezcla para el 50% de contenido salino.

Se puede observar una ligera disminución en la concentración de la biomasa. El sistema pasó de tener 290 mg/l de sólidos sedimentables en el porcentaje de contenido salino anterior (39%), a tener 270 mg/l para el porcentaje actual de salinidad lo que implica una reducción del 7%. Esto ocurre por el efecto combinado de la dilución del afluente del sistema y la presencia de contenido salino. A pesar de la disminución se observa que el sistema alcanza la estabilidad.

El resultado de los análisis de Sólidos Totales de las muestras correspondientes al 50% de contenido salino puede apreciarse en la Tabla 7.

Tabla 7: Valores de Sólidos Totales para el 50% de contenido salino.

% Contenido Salino	Sólidos totales (mg/l)	Sólidos totales fijos (mg/l)	Sólidos totales volátiles (mg/l)
50	22225	16715	5510
	22915	17245	5670
	22875	17140	5735

Como había de esperarse los valores de Sólidos Totales han aumentado considerablemente en comparación con los valores obtenidos para el 25% de contenido salino (en promedio unos 13.000 mg/l). Como se explicó anteriormente la mayor contribución a los sólidos totales procede de las sales disueltas contenidas en el agua de mar, y como en este nivel de salinidad hay mayor contenido de agua salada (50%) en el afluente al sistema, es lógico que el valor de los sólidos totales haya aumentado, hasta alcanzar un valor promedio de 22.000 mg/l.

La siguiente Tabla muestra los resultados obtenidos al realizar los análisis de Sólidos Suspendidos en el licor de mezcla.

Tabla 8: Valores de Sólidos Suspendidos para el 50% de contenido salino.

% Contenido Salino	Sólidos suspendidos totales (mg/l)	Sólidos suspendidos fijos (mg/l)	Sólidos suspendidos volátiles (mg/l)
50	3220	827	2393
	3793	1187	2607
	3267	920	2347

Como puede apreciarse en la Tabla 8, el valor promedio de Sólidos Sedimentables Volátiles presentes en el licor de mezcla del sistema es de aproximadamente 2.500 mg/l, lo cual implica que el sistema esta funcionando adecuadamente, a pesar de la presencia de contenidos salino. Dicho valor se mantiene dentro del rango establecido en la bibliografía (2.000 – 5.000 mg/l) para los sistemas de reactor biológico secuencial por cargas.

Adicionalmente para esta condición de salinidad, se analizó el contenido de Cloruros en la entrada y salida del sistema.

Tabla 9: Valores Cloruros para el 25% de contenido salino.

Muestra	Cloruros
Entada	9.604
Salida	9.108

La Tabla 9, muestra el incremento de la cantidad de Cloruros presentes en el afluente al sistema, en comparación con el porcentaje anterior (25%). Este comportamiento se debe a la presencia de mayor cantidad de agua de mar en la mezcla.

Además de los análisis de $\text{DBO}_{5,20}$, Sólidos en sus diferentes formas y presencia de Cloruros, se efectuaron análisis de Oxígeno Disuelto, pH y Conductividad para cada uno de los contenidos salinos, de manera tal de completar la caracterización de los afluentes y efluentes del sistema.

La figura 38, muestra las concentraciones de Oxígeno Disuelto en el licor de mezcla correspondientes a cada porcentaje de contenido salino.

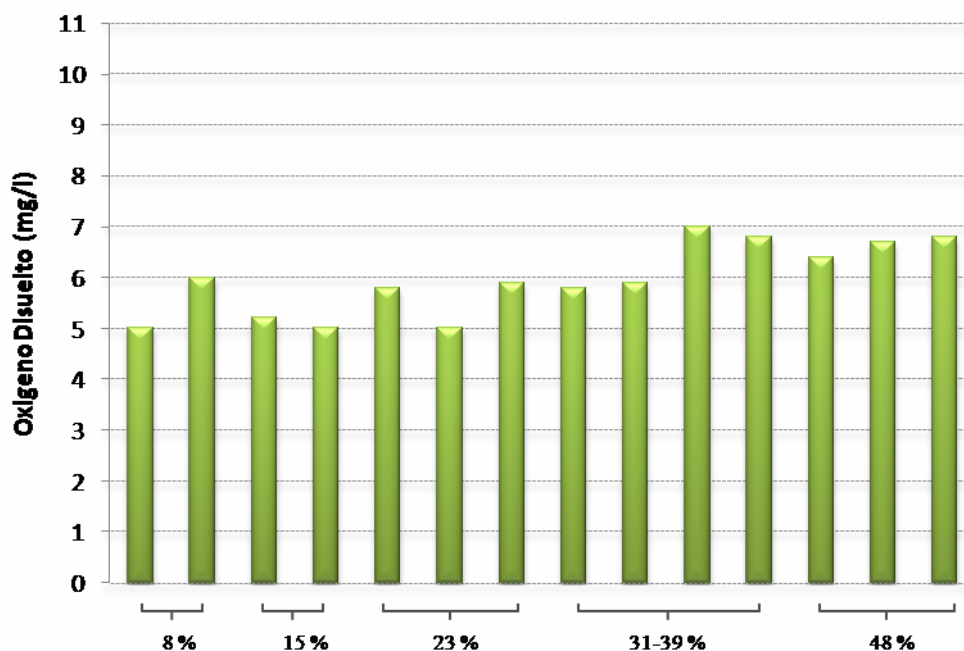


Figura 38: Valores de Oxígeno Disuelto en el licor de mezcla durante la etapa de aclimatación del sistema.

Como se puede observar en la figura, las concentraciones de Oxígeno Disuelto varían en un rango de 5 a 7 mg/l. Se puede apreciar una ligera tendencia al aumento en los valores cuando se tiene mayores contenidos salinos en la mezcla, debido a la dilución del afluente, es decir, a la presencia de menor cantidad de microorganismos. Sin embargo, no hay que perder de vista que el oxígeno disuelto disminuye a medida que aumenta el contenido salino, pero a pesar de esto, el rango de valores obtenidos es suficiente para garantizar condiciones aerobias en el sistema y facilitar el desarrollo de los microorganismos.

Los resultados de las mediciones de pH realizadas para el afluente y efluente del sistema correspondientes a cada nivel de contenido salino y para las muestras de agua de mar recolectadas, son representados en la figura 39.

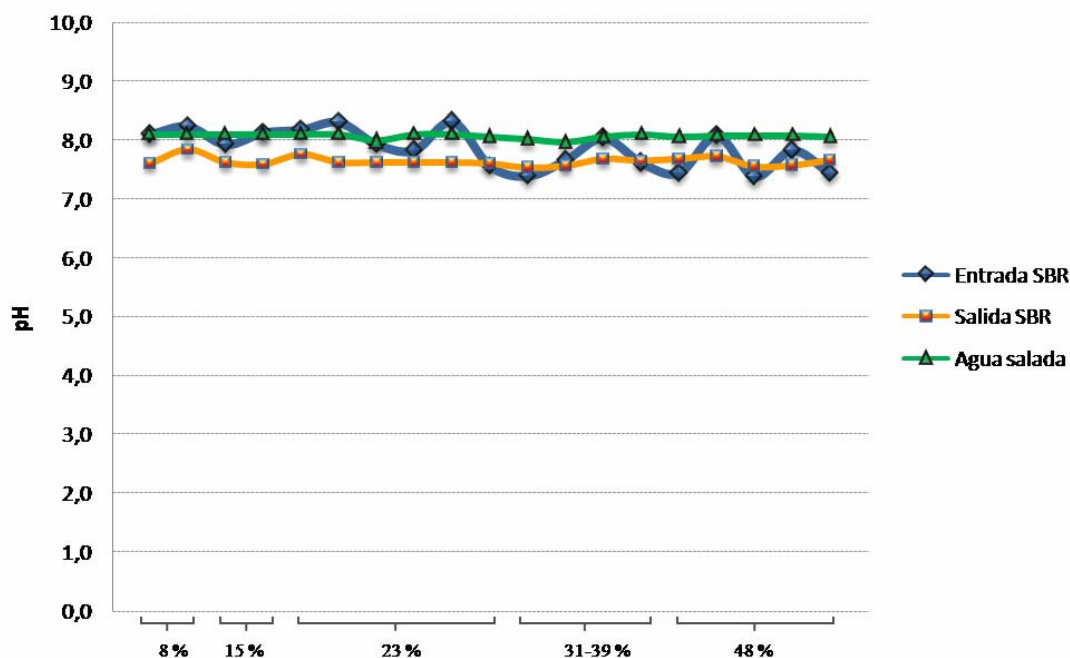


Figura 39: Valores de pH en el licor de mezcla durante la etapa de aclimatación del sistema.

