

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

**“EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL
NITRÓGENO TOTAL EN UN REACTOR DHS CON
RECIRCULACIÓN VARIABLE”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO SANITARIO

ELABORADO POR:

JIMY ANGEL TERRONES FLORES

ASESOR:

Ing. OTTO BRUNO ROSASCO GERKES

LIMA - PERÚ

2019

A Dios por iluminar mi camino, a mi madre Priscila y a mi padre Angel por su incalculable amor, por su gran paciencia y por el apoyo que me brindan día a día.

AGRADECIMIENTO

La presente investigación ha sido posible gracias al inmenso apoyo del Centro de Investigación de Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligros (CITRAR-UNI) en especial a la Dra. Rosa Yaya Beas (PhD), a la Ing. Litza Jara Huamanñahui, y a la Srta. Luz Marina.

A mis compañeros Joaquín Rojas Floreano, Jonatan E. Rojas, July Cosme, Ulises Pillaca, Lesli Meléndez, José Carlos Jiménez, Mabys Esperanza, Joshep Salazar, Bianca Reyes, Yerson Lazo, Ruth Paredes, Maira Vargas, así como al Sr. Manuel Romero y Ramses Huaman.

RESUMEN

En la presente investigación se evaluó el comportamiento del nitrógeno total y la carga orgánica en un reactor DHS (Downflow Hanging Sponge) de Sexta Generación alimentado con el efluente del reactor UASB y variando la tasa de recirculación hasta obtener la mayor eficiencia de remoción de carga orgánica, así como la estabilización del nitrógeno. Para poder evaluar dicho sistema de tratamiento se determinaron cuatro periodos de funcionamiento iniciando con el periodo de aclimatación seguido del primer periodo de evaluación, ambos sin recirculación; el segundo, tercer y cuarto periodo de evaluación fueron operados con una tasa de recirculación del 50%, 78% y 100% del caudal tratado por el reactor DHS, respectivamente.

El sistema de tratamiento se desarrolló a escala piloto con una duración de 33 semanas (225 días), operado en condiciones ambientales manteniendo un tiempo de retención hidráulico de 2 horas y un caudal de trabajo de 5.4 L/hora.

El reactor DHS de sexta generación fue construido en base al diseño de un filtro percolador, cuyo medio de soporte fue espuma de poliuretano en forma de cilindros huecos y endurecidos con resina epóxica.

Los resultados obtenidos mostraron que el Sistema DHS de Sexta generación con recirculación variable logró una remoción de 90.89% de DBO₅, 100% de nitrógeno amoniacal (NH₃-N) y 78.68% de nitrógeno total (NT) durante todo el periodo de investigación.

Se determinó que con la tasa de recirculación del 78% se logró una remoción eficiente y equiparable a la tasa del 100% en lo que respecta al nitrógeno amoniacal y DBO₅.

ABSTRACT

The present investigation assessed the behavior of nitrogen and organic load in a DHS reactor (Downflow Hanging Sponge) Sixth Generation fed with the UASB reactor effluent and varying the rate of recirculation to obtain the highest efficiency of removal of organic charge as well as stabilization of nitrogen. In order to evaluate this treatment system, four operating periods were determined starting with the acclimatization period followed by the first assessment period, both without recirculation; the second, third and fourth evaluation period were operated with a recirculation rate of 50%, 78% and 100% of the flow rate treated by the DHS reactor, respectively.

The treatment system was developed on a pilot scale with a duration of 33 weeks, operated under environmental conditions maintaining a hydraulic retention time of 2 hours and a working flow of 5.4 L/hour. The sixth generation DHS reactor was built on a percolator filter, whose medium of support was polyurethane foam in the form of hollow cylinders and hardened with epoxy resin.

The obtained results showed that the sixth generation DHS system with variable recirculation achieved a removal of 90.89% of BOD₅, 100% of ammoniacal nitrogen (NH₃-N) and 78.68% of total nitrogen (NT) during the entire investigation period.

It was determined that the 78% recirculation rate achieved an efficient clearance equivalent to the 100% rate for ammoniacal nitrogen and BOD₅.

INDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
1. CAPITULO I: INFORMACIÓN GENERAL.....	2
1.1. ANTECEDENTES	2
1.2. TECNOLOGÍA DOWNFLOW HANGING SPONGE – DHS	3
1.2.1. Reactor DHS: Esponja Colgante de Flujo Descendente	3
1.2.2. Espuma de Poliuretano	3
1.2.3. Tipos de Reactores DHS	4
1.2.4. Reactor DHS de Sexta Generación (G-06).....	4
1.2.5. Investigaciones.....	5
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
1.4. JUSTIFICACIÓN	7
1.5. OBJETIVOS	8
1.5.1. Objetivo general	8
1.5.2. Objetivos Específicos	8
1.6. HIPÓTESIS	8
1.6.1. Hipótesis General.....	8
1.6.2. Hipótesis Específica	8
2. CAPITULO II: MARCO TEORICO.....	9
2.1. ASPECTOS GENERALES	9
2.2. AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS	9
2.2.1. Características de las aguas residuales domésticas.....	10
2.2.1.1. Características Físicas	11
2.2.1.2. Características Químicas.....	12
2.2.2. Fundamentos de Biología.....	13
2.2.2.1. Fuentes de Carbono.....	13
2.2.2.2. Fuentes de Energía	14
2.2.3. Efectos de la polución por aguas residuales domésticas	14
2.2.4. Tratamiento de las aguas residuales	15
2.3. FILTROS PERCOLADORES.....	17
2.3.1. Introducción.....	17
2.3.2. Proceso de Recirculación en los Filtros Percoladores	18
2.3.3. Eficiencia media de remoción en filtros percoladores para aguas residuales domésticas	18
2.3.4. Ventajas y desventajas de los filtros percoladores.....	19

2.3.4.1.	Ventajas	19
2.3.4.2.	Desventajas.....	19
2.4.	CICLO DE NITRÓGENO	20
2.4.1.	Fases del Ciclo de Nitrógeno.....	20
2.4.2.	Nitrificación.....	21
2.4.2.1.	Factores que afectan a la nitrificación.....	26
2.4.3.	Desnitrificación	27
2.4.3.1.	Desnitrificación Autótrofa.....	30
2.4.3.2.	Desnitrificación Heterótrofa	31
2.4.3.3.	Desnitrificación Autótrofa - Heterótrofa	32
2.4.3.4.	Desnitrificación Autótrofa Aerobia por microorganismo nitrificantes autótrofos	32
2.4.3.5.	Desnitrificación Autótrofa Aerobia por microorganismo nitrificantes heterótrofos	33
2.5.	PROCESOS BIOLÓGICOS DE ELIMINACIÓN DE NITRÓGENO	33
2.5.1.	Nitrificación - Desnitrificación.....	33
2.5.2.	Proceso ANAMMOX.....	33
2.6.	EUTROFIZACION	33
2.6.1.	Causas de la Eutrofización	34
3.	CAPITULO II: MARCO NORMATIVO	35
3.1.	DOCUMENTOS EMITIDOS POR EL GOBIERNO PERUANO	35
3.2.	LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES (LMP) Y ESTANDARES DE CALIDAD AMBIENTAL (ECA).....	35
3.2.1.	Límites máximos Permisibles (LMP).....	35
3.2.2.	Estándares de Calidad Ambiental (ECA)	35
4.	CAPITULO IV: METODOLOGÍA DE TRABAJO	37
4.1.	CONSIDERACIONES GENERALES	37
4.1.1.	Ubicación del Reactor DHS G-06	37
4.1.2.	Descripción General del Prototipo de Investigación.....	37
4.2.	MEDICIONES.....	38
4.2.1.1.	Unidad de Almacenamiento.....	41
4.2.1.2.	Unidad Reguladora de Caudal.....	41
4.2.1.3.	Unidad Eléctrica Reguladora de Giro.....	42
4.2.1.4.	Unidad de Tratamiento Reactor DHS G-06.....	44
4.2.1.5.	Unidad de Sedimentación.....	46

4.2.1.6.	Unidad de Recirculación.....	46
4.2.2.	Etapas de la Investigación.....	48
4.3.	DISEÑO DEL SISTEMA.....	49
4.3.1.	Selección del Material Filtrante.....	49
4.3.1.1.	Porosidad.....	49
4.3.2.	Diseño del Reactor DHS G-06.....	51
4.3.2.1.	Características de las columnas de tratamiento.....	51
4.3.2.2.	Características del Medio Filtrante.....	52
4.3.2.3.	Tiempo de Retención Hidráulico Teórico.....	52
4.3.2.4.	Caudal de diseño del Reactor DHS G-06.....	53
4.3.3.	Instalación y montaje del Reactor DHS G-06.....	53
4.3.4.	Puesta en marcha del Prototipo DHS G-06.....	56
4.3.5.	Plan de Monitoreo.....	56
4.3.5.1.	Parámetros de Medición y Control.....	56
4.3.5.2.	Cronograma de Monitoreo.....	57
4.3.6.	Métodos Analíticos.....	57
4.3.6.1.	Temperatura.....	59
4.3.6.2.	pH.....	59
4.3.6.3.	Turbiedad.....	60
4.3.6.4.	Oxígeno Disuelto (OD).....	60
4.3.6.5.	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅).....	60
4.3.6.6.	Sólidos Suspendidos Totales – Sólidos Fijos Totales.....	60
4.3.6.7.	Nitrógeno Kjeldahl.....	60
4.3.6.8.	Nitrógeno Amoniacal.....	61
4.3.6.9.	Nitritos.....	61
4.3.6.10.	Nitratos.....	61
4.3.7.	Mantenimiento del Reactor DHS G-06.....	62
4.4.	EQUIPOS Y MATERIALES.....	63
4.4.1.	Unidad de Almacenamiento.....	63
4.4.2.	Unidad Reguladora de Caudal.....	63
4.4.3.	Unidad Eléctrica Reguladora de Giro.....	63
4.4.4.	Unidad de Tratamiento Reactor DHS G-06.....	63
4.4.5.	Unidad de Sedimentación.....	64
4.4.6.	Unidad de Recirculación.....	64
4.4.7.	Otros.....	64

5. CAPITULO V: RESULTADOS	65
5.1.1. Temperatura.....	65
5.1.2. pH.....	67
5.1.3. Turbiedad	69
5.1.4. Oxígeno Disuelto (OD)	71
5.1.5. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅).....	73
5.1.6. Sólidos Suspendidos Totales (SST) – Sólidos Suspendidos Fijos (SSF) – Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)	75
5.1.6.1. Punto P-01: Afluente	75
5.1.6.2. Punto P-02: Mezcla	77
5.1.6.3. Punto P-05: Efluente del Reactor DHS G-06	79
5.1.6.4. Punto P-06: Recirculación	81
5.1.7. Nitrógeno Amoniacal (NH ₃ -N).....	83
5.1.8. Nitrógeno Total (NT).....	85
5.1.9. Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK).....	87
5.1.10. Nitritos (NO ₂ ⁻)	89
5.1.11. Nitratos (NO ₃ ⁻)	91
5.1.12. Resumen del Comportamiento del Reactor DHS G-06.....	93
5.1.13. Biomasa en el Reactor DHS G-06.....	94
5.1.13.1. Crecimiento de la Biomasa.....	94
5.1.13.2. Caracterización microbiológica de la Biomasa.....	100
5.1.13.3. Biomasa presente en el sedimentador.....	102
6. CAPITULO VI: DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	104
6.1. PARÁMETROS EVALUADOS.....	104
6.1.1. Temperatura.....	104
6.1.2. pH.....	104
6.1.3. Turbiedad	106
6.1.4. Oxígeno Disuelto	108
6.1.5. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅).....	110
6.1.6. Sólidos Suspendidos Totales (SST)	112
6.1.7. Sólidos Suspendidos Fijos (SSF)	114
6.1.8. Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)	114
6.1.9. Nitrógeno Amoniacal (NH ₃ -N).....	117
6.1.9.1. Primer Periodo de Evaluación	119
6.1.9.2. Segundo Periodo de Evaluación.....	119

6.1.9.3.	Tercer Periodo de Evaluación.....	119
6.1.9.4.	Cuarto Periodo de Evaluación	119
6.1.10.	Nitrógeno Total (NT)	119
6.1.10.1.	Primer Periodo de Evaluación	120
6.1.10.2.	Segundo Periodo de Evaluación.....	120
6.1.10.3.	Tercer Periodo de Evaluación.....	120
6.1.10.4.	Cuarto Periodo de Evaluación	120
6.1.11.	Nitritos (NO_2^-) y Nitratos (NO_3^-)	122
6.1.12.	Relación DBO_5/NTK	122
6.2.	PROCESOS DE NITRIFICACIÓN Y DESNITRIFICACIÓN EN EL REACTOR DHS G-06	124
6.2.1.	Nitrificación.....	124
6.2.2.	Desnitrificación	126
6.2.2.1.	Desnitrificación en la mezcla	126
6.2.2.2.	Desnitrificación en el Reactor DHS G-06.....	126
6.2.2.3.	Desnitrificación en el Sedimentador 02 / Recirculación.....	127
6.3.	Discusión de la eficiencia de remoción de los parámetros evaluados	127
7.	CAPITULO VII: CONCLUSIONES	129
8.	CAPITULO VIII: RECOMENDACIONES	131
9.	CAPITULO IX: BIBLIOGRAFÍA	133
10.	CAPITULO X: ANEXOS.....	139
10.1.	ANEXO 1: CUADROS RESUMEN DE LOS PARÁMETROS ANALIZADOS	139
10.2.	ANEXO 2: PANEL FOTOGRAFICO	152

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 1:	Tipos de espuma marca Zebra	4
Tabla N° 2:	Eficiencia en el tratamiento de la Tecnología DHS de acuerdo a su generación.....	5
Tabla N° 3:	Composición típica del agua residual doméstica	10
Tabla N° 4:	Composición de excrementos y orina humana promedio.....	11
Tabla N° 5:	Clasificación de organismos según fuentes de carbono y energía..	14
Tabla N° 6:	Eficiencia media de remoción en filtros percoladores	19
Tabla N° 7:	Masa Molar de los compuestos (Ec. 2.9).....	24

Tabla N° 8: Masa Molar de los compuestos (Ec. 2.11).....	25
Tabla N° 9: Masa Molar de los compuestos (Ec. 2.12).....	25
Tabla N° 10: Masa Molar de los compuestos (Ec. 2.13).....	26
Tabla N° 11: Relación DBO ₅ /NTK	27
Tabla N° 12: Masa Molar de los compuestos (Ec. 2.15).....	29
Tabla N° 13: Masa Molar de los compuestos (Ec. 2.16).....	29
Tabla N° 14: Masa Molar de los compuestos (Ec. 2.17).....	29
Tabla N° 15: Límites Máximos Permisibles para los Efluentes de PTAR.....	35
Tabla N° 16: Estándares de Calidad Ambiental para Agua, Categoría 3, Riego de Vegetales y Bebidas para Animales - Riego de Vegetales.....	36
Tabla N° 17: Periodos de Evaluación	48
Tabla N° 18: Características físicas de la esponja endurecida	50
Tabla N° 19: Volumen de agua registrado para cada esponja.....	51
Tabla N° 20: Características de las columnas de tratamiento	52
Tabla N° 21: Características del medio filtrante.....	52
Tabla N° 22: Periodos en la Investigación.....	57
Tabla N° 23: Cronograma de Monitoreo.....	58
Tabla N° 24: Mantenimiento del Reactor DHS G-06.....	62
Tabla N° 25: Valores mínimos, máximo y promedios de la Temperatura	65
Tabla N° 26: Valores mínimos, máximo y promedios del pH durante toda la investigación.....	67
Tabla N° 27: Valores mínimos, máximo y promedios de la Turbiedad durante toda la investigación	69
Tabla N° 28: Valores mínimos, máximo y promedios del oxígeno disuelto durante toda la investigación	71
Tabla N° 29: Valores mínimos, máximo y promedios la DBO ₅ durante toda la investigación.....	73
Tabla N° 30: Valores mínimos, máximos y promedios de los Sólidos Suspendidos en el punto P-01	75
Tabla N° 31: Valores mínimos, máximos y promedios de los Sólidos Suspendidos en el punto P-02.....	77
Tabla N° 32: Valores mínimos, máximos y promedios de los Sólidos Suspendidos en el punto P-05.....	79
Tabla N° 33: Valores mínimos, máximos y promedios de los Sólidos Suspendidos en el punto P-06.....	81

Tabla N° 34: Valores mínimos, máximo y promedios del nitrógeno amoniacal durante toda la investigación	83
Tabla N° 35: Valores mínimos, máximo y promedios de nitrógeno total durante toda la investigación	85
Tabla N° 36: Valores mínimos, máximo y promedios de Nitrógeno Total Kjeldahl durante toda la investigación	87
Tabla N° 37: Valores mínimos, máximo y promedios de nitritos durante toda la investigación.....	89
Tabla N° 38: Valores mínimos, máximo y promedios de nitratos durante toda la investigación.....	91
Tabla N° 39: Resumen del comportamiento del Reactor DHS G-06.....	93
Tabla N° 40: Masa de la esponja endurecida (gr.).....	99
Tabla N° 41: Microorganismos probablemente presentes en la biomasa - Reactor DHS.....	101
Tabla N° 42: Sólidos sedimentables.....	103
Tabla N° 43: Valores mínimos, máximos y promedios de la eficiencia de remoción de Turbiedad (%)	108
Tabla N° 44: Valores mínimos, máximos y promedios de la eficiencia de remoción de DBO ₅ (%)	112
Tabla N° 45: Valores mínimos, máximos y promedios de la eficiencia de remoción de SST (%)	112
Tabla N° 46: Valores mínimos, máximos y promedios de la eficiencia de remoción de SSF (%)	114
Tabla N° 47: Valores mínimos, máximos y promedios de la eficiencia de remoción de SSV (%)	114
Tabla N° 48: Valores mínimos, máximos y promedios de la eficiencia de remoción de Nitrógeno Amoniacal NH ₃ (%)	117
Tabla N° 49: Valores mínimos, máximos y promedios de la eficiencia de remoción de Nitrógeno Total (%)	120
Tabla N° 50: Valores mínimos, máximo y promedios de la DBO ₅ /NTK.....	122
Tabla N° 51: Temperatura (°C).....	139
Tabla N° 52: Concentración de pH.....	140
Tabla N° 53: Turbiedad (UNT).....	141
Tabla N° 54: Concentración de Oxígeno Disuelto (mg/L)	142
Tabla N° 55: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅) (mg/L).....	143