El pH es el medio habitual para expresar la concentración del ión hidrogeno. Representa un importante parámetro de calidad del agua residual. El rango de concentración adecuado para la existencia de la mayoría de las formas de vida biológica es muy estrecho y crítico, típicamente se encuentra entre 6 y 9 mg/l.

Como se puede apreciar en la figura 39, los valores de pH para el afluente y efluente del sistema, correspondientes a cada nivel de contenido salino, y para las muestras de agua de mar recolectadas, se encuentran en un rango entre 7 y 9 mg/l, lo cual garantiza el buen desarrollo de la actividad biológica del sistema.

Finalmente, la figura 40 muestra los resultados de las mediciones de Conductividad realizadas para el afluente y efluente del sistema correspondientes a cada nivel de contenido salino, y para las muestras de agua de mar.

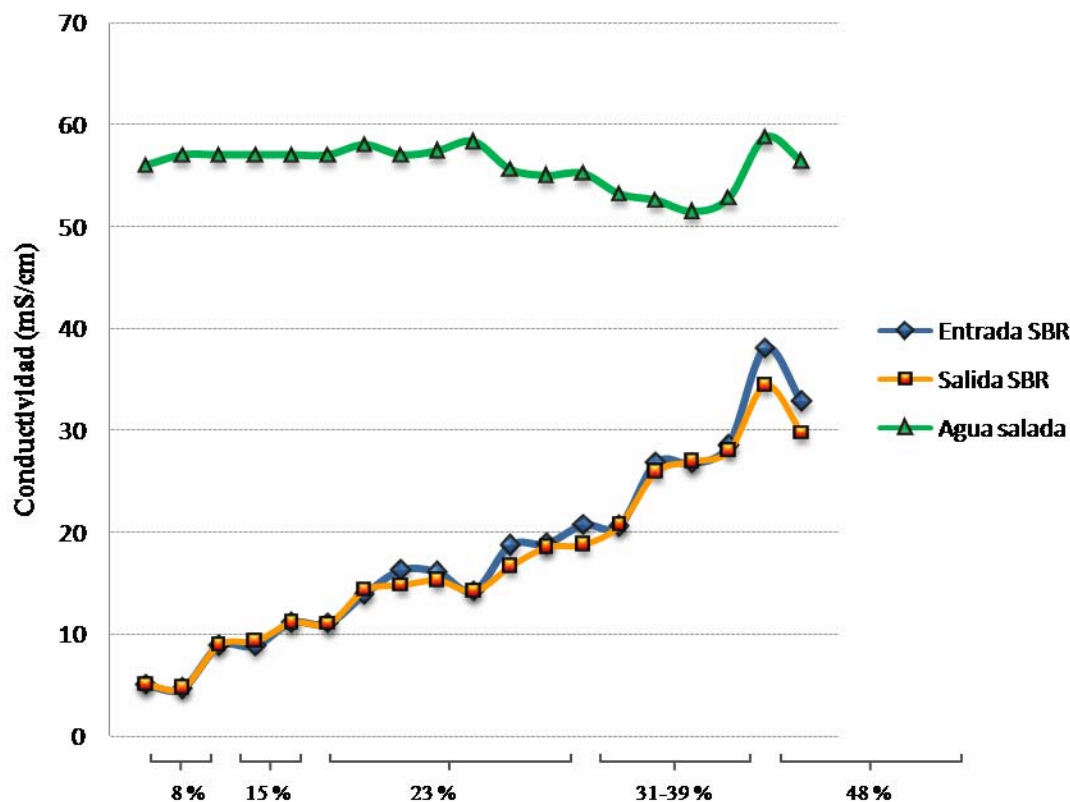


Figura 40: Valores de Conductividad en el licor de mezcla durante la etapa de aclimatación del sistema.

La conductividad eléctrica del agua es una medida de la habilidad de una solución de conducir una corriente eléctrica. Debido a que la corriente eléctrica es transportada por los iones en solución, la conductividad aumenta a medida que la concentración de iones se incrementa.

Es por ello que la conductividad de la mezcla aumenta a medida que se incrementa el porcentaje de agua salada, incluso se puede observar que el comportamiento de la conductividad del agua salada se refleja en el comportamiento de la conductividad de la mezcla, además de esto como punto importante, a medida que se incrementa el nivel salino, la mezcla tiende a presentar la conductividad del agua salada.

La medida de la conductividad sirvió durante el proceso de operación del sistema, para verificar que los porcentajes de agua salada coincidían con el porcentaje que se estuviese trabajando en el momento. Esta relación intrínseca, sirvió por tanto para regular los porcentajes, añadiendo o quitando cierto volumen de agua residual para compensar o retomar el aumento o la pérdida de salinidad.

De esta manera, una vez lograda la aclimatación de la biomasa y la estabilidad del sistema, se realizó la caracterización tanto de afluentes y efluentes, como del licor de mezcla del sistema, para cada condición de salinidad establecida para la evaluación (25% y 50%), con excepción del 75% de contenido salino. Por las razones explicadas anteriormente, no tenía sentido seguir avanzando con contenidos superiores al 50% por lo cual se recomienda la evaluación del sistema en período de sequía.

Optimización de las condiciones de operación del SBR.

La optimización de las condiciones de los sistemas de reacción secuenciales por cargas implican un procedimiento mediante el cual, se consiguen los tiempos óptimos de reacción, de modo que reduciendo o aumentando la etapa de aireación, se puedan obtener efluentes con características deseadas en cuanto a remoción de contaminantes. De este modo se pudiesen tomar dos caminos, el primero, aumentar los tiempos de reacción con el fin de incrementar el tiempo de digestión y por tanto aumentar la remoción de materia orgánica biodegradable, y el segundo, disminuirlo, si se llegase a apreciar que durante el proceso de reacción, existe un punto en el tiempo donde no se empiezan a percibir cambios en la calidad del efluente.

En función a esto, Azuaje y Muñoz (2006), lograron optimizar los tiempos de reacción de modo que se pudiesen obtener valores deseados de remoción (mayores al 90% de $\text{DBO}_{5,20}$) durante el menor tiempo de reacción posible.

Para aplicar este esquema, a las condiciones de esta investigación, se planteó el objetivo de optimizar la operación del reactor para el momento en que este no arrojara resultados esperados en cuanto a remoción, en tal sentido, en el momento que se observase una reducción en la remoción, se debían aumentar los tiempos de reacción, de modo que se permitiera al sistema el tiempo suficiente de digestión para remover la materia orgánica biodegradable requerida. No obstante, durante el desarrollo de la experimentación, se observó una reducción apreciable en la efectividad del reactor justo en el momento en que se llegó al 50% de contenido salino, pero con la salvedad, que esta disminución en la eficiencia, no era causada por el deterioro de la calidad del efluente en términos de $DBO_{5,20}$, ya que esta se mantuvo constante, sino por el bajo contenido de materia orgánica biodegradable en la alimentación del reactor. Es por ello, que la reducción del porcentaje de remoción observada, no fue considerada como un requerimiento para efectuar una optimización y puesta en marcha para unas nuevas condiciones.