Tabla N° 56: Concentración de Nitrógeno Amoniacal (mg/L)	144
Tabla N° 57: Concentración del Nitrógeno Total (mg/L)	145
Tabla N° 58: Concentración de NTK (mg/L)	146
Tabla N° 59: Concentración de Nitritos (mg/L)	147
Tabla N° 60: Concentración de Nitratos (mg/L)	148
Tabla N° 61: Relación de DBO ₅ /NTK	149
Tabla N° 62: Valores representativos de la Nitrógeno Total Kjeldahl en base a los periodos de evaluación	149
Tabla N° 63: Valores representativos de la Temperatura en base a los periodos de evaluación	150
Tabla N° 64: Valores representativos del pH en base a los periodos de evaluación	150
Tabla N° 65: Valores representativos de turbiedad en base a los periodos de evaluación	151
Tabla N° 66: Valores representativos del oxígeno disuelto en base a los periodos de evaluación	151

INDICE DE GRAFICOS

Gráfico N° 1: Temperatura en el Sistema durante todas las semanas de evaluación	66
Gráfico N° 2: pH en el Sistema durante las semanas de evaluación	68
Gráfico N° 3: Turbiedad en el Sistema durante las semanas de evaluación	70
Gráfico N° 4: Oxígeno Disuelto en el Sistema durante las semanas de evaluación	72
Gráfico N° 5: Concentración de la DBO ₅ durante las semanas de evaluación ..	74
Gráfico N° 6: Sólidos Suspendidos Totales en el Punto P-01	76
Gráfico N° 7: Sólidos Suspendidos Totales en el Punto P-02	78
Gráfico N° 8: Sólidos Suspendidos Totales en el Punto P-05	80
Gráfico N° 9: Sólidos Suspendidos Totales en el Punto P-06	82
Gráfico N° 10: Concentración de Nitrógeno Amoniacal NH ₃ (mg/L) durante el proceso de investigación	84
Gráfico N° 11: Concentración de Nitrógeno Total NT (mg/L) durante el proceso de investigación	86
Gráfico N° 12: Concentración de Nitrógeno NTK (mg/L) durante el proceso de investigación	88

Gráfico N° 13: Concentración de Nitritos NO_2^- (mg/L) durante el proceso de investigación.....	90
Gráfico N° 14: Concentración de Nitratos NO_3^- (mg/L) durante el proceso de investigación.....	92
Gráfico N° 15: Masa de la esponja endurecida (gr.)	100
Gráfico N° 16: Concentración de pH vs LMP PTAR.....	105
Gráfico N° 17: Eficiencia de remoción de la Turbiedad (%)	107
Gráfico N° 18: Concentración de Oxígeno Disuelto vs ECA	109
Gráfico N° 19: Valores Semanales de la DBO_5 vs LMP – Eficiencia de Remoción de la DBO_5 (%)	111
Gráfico N° 20: Eficiencia de Remoción de los Sólidos Suspendidos Totales ..	113
Gráfico N° 21: Eficiencia de Remoción de los Sólidos Suspendidos Fijos	115
Gráfico N° 22: Eficiencia de Remoción de los Sólidos Suspendidos Volátiles	116
Gráfico N° 23: Eficiencia de Remoción del Nitrógeno Amoniacal NH_3 (mg/L) .	118
Gráfico N° 24: Eficiencia de Remoción del Nitrógeno Total NT (mg/L)	121
Gráfico N° 25: Relación DBO_5/NTK	123

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Tipos de Reactores DHS de acuerdo al tipo y disposición de la esponja.....	2
Figura N° 2: Forma de la esponja de poliuretano de acuerdo	3
Figura N° 3: Inventario de plantas de tratamiento de AR	15
Figura N° 4: Ciclo del Nitrógeno.....	21
Figura N° 5: Ubicación del Reactor DHS G-06.....	37
Figura N° 6: Esquema del funcionamiento a escala piloto del Reactor DHS Sexta generación con recirculación variable	39
Figura N° 7: Diagrama del Sistema Piloto DHS G-06.....	55

INDICE DE FOTOS

Foto N° 1: Prototipo de investigación - Reactor DHS G-06	40
Foto N° 2: Vista en planta de la Bomba sumergible al interior del tanque de almacenamiento	41
Foto N° 3: Componentes del esquema de válvulas de la Unidad Reguladora de Caudal	42

Foto N° 4: Vista superior 01	43
Foto N° 5: Vista superior 02	43
Foto N° 6: Esquema de la Unidad Eléctrica Reguladora de Giro.....	43
Foto N° 7: Componentes de la Resina Epóxica	44
Foto N° 8: Espuma de Poliuretano endurecidas con Resina Epóxica.....	45
Foto N° 9: Distribución de las esponjas endurecidas dentro de los tubos de acrílico (Módulos)	45
Foto N° 10: Recolección del agua tratada por el reactor DHS.....	46
Foto N° 11: Configuración del Sedimentador 02	47
Foto N° 12: Componentes del esquema de válvulas de la Unidad de Recirculación	48
Foto N° 13: Disposición de las esponjas y forrado del acrílico	54
Foto N° 14: Termohigrometro.....	59
Foto N° 15: Medidor de pH	59
Foto N° 16: Crisoles con filtros de fibra de vidrio en desecador	60
Foto N° 17: Viales de Nitrógeno Amoniacal	61
Foto N° 18: Distribución de las esponjas en el Módulo 01 – Día 20/07/2018.....	94
Foto N° 19: Distribución de las esponjas en el Módulo 02 – Día 20/07/2018.....	94
Foto N° 20: Distribución de las esponjas en el Módulo 03 – Día 20/07/2018.....	94
Foto N° 21: Esponjas en la base del Módulo 01 – Día 12/09/2018.....	95
Foto N° 22: Esponjas en la base del Módulo 03 – Día 12/09/2018.....	95
Foto N° 23: Distribución de las esponjas en el Módulo 01 – Día 05/12/2018.....	96
Foto N° 24: Distribución de las esponjas en el Módulo 02 – Día 05/12/2018.....	96
Foto N° 25: Distribución de las esponjas en el.....	96
Foto N° 26: Distribución de las esponjas en el Módulo 01 y Módulo 02 – Día 15/02/2019.....	97
Foto N° 27: Distribución de las esponjas en el Módulo 03 – Día 15/02/2019.....	97
Foto N° 28: Desmontaje de los módulos – Día 18/02/2019.....	98
Foto N° 29: Módulos al inicio de la investigación.....	99
Foto N° 30: Módulos al finalizar de la investigación	99
Foto N° 31: Sedimentador 01.....	102
Foto N° 32: Sedimentador 02.....	102
Foto N° 33: Preparación de las esponjas con resina epóxica.....	152
Foto N° 34: Baño de resina epóxica a las esponjas blandas.....	152
Foto N° 35: Esponjas Endurecidas	153

Foto N° 36: Acrílico cilíndrico	153
Foto N° 37: Esponjas endurecidas dentro del acrílico	154
Foto N° 38: Turbidímetro.....	154
Foto N° 39: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	155
Foto N° 40: Bomba de aire de 1/3 HP	155
Foto N° 41: Frascos para determinar nitritos y nitratos	155
Foto N° 42: Frascos con muestras – Análisis de Nitratos.....	156
Foto N° 43: Frascos con muestras – Análisis de Nitritos.....	156
Foto N° 44: Frascos con muestras en reposo – Nitritos (01)	156
Foto N° 45: Frascos con muestras en reposo – Nitritos (02).....	157
Foto N° 46: Frascos con muestras en reposo - Nitratos.....	157
Foto N° 47: Monitoreo en el Reactor DHS G-06.....	158
Foto N° 48: Muestra obtenida del Módulo 01	158
Foto N° 49: Prueba de Sólidos con Membranas de Fibra de Vidrio.....	158
Foto N° 50: Prueba de Sólidos Suspendedos Totales (T=105°C)	159
Foto N° 51: Preparación de la muestra – Nitrógeno Total Kjeldahl.....	159
Foto N° 52: Análisis 01 – Nitrógeno Amoniacal.....	160
Foto N° 53: Análisis 02 – Nitrógeno Amoniacal.....	160
Foto N° 54: Análisis 03 – Nitrógeno Amoniacal.....	161
Foto N° 55: Sistema Giratorio Repartidor de Caudal.....	161
Foto N° 56: Lodo adherido a las paredes internas del Sedimentador 02.....	162
Foto N° 57: Esponjas endurecidas en el Módulo 01	162
Foto N° 58: Esponjas endurecidas en el Módulo 03.....	163
Foto N° 59: Desmontaje del Sedimentador 01	163
Foto N° 60: Desmontaje del Módulo 03.....	164
Foto N° 61: Desmontaje de los Módulos 01, 02 y 03.....	164
Foto N° 62: Esponjas del Módulo 02 al finalizar la investigación	165
Foto N° 63: Esponja con biomasa adherida – Final de la investigación.....	165

INTRODUCCIÓN

La presente investigación se centra en el comportamiento de la tecnología denominada Esponjas Colgantes de Flujo Descendente (DHS: “Downflow Hanging Sponge”) como alternativa eficiente en el tratamiento secundario de las aguas residuales con la finalidad de remover materia orgánica y estabilizar el nitrógeno.

La tecnología DHS consta de seis (06) generaciones, las cuales se diferencian una de la otra por la configuración y características físicas de las esponjas (medio de soporte) siendo la primera generación la más investigada en nuestro país a nivel de tesis, sin embargo, para la presente investigación se ha seleccionado la Sexta Generación (DHS G-06).

La investigación, a escala piloto, fue desarrollada en el Centro de Investigación de Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos – CITRAR en la zona Metanogénica, donde se instaló un reactor compuesto por tres módulos en serie de forma vertical en el que se realizaron mediciones diarias de temperatura, pH, oxígeno disuelto, turbiedad y mediciones semanales de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Suspendidos Fijos (SSF), Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV), Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK), Nitrógeno Amoniacal (NH_3), Nitritos (NO_2^-) y Nitratos (NO_3^-).

El montaje del reactor DHS se realizó el 03 de abril del 2018, la puesta en marcha se dio inicio el 05 de julio del 2018 y finalizó el 15 de febrero del 2019 en un periodo de investigación de 33 semanas.

1. CAPITULO I: INFORMACIÓN GENERAL

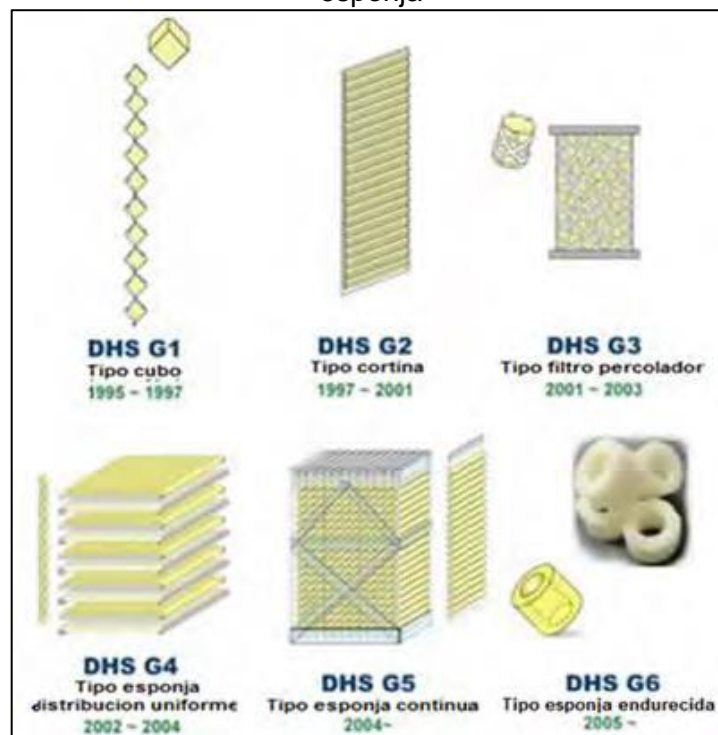
1.1. ANTECEDENTES

El reactor de Esponjas Colgantes de Flujo Descendente (DHS) ha tomado gran relevancia, recientemente, como un proceso viable de post tratamiento al Reactor Anaerobio de Manto de Lodos de Flujo Ascendente (UASB).

Existen diversos estudios a escala piloto de las generaciones del reactor DHS que muestran un tratamiento eficiente del efluente del reactor UASB además de su accesible operación y fácil mantenimiento. (Agrawal et al., 1997; Machdar et al., 2000; Tandukar et al., 2005).

De acuerdo a la data que se tiene actualmente, países en desarrollo tales como Brasil, India, Colombia, Egipto y España han implementado reactores DHS a escala real para el tratamiento de las aguas residuales domésticas. (Uemura y Harada, 2010).

Figura N° 1: Tipos de Reactores DHS de acuerdo al tipo y disposición de la esponja



Fuente: Treatment performance of practical-scale down-flow hanging sponge reactor using sixth-generation sponge media (Tsutomu Okubo, 2016)

Figura N° 2: Forma de la esponja de poliuretano de acuerdo a la generación DHS



Fuente: Treatment performance of practical-scale down-flow hanging sponge reactor using sixth-generation sponge media (Tsutomu Okubo, 2016)

1.2. TECNOLOGÍA DOWNFLOW HANGING SPONGE – DHS

1.2.1. Reactor DHS: Esponja Colgante de Flujo Descendente

Es un sistema de tratamiento análogo al filtro percolador, la diferencia radica en el material de soporte ya que el reactor DHS utiliza de manera exclusiva la espuma de poliuretano (esponjas).

Las esponjas poseen una gran porosidad y gracias a dicha propiedad, se adhiere mayor biomasa. Las bacterias presentes en el proceso de tratamiento degradan los contaminantes orgánicos, nitrogenados y fosforados del desagüe.

1.2.2. Espuma de Poliuretano

Material sintético, duroplástico y reticulado (forma de red). Se forma a partir del petróleo y el azúcar mediante procesos químicos. La reacción exotérmica de ambos componentes (Isocianato y Polioliol) libera gases que van formando burbujas que al enfriarse se genera la porosidad característica de la esponja.

Existen diversas aplicaciones para la espuma de poliuretano; dependiendo de sus características se pueden utilizar a nivel industrial.

Una de las características principales del mencionado material es su bajo costo y ello conlleva una mayor distribución comercial. A continuación, se muestran otras características también relevantes:

- Densidad
- Dureza
- Conductividad térmica

En el Perú, existen varias empresas encargadas de la fabricación y distribución de la espuma de poliuretano. La elección de la esponja se explicará en el desarrollo de la investigación.

Tabla N° 1: Tipos de espuma marca Zebra

Tipo	Densidad	Color
Zebra 300	18 Kg/m ³	Amarillo-Lila
Zebra 400	20 Kg/m ³	Celeste-Lila
Zebra 500	23 Kg/m ³	Oro-Lila
Zebra 560	25 Kg/m ³	Amarillo-Amarillo claro

Fuente: Empresa Zebra.

1.2.3. Tipos de Reactores DHS

Reactor DHS G-01: Tipo Cubo.

Reactor DHS G-02: Tipo Cortina.

Reactor DHS G-03: Tipo Filtro Percolador.

Reactor DHS G-04: Tipo Esponjas Dispuestas.

Reactor DHS G-05: Tipo Esponjas Continuas.

Reactor DHS G-06: Tipo Esponja Endurecida.

1.2.4. Reactor DHS de Sexta Generación (G-06)

La configuración básica del reactor DHS es similar a la del Filtro Percolador. La disimilitud es el material portante: Espuma de poliuretano (esponja) para el reactor DHS mientras que en los filtros percoladores convencionales se usan piedras, gravas, plásticos, etc.

Existen seis (06) generaciones o tipos de Reactor DHS; en todas ellas se usa la espuma de poliuretano como medio de tratamiento sin embargo se diferencian entre sí por el tamaño, forma y disposición de la esponja.

De la primera a la quinta generación (G-01 a G-05) se utiliza la esponja sin ningún tipo de componente químico adicional que cambie sus características físicas a la que se le denomina “esponja de poliuretano blanda”.

En el caso del reactor DHS de sexta generación (G-06) se utiliza una esponja rígida la cual ha sido tratada con resina epóxica. Al ser una esponja endurecida, no es necesario colocar hilos o cualquier otro medio que permita la disposición de la esponja sin deformarse como el caso de las generaciones anteriores. Debido a la ausencia de esos soportes, toda la superficie de la esponja está expuesta a las aguas residuales, mejorando las interacciones entre las aguas residuales, el aire

y la biomasa en la esponja. Por lo tanto, cabe esperar una mayor eficiencia del proceso en el nuevo reactor DHS.