Dada estas condiciones, se sugiere, tal como se indicó anteriormente, la realización de la investigación en período de sequía para conseguir mayores concentraciones de materia orgánica biodegradable en el afluente al sistema. Al tener mayor carga orgánica en la entrada, al sistema le sería más difícil degradarla por los efectos adversos de la sal y podría presentar valores de $DBO_{5,20}$ por encima de los establecidos en la norma, por lo cual se debería realizar la optimización del tiempo de operación del sistema, y así obtener valores de $DBO_{5,20}$ en el efluente dentro de los valores normados y el nuevo ciclo óptimo de operación del sistema.

Estudio de la viabilidad del uso de un SBR bajo condiciones de salinidad.

Una vez culminada la caracterización del sistema, se procedió a estudiar la viabilidad de un Sistema de Reactor Secuencial por Cargas para el tratamiento de aguas

residuales con contenido salino producto de actividades domésticas propias de islas e islotes.

Analizando los resultados obtenidos al describir físico-químicamente los afluentes y efluentes del sistema, así como también el licor de mezcla, se busca establecer si se logró con éxito el tratamiento del agua residual, a pesar de los efectos adversos producidos por los contenidos de sal.

La figura 41, muestra el comportamiento de los Sólidos Sedimentables durante todas las fases de operación del sistema.

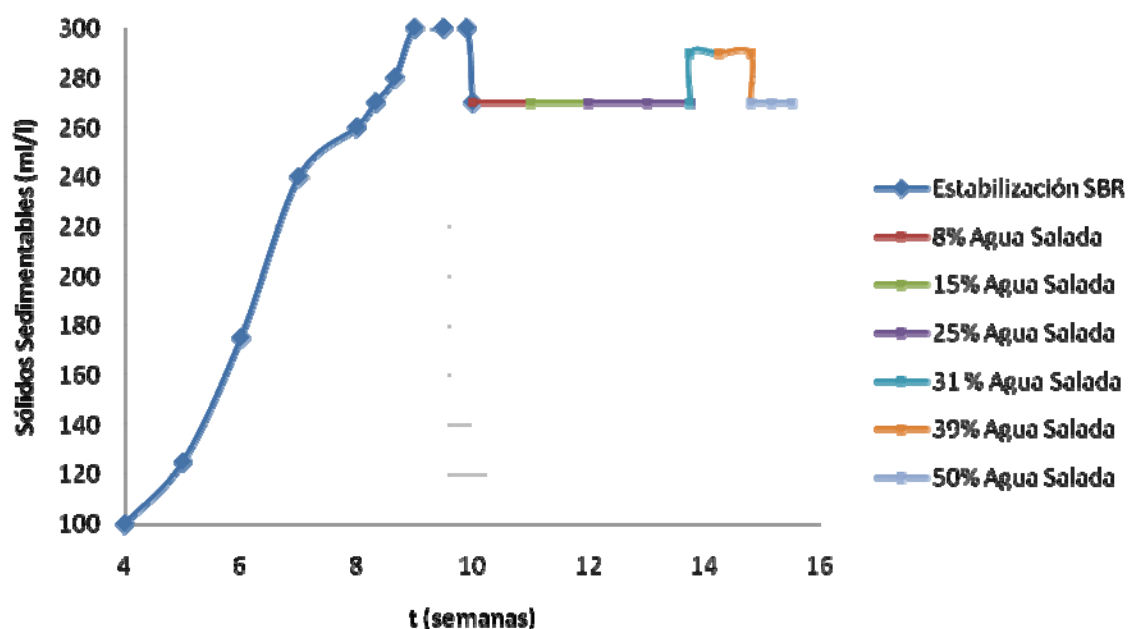


Figura 41: Valores de Sólidos Sedimentables durante las etapas de operación del sistema.

Este parámetro se midió a lo largo de la fase experimental para cuantificar y mantener un control de la concentración de biomasa en el sistema.

En la etapa de estabilización, se pudo observar la generación progresiva de la biomasa a través de cada semana de operación del sistema. La concentración fue incrementándose paulatinamente hasta alcanzar un nivel constante.

En la etapa de aclimatación, se pudo apreciar que al iniciar la adición de los contenidos salinos, la concentración de biomasa disminuyó apreciablemente debido a la pérdida de microorganismos que no toleraron la inclusión de contenidos salinos en el afluente al sistema. Sin embargo, pese a los efectos adversos de la sal, el sistema logra estabilizarse.

Al seguir incrementando el porcentaje de contenido salino en el afluente, el sistema no sólo fue capaz de estabilizarse sino que además logró reanudar el crecimiento de la biomasa.

Cabe destacar, que a lo largo de la etapa de aclimatación, no hubo extracción del lodo activo del sistema, ya que era necesario observar el comportamiento de la concentración de la biomasa, es decir, verificar si estaba creciendo o por lo menos manteniéndose constante.

Al realizar el último incremento de contenido salino, se vuelve a observar una disminución de la concentración de biomasa en el sistema, debida al efecto combinado de la salinidad y la dilución de la carga orgánica del afluente. A pesar de esto, el sistema de nuevo logra adaptarse a esta condición y alcanza la estabilización.

Asimismo, se realizó una comparación entre los Sólidos Suspendidos Volátiles del licor de mezcla del sistema SBR en etapa de funcionamiento estable, con respecto a los Sólidos Suspendidos Volátiles en etapa de aclimatación al contenido salino en 25% y 50% respectivamente, con ayuda de la figura 42.

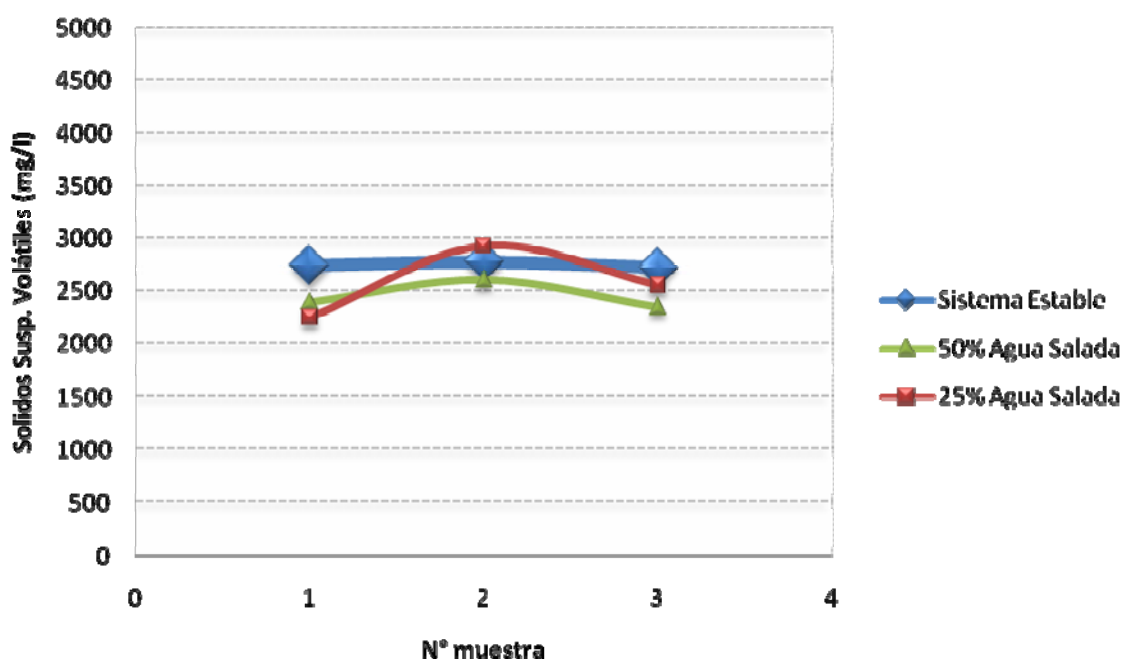


Figura 42: Valores de Sólidos Suspendidos durante las etapas de operación del sistema.

Para el 25% de contenido salino se obtuvo una diferencia porcentual respecto del Sistema operando libre de agua salada de 6%, con un valor de Desviación Estándar de 119 unidades. Por otro lado para el 50% de contenido salino se obtuvo una diferencia porcentual de 11%, con una desviación estándar de 209 unidades.

Estos valores indican en ambos casos una diferencia poco apreciable con respecto al sistema trabajando sin contenido salino, notándose un esperado decremento en la cantidad de Sólidos Suspendidos Volátiles, sobre todo para el 50%. Este efecto de disminución es originado por el grado de dilución y disminución de la carga orgánica del afluente al reactor, ya que los Sólidos Suspendidos Volátiles representan la fracción de sólidos presentes en el agua como material no disuelto, responsable de la remoción del afluente, el cual se ve perturbado por la carencia de materia orgánica biodegradable producto de la dilución, además del ya mencionado efecto adverso de las sales marinas en este tipo de sistemas.

Sin embargo, a pesar de las condiciones desfavorables que afectaron al sistema, los valores de Sólidos Suspendidos Volátiles, como se puede apreciar en la figura, permanecieron dentro de los rangos típicos para los SBR, los cuales comprenden entre 2.000 y 5.000 mg/l (Metcalf y Eddy, 2003).

Para complementar este análisis, se realizó la evaluación de un parámetro adicional: el Índice Volumétrico de Lodos. El IVL es una medida usualmente utilizada para cuantificar las características de sedimentación de los lodos y los resultados se muestran en la figura 43.

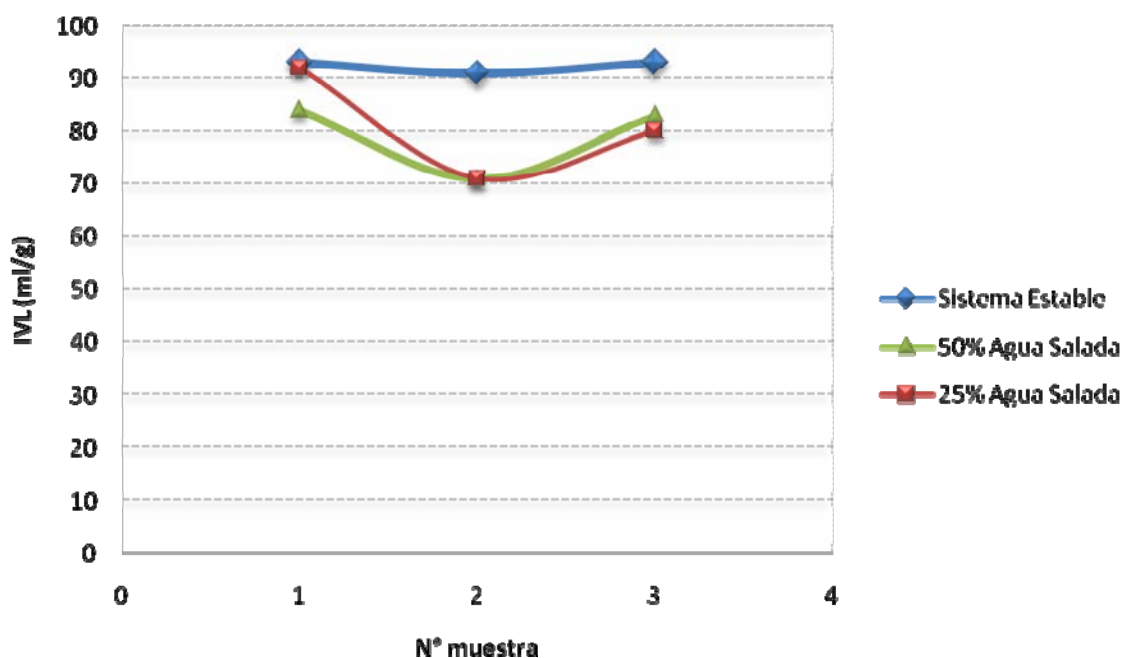


Figura 43: Valores de IVL durante las etapas de operación del sistema.

Un lodo posee buenas características de decantación si posee un valor de IVL por debajo de 100 ml/g (Metcalf y Eddy, 2003) y como puede apreciarse en la figura 43, para esta evaluación el IVL se encuentra en un rango entre 79 y 92 ml/g, lo cual confirma que a pesar del impacto desfavorable de la sal en el sistema, el lodo generado posee buenas características. Sin embargo, como se mencionó

anteriormente, sería importante realizar un estudio biológico del lodo para verificar sus características.

Siguiendo con los análisis, en la siguiente figura se encuentra representado la eficiencia de remoción del sistema en términos de $DBO_{5,20}$, durante las etapas de operación del sistema.

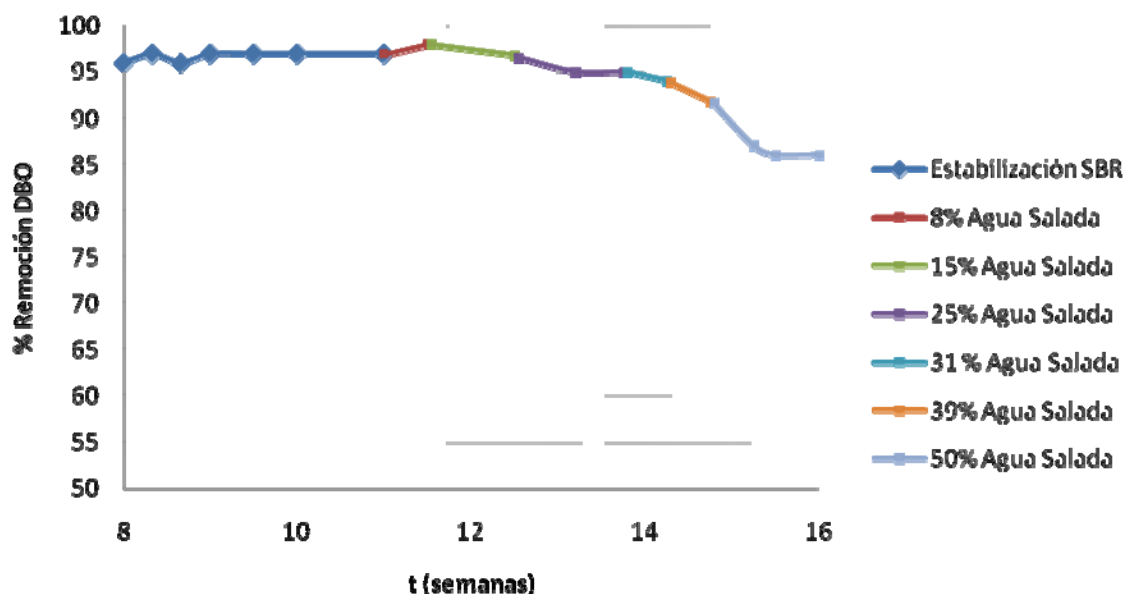


Figura 44: Porcentaje de remoción en función de la $DBO_{5,20}$ durante las etapas de operación del sistema.

En la figura 44, se puede observar que en la fase de estabilización, se obtuvo un factor de remoción promedio de materia orgánica biodegradable igual a 97% y que en la etapa de aclimatación, al inicio de la alimentación de contenido salino, el sistema responde manteniendo el mismo porcentaje de remoción.

No obstante, al continuar incrementando el nivel de salinidad, se logra apreciar la disminución gradual de la eficiencia del proceso, sobretodo en los últimos porcentajes de contenido salino. El sistema disminuye su eficiencia en remoción a 95%, luego a 92% y por último se obtuvo una eficiencia de remoción de la materia orgánica de 86%.