Tabla N° 2: Eficiencia en el tratamiento de la Tecnología DHS de acuerdo a su generación

	DHS					
	G-01	G-02	G-03	G-04	G-05	G-06
Tiempo de Retención Hidráulico (horas)	2.3	2	2.7	2	2.5	2
Remoción DBO (%)	97	96	98	96	95	96
Remoción DQO (%)	94	84	93	93	90	93
Remoción de sólidos suspendidos (%)	98	68	92	93	95	95
Remoción de coliformes termotolerantes (Log 10)	-	2.7	2.6	3.5	4	2.8
Tiempo de retención de sólidos (días)		90 - 100	-	100 - 125	90 - 125	100
Capacidad de la esponja (%)	-	25	38	38	55 - 57	34

Fuente: Exposition "Indian-Japan International Collaboration for an innovative sewage treatment technology with cost-effective and minimum energy requirement" - Hideki Harada.

1.2.5. Investigaciones

De acuerdo con la investigación realizada en CITRAR en el año 2012 por los investigadores Rafael Francois Rojas Ramos y Luis Angel Visurraga Mariño denominada "Tratamiento de Aguas Residuales con Tecnología D.H.S. A Escala Piloto" la cual consistía en evaluar el comportamiento de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) en un periodo de 6 meses se llegó obtener un resultado de 2.66 mg/L en el efluente del sistema en mención.

Los investigadores Hui Ping Chuang y Takashi Yamaguchi (2007), desarrollaron una investigación donde estudiaron el proceso de nitrificación dentro de un reactor DHS de Segunda Generación bajo limitadas condiciones de oxígeno (1.2 ppm de OD) con el fin de remover el nitrógeno de las aguas residuales domésticas.

En esta investigación se realizaron los procesos de oxidación anaeróbica de amonio (proceso anammox) y nitrificación parcial a lo largo de 5 meses. Se encontró una gran dependencia entre la concentración de oxígeno y la concentración de nitritos (NO₂) producidos con respecto al amonio (NH₄⁺-N), siendo ambos parámetros inversamente proporcionales.

Además, se concluyó que la eliminación del nitrógeno amoniacal fue elevada a una concentración muy baja de oxígeno (0.2 ppm de OD).

La investigadora Hui Ping Chuang (2008) elaboró un proyecto en donde se estudió el proceso de nitrificación en el reactor DHS de Primera Generación y su interacción con respecto a los microorganismos anammox. El sistema se operó a lo largo de 10 meses utilizando aguas residuales artificiales y la recirculación del efluente tratado ($r=50\%$) dando como resultado que las bacterias anammox eran más predominantes que las bacterias "Candidatus Kuenenia Stutgartiensis", llegando a una eficiencia de remoción del nitrógeno amoniacal del 95%.

Los investigadores Shigeki Uemura, Akiyoshi Ohashi y Hideki Harada (2013) evaluaron el comportamiento de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y del Nitrógeno en sus diferentes estados (Nitritos, Nitratos, Nitrógeno Amoniacal y Nitrógeno Total Kjeldahl) en un reactor DHS de Sexta Generación a lo largo de 2 años en donde se logró obtener, a la salida del reactor DHS, un resultado promedio de DBO y de Nitrógeno Amoniacal (NH_3) de 12 mg/L y 4.1 mg/L, respectivamente.

Kengo Kubota, Masanobu Takahashi y Hideki Harada (2016) desarrollaron una investigación en la India utilizando esponjas endurecidas como medio de soporte durante un periodo de 390 días conformando tres (03) etapas de operación. La primera etapa se desarrolló los 111 primeros días tratando un caudal de 500 m³/día; en la segunda etapa se elevó el caudal a 1000 m³/día, desde el día 112 hasta el día 317 y, finalmente, en la tercera etapa se disminuyó el caudal a 750 m³/día iniciando el día 318 hasta el día 390. Los valores promedios de DBO₅ y de NH_3 a la salida del reactor durante las tres etapas de operación fueron de 7 mg/L y 6 mg/L, respectivamente. El sistema logró una eficiencia de remoción de DBO₅ del 95% y con respecto al NH_3 llegó hasta un 82%.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente, en nuestro país, el tratamiento de las aguas residuales llega a un 66.4% de acuerdo a la información de SUNASS siendo el tratamiento más predominante el de las lagunas de estabilización debido a su alta eficiencia con

respecto a la remoción de carga orgánica y al proceso de nitrificación, sin embargo, dicho tratamiento necesita un área extensa para poder lograr tales resultados.

A nivel de aguas residuales domésticas, las altas concentraciones de nitrógeno amoniacal (de 40 a 85 mg/L) provocan una disminución del oxígeno disuelto en los cuerpos de agua y, en lo que respecta a consumo humano, la elevada concentración de nitratos conlleva un impacto negativo en la salud pública.

De acuerdo a los resultados obtenidos en las investigaciones mencionadas, la tecnología DHS es un tratamiento que tiene un alto rendimiento en la eliminación de nitrógeno amoniacal y carga orgánica requiriendo una menor área de tratamiento, no obstante, de tales investigaciones sólo una (DHS de primera generación) ha contemplado la recirculación del efluente tratado a una tasa constante mientras que las demás (DHS de la segunda a la sexta) han tratado un afluente a tasa constante o variable pero ambas sin recirculación.

A la fecha, no se cuenta con mayor información acerca del impacto de la recirculación con respecto a la remoción de nutrientes y/o carga orgánica en las diferentes generaciones del reactor DHS.

1.4. JUSTIFICACIÓN

Considerando la importancia de la remoción del nitrógeno amoniacal y la carga orgánica en las aguas residuales, la presente investigación busca determinar el efecto que tiene las diferentes tasas de recirculación con respecto a dichos parámetros en un reactor DHS.

Se ha escogido la Sexta Generación debido a dos motivos fundamentales, el primero se basa en que no se ha desarrollado investigaciones acerca de la recirculación en dicha generación y el segundo motivo es el uso de la esponja endurecida como material de soporte la cual es más resistente a la compresión y a la deformación, que son ventajas en comparación a las generaciones anteriores de DHS pues estas utilizan esponjas sin recubrimiento (esponjas blandas).

Por lo expuesto, la investigación en el Reactor DHS de Sexta generación busca evaluar la eficiencia del tratamiento, así como el impacto que conlleva la recirculación variable en la remoción del nitrógeno amoniacal y carga orgánica.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo general

- Evaluar el comportamiento del Nitrógeno Total y la materia orgánica en un sistema DHS de sexta generación con recirculación variable.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar un esquema piloto de un sistema DHS de sexta generación con recirculación variable utilizando los parámetros básicos de diseño.
- Determinar la remoción DBO_5 en cada periodo de evaluación.
- Evaluar el comportamiento del Nitrógeno Total en cada periodo de evaluación.
- Evaluar el comportamiento del Nitrógeno Amoniacal en cada periodo de evaluación.
- Evaluar el comportamiento del Nitritos en cada periodo de evaluación.
- Evaluar el comportamiento del Nitratos en cada periodo de evaluación.
- Evaluar la eficiencia de remoción de Sólidos Suspendidos Totales, Sólidos Suspendidos Fijos y Sólidos Volátiles en cada periodo de evaluación.

1.6. HIPÓTESIS

1.6.1. Hipótesis General

El aumento de la tasa de recirculación en un Reactor DHS de Sexta Generación producirá una mayor remoción de nitrógeno amoniacal y carga orgánica presentes en las aguas residuales domésticas a tratar.

1.6.2. Hipótesis Específica

La recirculación a una tasa del 100% logrará una remoción mayor al 95% de nitrógeno amoniacal y de DBO_5 siendo dicha tasa la de mejor eficiencia con respecto a las de menor porcentaje.

2. CAPITULO II: MARCO TEORICO

2.1. ASPECTOS GENERALES

La necesidad de tratar las aguas residuales domésticas se centra, fundamentalmente, en la salud pública y la contaminación ambiental en los cuerpos receptores.

Si bien es cierto, los cuerpos de agua tienen la capacidad de autopurificación gracias a microorganismos especializados tales como las algas y bacterias, ello ocurre siempre y cuando no se sobrepase ciertas concentraciones límites de sustancias orgánicas e inorgánicas. Al no exceder dichas concentraciones, los microorganismos especializados pueden descomponer, metabolizar y transformar tales desechos en sustancias más simples como nitritos, nitratos, dióxido de carbono. Las aguas residuales que sobrepasen dichos límites permisibles y sean vertidos a los cuerpos de agua sin tratamiento, generarán un problema de contaminación.

Para poder tratar las aguas residuales de manera óptima (eficiente y económicamente factible) se debe elaborar un estudio completo de las características de dichas aguas así como el caudal a tratar, el tiempo de residencia o de retención de las aguas residuales en el sistema de tratamiento, los parámetros hidráulicos de diseño, el área y ubicación en el cual se proyectará la planta de tratamiento (topografía), las características meteorológicas, uso final de las aguas tratadas y lugar de vertimiento (quebrada seca, ríos).

2.2. AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

Son fuentes contaminantes generadas por la actividad humana las cuales son transportadas mediante un sistema de alcantarillado que parten desde las viviendas, edificios o instituciones.

La composición de las aguas residuales domésticas es única para cada lugar, he ahí la importancia de su caracterización y su respectivo análisis mediante laboratorios certificados y acreditados. Estas aguas están compuestas por una mezcla de componentes físicos, químicos y biológicos; orgánicos e inorgánicos; disueltos y suspendidos.

2.2.1. Características de las aguas residuales domésticas

Las aguas residuales domésticas provienen de las excretas humanas y orina, de tal manera que contribuyen, predominantemente, con la materia orgánica (DBO₅), nitrógeno, sólidos suspendidos y coliformes termotolerantes.

Según Alaerts (1995), la composición del agua residual está determinada por el caudal y por su fuente.

Los constituyentes más importantes de los residuos líquidos confieren al agua residual propiedades físicas, químicas o biológicas indeseables. (Van Haandel y Lettinga, 1994)

Tabla N° 3: Composición típica del agua residual doméstica

Contaminantes	Unidades	Concentración		
		Débil	Media	Fuerte
Sólidos totales (ST)	mg/l	350	720	1200
Disueltos totales (SDT)	mg/l	250	500	850
Fijos	mg/l	145	300	525
Volátiles	mg/l	105	200	325
Sólidos en suspensión (SS)	mg/l	100	220	350
Fijos	mg/l	20	55	75
Volátiles	mg/l	80	165	275
Sólidos sedimentables	mg/l	5	10	20
DBO ₅ a 20°C	mg/l	110	220	400
Carbono orgánico total (COT)	mg/l	80	160	290
DQO	mg/l	250	500	1000
Nitrógeno (total en la forma N)	mg/l	20	40	85
Orgánico	mg/l	8	15	35
Amoníaco libre	mg/l	12	25	50
Nitritos	mg/l	0	0	0
Nitratos	mg/l	0	0	0
Fósforo (total en la forma p)	mg/l	4	8	15
Orgánico	mg/l	1	3	5
Inorgánico	mg/l	3	5	10
Cloruros ^a	mg/l	30	50	100
Sulfato ^a	mg/l	20	30	50
Alcalinidad (comoCaCO3)	mg/l	50	100	200
Grasa	mg/l	50	100	150
Coliformes totales	N°/100ml	106-107	107-108	107-109
Compuestos orgánicos volátiles	mg/l	<100	100-400	>400

^a: Los valores se deben aumentar en la cantidad que estos compuestos se hallen presentes en las aguas de suministro.

Fuente: Metcalf & Eddy (1995).

Si bien dichas aguas tienen características únicas partiendo de su origen, contribución, transporte y tratamiento, existe un rango de valores de los parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en las aguas residuales domésticas.

Tabla N° 4: Composición de excrementos y orina humana promedio

Características	Material Fecal	Orina
Cantidad (humedad) por persona por día	135 - 270 g	1 - 1.3 Kg
Cantidad (seca) por persona por día	35 - 70 g	50 - 70 g
Humedad (%)	66 - 80 g	93 - 96
Materia Orgánica (%)	88 - 97 g	65 - 85
Nitrógeno (%)	5.0 - 7.0	15 - 19
Fósforo (como %P ₂ O ₃)	3.0 - 5.4	2.5 - 5.0
Potasio (como %K ₂ O)	1.0 - 2.5	3.0 - 4.5
Carbón (%)	44 - 55	11.0 - 17.0
Calcio (como %CaO)	4.5	4.5 - 6.0
pH	6.1	5.6 - 6.8
Conductividad (mS/cm)	17.49	8.72 - 26.8
NH ₄ -N (mg/cd)	571	318 - 883
Urea (g/cd)	16..8	11.8 23.8
Nitrógeno total (g/cd)	10.8	7.7 - 15
Fósforo (g/cd)	0.93	0.6 - 1.48
Potasio (g/cd)	2.6	1.38 - 3.52
DQO (g/cd)	12.97	5.37 - 24.02
DBO ₅ (g/cd)	6.06	1.76 - 9.79

Fuente: Tratamiento de Aguas Residuales, Jairo Romero (2008)

2.2.1.1. Características Físicas

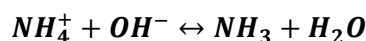
- **Sólidos Sedimentables:** Los sólidos presentes en las aguas residuales crudas permite visualizar de manera subjetiva la calidad de dichas aguas.
- **Temperatura:** Parámetro importante en los procesos biológicos, así como en las reacciones químicas y la vida acuática. La temperatura óptima para el crecimiento bacteriano va de 25 a 35°C.
- **Turbiedad:** Parámetro que indica la calidad del agua residual. Se mide en unidades nefelométricas de turbiedad (UNT).

2.2.1.2. Características Químicas

- pH: Parámetro que indica el grado de acidez o basicidad de las aguas residuales. Si la concentración de pH es menor a 5 y superior a 9, el tratamiento biológico se ve sumamente afectado. (Crites & Tchobanoglous, 2000).
- Oxígeno Disuelto (OD): La determinación del OD es la base del cálculo para la DBO. Todo proceso aerobio requiere una concentración de OD mayor a 0.5 mg/L. (Jairo Romero, 2008).
Su importancia es clave en los procesos de nitrificación y desnitrificación.
- Demanda Bioquímica de Oxígeno: Cantidad de oxígeno requerida por los microorganismos presentes en las aguas residuales para estabilizar la materia orgánica en condiciones aerobias.
- Nitrógeno Total: Comprende al nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos. La información del nitrógeno en sus diferentes formas es requerida para el tratamiento de las aguas residuales; su exceso genera problemas de eutrofización.

$$N_{Total} = N_{orgánico} + N_{amoniacal} + Nitritos + Nitratos$$

- Nitrógeno Orgánico: Es el nitrógeno predominante en las aguas residuales frescas.
- Nitrógeno Amoniacal: Proviene de la descomposición anaerobia del nitrógeno orgánico. Si el pH es superior a 9.3, predomina el amoniaco (NH_3) y para valores menores de 9.3, predomina el ion amonio (NH_4^+). (Jairo Romero, 2008).



- Nitrógeno Total Kjeldahl: Es la suma del nitrógeno orgánico y el nitrógeno amoniacal.

$$N_{Total\ Kjeldahl} = N_{orgánico} + N_{amoniacal}$$

- Nitritos: Se genera a partir de la oxidación del nitrógeno amoniacal mediante las bacterias nitrosomonas. Es altamente tóxico para peces y algunas especies submarinas.
- Nitratos: Es la forma más oxidada del nitrógeno. En concentraciones elevadas en el agua potable, es perjudicial para los niños.

2.2.2. Fundamentos de Biología

El desarrollo de los procesos biológicos para el tratamiento de aguas residuales depende de la dinámica de la utilización del sustrato y del crecimiento microbiano en la película biológica o biofilm. El diseño y la operación efectiva del sistema DHS para el tratamiento de aguas residuales requieren de una comprensión de las interrelaciones biológicas que ocurren y de los principios básicos del desarrollo de microorganismos que se expone a continuación.

Para un desarrollo adecuado, los microorganismos deben tener disponibles fuentes de energía y carbono para la síntesis del nuevo material celular y elementos inorgánicos tales como el nitrógeno y el fósforo, considerados como macronutrientes por requerirse en cantidades abundantes y, micronutrientes como azufre, potasio, calcio, zinc, magnesio, cobre, molibdeno, hierro y cobalto.

Nutrientes orgánicos también pueden ser requeridos para la síntesis de las células. A continuación, se detallan las fuentes de carbono y de energía, conocidos como sustratos y nutrientes que necesitan los diversos tipos de microorganismos en la comunidad biológica.

2.2.2.1. Fuentes de Carbono

Los microorganismos obtienen el carbono para el crecimiento celular a partir de la materia orgánica o del dióxido de carbono. Los microorganismos que usan el carbono orgánico para la formación de nueva biomasa son llamados heterótrofos mientras que los microorganismos que usan el dióxido de carbono son llamados autótrofos. La conversión del dióxido de carbono a compuestos celulares es un proceso de reducción que requiere energía. Por esta razón, los organismos autótrofos emplean mayor cantidad de energía en sus procesos de síntesis que los heterótrofos presentando tasas de crecimiento menores. En el presente estudio se ha encontrado que en el reactor DHS, las bacterias nitrificantes, se

encuentran en mayor presencia en la fase final del tratamiento, donde disminuyen los organismos heterótrofos al bajar la carga orgánica.

2.2.2.2. Fuentes de Energía

La energía requerida para la síntesis celular puede ser tomada de la luz o por reacciones de oxidación química. Aquellos organismos capaces de utilizar la luz como fuente de energía son llamados fotótrofos y los organismos que derivan su energía a partir de reacciones químicas son los quimiótrofos. Estas bacterias pueden oxidar compuestos orgánicos e inorgánicos para obtener energía. En el caso del sistema DHS, este funciona en ausencia de luz para evitar el crecimiento de algas que obstruyan el sistema, por lo tanto, en condiciones óptimas sólo existe presencia de organismos quimiótrofos. Estos organismos pueden ser heterótrofos como los protozoarios y la mayoría de bacterias o autótrofos como las bacterias nitrificantes. Los organismos quimio autótrofos obtienen energía a partir de las reacciones de oxidación de compuestos inorgánicos reducidos tales como el amoníaco, nitrito, hierro ferroso y sulfuros. Los quimioheterotrofos generalmente obtienen energía de la oxidación de compuestos orgánicos.

Tabla N° 5: Clasificación de organismos según fuentes de carbono y energía

Clasificación		Fuentes de Carbono	Fuentes de Energía	Organismo representativo
Heterótrofos	Quimioorganótrofos	Carbono Orgánico	Reacciones orgánicas de oxidación	Bacterias, protozoarios, hongos, animales
	Fotoheterótrofos	Carbono Orgánico	Luz	Bacterias fotosintéticas
Autótrofos	Quimiolitotróficos	CO ₂	Reacciones orgánicas de oxidación	Bacterias
	Fotoautótrofos	CO ₂	Luz	Bacterias fotosintéticas, algas.

Fuente: (Madigan, J.M. Martiniki, & J. Parker, 1997)

2.2.3. Efectos de la polución por aguas residuales domésticas

La polución a diferencia de la contaminación viene a hacer el impacto negativo a un ecosistema de manera drástica y significativa (tóxica) o también llamada de

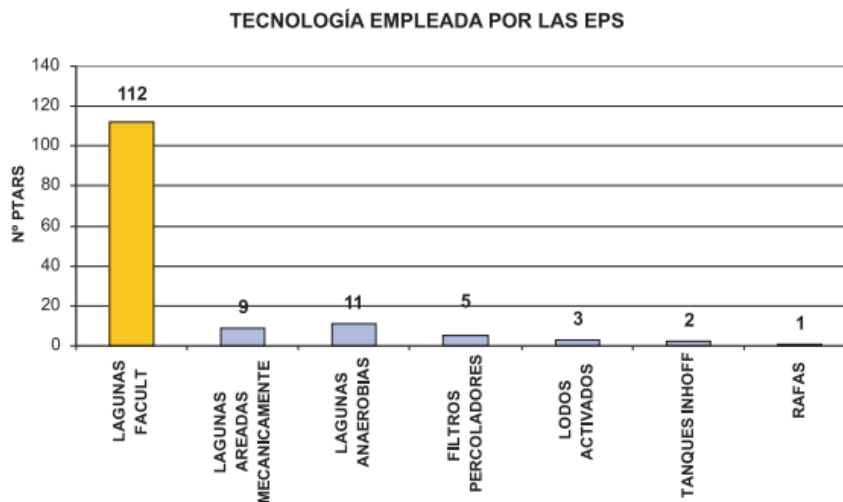
intensidad elevada. Las aguas residuales domésticas generan contaminación a los cuerpos de agua a donde son vertidos siempre y cuando, dichas aguas, tengan características físicas, químicas o biológicas adversas al cuerpo de agua receptor haciendo inaceptable su uso para el fin propuesto.

2.2.4. Tratamiento de las aguas residuales

El objetivo principal del tratamiento de aguas residuales es proteger la salud y promover el bienestar de los individuos miembros de la sociedad. (Jairo Alberto Romero Rojas, 2008).

El cuidado y la prevención de los cuerpos de agua que reciben descargas de agua residual, serán posibles si se consideran técnicas apropiadas de tratamiento que van desde el punto de vista económico financiero y su permanente operación y mantenimiento. Las estadísticas de SUNASS en el año 2007, muestran que las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR's) en las EPS llegan a ser 143 y que, en ellas, predomina ampliamente el tratamiento con lagunas facultativas, seguidas de las lagunas aireadas mecánicamente, lagunas anaerobias, filtros percoladores, lodos activados, tanques Imhoffs y RAFA's. A continuación, se muestra la distribución de PTAR's con respecto a la tecnología de tratamiento.

Figura N° 3: Inventario de plantas de tratamiento de AR



Fuente: Diagnóstico situacional de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en las EPS del Perú y propuestas de solución – SUNASS (2007).

La implementación, construcción y desarrollo de lagunas facultativas en la mayoría de PTAR's en el Perú, puede estar ligado al bajo costo de inversión, a la mínima capacidad de operación y mantenimiento, y a la alta eficiencia por sus

largos periodos de retención que requiere dicho tratamiento. Si bien tiene grandes ventajas también tiene diversas limitaciones como es el caso de la necesidad de un área extensa de terreno para poder construir las, las condiciones meteorológicas y geológicas de la zona.

En muchos casos no se cuenta con un área disponible para poder ejecutar el tratamiento de lagunas facultativas es por tal motivo que se busca otro tipo de tratamiento (aunque con un costo de inversión más elevado) que tenga igual o mayor eficiencia; uno de esos tratamientos son los Filtros Percoladores.

- **Tratamientos Biológicos**

Este tipo de tratamiento aprovecha la actividad biológica de las aguas residuales para remover y transformar sustancias orgánicas biodegradables, coloidales o disueltas. La transformación se da por dos caminos, el de la conversión a gases que finalmente se van a la atmósfera y, en biomasa adherida o suspensión que luego se extraerá mediante sedimentación.

La actividad biológica también abarca la remoción de nutrientes tales como el nitrógeno y fósforo presentes, en gran medida, en las aguas residuales domésticas. (Jairo Romero, 2008).

Dentro del tratamiento biológico existen tres (03) tipos de procesos: Aerobios, Anóxicos y Anaerobios:

- **Proceso Aerobio:** Este proceso se subdivide en dos (02) cuyas características están dadas por el tipo de crecimiento de la biomasa: Suspendida y Adherida.

En el crecimiento suspendido, encontramos a los lodos activados, lagunas aireadas, digestión aerobia, lagunas aerobias y, para el crecimiento adherido, tenemos a los filtros percoladores, las torres biológicas, las unidades rotatorias de contacto biológico (Biodiscos), reactores de lecho fijo. Se caracteriza por la remoción de DBO, por la estabilización y la nitrificación.

- **Proceso Anóxico:** Este proceso también se subdivide en dos (02) cuyas características están dadas por el tipo de crecimiento de la biomasa: Suspendida y Adherida.

Se caracteriza por la remoción de DBO y por el proceso de nitrificación.

- **Proceso Anaerobio:** Este proceso se subdivide en tres (03) cuyas características están dadas por el tipo de crecimiento de la biomasa: Suspendido, Híbrido y Adherido. En este proceso encontramos las lagunas anaerobias, manto de lodos de flujo ascensional (UASB), filtro anaerobio, lecho expandido. Se caracteriza por la remoción de DBO y por la estabilización de la materia orgánica.

Proceso de crecimiento Suspendido: Para que este proceso se lleve a cabo, los microorganismos especializados en tratar el agua residual, se mantienen en suspensión líquida mediante mezcla.

El tipo de tratamiento más usual referido a este proceso es el de lodos activados.

Proceso de crecimiento Adherido: Para este proceso, los microorganismos especializados que intervienen en el tratamiento de las aguas residuales, se unen a un material que permite la adherencia del biofilm.

El material a utilizarse en este tipo de proceso puede encontrarse totalmente o parcialmente sumergido.

Los filtros percoladores son un claro ejemplo donde ocurre el crecimiento adherido. El agua residual se distribuye en el área superior de la estructura escurriendo de forma vertical por el material portante (no sumergido) hasta un depósito que capta el agua residual tratada.

2.3. FILTROS PERCOLADORES

2.3.1. Introducción

Denominado como *lecho de oxidación biológica* debido a que es un proceso en el que el agua residual se pone en contacto con el biofilm o biopelícula adherida a un medio de soporte fijo. Al ser un tratamiento secundario, requiere de un tratamiento primario como el uso de un reactor UASB.

La biopelícula es una capa de microorganismos (principalmente bacterias aerobias) que se alimentan de la materia orgánica biodegradable presente en las aguas residuales.

La reproducción de los microorganismos presentes en la biopelícula adherida se da gracias a la oxidación de la materia orgánica, en condiciones favorables de pH y temperatura, presentes en el agua residual hasta llegar a un equilibrio biológico.

A medida que la película biológica aumenta de espesor, se generan dos fases considerando la superficie del medio de soporte como inicio del crecimiento del biofilm. La materia orgánica adsorbida es utilizada por los microorganismos aerobios de la parte externa (primera fase o fase aerobia) dando como resultado a que se forme un crecimiento endógeno en la parte interna (segunda fase o fase anaerobia) en donde no se tiene el sustrato necesario.

En la segunda fase, el biofilm pierde su capacidad de adherencia al medio y mediante la acción del agua residual que ingresa al filtro este se desprende dándose lugar a un nuevo crecimiento de la capa zoogeal o biopelícula.

2.3.2. Proceso de Recirculación en los Filtros Percoladores

La recirculación no es un proceso indispensable en lo que respecta a los filtros percoladores sin embargo su implementación en este proceso de tratamiento, mejora a la “maduración” y la eficiencia del filtro.

El aumento de la eficiencia de remoción de la DBO_5 debido a la recirculación está dado por los siguientes factores:

- La materia orgánica del efluente recirculado del filtro tiene contacto más de una vez con la biomasa y por ende aumenta la eficiencia de contacto permitiendo sembrar a lo largo de la profundidad del filtro una mayor variedad de microorganismos.
- Este proceso incrementa la eficiencia de tratamiento debido a la reducción de cortocircuitos gracias a un mejor efecto de remojo del filtro además de ello mejora la distribución del caudal a tratar sobre la superficie del filtro.
- Reduce la tendencia al taponamiento entre los medios de soporte.

Si el medio de soporte tiene una porosidad apropiada, la diferencia de temperatura entre el aire y el agua residual provee aspiración natural y una aireación suficiente. El caudal recirculado cumple un rol, importante debido a que diluye el efluente del reactor UASB haciendo que la materia orgánica pueda ser procesada y asimilada con más facilidad por las bacterias presentes en los medios filtrantes.

2.3.3. Eficiencia media de remoción en filtros percoladores para aguas residuales domésticas

La operación y mantenimiento de los filtros percoladores es de vital importancia en la eficiencia del tratamiento ya que puede llegar a producir efluentes con bajas concentraciones de DBO y altamente nitrificados.

A continuación, se muestran valores promedios de remoción:

Tabla N° 6: Eficiencia media de remoción en filtros percoladores

Parámetro	Unidad	Eficiencia
DBO ₅	mg/L	65-85%
Sólidos Totales	mg/L	60-85%
Nitrógeno	mg/L	15-50%
Fósforo	mg/L	8-12%
Coliformes Fecales	NMP/100ml	60-97%

Fuente: Metcalf & Eddy, Inc, 2003

2.3.4. Ventajas y desventajas de los filtros percoladores

2.3.4.1. Ventajas

- Requiere una menor área con respecto a otros sistemas de tratamiento.
- El efluente del filtro percolador se caracteriza por ser de alta calidad.
- El proceso de tratamiento es relativamente sencillo.
- Los filtros de tasa baja tienen la capacidad de auto estabilizarse ante variaciones de carga y concentraciones del afluente.
- Los lodos producidos en los filtros percoladores son estables, bien floculados y de fácil decantación.
- Se puede implementar un tratamiento complementario al filtro percolador para lograr la desnitrificación.
- La biomasa inmovilizada tiene una larga vida, alrededor 5 años.
- El costo de implementación es bajo.

2.3.4.2. Desventajas

- Requiere un tratamiento primario para tener un afluente más clarificado.
- Si el terreno es relativamente o totalmente plano, es necesario un sistema de bombeo para alimentar al filtro percolador.
- Debido al proceso biológico dentro del filtro percolador, se pueden generar olores desagradables.
- Gran probabilidad de desarrollo de vectores como mosquitos sobre todo en climas cálidos.

2.4. CICLO DE NITRÓGENO

En las aguas residuales frescas, encontramos al nitrógeno en forma de proteínas y urea (nitrógeno orgánico) sin embargo, debido a las bacterias presentes en el agua residual lo transforman en nitrógeno amoniacal.

En procesos de tratamiento aireados, el nitrógeno amoniacal se transforma en nitritos y nitratos.

Las algas y otras plantas acuáticas sintetizan las proteínas utilizando los nitratos, pero un exceso de dicho nutriente puede provocar crecimientos desmedido para lo cual se debe remover.

2.4.1. Fases del Ciclo de Nitrógeno

i) Fijación ($N_2 \rightarrow NH_4^+$)

Es el proceso de transformación del nitrógeno molecular (N_2) del aire en NH_4^+ para su asimilación e incorporación a la biomasa.

Los microorganismos que participan en la fijación son del género Azotobacter y Clostridium, las cianobacterias del género Nostoc y Anabeana; y las bacterias simbióticas del del género Rhizobium. (Garzón-Zúñiga, 2005).

ii) Nitrificación ($NH_4^+ \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO_3^-$)

Proceso en donde el ion amonio se transforma a nitritos y luego a nitratos mediante microorganismo especializados.

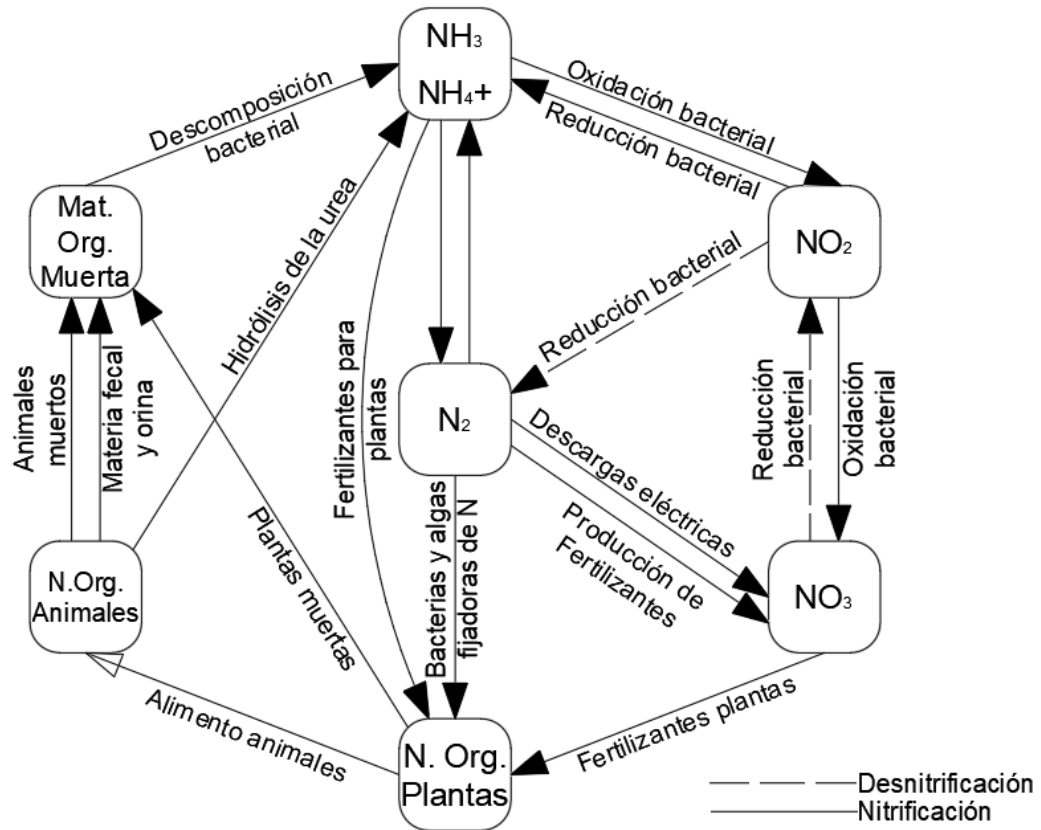
iii) Asimilación (NH_4^+ o $NO_3^- \rightarrow$ Nitrógeno Orgánico)

Proceso en donde las formas inorgánicas del nitrógeno son utilizadas para el crecimiento de los microorganismos. El nitrógeno asimilable más común es el NH_4^+ sin embargo también existen microorganismos capaces de degradar los iones NO_3^- -N.

iv) Amonificación (Nitrógeno Orgánico $\rightarrow NH_4^+$)

Proceso donde se generan formas inorgánicas del nitrógeno a partir de compuestos orgánicos.

Figura N° 4: Ciclo del Nitrógeno



Fuente: Tratamiento de Aguas residuales
(Jairo Alberto Romero Rojas, 2008)

v) Desnitrificación ($\text{NO}_3 \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$)

Se da cuando los nitritos pasan a nitrógeno gaseoso mediante bacterias desnitrificadoras que revierten la acción de las fijadoras de nitrógeno. El proceso se da en condiciones mínimas de oxígeno lo que obliga a los microorganismos a utilizar nitratos en vez del oxígeno para respirar. (Garzón-Zúñiga, 2005).

vi) Anammox ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{N}_2$)

Proceso anóxico en el que algunos microorganismos, en presencia de nitritos, transforman el amonio en nitrógeno gas.

2.4.2. Nitrificación

Es un proceso aerobio en donde se oxida el ion amonio o nitrógeno amoniacal en nitritos y luego los nitritos a nitratos. Los microorganismos especializados en

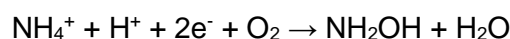
transformar el nitrógeno, pertenecen a la familia Nitrobacteriaceae siendo Gram Negativos.

En cada uno de los procesos participan microorganismos de diferentes géneros. No ha sido posible identificar microorganismos que puedan oxidar, directamente, el ion amonio o nitrógeno amoniacal a nitratos (Prosser, 1989).