Este comportamiento era de esperarse debido a que como se reportó en el marco referencial, el tratamiento biológico de agua residual salina usualmente resulta en una disminución del rendimiento, por los efectos adversos de la sal sobre la actividad de los microorganismos, fenómeno conocido como plasmólisis, cuyo estudio sería de gran interés.

Sin embargo, pese al impacto desfavorable de la sal en los microorganismos, el sistema logra mantenerse en el rango de eficiencia de remoción de DBO reportado por la EPA para los SBR que generalmente es del 85 al 95 por ciento.

Por lo tanto, se puede decir que una adaptación adecuada de los lodos, hace posible el tratamiento de agua residual salina. El efecto de inhibición de la sal puede ser reducido significativamente después de un apropiado proceso de aclimatación de la biomasa y esto demuestra que los SBR pueden tratar con éxito las aguas residuales con contenido salino.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

- Se logró simular las condiciones de las aguas residuales con contenido salino propias de actividades domésticas provenientes de islas e islotes. Para el 25% de contenido salino se obtuvo un rango de $DBO_{5,20}$ entre 64 y 77 mg/l con una concentración de 4.200 mg/l de Cloruros y para el 50% de contenido salino se obtuvo un rango de $DBO_{5,20}$ entre 15 y 27 mg/l con una concentración de 9.600 mg/l de Cloruros.
- Se logró la generación de la biomasa y la estabilización del sistema, alcanzando valores de remoción en términos $DBO_{5,20}$ y DQO por encima del 90%, ratificando así los resultados obtenidos en el Trabajo Especial de Grado de Azuaje y Muñoz (2006).
- Se logró la adaptación de la biomasa a los contenidos salinos como consecuencia de la aclimatación gradual al sistema, lo cual hizo posible el tratamiento de agua residual salina.
- Se comprueba la viabilidad del uso de los sistemas SBR para el tratamiento de agua residual producto de las actividades domésticas de comunidades establecidas en islas e islotes, obteniendo factores de remoción en términos de $DBO_{5,20}$ de 95% y 86%, para contenidos salinos de 25% y 50% respectivamente.
- Debido al efecto combinado del agua residual por las lluvias y la dilución con agua de mar, no se logró la evaluación del sistema para valores de salinidad mayores de 50%.

- La optimización del sistema se hace innecesaria ya que el sistema respondió eficientemente a las condiciones de dilución y salinidad generadas por la simulación.
- La caracterización de afluentes y efluentes en términos de DQO para el agua residual con contenido salino, no fue posible debido a la interferencia de los Cloruros.

CAPÍTULO VI

RECOMENDACIONES

- Realizar una comparación de los valores de carga orgánica obtenidos con la simulación, con los valores de carga orgánica que se obtendrían al analizar muestras conseguidas directamente de las aguas residuales con contenido salino procedentes de islas e islotes.
- Realizar la evaluación del sistema SBR en período de sequía, para reducir el efecto desfavorable de las lluvias sobre la concentración de materia orgánica biodegradable en el afluente al sistema.
- Realizar análisis biológicos para verificar la calidad de los lodos y comprobar si la reducción de la eficiencia se debe al efecto adverso de sal sobre los microorganismos.
- Utilizar métodos especialmente dirigidos a la determinación de DQO de aguas salobres, para lograr la caracterización de los afluentes y efluentes con contenido salino.
- Por medio de la caracterización a los afluentes y efluentes al SBR, comprobar la remoción de detergentes por parte del sistema, así como de otros parámetros que caracterizan el funcionamiento del sistema.

CAPÍTULO VII

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Artan N., Orhon D. y Tasli R. (2002). Design of SBR system for nutrient removal from wastewater subject to seasonal fluctuations. *Water Science Technology*, 46, 91-98.
2. Azuaje E. y Muñoz R. (2006). Diseño, construcción y evaluación preliminar de un sistema de reactor biológico secuencial a escala. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
3. Biologia.org. [Homepage]. El ecosistema “Fangos Activados”. Consultado el día 1 de abril de 2008 de la World Wide Web:
<http://www.biologia.org/?pid=5000&id=93&page=0>
4. Bretti J. (2002). Sistema de tratamiento SBR. Pontificia Universidad Católica Argentina, Argentina.
5. Enviroment Protection Agency. (1999). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales: Reactores secuenciales por tandas. EPA 832-F-99-073 Washington, D.C.
6. Faculty of Health, Life & Social Sciences. [Homepage]. Sequencing Batch Reactor Plant. Consultado el día 1 de abril de 2008 de la World Wide Web:
www.lifesciences.napier.ac.uk/.../kinneil.htm
7. Intrasingkha N., Keller J. y Blackall L. (1999). Biological nutrient removal efficiency in treatment of saline wastewater. *Water Science Technology*, 39(6), 180-190.

8. Kargi F. y Dincer A.R. (1997). Biological treatment of saline wastewater by fed-batch operation. *Chem. Tech. Biotechnol.*, 69, 167-172.
9. Kargi F. y Dincer A.R. (1999). Salt inhibition effects in biological treatment of saline wastewater in RBC. *Environmental Engineering*, 125(10), 966-971.
10. Lefebvre O., Quentin S., Torrijos M., Godon J.J., Delgenés J.P. y Moletta R. (2007). Impact of increasing NaCl concentrations on the performance and community composition of two anaerobic reactors. *Enviromental Biotechnology*, 75, 61-69.
11. Metcalf y Eddy. (1977). *Tratamiento y depuración de las aguas residuales*. Primera Edición. España: Editorial Labor, S.A.
12. Metcalf y Eddy. (2003). *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse*. Fourth Edition. Mc Graw Hill.
13. Moon B.H., Seo G.T., Lee T.S., Kim S.S. y Yoon C.H. (2003). Effects of salt concentration on floc characteristics and pollutants removal efficiencies in treatment of seafood wastewater by SBR. *Water Science and Technology*, 47, 65-70.
14. Panswad T. y Anan C. (1999) Impact of high chloride wastewater on an anaerobic/anoxic/aerobic process with and without inoculation of chloride acclimates seeds. *Water Science Technology*, 33(5), 1165-1172.
15. Public Works and Government Services Canada. [Homepage]. Community Wastewater Systems. Consultado el día 1 de abril de 2008 de la World Wide Web:
http://www.pwgsc.gc.ca/si/inac/content/diagrams/wastewater_fig10-e.html

16. Rene E.R., Kim S.J. y Park H.S. (2007). Effect of COD/N ratio and salinity on the performance of sequencing batch reactors. *Bioresource Technology*, 2007.01.037.
17. Steve's Place v 6.3. [Homepage]. Water Potential. Consultado el día 1 de abril de 2008 de la World Wide Web:
http://www.steve.gb.com/science/water_potential.html
18. Uygur A, Kargi F. (2004). Salt inhibition on biological nutrient removal from saline wastewater in a sequencing batch reactor. *Enzyme and Microbial Technology*, 34, 313-318.
19. Uygur A. (2006). Specific nutrient removal rates in saline wastewater treatment using sequencing batch reactor. *Process Biochemistry*, 41, 61-66.

CAPÍTULO VIII

APÉNDICES

APÉNDICE A: CÁLCULOS TIPO

Parámetros físico-químicos:• **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_{5,20}):**

$$DBO_{5,20} = \frac{(OD_b - OD_m) \cdot V_{total}}{V_m}$$

Donde:

OD_b: Oxígeno disuelto del blanco finalizado el período de incubación, mg/l.

OD_m: Oxígeno disuelto de la muestra finalizado el período de incubación, mg/l.

V_{total}: Volumen total de la botella de siembra, ml.

V_m: Volumen de la muestra sembrada, ml.

Para el afluente del SBR en la etapa de estabilización, se tiene:

$$DBO_{5,20} = \frac{(6,3 - 3,4) \cdot 300}{7} = 124 \text{ mg / l}$$

• **Porcentaje de agotamiento de oxígeno:**

$$\% \text{Agotamiento } O_2 = \frac{(OD_b - OD_m)}{OD_b} \times 100$$

Donde:

%Agotamiento O₂: Porcentaje de agotamiento de oxígeno en la muestra, %.