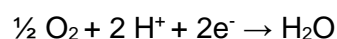
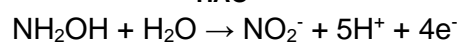
- **Nitrificación ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-$):**

Se realiza por medio de las bacterias del género Nitrosomonas y Nitrosolobus, entre otros. Primero la enzima amonio monooxigenasa (AMO) convierte el ion amonio en hidroxilamina, que posteriormente se transforma en nitrito, mediante la hidroxilamina óxido-reductasa (HAO). (Hooper, T. Vannelli, D. Bergmann & D. Arciero, 1997) (Kroneck, J. Beuerle, & R. W. Schumacher, 1992).

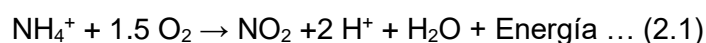
AMO



HAO



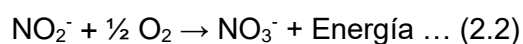
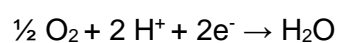
La conversión del nitrógeno amoniacal o ion amonio a nitritos por las Nitrosomonas consume una gran cantidad de oxígeno generando iones hidrógeno lo que produce una disminución del pH (Eckenfelder, 1989). Esta reacción es exotérmica liberando una energía que va de 58 a 84 Kcal por mol de ion amonio.



- **Nitrificación ($\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$):**

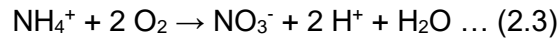
La transformación de nitritos a nitratos se realiza por las bacterias del género Nitrobacter y Nitrosococcus entre otros, mediante la acción del nitrito óxido-reductasa (NOR). (Cervantes-Carrillo, Pérez, & Gomez, 2000).

NOR

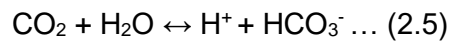
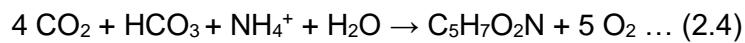


En la reacción (2.2) se libera una energía que va de 15.4 a 20.9 Kcal/mol de nitrito.

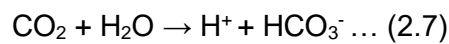
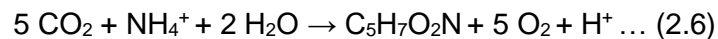
La conversión global de ion amonio a nitrato es:



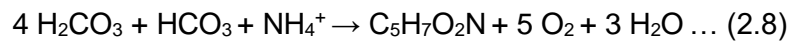
La reacción de síntesis celular de los microorganismos que intervienen en la nitrificación está representada en las siguientes ecuaciones químicas en donde se asume que la biomasa tiene una fórmula química de la forma $\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N}$.



(Ec. 2.4) + (Ec. 2.5):



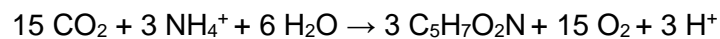
(Ec. 2.4) + (Ec. 2.7):



Las reacciones químicas amonio-nitrito y nitrito-nitrato proporcionan energía para el crecimiento de las bacterias nitrificantes.

La ecuación del crecimiento de nitrosomonas se determina mediante el cálculo estequiométrico de las siguientes ecuaciones:

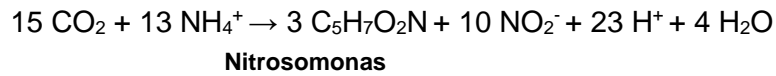
3x(Ec. 2.6):



10x(Ec. 2.1):



3x(Ec. 2.6) + 10x(Ec. 2.1):

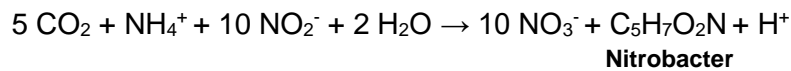


La ecuación del crecimiento de nitrobacter se determina mediante el cálculo estequiométrico de las siguientes ecuaciones:

10x(Ec. 2.2):



10x(Ec. 2.1) + (Ec. 2.6):



La reacción final se da mediante los procesos anabólicos y catabólicos de la nitrificación y se muestra a continuación:

21x(Ec. 2.3) + (Ec. 2.4):



Tabla N° 7: Masa Molar de los compuestos (Ec. 2.9)

Compuesto	Masa Molar (g/mol)	Coefficiente Estequiométrico (N)	Masa Molar Total (g/mol)
CO ₂	12	4	48
N	14	22	308

De acuerdo a la tabla mostrada: CO₂ requerido = 48/308 = 0.16 mg C / mg N.

Se genera 0.16 gramos de carbono inorgánico por cada mg de amonio (NH₄⁺ - N).

Las reacciones químicas descritas hasta el momento, se realizan en medio acuoso.

Los coeficientes estequiométricos de la reacción 2.9 muestran que por cada mol de amonio oxidada (NH₄⁺) en el proceso de nitrificación se consume una gran cantidad de oxígeno y se genera una cantidad considerable de biomasa.

El consumo de CO₂ por parte de los organismos conlleva a una disminución de la forma disuelta del CO₂, ácido carbónico H₂CO₃.

La conversión del ion amonio a nitrito se da mediante la reacción química:



La oxidación global se da mediante:

(Ec. 2.10) + (Ec. 2.2):

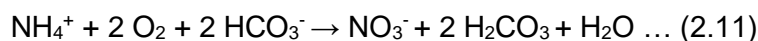


Tabla N° 8: Masa Molar de los compuestos (Ec. 2.11)

Compuesto	Masa Molar (g/mol)	Coefficiente Estequiométrico (N)	Masa Molar Total (g/mol)
O ₂	32	1	32
N	14	1	14
HCO ₃ ⁻	50	2	100

De acuerdo a la tabla mostrada:

$$\text{O}_2 \text{ requerido} = 64/14 = 4.57 \text{ mg O}_2 / \text{mg N.}$$

$$\text{Alcalinidad requerida} = 100/14 = 7.14 \text{ mg Alc - CaCO}_3 / \text{mg N.}$$

Las ecuaciones globales de síntesis – oxidación:

54x(Ec. 2.10) + (Ec. 2.8):

Nitrosomonas

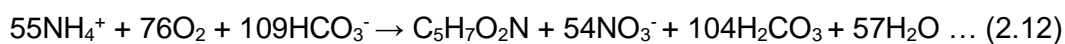


Tabla N° 9: Masa Molar de los compuestos (Ec. 2.12)

Compuesto	Masa Molar (g/mol)	Coefficiente Estequiométrico (N)	Masa Molar Total (g/mol)
O ₂	32	76	2432
N	14	55	770
C ₅ H ₇ O ₂ N	113	1	113

De acuerdo a la tabla mostrada:

$$\text{O}_2 \text{ requerido} = 2432/770 = 3.15 \text{ mg O}_2 / \text{mg N.}$$

$$\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N requerida} = 113/770 = 0.15 \text{ mg C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N} / \text{mg N.}$$

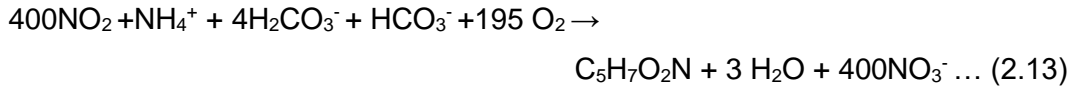


Tabla N° 10: Masa Molar de los compuestos (Ec. 2.13)

Compuesto	Masa Molar (g/mol)	Coefficiente Estequiométrico (N)	Masa Molar Total (g/mol)
O ₂	32	195	6240
N	14	400	5600
C ₅ H ₇ O ₂ N	113	1	113

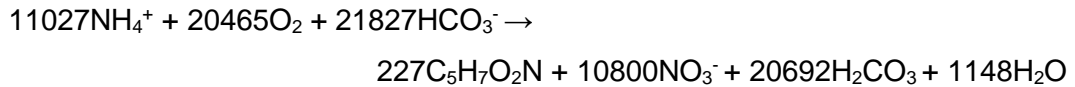
De acuerdo a la tabla mostrada:

$$\text{O}_2 \text{ requerido} = 6240/5600 = 1.11 \text{ mg O}_2 / \text{mg N.}$$

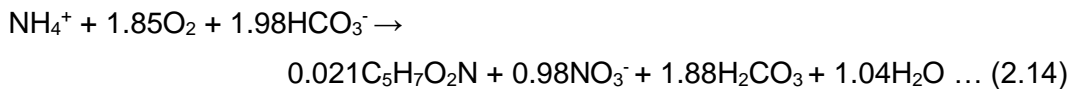
$$\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N} \text{ requerida} = 113/560 = 0.02 \text{ mg C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N} / \text{mg N.}$$

La reacción global está compuesta de la siguiente manera:

200x(Ec. 2.12) + 27x(Ec. 2.13):



Simplificando coeficientes estequiométricos:



2.4.2.1. Factores que afectan a la nitrificación

Las bacterias nitrificantes mencionadas anteriormente son microorganismos sensibles y muy susceptibles a agentes externos. Los factores que afectan a la nitrificación han sido determinados en diversos ensayos de laboratorio y se muestran a continuación:

- Relación DBO₅/NTK.
- Concentración de amonio y nitritos.
- pH.
- Temperatura.
- Concentración de Oxígeno Disuelto.

- Agentes orgánicos e inorgánicos que pueden inhibir el crecimiento y acción de los organismos nitrificantes.

Relación DBO₅/NTK

Se ha observado una correlación entre la capacidad de nitrificación y la relación DBO₅/NTK.

A mayor valor de la relación, menor presencia de la fracción de organismos nitrificantes ya que a medida que baja la DBO₅/NTK debe aumentar la fracción de nitrificantes (García, 1997).

Tabla N° 11: Relación DBO₅/NTK

DBO₅/NTK	Fracción de nitrificantes
0.5	0.35
1	0.21
2	0.12
3	0.083
4	0.064
5	0.054
6	0.043
7	0.037
8	0.033
9	0.029

Fuente: Ingeniería ambiental: Contaminación y tratamientos. Ramón Sans Fonfría, Joan de Pablo Rivas, 1989.

La fracción de microorganismos nitrificantes depende de la relación de DBO₅/NTK de tal forma que para valores comprendidos entre 1 y 3, la fracción de microorganismos nitrificantes se encuentra entre 0.21 y 0.083. Para relaciones mayores que 5, la fracción de microorganismos nitrificantes decrece a partir de un valor aproximado de 0.054. Para estas relaciones se considera que el proceso de nitrificación es de fase única, es decir, que existe la nitrificación, pero tiene un peso importante la transformación de la materia orgánica. (Ramón y Rivas, 1989).

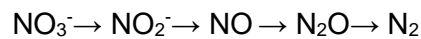
2.4.3. Desnitrificación

La desnitrificación es uno de los procesos clave en la eliminación biológica del nitrógeno en las aguas residuales. Mediante este proceso, las formas oxidadas de nitrógeno, como el nitrato (NO₃⁻) y el nitrito (NO₂⁻), se convierten en nitrógeno gaseoso (N₂). La desnitrificación es un proceso *cuasi* anaeróbico llevado a cabo por bacterias desnitrificantes.

Las vías bioquímicas en las cuales se realiza la desnitrificación, se da en un estado anóxico más que un anaerobio.

El proceso de desnitrificación se genera mediante etapas sucesivas iniciando en la reducción de nitratos hasta llegar al nitrógeno gas apareciendo como productos intermedios nitritos, óxido nítrico y óxido nitroso. Los microorganismos predominantes que intervienen en este proceso son Alcaligenes, Paracoccus, Pseudomonas, Thiobacillus, Rhizobium, Thiosphera . (Delwiche CC., 1982).

Mediante el metanol como fuente de carbono, se genera una reacción estequiométrica (reducción) de la siguiente forma:

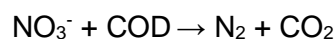


La producción (ATP) a partir de nitritos y de nitratos es menor que la obtenida a partir del oxígeno, y mayor que la obtenida a partir de la reducción de sulfato, situación que determina la presencia por parte de los microorganismos de emplear un aceptor u otro (Brock, 1994).

Los compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales que sirven como sustrato para el proceso de desnitrificación son:

- Metanol (CH₃OH).
- Etanol (C₂H₅OH).
- Ácido acético (CH₃-COOH), entre otros.

La siguiente reacción química muestra el proceso de desnitrificación:



(Nitrato + Sustratos Orgánicos → Gas nitrógeno + Dióxido de carbono)

Remoción de los nitratos:

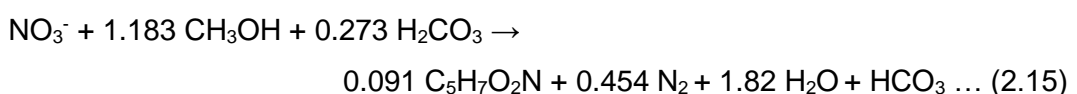


Tabla N° 12: Masa Molar de los compuestos (Ec. 2.15)

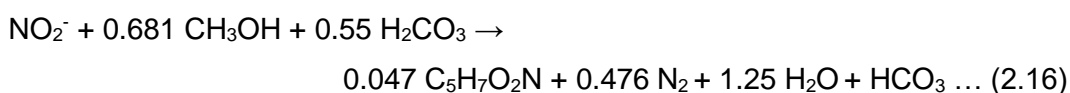
Compuesto	Masa Molar (g/mol)	Coefficiente Estequiométrico (N)	Masa Molar Total (g/mol)
CH ₃ OH	32	1.183	37.856
N	14	1	14
C ₅ H ₇ O ₂ N	113	0.091	10.283

De acuerdo a la tabla mostrada:

$$\text{CH}_3\text{OH requerido} = 37.856/14 = 2.70 \text{ mg CH}_3\text{OH} / \text{mg N.}$$

$$\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N nuevas} = 10.283/14 = 0.74 \text{ mg C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N} / \text{mg N.}$$

Remoción de los nitratos:

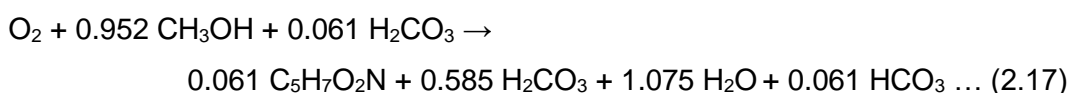
**Tabla N° 13:** Masa Molar de los compuestos (Ec. 2.16)

Compuesto	Masa Molar (g/mol)	Coefficiente Estequiométrico (N)	Masa Molar Total (g/mol)
CH ₃ OH	32	0.681	21.792
N	14	1	14

De acuerdo a la tabla mostrada:

$$\text{CH}_3\text{OH requerido} = 21.792/14 = 1.56 \text{ mg CH}_3\text{OH} / \text{mg N.}$$

Remoción del oxígeno:

**Tabla N° 14:** Masa Molar de los compuestos (Ec. 2.17)

Compuesto	Masa Molar (g/mol)	Coefficiente Estequiométrico (N)	Masa Molar Total (g/mol)
CH ₃ OH	32	0.952	30.464
O ₂	16	2	32

De acuerdo a la tabla mostrada:

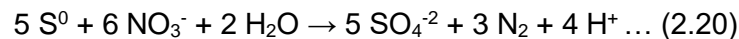
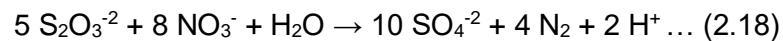
$$\text{CH}_3\text{OH requerido} = 30.464/32 = 0.95 \text{ mg CH}_3\text{OH} / \text{mg O}_2.$$

2.4.3.1. Desnitrificación Autótrofa

Proceso que se caracteriza por remover óxidos de nitrógeno y compuestos con azufre, sobre todo en aguas residuales tratadas con altas concentraciones de nitratos o nitritos y baja materia orgánica. (Oh, Bum, Yo, Zubair, & Kim, 2002) (Kim, Lee, & Bae, 2004) (Tang, An, & Nemat, 2010).

Las bacterias desnitrificantes que intervienen en este proceso son las denominadas *Thiobacillus denitrificans* y *Thiomicrospira denitrificans* que trabajan a un pH óptimo entre 7 y 8, y una temperatura de trabajo de 25 y 35°C (Moraes, Souza, & Foresti, 2012) (Tang, An, & Nemat, 2010) (Oh, Bum, Yo, Zubair, & Kim, 2002).

La interacción biológica entre los ciclos del nitrógeno y azufre está dada por la desnitrificación autótrofa, que consiste en la reducción de óxidos de nitrógeno (NO_3^- y/o NO_2^-) a nitrógeno gaseoso, utilizando compuestos reducidos de azufre como dadores de electrones. El producto final obtenido son sulfatos que es menos perjudicial que los nitratos cuando se insertan al medio marino.



Las ventajas de este tipo de desnitrificación con la desnitrificación heterótrofa convencional (Campos, Carvalho, Portela, Mosquera-Corral, & Méndez, 2008) son:

- Los microorganismos no necesitan una fuente de carbono orgánica.
- La producción de lodos es mínima lo que determina un menor costo en lo que respecta su disposición y manejo.

El producto final que se obtiene luego de la reacción dependerá de la concentración de oxígeno. Si la finalidad es la eliminación de nitratos, se debe evitar la presencia de oxígeno dado que las bacterias usarán preferentemente este como aceptor de electrones.

La materia orgánica no tiene efecto inhibitorio en el proceso, pero afecta la oxidación de las especies de azufre, disminuyendo la formación de sulfatos (Kim & Son, 2000) (Oh, Bum, Yoo, Zubair, & Kim, 2002).

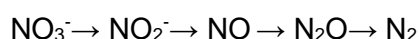
2.4.3.2. Desnitrificación Heterótrofa

En este proceso, un sustrato orgánico como el metanol, etanol, ácido acético o glucosa actúa como fuente de energía y fuente de carbono la materia orgánica biodegradable presente en el medio, mientras que se usa el nitrato como aceptor de electrones, reduciéndolo a nitrógeno gas en condiciones anóxicas por la acción de las bacterias heterótrofas (Pseudomonas, Paracoccus, Alcaligenes, Thiobacillus, Bacillus).

La alta eficiencia de este proceso implica la utilización de reactores de poco volumen y con costos bajos, no obstante, el carbono residual generado en la desnitrificación heterótrofa ocasiona problemas en el agua potable.

La desnitrificación heterótrofa parte de la reducción de nitratos a nitritos, mediante la canalización del nitrato reductasa, seguido a ello se reduce el nitrito a óxido nítrico por medio de la nitrito reductasa, luego el óxido nítrico se reduce a óxido nitroso localizada en la membrana citoplasmática; finalmente el óxido nitroso pasa a nitrógeno gas mediante la enzima óxido nitroso reductasa localizada en el periplasma.

El periplasma es inhibido por la presencia de oxígeno por tal motivo se ha de tener cuidado con la interferencia del O₂ ya que, si no se completa la desnitrificación, se liberaría óxido nitroso el cual es perjudicial por su contribución en el efecto invernadero (Cervantes-Carrillo, Pérez, & Gómez, 2000).



En la desnitrificación existe la posibilidad de acumulación de nitritos, óxido nitroso y óxido nítrico debido a que el nitrato se reduce en etapas y este proceso se ve afectado por las concentraciones del sustrato empleado y/o a las condiciones de operación.

Para poder asegurar la desnitrificación completa, es decir que el producto final sea el nitrógeno gas, se debe operar en condiciones óptimas tal como el nivel de oxígeno disuelto, fuente de carbono, concentración de nitratos, la relación entre el carbono-nitrógeno, fósforo, pH, temperatura y la posible presencia de tóxicos. (Deheco I. & Egusquiza F., 2011).

Si el pH es menor a 6 (ácido), se acumula ácido nitroso, muy tóxico para las bacterias y si el pH es ligeramente alcalino, el nitrato es convertido en nitrógeno gas. Esta información ha sido desarrollada en cultivos batch mientras que, para

cultivos en medio continuo, no se ha observado acumulación de intermediarios de la desnitrificación en el intervalo de pH de 6 a 9 pese a haberse aplicado una alta tasa de aplicación. La desnitrificación tiende a aumentar la alcalinidad debido a que necesita protones de hidrógeno para su ejecución (Sanchez J. & Sanabria J., 2009).

2.4.3.3. Desnitrificación Autótrofa - Heterótrofa

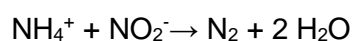
Es usual que las aguas residuales industriales contengan altas concentraciones de sulfuros y nitratos o nitritos. Para poder remover dichos compuestos, una alternativa eficiente es el tratamiento biológico en donde el sulfuro de azufre elemental es oxidado parcialmente utilizando bacterias desnitrificantes autótrofas mientras que la remoción biológica de los nitritos a gas nitrógeno puede lograrse mediante bacterias desnitrificantes heterótrofas.

Al estar presentes ambos tipos de bacterias en el mismo reactor, éstas compiten por el suministro limitado de nitritos (Wang A., Chen C., Ren N., Lee D., Yu Z., 2008).

2.4.3.4. Desnitrificación Autótrofa Aerobia por microorganismo nitrificantes autótrofos

Se ha observado la existencia de ciertos microorganismos nitrificantes denominados bacterias nitrificantes facultativas, que han sido aislados del suelo, con la capacidad de desnitrificar sin la necesidad de degradar materia orgánica cuando se encuentran en condiciones limitantes de oxígeno (1.0 mg/L aproximadamente). Entre las bacterias mencionadas, se tiene a las Nitrosomas europeae y Nitrosomas eutropha, las cuales transforman los nitritos en nitratos en presencia de una alta concentración de oxígeno disuelto. (Yoshida y Alexander, 1970; Ritchie y Nicholas, 1972; Goreau et al., 1980; Lipschultz et al., 1981; Robertson, 1988).

Sin embargo, si el oxígeno es limitado (1.0 mg/L), dichos microorganismos utilizan el ion amonio (NH_4^+) como fuente de energía (donador de electrones) y los nitritos como aceptores de electrones para luego ser reducidos a las formas gaseosas del nitrógeno (Bock, Schmidt, Stuvén, & Zart, 1995).



2.4.3.5. Desnitrificación Autótrofa Aerobia por microorganismo nitrificantes heterótrofos

Existen microorganismos que oxidan el ion amonio en nitritos en presencia de una fuente de carbono diferente al CO_2 para luego transformar los nitritos en N_2O bajo condiciones aerobias con alta concentración de oxígeno (5 a 7mg/L). La *Thiosphaera pantotropha* es el microorganismo que más ha sido estudiada y que realiza la transformación antes mencionada.

La adaptación de dicho microorganismo en un tratamiento de lodos activados para un efluente con alta carga nitrogenada, mostró una eliminación aproximada de 80% del $\text{NO}_x\text{-N}$ por desnitrificación aerobia (Kshirsagar et al., 1995).

2.5. PROCESOS BIOLÓGICOS DE ELIMINACIÓN DE NITRÓGENO

Se ha descrito las fases del ciclo del nitrógeno en donde se ha detallado la transformación del nitrógeno a sus diferentes estados realizadas por determinados microorganismos en condiciones óptimas.

2.5.1. Nitrificación - Desnitrificación

Se necesitan condiciones aerobias y anóxicas para que se lleve a cabo este proceso, lo cual implica que se proyecte dos unidades por separado.

La remoción del nitrógeno en las aguas residuales mediante la nitrificación – desnitrificación se da mediante la oxidación del nitrógeno amoniacal o ion amonio a nitratos y luego a nitrógeno gas gracias a las bacterias autótrofas amonio, nitrito oxidantes y bacterias heterótrofas desnitrificantes.

2.5.2. Proceso ANAMMOX

Oxidación anaerobia de amonio (Anaerobic Ammonium Oxidation) es un proceso biológico en donde participan algunos microorganismos en condiciones anóxicas transforman el nitrógeno amoniacal en nitrógeno gaseoso mediante el nitrito comoceptor de electrones. El nitrito es de vital importancia para los organismos ANAMMOX por su afinidad para catalizarlo. (Van Loosdrecht & Salem, 2006).

2.6. EUTROFIZACION

La eutrofización es un proceso de contaminación que ocurre en sistemas acuáticos que se caracteriza por proliferación y acumulación en exceso de microalgas y plantas superiores.

2.6.1. Causas de la Eutrofización

La causa principal de la eutrofización es el incremento excesivo de la carga de nutrientes (nitrógeno y fósforo) debido fuentes internas y externas.

La fuente externa de nutrientes se genera por el arrastre de materiales por el efecto de la erosión y precipitación en la cuenca. (Esteves, 1988).

La fuente interna se genera por la descomposición de la materia orgánica en el propio sistema, retención de nutrientes a través de mecanismos físicos y químicos en los sedimentos. La principal fuente interna es el sedimento del propio sistema, el cual puede actuar como trampa o fuente de nutrientes.

3. CAPITULO II: MARCO NORMATIVO

3.1. DOCUMENTOS EMITIDOS POR EL GOBIERNO PERUANO

- Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua D.S. N° 002-2008-MINAM.
- Límites Máximos Permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales, D.S. N° 003-2010-MINAM.

3.2. LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES (LMP) Y ESTANDARES DE CALIDAD AMBIENTAL (ECA).

En la presente investigación, se tomará como base, la comparación del resultado del efluente del DHS de sexta generación con los LMP's y con los ECA's (Categoría N°3).

3.2.1. Límites máximos Permisibles (LMP)

Es la cuantificación de la concentración de sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan un efluente final o una emisión de una planta de tratamiento de aguas residuales, y que al ser superada pueda causar o genere daños en la salud del ser humano y al medio ambiente.

Su exigencia legal parte del Ministerio del Ambiente y de los organismos adscritos que conforman el Sistema Nacional de Gestión Ambiental.

Tabla N° 15: Límites Máximos Permisibles para los Efluentes de PTAR

Parámetro	Unidad	LMP
Aceites y Grasas	mg/L	20
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	10 000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	200
pH	Unidad	6.5 - 8.5
Sólidos Totales en Suspensión	mg/L	150
Temperatura	°C	<35

Fuente: D.S. N° 003-2010-MINAM: LMP para los efluentes de Plantas de Tratamiento de aguas residuales domésticas.

3.2.2. Estándares de Calidad Ambiental (ECA)

El objetivo de esta norma es establecer el nivel de concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el

agua, en su condición de cuerpo receptor y componente básico de los ecosistemas acuáticos, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni para el ambiente. Los Estándares aprobados son aplicables a los cuerpos de agua del territorio nacional en su estado natural y son obligatorios en el diseño de las normas legales y las políticas públicas siendo un referente obligatorio en el diseño y aplicación de todos los instrumentos de gestión ambiental.

Los estándares de calidad ambiental del agua en general, se encuentran sujetos a parámetros establecidos según los usos del cuerpo receptor. Los usos de las aguas han sido divididos en cuatro categorías:

- Categoría 1: Poblacional y Recreacional.
- Categoría 2: Actividades Marino Costeras.
- **Categoría 3: Riego de Vegetales y Bebida de Animales.**
- Categoría 4: Conservación del Ambiente Acuático.

Tabla N° 16: Estándares de Calidad Ambiental para Agua, Categoría 3, Riego de Vegetales y Bebidas para Animales - Riego de Vegetales

Parámetros para Riego de Vegetales de Tallo Bajo y Tallo Alto		
Parámetros	Unidad	Valor
Fisicoquímicos		
pH	Unidad de pH	6.5-8.5
Conductividad	uS/cm	<2000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	15
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	40
Oxígeno Disuelto	mg/L	>=4
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	<1000
Aceites y Grasas	mg/L	1
Cloruros	mg/L	100-700
Nitritos	mg/L	0.06
Fosfatos	mg/L	1
Nitratos	mg/L	10
Sulfatos	mg/L	300
Inorgánicos		
Arsénico	mg/L	0.05
Boro	mg/L	0.5-6
Cadmio	mg/L	0.005
Cianuro Wad	mg/L	0.1
Mercurio	mg/L	0.001
Plomo	mg/L	0.05
Zinc	mg/L	2
Biológicos		
Coliformes Totales	NMP/100 ml	2000
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	5000

Fuente: MINAM.

4. CAPITULO IV: METODOLOGÍA DE TRABAJO

4.1. CONSIDERACIONES GENERALES

4.1.1. Ubicación del Reactor DHS G-06

La presente investigación fue realizada en las instalaciones del Centro de Investigación en Tratamiento de Aguas Residuales y Residuos Peligrosos (CITRAR) de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), distrito del Rímac, Lima, Perú. CITRAR se encuentra ubicado en la puerta N°7 de la UNI en la avenida Túpac Amaru a espaldas del Metro - UNI.

La tesis se instaló en el módulo 09 de la Zona Metanogénica, a espaldas de la Oficina y Laboratorio de CITRAR.

Figura N° 5: Ubicación del Reactor DHS G-06



Fuente: Google Earth Pro

4.1.2. Descripción General del Prototipo de Investigación

El agua residual afluente del reactor DHS G-06, provenía de un tratamiento previo el cual iniciaba en la unidad de Captación, seguido de la unidad de Pre tratamiento compuesto por las Cámaras de Rejas gruesas y finas, desarenador y

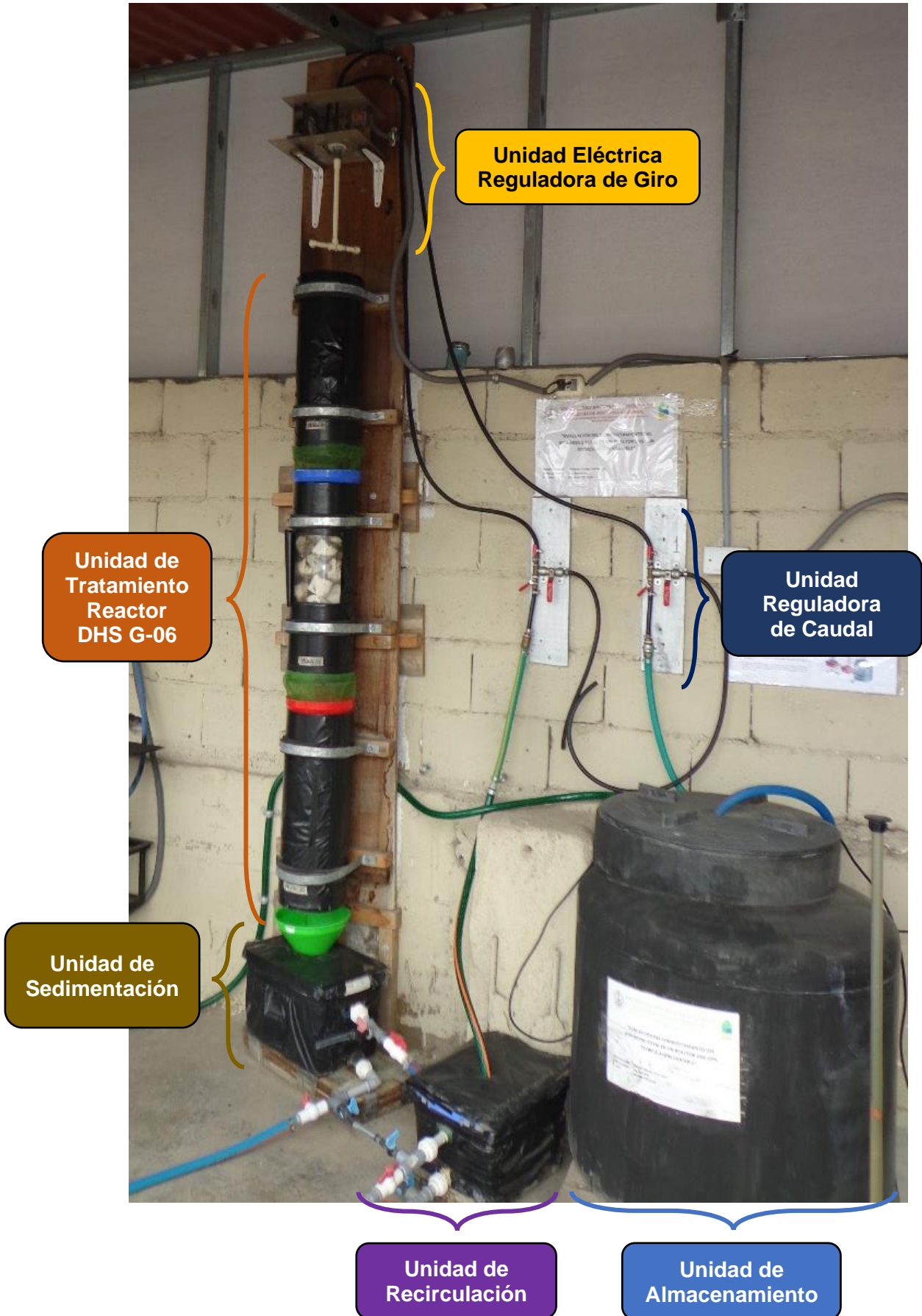
posteriormente a la unidad de tratamiento primario denominado reactor UASB, **siendo el efluente de dicho reactor, el afluente del prototipo de investigación.** El Sistema DHS G-06 propuesto como investigación estuvo constituido por una Unidad de Almacenamiento conformado por un tanque de 250L y una bomba sumergible dentro del tanque en mención, una Unidad Reguladora de Caudal, una Unidad Eléctrica regulador de giro de la tubería distribuidora de caudal, una Unidad de Tratamiento Reactor DHS G-06 compuesto por tres módulos en serie (Módulo 01, Módulo 02 y Módulo 03) distribuidos de forma vertical, una Unidad de Sedimentación y una Unidad de Recirculación.

4.2. MEDICIONES

Los puntos monitoreo fueron:

- P-01: Afluente (Ingreso).
- P-02: Mezcla.
- P-03. Efluente del Módulo 01.
- P-04. Efluente del Módulo 02.
- P-05: Efluente del Módulo 03 (Efluente DHS G-06).
- P-06: Recirculación (salida del Sedimentador 02).

Foto N° 1: Prototipo de investigación - Reactor DHS G-06



4.2.1.1. Unidad de Almacenamiento

Constituido por un tanque Rotoplas de 250 Litros que almacenaba el agua residual tratada en el Reactor UASB y una bomba sumergible de ½ HP (bomba 01) situada en el interior de dicho tanque. La bomba fue cubierta por una malla de pescador para evitar la obstrucción de los sólidos presentes en el agua residual.

Foto N° 2: Vista en planta de la Bomba sumergible al interior del tanque de almacenamiento



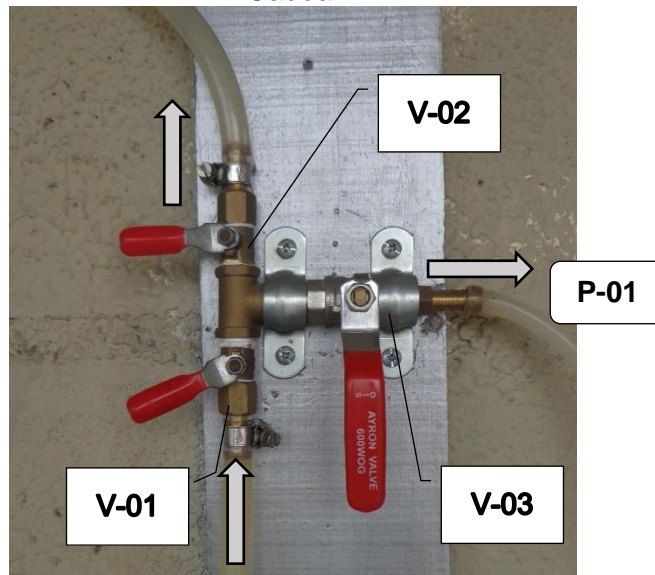
La bomba se conectaba a la siguiente unidad mediante una manguera pesada de ½” que permanecía ajustada con una abrazadera de acero inoxidable de ¾” al inicio de la impulsión.