Para el afluente del SBR en la etapa de estabilización, se tiene:

$$\%AgotamientoO_2 = \frac{(6,3 - 3,4)}{6,3} \times 100 = 46\%$$

• **Demanda Química de Oxígeno (DQO Micro):**

Se calcula la Absorbancia a través de la Tramitancia:

$$A = -\text{Log}\left(\frac{\%T}{100}\right)$$

Donde:

A: Absorbancia, adimensional.

%T: Porcentaje de Tramitancia, %.

Se calculan los miligramos de O₂ a partir de la ecuación de la recta que ajusta la curva de calibración del Espectrofotómetro:

$$mgO_2 = \frac{A + 0,004}{0,153} =$$

Donde:

mgO₂: Miligramos de O₂, mg.

Se calcula la DQO:

$$DQO = \frac{mgO_2}{V_m}$$

Para el afluente del SBR en la etapa de estabilización, se tiene:

$$A = -\text{Log}\left(\frac{81}{100}\right) = 9,2 * 10^{-2}$$

$$mgO_2 = \frac{9,15 * 10^{-2} + 0,004}{0,153} = 0,62$$

$$DQO = \frac{0,62}{2,5 \times 10^{-3}} = 250 \text{ mg / l}$$

• **Sólidos Totales (T=103 °C):**

$$S_T = \frac{(m_f - m_i)}{V_m} \times 10^6$$

Donde:

S_T : Sólidos totales de la muestra, mg/l.

m_f : Peso final de la cápsula y residuos de la muestra, g.

m_i : Peso inicial de la cápsula, g.

Para el licor de mezcla con 25% de contenido salino, se tiene:

$$S_T = \frac{(66,7647 - 66,4993)}{10} \times 10^6 = 13.270 \text{ mg / l}$$

• **Sólidos Totales Fijos (T=505°C):**

$$S_{TF} = \frac{(m_f - m_i)}{V_m} \times 10^6$$

Donde:

S_{TF} : Sólidos totales fijos de la muestra, mg/l.

Para el licor de mezcla con 25% de contenido salino, se tiene:

$$S_{TF} = \frac{(66,6705 - 66,4993)}{10} \times 10^6 = 8.560 \text{ mg / l}$$

• **Sólidos Totales Volátiles:**

$$S_{TV} = S_T - S_{TF}$$

Donde:

S_{TV} : Sólidos totales volátiles de la muestra, mg/l.

Para el licor de mezcla con 25% de contenido salino, se tiene:

$$S_{TV} = 13.270 - 8560 = 4.710 \text{ mg / l}$$

• **Sólidos No Filtrables Totales o Suspendidos Totales (T=103°C):**

$$S_{ST} = \frac{(m_f - m_i)}{V_m} \times 10^6$$

Donde:

S_{ST} : Sólidos disueltos totales de la muestra, mg/l.

Para el licor de mezcla con 25% de contenido salino, se tiene:

$$S_{ST} = \frac{(1,3789 - 1,3280)}{15} \times 10^6 = 3.393 \text{ mg / l}$$

• **Sólidos No Filtrables Fijos o Suspendidos Fijos (T=550°C):**

$$S_{SF} = \frac{(m_f - m_i)}{V_m} \times 10^6$$

Donde:

S_{SF} : Sólidos disueltos fijos de la muestra, mg/l.

Para el licor de mezcla con 25% de contenido salino, se tiene:

$$S_{SF} = \frac{(1,3406 - 1,3280)}{15} \times 10^6 = 840 \text{ mg / l}$$

• **Sólidos No Filtrables Volátiles o Suspendidos Volátiles:**

$$S_{SV} = S_{ST} - S_{SF}$$

Donde:

S_{SV} : Sólidos disueltos volátiles de la muestra, mg/l.

Para el licor de mezcla con 25% de contenido salino, se tiene:

$$S_{SV} = 3.393 - 840 = 2.553 \text{ mg / l}$$

• **Sólidos Filtrables Totales o Disueltos Totales:**

$$S_{DT} = S_T - S_{ST}$$

Donde:

S_{DT} : Sólidos suspendidos totales de la muestra, mg/l.

Para el licor de mezcla con 25% de contenido salino, se tiene:

$$S_{DT} = 13.270 - 3.393 = 9.877 \text{ mg / l}$$

• **Sólidos Filtrables Fijos o Disueltos Fijos:**

$$S_{DF} = S_{TF} - S_{SF}$$

Donde:

S_{DF} : Sólidos suspendidos fijos de la muestra, mg/l.

Para el licor de mezcla con 25% de contenido salino, se tiene:

$$S_{DF} = 8.560 - 840 = 7.720 \text{ mg / l}$$

• **Sólidos Filtrables Volátiles o Disueltos Volátiles:**

$$S_{DV} = S_{TV} - S_{SV}$$

Donde:

S_{DV} : Sólidos suspendidos volátiles de la muestra, mg/l.

Para el licor de mezcla se tiene:

$$S_{DV} = 4.710 - 2.553 = 2.157 \text{ mg / l}$$

Eficiencia del Proceso:**• Eficiencia del Proceso en términos de DBO_{5,20}:**

$$\% \text{Remoción (DBO}_{5,20}) = \frac{(DBO_o - DBO_e)}{DBO_o} \times 100$$

Donde:

% Remoción (DBO_{5,20}): Porcentaje de Remoción en términos de DBO, %.

DBO_o: DBO_{5,20} de entrada al sistema, mg/l.

DBO_e: DBO_{5,20} de salida al sistema, mg/l.

Para el sistema SBR en la etapa de estabilización, se tiene:

$$\% \text{Remoción (DBO}_{5,20}) = \frac{(119 - 3)}{119} \times 100 = 97\%$$

• Eficiencia del Proceso en términos de DQO:

$$\% \text{Remoción (DQO)} = \frac{(DQO_o - DQO_e)}{DQO_o} \times 100$$

Donde:

% Remoción (DQO): Porcentaje de Remoción en términos de DQO, %.

DQO_o: DQO de entrada al sistema, mg/l.

DQO_e: DQO de salida al sistema, mg/l.

Para el sistema SBR en la etapa de estabilización, se tiene:

$$\% \text{Remoción (DQO)} = \frac{(222 - 17)}{222} \times 100 = 92\%$$

Porcentajes y Tiempos de alimentación de cada componente en la mezcla:**• Altura de operación del tanque de mezclado:**

$$h_t = \frac{n \cdot V_r}{L_t \cdot A_t}$$

Donde:

n: Número de ciclos de operación del SBR diarios, adimensional.

V_r : Volumen de operación del reactor, cm^3 .

L_t : Largo del tanque de mezclado, cm.

A_t : Ancho del tanque de mezclado, cm.

$$h_t = \frac{4 \cdot 36.000}{95 \cdot 52} = 30\text{cm}$$

• Volumen de operación del tanque de mezclado:

$$V_t = L_t \cdot A_t \cdot h_t$$

Donde:

V_t : Volumen de operación del tanque, cm^3 .

$$V_t = 92 \cdot 52 \cdot 30 = 148.000\text{cm}^3 = 148\text{l}$$

• Volumen de alimentación:

*De agua de mar:

$$V_{am} = Q_{am} \cdot t_{am}$$

Donde:

V_{am} : Volumen de alimentación de agua de mar, l.

Q_{am} : Caudal de alimentación de agua de mar, l/min.

t_{am} : tiempo de alimentación, min.

Para el 25% de contenido salino en la mezcla, se tiene:

$$V_{am} = 11,26 \cdot 3 = 34\text{L}$$

*De agua residual:

$$V_{ar} = Q_{ar} \cdot t_{ar}$$

Donde:

V_{ar} : Volumen de alimentación de agua residual, m^3 .

Q_{ar} : Caudal de alimentación de agua residual, m^3/min .

t_{ar} : tiempo de alimentación, min.

Para el 25% de contenido salino en la mezcla, se tiene:

$$V_{ar} = 6,66 \cdot 17 = 113l$$

• **Porcentaje de alimentación:**

*De agua de mar:

$$\%Alimentación_{am} = \frac{V_{am}}{V_t} \times 100$$

Donde:

$\%Alimentación_{am}$: Porcentaje de alimentación de agua de mar en la mezcla.

Para el 25% de contenido salino en la mezcla, se tiene:

$$\%Alimentación_{am} = \frac{34}{148} \times 100 = 23\% \cong 25\%$$

*De agua residual:

$$\%Alimentación_{ar} = \frac{V_{ar}}{V_t} \times 100$$

Donde:

$\%Alimentación_{ar}$: Porcentaje de alimentación de agua residual en la mezcla.

Para el 25% de contenido salino en la mezcla, se tiene:

$$\%Alimentación_{ar} = \frac{113}{148} \times 100 = 75\%$$

Índice Volumétrico de Lodos:

$$IVL = \frac{V_{ss} * 10^3}{V_{sst}}$$

Donde:

IVL: Índice Volumétrico de Lodos, mL/g.

V_{ss} : Volumen de Sólidos Sedimentables, mL/L.

V_{sst} : Volumen de Sólidos Suspendidos Totales, mg/L.

Para el licor de mezcla con 25% de contenido salino, se tiene:

$$IVL = \frac{270 * 10^3}{2947} = 92 \text{ mL} / g$$

APÉNDICE B: ETAPA DE ESTABILIZACIÓN DEL SISTEMA

Tabla 10: DQO de las muestras en la etapa de estabilización.

Fecha	Volumen muestra (ml)	Tramitancia		DQO (mg/l)		% Eficiencia
		Entrada	Salida	Entrada	Salida	
30/07/2008	2,50	88,5	95	149	69	54
06/08/2008	2,50	84	95	208	69	67
13/08/2008	2,50	83	95	222	69	69
21/08/2008	2,50	85	96	195	57	71
27/08/2008	2,50	85	98	174	17	90
28/08/1900	2,50	85	98	195	17	91
30/08/2008	2,50	80	97	264	29	89
01/09/2008	2,50	85	98	195	17	91
03/09/2008	2,50	81	97	250	29	89
04/09/2008	2,50	83	98	222	17	92
05/09/2008	2,50	78	98	293	17	94
17/09/2008	2,50	77	97	307	29	91
18/09/2008	2,50	76	98	322	17	95

Tabla 11: DBO_{5,20} de las muestras en la etapa de estabilización.

Muestra	Volumen muestra (ml)	Blanco (mg/l)	OD (mg/l)	% Agotamiento	DBO _{5,20}	Promedio	% Remoción
Entrada 27/08/2008	1	7,7	6,4	11,7	270	180	96
	3		5,7	20,8	160		
	5		5,2	31,2	144		
	7		5,4	44,2	146		
Salida 27/08/2008	40		6	9,1	5	38	
	50		5,4	11,7	5		
	60		5,5	14,3	6		
	70		4,8	16,9	6		

Tabla 11: DBO_{5,20} de las muestras en la etapa de estabilización. Continuación.

Entrada 28/08/2008	1	7,85	7,4	5,7	135	122	97
	3		6,8	13,4	105		
	5		6	23,6	111		
	7		5	36,3	122		
Salida 28/08/2008	40	7,85	7,8	0,6	0	4	97
	50		7,6	3,2	2		
	60		7,4	5,7	2		
	70		7	10,8	4		
Entrada 30/08/2008	1	7	5	28,6	600	169	95
	3		4,7	32,9	230		
	5		4,4	37,1	156		
	7		4,2	40,0	120		
Salida 30/08/2008	40	7	5,2	25,7	14	8	95
	50		5,2	25,7	11		
	60		5,2	25,7	9		
	70		5,2	25,7	8		
Entrada 03/09/2008	1	6,3	5,7	9,5	180	119	97
	3		5	20,6	130		
	5		4,4	30,2	114		
	7		3,4	46,0	124		
Salida 03/09/2008	40	6,3	5,3	15,9	6	3	97
	50		4,8	23,8	6		
	60		4,6	27,0	5		
	70		4	36,5	3		

Tabla 11: DBO_{5,20} de las muestras en la etapa de estabilización. Continuación.

Entrada 04/09/2008	1	7,45	7,1	4,7	105	88	97
	3		6,8	8,7	65		
	5		6,3	15,4	69		
	7		5,4	27,5	88		
Salida 04/09/2008	40	7,45	6,8	8,7	4	3	97
	50		6,2	16,8	5		
	60		5,9	20,8	5		
	70		5,4	27,5	3		
Entrada 05/09/2008	1	7,4	7,2	2,7	60	81	97
	3		6,8	8,1	60		
	5		6,4	13,5	60		
	7		5,5	25,7	81		
Salida 05/09/2008	40	7,4	6,8	8,1	4	3	97
	50		6	18,9	5		
	60		5,5	25,7	6		
	70		5,4	27,0	3		

Tabla 12: Valores de los parámetros de tiempo y porcentajes para la simulación de aguas residuales con contenido salino

Tiempo de alimentación de agua de mar (min.)	% Agua de mar en la mezcla	Tiempo de alimentación de agua resid. (min.)	% Agua residual en la mezcla
1	8	20	92
2	15	19	85
3	23	17	77
4	31	15	69
5	39	13	61
6	48	11	52
7	54	10	46
8	63	8	37
9	68	7	32
10	77	5	23

Tabla 13: Valores de DBO_{5,20} y cloruros para diferentes porcentajes de agua salada en la mezcla.

% Contenido Salino	DBO (mg/l)	Cloruros (mg/l)
0	81 - 169	60-100
25	64 - 77	4200
50	15 - 21	9604

Tabla 14: Valores de Sólidos Sedimentables del licor de mezclado durante el periodo de estabilización

Semana	Sólidos Sedimentables (ml/l)
4	100
5	125
6	175
7	240
8	270
9	300

Tabla 15: Valores de % de Remoción en DQO durante el periodo de estabilización

Semana	% Remoción DQO
4	54
5	67
6	69
7	71
8	90
9	91

Tabla 16: Valores de promedio de los Sólidos Sedimentables del licor de mezclado durante las últimas semanas del periodo de estabilización.

Semana	Sólidos Sedimentables (ml/l)	Promedio
8	260	270
	270	
	280	
9	300	300
	300	
	300	

Tabla 17: Valores de DBO_{5,20} de afluentes y efluentes al SBR durante las últimas semanas del periodo de estabilización.

Semana	Muestra	DQO (mg/l)
8	Entrada	174
	Salida	17
	Entrada	195
	Salida	17
	Entrada	264
	Salida	29
9	Entrada	195
	Salida	17
	Entrada	250
	Salida	29
	Entrada	222
	Salida	17

Tabla 18: Valores de % de Remoción en DQO durante el periodo de estabilización

Semana	% Remoción DQO	Promedio
8	90	90
	91	
	89	
9	91	91
	89	
	92	

Tabla 19: Valores de DBO_{5,20} para afluentes y efluentes al SBR y porcentajes de Remoción durante las últimas semanas de la estabilización

Semana	Muestra	DBO (mg/l)	% Remoción DBO	Promedio
8	Entrada	145	96	96
	Salida	6		
	Entrada	122	97	
	Salida	4		
	Entrada	169	95	
	Salida	8		
9	Entrada	119	97	97
	Salida	3		
	Entrada	88	97	
	Salida	3		
	Entrada	81	96	
	Salida	3		

Tabla 20: Valores de Sólidos Suspendidos en todas sus formas para las últimas semanas de la estabilización

Semana	Sólidos suspendidos totales (mg/l)	Promedio	Sólidos suspendidos fijos (mg/l)	Promedio	Sólidos suspendidos volátiles (mg/l)	Promedio
8	2930	3250	470	523	2460	2727
	3420		560		2860	
	3400		540		2860	
9	3227	3258	487	513	2740	2744
	3307		533		2773	
	3240		520		2720	

APÉNDICE C: ETAPA DE ACLIMATACIÓN DEL SISTEMA

Tabla 21: Porcentajes volumétricos de contenido de agua salada para las mezclas de afluente al SBR

Semana	% Contenido Salino
11	8
12	15
13	23
14	31 - 39
15	48

Tabla 22: Valores de $DBO_{5,20}$ para efluentes y afluentes de 8% y 15% en contenido salino.