4.2.1.2. Unidad Reguladora de Caudal

La bomba 01 empalmaba a la Unidad Reguladora de Caudal mediante una manguera pesada de ½” unida a una unión de bronce del mismo diámetro, dicha unión contaba con un pitón de salida que reducía el diámetro a 8mm.

Se colocaron tres válvulas esféricas de bronce de ½” unidas mediante una TEE y mangueras plastificadas transparentes de 8mm de diámetro, con el fin de regular el caudal.

Foto N° 3: Componentes del esquema de válvulas de la Unidad Reguladora de Caudal



La función de la válvula V-01 era la de regular el caudal mientras se mantenía cerrada la válvula V-02 y totalmente abierta la válvula V-03 desde donde se aforaba hacia una probeta graduada.

Regulado el caudal de diseño, se cerraba la válvula V-03 y se abría por completo la válvula V-02 desde donde se permitía el paso del afluente hacia la Unidad distribuidora de caudal.

La válvula V-03, además de cumplir la función de descarga, también fue el primer punto donde se recogía la muestra que luego se analizaba en el laboratorio. Llámese primer punto de monitoreo: "P-01".

4.2.1.3. Unidad Eléctrica Reguladora de Giro

Dicha unidad se ubicaba en la parte más elevada del reactor DHS y se compone de un transformador de 12V, un tablero de circuito eléctrico simple, un motor giratorio, tubería de CPVC de ½" con orificios, un ventilador de corriente alterna AC, un par de engranajes y un vaso de plástico. Todos los componentes mencionados estaban protegidos por un acrílico de forma cuadrada al cual se le perforó dos orificios de 9 mm de diámetro por donde cruzaban las mangueras provenientes de la unidad de regulación y de la unidad de recirculación llegando a unirse en el vaso de plástico.

El funcionamiento de la parte eléctrica parte del transformador ya que permitía el paso de corriente eléctrica desde una fuente alterna (tomacorriente)

transformándola a corriente continua hacia el tablero eléctrico simple que, a su vez, estaba conectado a un motor giratorio.

La función del tablero eléctrico fue regular de forma manual la velocidad de giro del motor. Mediante un sistema de dos engranajes conectados a dicho motor, permitió el giro de la tubería de CPVC (eje y brazo giratorio) como se muestra en las siguientes fotos.

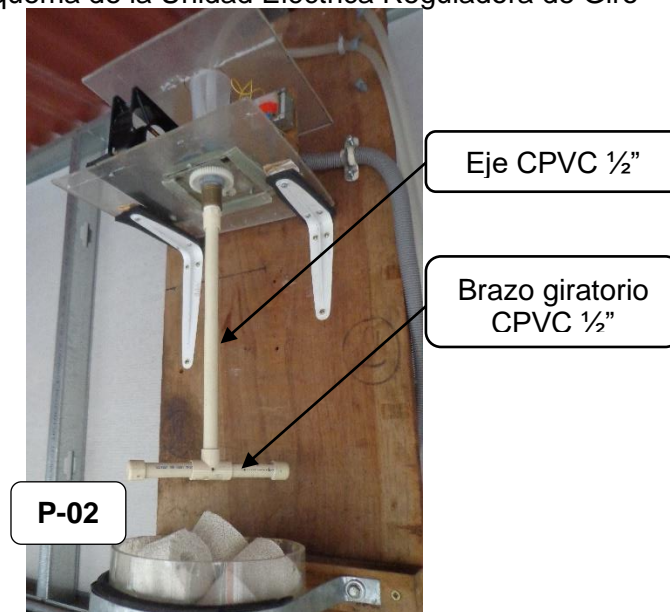
Foto N° 4: Vista superior 01



Foto N° 5: Vista superior 02



Foto N° 6: Esquema de la Unidad Eléctrica Reguladora de Giro



Al brazo giratorio de CPVC $\frac{1}{2}$ " , se le hicieron 5 orificios de 2 mm de diámetro a lo largo de la tubería con la finalidad de distribuir el caudal en el área superficial del reactor DHS (Módulo 01).

La distancia entre la tubería horizontal giratoria de CPVC y el área superficial del Módulo 01 fue de 15 cm. Dicho espacio de separación se tomó como el segundo punto de monitoreo “P-02”.

4.2.1.4. Unidad de Tratamiento Reactor DHS G-06

Conformado por tres tubos (módulos) de acrílico de 8” de diámetro y 60 cm de alto, y separados 15 cm uno del otro. En el interior de cada módulo se ubicaron 51 esponjas de poliuretano endurecidas colocadas de manera aleatoria tratando de no dejar espacios vacíos.

Para poder lograr el diseño de las esponjas acorde a la base bibliográfica del Doctor Hideki Harada, se tomó una plancha de espuma de poliuretano de 2 m x 1.5m x 5cm y se procedió a cortar con la ayuda de un hilo caliente de nicrom, dándole la forma de cilindros huecos de 6cm de diámetro, 2 cm de orificio y 5 cm de altura.

Elaborado los cilindros huecos, se procedió a preparar la resina epóxica.

Foto N° 7: Componentes de la Resina Epóxica



La resina epóxica consta de tres componentes: La resina propiamente dicha, el endurecedor y el solvente acrílico. En un recipiente metálico se procedió a mezclar los dos primeros componentes mencionados durante 20 minutos y luego se agregó una pequeña cantidad del solvente hasta llegar a un color blanco continuo. Los tres componentes mezclados ocupaban un volumen de 1 galón el cual se utilizó para endurecer 210 esponjas cilíndricas huecas.

Foto N° 8: Espuma de Poliuretano endurecidas con Resina Epóxica



Cada esponja fue bañada con la resina epóxica considerando que no se saturen, es decir, evitando la obstrucción de los poros.

El endurecimiento de las esponjas tomó alrededor de 2 horas.

Foto N° 9: Distribución de las esponjas endurecidas dentro de los tubos de acrílico (Módulos)



Los puntos de monitoreo “P-03” y “P-04” fueron considerados en las separaciones entre el Módulo 01 - Módulo 02 y el Módulo 02 – Módulo 03, respectivamente.

El espaciamiento entre acrílicos fue cubierto con una malla de pescador que evitaba el ingreso de vectores y permitía el ingreso de oxígeno.

4.2.1.5. Unidad de Sedimentación

A la salida del Módulo 03 se colocó un embudo de 8" de diámetro cuya función era la de dirigir el agua tratada hacia un sedimentador el cual llamaremos Sedimentador 01.

En el sedimentador se hicieron dos agujeros, uno en la parte baja con el objetivo de purgar los lodos sedimentados y el segundo a 15 cm de la base con la finalidad de transportar, por rebose, hacia otro recipiente (Sedimentador 02) el agua tratada por el reactor DHS.

Para la purga, se utilizaron una unión universal roscada de ½", un codo roscado 90° de PVC de ½", una válvula de jardinería de ½", una válvula de bola roscada de PVC de ½", niples y manguera de ½", y para el rebose, se utilizaron dos uniones universales roscadas de ½", una válvula de jardinería de ½", una válvula de bola roscada de PVC de ½", dos abrazaderas de acero inoxidable de ¾", niples y manguera de ½".

Foto N° 10: Recolección del agua tratada por el reactor DHS



La recolección del agua tratada antes de llegar al sedimentador fue denominado punto de monitoreo "P-05".

4.2.1.6. Unidad de Recirculación

El agua tratada en el Sedimentador 01 se transporta por rebose al Sedimentador 02 en donde se daba inicio a la recirculación mediante una bomba sumergible de

½ HP instalada al interior del sedimentador en mención. Se impulsaba el agua tratada hacia un esquema de válvulas con la misma configuración y función con la que se transporta el afluente desde el tanque de almacenamiento hasta la unidad distribuidora de caudal.

La manguera de recirculación con la manguera del afluente, se unen en la parte alta del reactor antes del ingreso al tubo de CPVC mediante una TEE de plástico y de uso en jardinería (debido al diámetro de la manguera).

Al considerar el mismo esquema de válvulas en la unidad de recirculación, también cumplió las mismas funciones que la unidad de reguladora de caudal.

Al Sedimentador 02 también se le instaló una purga y un rebose como se observa en la siguiente figura.

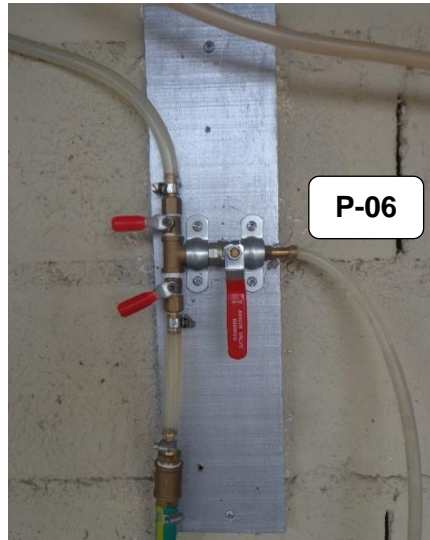
Foto N° 11: Configuración del Sedimentador 02



El rebose fue construido con un niple especial que atravesaba el recipiente plástico y se anclaba a él mediante dos empaquetaduras, una tuerca y una contra tuerca, también con dos uniones universales roscadas de ½", una válvula de jardinería de ½", una válvula de bola roscada de PVC ½", niples de PVC y un codo de PVC roscado 90°.

La purga ubicada en la parte baja del sedimentador 02, constó de una unión universal roscada de ½", un niple especial de las mismas características del instalado en el rebose, una válvula de bola roscada de PVC ½", una TEE roscada de PVC ½" y una manguera pesada de ½" con su respectiva abrazadera que conectaba la purga del sedimentador con la red de desagüe.

Foto N° 12: Componentes del esquema de válvulas de la Unidad de Recirculación



4.2.2. Etapas de la Investigación

El procedimiento experimental del prototipo se realizó en 4 etapas:

- Primera Etapa: Elaboración del esquema del prototipo, ubicación e instalación del reactor DHS.
- Segunda Etapa: Prueba hidráulica del Reactor DHS, así como todos los componentes que lo complementan y puesta en marcha considerando el caudal de diseño y el tiempo de retención hidráulica.
- Tercera Etapa: En esta etapa se consideraron cuatro periodos de evaluación además de una fase de aclimatación del reactor DHS en base a la Recirculación:

Tabla N° 17: Periodos de Evaluación

PERIODO DE EVALUACIÓN	Recirculación del efluente	Tiempo
ACLIMATACIÓN	Sin Recirculación	4 semanas
PRIMERO	Sin Recirculación	6 semanas
SEGUNDO	50%	10 semanas
TERCERO	78%	7 semanas
CUARTO	100%	6 semanas

Fuente: Elaboración propia.

Durante este periodo se realizaron las mediciones fisicoquímicas y las correspondientes al Nitrógeno, DBO, Sólidos Suspendidos Totales y Sólidos Suspendidos Fijos. Se configuró el caudal de diseño a diario y se realizó el mantenimiento semanal.

- Cuarta Etapa: Interpretación de resultados y elaboración del informe final.

4.3. DISEÑO DEL SISTEMA

El diseño del Reactor DHS G-06 con recirculación variable estuvo basado en diferentes consideraciones partiendo de las características físicas de la espuma de poliuretano, volumen del medio de soporte, cálculo y distribución del caudal de diseño y del caudal de recirculación.

4.3.1. Selección del Material Filtrante

La elección del tipo de espuma de poliuretano se basó en la capacidad de la esponja para retener la resina epóxica sin colmatar los poros, es decir, sin saturarse.

El mayor tamaño de poro permite la penetración más profunda de agua residual y, para la Sexta Generación (DHS G-06), el volumen de vacío de la esponja rígida debe ser 70% o menos, que es una porosidad menor que el de la esponja de poliuretano blando (>97%) utilizada en estudios anteriores del reactor DHS. (Takashi Onodera, 2014).

4.3.1.1. Porosidad

La porosidad de la esponja fue calculada a partir de la esponja endurecida. Se tomaron cinco muestras (05) para obtener una porosidad promedio de la esponja dura.

$$Porosidad (\%) = \left(1 - \frac{D_r}{D_a}\right) * 100\%$$

Donde:


D_r : Densidad real (g/cm^3).

D_a : Densidad aparente (g/cm^3).

El cálculo de la porosidad se elaboró de la siguiente manera:

- Volumen y masa de la esponja endurecida

Tabla N° 18: Características físicas de la esponja endurecida

Esponja Endurecida	Dimensiones (cm)			Vol. esponja V1 (cm ³)	Masa esponja (gr)	
	Diam. Ext. (D)	Diam. Int. (d)	Altura (h)			
	I	6.0	2.0	5.0	125.66	33.3
	II	6.0	2.0	5.0	125.66	35.9
	III	6.0	2.0	5.0	125.66	25.7
	IV	6.0	2.0	5.0	125.66	37.3
	V	6.0	2.0	5.0	125.66	35.7

Fuente: Elaboración propia.

La masa promedio de la espuma = 33.6 gramos

- Densidad real de la esponja endurecida (D_r)

$$Densidad\ real = \frac{Masa\ de\ la\ esponja\ endurecida}{Volumen\ de\ la\ esponja\ endurecida}$$

$$Densidad\ real = \frac{33.6\ gramos}{125.66\ cm^3} = 0.27\ g/cm^3$$

- Densidad aparente de la esponja endurecida (D_a)

Para determinar la densidad aparente se siguieron los siguientes pasos:

- En un vaso de precipitados de 500 ml se vertió 400 ml de agua destilada.
- Cada esponja endurecida fue colocada dentro del vaso de precipitados con la cantidad de agua mencionada anteriormente.
- Se retiró la esponja con mucha rapidez y se pasó a medir el agua que quedó en el vaso de precipitados (volumen registrado).
- La diferencia del agua presente en el vaso luego de retirar la esponja y los 400 ml iniciales, fue el volumen de agua que retiene la espuma de poliuretano endurecida.

Tabla N° 19: Volumen de agua registrado para cada esponja

N° Esponja	Dimensiones (cm)			Vol. registrado de agua (mL)	Vol. de agua retenida en la esponja (mL)
	Diam. Ext. (D)	Diam. Int. (d)	Altura (h)		
I	6.0	2.0	5.0	330	70
II	6.0	2.0	5.0	325	75
III	6.0	2.0	5.0	320	80
IV	6.0	2.0	5.0	330	70
V	6.0	2.0	5.0	325	75

Fuente: Elaboración propia.

El promedio del volumen de agua en la esponja = 74 cm³.

Además, se conoce que la densidad del agua es 1 g/cm³.

$$\text{Densidad aparente} = \frac{\text{Promedio del Volumen de Esponja con agua}}{\text{Volumen de la esponja endurecida}}$$

$$\text{Densidad aparente} = \frac{74}{125.66} = 0.59 \text{ g/cm}^3$$

Finalmente, la Porosidad se calcula:

$$\text{Porosidad (\%)} = \left(1 - \frac{D_r}{D_a}\right) * 100\%$$

$$\text{Porosidad (\%)} = \left(1 - \frac{0.27}{0.59}\right) * 100\%$$


$$\text{Porosidad (\%)} = 54.62\%$$

4.3.2. Diseño del Reactor DHS G-06

4.3.2.1. Características de las columnas de tratamiento

En el siguiente cuadro se muestran las características físicas de los módulos DHS G-06.

Tabla N° 20: Características de las columnas de tratamiento

		Módulo		
		01	02	03
	<i>Tipo de DHS</i>	Esponja endurecida	Esponja endurecida	Esponja endurecida
	<i>Generación</i>	G-06	G-06	G-06
	<i>Material</i>	Acrílico	Acrílico	Acrílico
	<i>Diámetro</i>	8"	8"	8"
	<i>Sección transversal (m²)</i>	0.628	0.628	0.628
	<i>Altura (m)</i>	0.60	0.60	0.60
	<i>Orientación</i>	Vertical	Vertical	Vertical
	<i>Volumen del módulo (cm³)</i>	18849.56	18849.56	18849.56

4.3.2.2. Características del Medio Filtrante

Por motivos prácticos, para calcular el número de medios filtrantes o cilindros huecos (esponja endurecida), se considera una columna (Módulo 01). A continuación, se muestra los pasos de cálculo.

Tabla N° 21: Características del medio filtrante

Características		Fórmula	Valor
% Esponja en columna	F		0.34 (Tsutomu Okubo)
Volumen del módulo	V'		18849.56 cm ³
Volumen de espuma de poliuretano en la columna	V	$V = F \cdot V'$	6408.85 cm ³
Dimensiones de la espuma	D	Diámetro externo	6 cm
	d	Diámetro interno	2 cm
	h	Altura	5 cm
Volumen de la espuma	V _e	$V_e = \pi \cdot (D^2 - d^2) / 4 \cdot h$	125.66 cm ³
Número de Espumas	n _e	$n_e = V / V_e$	51 esponjas
Porosidad	%P		54.62 %
Volumen efectivo	V _{ef}	$V_{ef} = \%P \cdot V_e \cdot n_e$	3500.62 cm ³

Fuente: Elaboración propia

Para un módulo: $V_{ef} = 3500.62 \text{ cm}^3$.