% Contenido Salino	Muestra	DBO (mg/l)
8	Entrada	73
	Salida	3
	Entrada	86
	Salida	2
15	Entrada	55
	Salida	2
	Entrada	69
	Salida	2

Tabla 23: Valores de porcentaje de Remoción en $DBO_{5,20}$ para afluentes de 8% y 15% en contenido salino.

% Contenido Salino	% Remoción DBO	Promedio
8	96	97
	98	
15	96	
	97	

Tabla 24: Valores de Sólidos Sedimentables para afluentes de 8% y 15% en contenido salino.

% Contenido Salino	Sólidos Sedimentables (ml/l)
8	270
	270
15	270
	270

Tabla 25: Valores de $\text{DBO}_{5,20}$ para afluentes de 25% en contenido salino.

% Contenido Salino	Muestra	DBO (mg/l)
25	Entrada	64
	Salida	3
	Entrada	77
	Salida	4
	Entrada	66
	Salida	3

Tabla 26: Valores de porcentaje de Remoción en $\text{DBO}_{5,20}$ para afluentes de 50% en contenido salino.

% Contenido Salino	% Remoción DBO
25	95
	95
	95

Tabla 27: Valores de Sólidos Sedimentables para afluentes de 25% en contenido salino.

% Contenido Salino	Sólidos Sedimentables (ml/l)
25	270
	270
	270

Tabla 28: Valores de Sólidos Totales en todas sus formas para afluentes de 25% en contenido salino.

% Contenido Salino	Sólidos totales (mg/l)	Sólidos totales fijosv(mg/l)	Sólidos totales volátiles (mg/l)
25	13203	9749	3454
	13345	9040	4305
	13270	8560	4710

Tabla 29: Valores de Sólidos Suspendidos en todas sus formas para afluentes de 25% en contenido salino.

% Contenido Salino	Sólidos suspendidos totales (mg/l)	Sólidos suspendidos fijos (mg/l)	Sólidos suspendidos volátiles (mg/l)
25	2947	700	2247
	3780	853	2927
	3393	840	2553

Tabla 30: Valores de Sólidos Disueltos en todas sus formas para afluentes de 25% en contenido salino.

% Contenido Salino	Sólidos disueltos totales (mg/l)	Sólidos disueltos fijos (mg/l)	Sólidos disueltos volátiles (mg/l)
25	10256	9049	1207
	9565	8187	1378
	9877	7720	2157

Tabla 31: Valores de DBO_{5,20} para 31% y 39% en contenido salino.

% Contenido Salino	Muestra	DBO (mg/l)
31	Entrada	35
	Salida	2
	Entrada	41
	Salida	2
39	Entrada	30
	Salida	2
	Entrada	24
	Salida	2

Tabla 32: Valores de porcentaje de Remoción en $DBO_{5,20}$ para afluentes de 31% y 39% en contenido salino.

% Contenido Salino	% Remoción DBO	Promedio
31	94	95
	95	
39	93	93
	92	

Tabla 33: Valores de Sólidos Sedimentables para afluentes de 31% y 39% en contenido salino.

% Contenido Salino	Sólidos Sedimentables (ml/l)
31	290
	290
39	290
	290

Tabla 34: Valores de $DBO_{5,20}$ para 50% en contenido salino.

% Contenido Salino	Muestra	DBO (mg/l)
50	Entrada	21
	Salida	3
	Entrada	15
	Salida	2
	Entrada	21
	Salida	3

Tabla 35: Valores de porcentaje de Remoción en $DBO_{5,20}$ para 50% en contenido salino.

% Contenido Salino	% Remoción DBO
50	86
	87
	86

Tabla 36: Valores de Sólidos Sediementables para 50% en contenido salino.

% Contenido Salino	Sólidos Sediementables (ml/l)
50	270
	270
	270

Tabla 37: Valores de Sólidos Totales en todas sus formas para 50% en contenido salino.

% Contenido Salino	Sólidos totales (mg/l)	Sólidos totales fijos (mg/l)	Sólidos totales volátiles (mg/l)
50	22225	16715	5510
	22915	17245	5670
	22875	17140	5735

Tabla 38: Valores de Sólidos Suspendidos en todas sus formas para 50% en contenido salino.

% Contenido Salino	Sólidos suspendidos totales (mg/l)	Sólidos suspendidos fijos (mg/l)	Sólidos suspendidos volátiles (mg/l)
50	3220	827	2393
	3793	1187	2607
	3267	920	2347

Tabla 39: Valores de Sólidos Disueltos en todas sus formas para 50% en contenido salino.

% Contenido Salino	Sólidos disueltos totales (mg/l)	Sólidos disueltos fijos (mg/l)	Sólidos disueltos volátiles (mg/l)
50	19005	15888	3117
	19122	16058	3063
	19608	16220	3388

Tabla 40: Valores de Oxígeno Disueltos para el parido de aclimatación del sistema.

% Contenido Salino	Oxígeno Disuelto (mg/l)
8	5
	6
15	5,2
	5
25	5,8
	5
	5,9
31	5,8
	5,9
39	7
	6,8
50	6,4
	6,7
	6,8

Tabla 41: Valores de pH y Conductividad para el parido de aclimatación del sistema.

% Agua Salada	pH			Conductividad (ms/cm)		
	Entrada	Salida	Ag. Mar	Entrada	Salida	Ag. Mar
8	8,1	7,6	8,1	5	5	56
	8,2	7,8	8,1	5	5	57
15	7,9	7,6	8,1	9	9	57
	8,1	7,6	8,1	9	9	57
25	8,2	7,8	8,1	11	11	57
	8,3	7,6	8,1	11	11	57
	7,9	7,6	8,0	14	14	58
	7,8	7,6	8,1	16	15	57
	8,3	7,6	8,1	16	15	57
	7,6	7,6	8,1	14	14	58
31	7,4	7,5	8,0	19	17	56
	7,7	7,6	8,0	19	18	55
39	8,0	7,7	8,1	21	19	55
	7,6	7,7	8,1	21	21	53
50	7,4	7,7	8,1	27	26	53
	8,1	7,7	8,1	27	27	52
	7,4	7,6	8,1	29	28	53
	7,8	7,6	8,1	38	34	59
	7,4	7,7	8,1	33	30	56

Tabla 42: Valores de índice volumétrico de lodo del sistema.

Semana	% Contenido Salino	IVL	Promedio
9	0	93	92
		91	
		93	
12	25	92	81
		71	
		80	
15	50	84	79
		71	
		83	

APÉNDICE D: DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO (DFP)

APÉNDICE E: DIAGRAMA DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

APHA: American Public Health Association.

AWWA: American Water Works Association.

DBO: Demanda Biológica de Oxígeno, mg/l.

DQO: Demanda Química de Oxígeno, mg/l.

EPA: Agencia de Protección Ambiental.

F/M: relación alimento a microorganismo, d⁻¹.

IVL: índice de lodos, mg/l.

mgd: millones de galones por día.

MLSS: sólidos suspendidos en el licor mezclado, mg/l.

PETA: Planta Experimental de Tratamiento de Aguas.

PVC: policloruro de vinilo.

SBR: reactor secuencial por cargas.

SST: sólidos suspendidos totales, mg/l.

TRH: tiempo de retención hidráulica, h.