Para los tres módulos: $V_{ef \text{ total}} = (3500.62) \cdot (3) = 10501.85 \text{ cm}^3$.

4.3.2.3. Tiempo de Retención Hidráulico Teórico

En base a las investigaciones de Hideki Harada y Tsutomu Okubo, se consideró un tiempo de retención TRH = 2 horas.

4.3.2.4. Caudal de diseño del Reactor DHS G-06

$$Q_{diseño} = \frac{V_{efectivo\ total}}{TRH}$$

$$Q_{diseño} = \frac{10501.85}{2} = 0.00525 \frac{m^3}{hora}$$

$$Q_{diseño} = 90 \text{ mL/min}$$

$$Q_{diseño} = 1.50 \text{ mL/s}$$

4.3.3. Instalación y montaje del Reactor DHS G-06

Con los materiales y equipos detallados anteriormente, se comenzó con la instalación del Reactor DHS G-06 en el espacio brindado dentro de CITRAR.

El día jueves 15 de febrero del 2018 se dio inicio con la instalación del prototipo comenzando con la instalación de la base de madera de 3.40m de altura cuya finalidad fue la de apoyo y sostén de los acrílicos (Módulos 01, 02 y 03).

La base de madera en mención fue sujeta mediante tirafones de 4" de largo que atravesaban la madera hasta adentrarse en unos tarugos insertados en la pared. Instalado el soporte de madera se procedió a colocar una placa rectangular de acrílico de 20cm x 20cm con dos ángulos de metal en la parte alta del soporte de madera con la finalidad de sostener la Unidad Eléctrica Reguladora de Giro.

Para asegurar que el caudal fuese distribuido uniformemente en toda el área superficial del módulo 01, se procedió a nivelar la unidad eléctrica. Luego de realizar el nivelado se prosiguió con la instalación del tubo de CPVC (eje y brazo giratorio) conectándolo al motor giratorio mediante los engranajes y accesorios. El giro se mantuvo en 6RPM durante toda la investigación.

Las esponjas fueron colocadas dentro de cada tubo de acrílico de manera aleatoria tratando de evitar espacios vacíos por donde el agua residual pueda pasar sin tratamiento.

Terminada la inserción de las esponjas endurecidas, se procedió a forrar los acrílicos con un plástico negro para evitar el ingreso de luz solar y con ello la proliferación de algas.

Foto N° 13: Disposición de las esponjas y forrado del acrílico



Los tubos de acrílico fueron sujetos a la base de madera con la ayuda de láminas flexibles de acero inoxidable de 3.5mm de espesor que cumplían la función de abrazaderas.

Entre el acrílico y la lámina de acero, se colocó un material micro poroso para evitar rajaduras al momento de ajustar los módulos hacia la base.

Los tubos de acrílico (módulos) tuvieron una separación de 15 cm uno del otro.

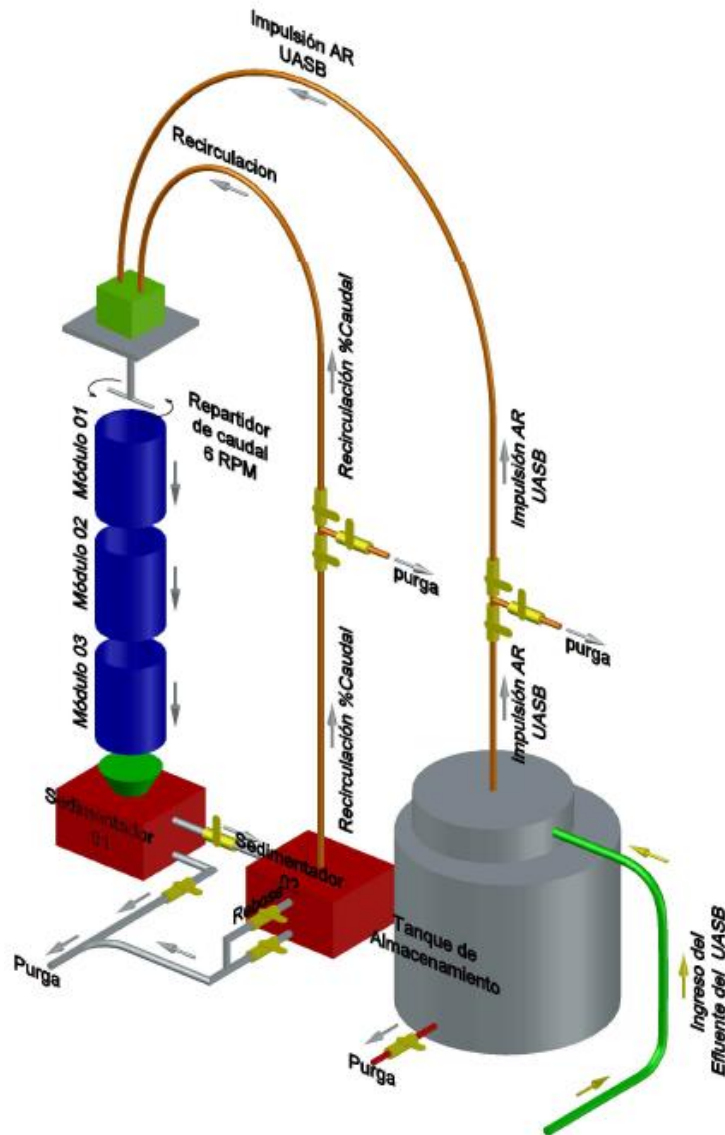
Debajo del módulo 03, se instaló un recipiente (Sedimentador 01) que cumplía la función de recolectar el efluente y trasladar, por rebose, el agua residual tratada a otra unidad de sedimentación (Sedimentador 02) implementada con una bomba sumergible de $\frac{1}{2}$ HP de potencia cuya finalidad era la de recircular el efluente del primer sedimentador hacia el punto de mezcla.

Se instalaron válvulas de bronce las cuales conformaban la unidad de regulación y la unidad de recirculación, cada una sobre una base rectangular de madera de 15cm x 60cm.

Las válvulas se conectaban con la unidad eléctrica reguladora de giro mediante dos mangueras de 8mm de diámetro que iban desde la unidad de regulación hasta la parte más alta del reactor.

Cabe aclarar que, en esta etapa, las mangueras no fueron forradas debido a que se quería probar el sistema de forma hidráulica y observar la posible existencia de fugas o pérdidas.

Figura N° 7: Diagrama del Sistema Piloto DHS G-06



El tanque de almacenamiento de 250 L fue ubicado debajo de las válvulas (Unidad Reguladora de Caudal).

Se instaló una manguera flexible de $\frac{1}{2}$ " que conectaba el ingreso del agua residual proveniente del reactor UASB hacia el tanque, también se colocó dentro de dicha unidad una bomba sumergible de $\frac{1}{2}$ HP la cual se conectaba a las válvulas mediante otra manguera de $\frac{1}{2}$ ", una unión de bronce con reducción y otra manguera de 8 mm de diámetro.

Para terminar con la instalación del tanque de almacenamiento, se colocó la purga correspondiente conformada por un visor (nivel), una TEE, una válvula de PVC de ½" y una manguera de ½" conectada al desagüe.

Concluida la instalación del sistema, se procedió a realizar la prueba hidráulica con agua potable con la finalidad de detectar fugas en las uniones o en alguna manguera deteriorada.

Se encontró un solo punto de fuga en el sedimentador 02 que fue corregido utilizando una empaquetadura.

Solucionado el problema se procedió a forrar todo lo que fuese transparente como las mangueras de 8mm y los sedimentadores.

4.3.4. Puesta en marcha del Prototipo DHS G-06

El arranque del sistema comenzó desde el momento en que se le alimentó con agua residual proveniente del efluente del reactor UASB.

La puesta en marcha se dio inicio el día miércoles 04 de julio de 2018 a las 2:42pm. El inicio del monitoreo y correspondiente análisis físico químico, se realizó el día 05 de julio de 2018 a las 10:00 am.

4.3.5. Plan de Monitoreo

El plan se rige por la determinación de los puntos monitoreados, los parámetros evaluados y el cronograma de monitoreo.

4.3.5.1. Parámetros de Medición y Control

El análisis de los seis (06) puntos de monitoreo comprendió la evaluación de los siguientes parámetros:

- Temperatura.
- pH.
- Turbiedad.
- Oxígeno Disuelto (OD).
- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅).
- Sólidos Suspendidos Totales (SST).
- Sólidos Suspendidos Fijos (SSF).
- Nitrógeno:

- Nitritos (NO_2^-).
- Nitratos (NO_3^-).
- Nitrógeno Amoniacal (NH_3).
- Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK).

En el caso de la DBO_5 y de los Sólidos Suspendidos Totales, Volátiles y Fijos, se consideraron cuatro puntos de monitoreo durante toda la investigación los cuales fueron: P-01 (Afluente), P-02 (Mezcla), P-05 (Efluente DHS G-06) y P-06 (Recirculación).

4.3.5.2. Cronograma de Monitoreo

Los parámetros mencionados anteriormente, se monitorearon de la siguiente manera:

- Monitoreo diario: temperatura, pH, turbiedad y oxígeno disuelto.
- Monitoreo semanal: DBO_5 , SS Totales, SS Fijos y Nitrógeno.

Tabla N° 22: Periodos en la Investigación

	Desde	Hasta
<i>Periodo de aclimatación</i>	05 de Julio 2018	03 de agosto 2018
<i>Primer periodo de evaluación</i>	06 de agosto 2018	05 de octubre 2018
<i>Segundo periodo de evaluación</i>	08 de octubre 2018	16 de noviembre 2018
<i>Tercer periodo de evaluación</i>	19 de noviembre 2018	04 de enero 2019
<i>Cuarto periodo de evaluación</i>	07 de enero 2019	15 de febrero 2019

Fuente: Elaboración propia.

4.3.6. Métodos Analíticos

Para realizar los diversos análisis en la investigación, fue necesario el uso de métodos de laboratorio estandarizados y técnicas analíticas con el fin de determinar valores confiables para cada parámetro. La base de los análisis realizados está descrita en el libro "Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales de la AHA, AWWA, WPCF (American Public Health Association, American Water Works Association and Water Pollution Control Federation), 17^{va} edición, 1992.

A continuación, se describen los parámetros evaluados en la investigación:

4.3.6.1. Temperatura

La temperatura ambiental fue determinada con Termohigrometro KNX 608^a y la temperatura de las muestras analizadas fue hallada con el Oxímetro Sension6 marca HACH perteneciente al laboratorio de CITRAR.

Foto N° 14: Termohigrometro



4.3.6.2. pH

La medición de pH fue realizada con el multiparámetro marca HACH HQ 30d perteneciente al laboratorio de CITRAR.

Foto N° 15: Medidor de pH



4.3.6.3. Turbiedad

El valor de este parámetro fue hallado con un Colorímetro de marca Hach modelo DR860 perteneciente al laboratorio de CITRAR.

4.3.6.4. Oxígeno Disuelto (OD)

Al igual que la temperatura de las muestras, la medición de OD fue realizada con el Oxímetro HQ 40d marca HACH perteneciente al laboratorio de CITRAR.

4.3.6.5. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

La determinación de la DBO fue elaborada en el Laboratorio de Investigación del Agua (LIA) de la Facultad de Ingeniería Ambiental – UNI, en base al método: Prueba de Requerimiento de Oxígeno Bioquímico de 5 días, de los “Standard Methods para el análisis de Agua Potable y Residuales” de la APHA AWWA, 17va edición, 1992.

4.3.6.6. Sólidos Suspendidos Totales – Sólidos Fijos Totales

La determinación de Sólidos Totales fue realizada en el Laboratorio de Investigación del Agua de la facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería, de acuerdo a los “Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales” APHA-AWWA-WPCF”, 17va edición, 1992.

Foto N° 16: Crisoles con filtros de fibra de vidrio en desecador



4.3.6.7. Nitrógeno Kjeldahl

La determinación del Nitrógeno Kjeldahl fue realizada en el laboratorio acreditado SAG PERU SAC, siguiendo el método SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-Norg-B, 23rd Ed. 2017. Nitrogen (Organic). Macro-Kjeldahl Method.

4.3.6.8. Nitrógeno Amoniacal

La determinación de este parámetro fue realizada en dos laboratorios:

- Laboratorio de Citrar mediante viales de Nitrógeno Amoniacal – Método Salicilato - Rango 0.4 - 50.0mg/L en base a los “Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales” APHA-AWWA-WPCF”, 17va edición, 1992.
- Laboratorio acreditado SAG PERU SAC, siguiendo el método SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-NH3-B, C, 23rd Ed.2017. Nitrogen (Ammonia). Preliminary Distillation Step. Titrimetric Method.

Foto N° 17: Viales de Nitrógeno Amoniacal



4.3.6.9. Nitritos

La determinación de Nitritos fue elaborada en el Laboratorio CITRAR, utilizando el Reactivo Nitraver 2 Marca HACH para 10ml de muestra – Rango 2-30mg/L en base a los “Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales” APHA-AWWA-WPCF”, 17va edición, 1992”.

4.3.6.10. Nitratos

La determinación de Nitratos fue elaborada en el Laboratorio CITRAR, utilizando el Reactivo Nitraver 5 Marca HACH para 10ml de muestra – Rango 2-30mg/L en base a los “Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales” APHA-AWWA-WPCF”, 17va edición, 1992”.

4.3.7. Mantenimiento del Reactor DHS G-06

El mantenimiento se realizó de la siguiente manera:

Tabla N° 24: Mantenimiento del Reactor DHS G-06

Componente	Actividad	Frecuencia
Unidad de Almacenamiento	Limpieza del tanque de 250 L	Semanal
	Limpieza de la malla protectora de la bomba	Semanal
	Limpieza de la bomba sumergible	Semanal
Unidad Reguladora de Caudal	Calibración de caudal	Diario
	Cambio de las válvulas de 1/4"	Sólo una vez
Unidad Eléctrica Reguladora de Giro	Cambio del motor giratorio	Sólo una vez
	Limpieza de la tubería de CPVC ½"	Cada dos días
	Limpieza del tablero eléctrico y transformador	Mensual
Unidad de Tratamiento Reactor DHS G-06	Limpieza externa de los acrílicos	Mensual
	Limpieza de la malla protectora	Semanal
Unidad de Sedimentación	Limpieza del sedimentador	Semanal
	Limpieza del embudo	Cada tres días
	Limpieza de las tuberías y accesorios del rebose y purga	Semanal
Unidad de Recirculación	Limpieza del sedimentador	Semanal
	Limpieza de la bomba sumergible	Semanal
	Limpieza de las tuberías y accesorios del rebose y purga	Semanal
	Calibración de caudal	Diario
	Cambio de las válvulas de 1/4"	Sólo una vez

Fuente: Elaboración propia

4.4. EQUIPOS Y MATERIALES

4.4.1. Unidad de Almacenamiento

- 01 tanque de almacenamiento de 250 L (Rotoplas).
- 01 visor de plástico para el tanque de almacenamiento.
- 01 bomba sumergible de ½" HP. Qmáx = 5000 L/H. Hmáx = 5 m.
- 6.7 m de manguera pesada de ½".
- 02 uniones universales de ½".
- 03 válvulas de bronce de ½".
- 01 válvula de bola roscada de PVC ½".
- 01 TEE de PVC de ½".

4.4.2. Unidad Reguladora de Caudal

- 0.90 m de manguera pesada de ½".
- 01 unión de bronce de ½".
- 03 pitones de bronce de ½".
- 03 válvulas esféricas de bronce de ½".
- 03 abrazaderas de ¾".
- 2.50 m de manguera plastificada de 8mm.
- 1 TEE de jardinería de 8mm.

4.4.3. Unidad Eléctrica Reguladora de Giro

- Transformador de 12V.
- Tablero de circuito eléctrico simple.
- Motor giratorio CC2S.
- Un juego de engranajes de plástico.
- 01 ventilador de corriente alterna.
- 5.20 metros de cable THW 12 Indeco.
- 2.50 m de manguera plastificada de 3/8".
- 1.20 m de tubería CPVC de ½".
- 02 tapones de CPVC de ½".
- 01 TEE de CPVC de ½".

4.4.4. Unidad de Tratamiento Reactor DHS G-06

- 03 tubos de acrílico de 0.60m de alto x 8" de diámetro.
- 06 abrazaderas de acero inoxidable de 0.050m de largo x 2" de ancho.
- 01 madera de soporte de 3.20m de altura por 0.40m de ancho.
- 12 stovebolt de 3".
- 04 tirafones hexagonales de 4".
- 05 listones de madera de 0.50m de largo x 0.10m de ancho.
- 02 mallas de pescador de 80cm de largo por 20cm de ancho.
- 02 embudos cortados de 8".

4.4.5. Unidad de Sedimentación

- 01 embudo de 8" de diámetro.
- 01 embace plástico (sedimentador).
- 02 nipples especiales (con tuerca, contratuerca y empaquetaduras).
- 02 válvulas de bola roscada de PVC 1/2".
- 02 TEE de PVC de 1/2".
- 04 nipples de PVC de 1/2".
- 03 uniones universales roscadas de PVC de 1/2".
- 04 abrazaderas de acero inoxidable de 3/4".
- 01 codo 90° roscado de PVC de 1/2".
- 02 válvulas de jardinería de 1/2".
- 1.30m de manguera pesada de 1/2".

4.4.6. Unidad de Recirculación

- 01 embace de plástico.
- 01 bomba sumergible de 1/2" HP. Q_{máx} = 5000 L/H. H_{máx} = 5 m.
- 03 nipples especiales (tuerca, contratuerca y empaquetaduras).
- 04 uniones universales roscadas de PVC de 1/2".
- 03 TEE de PVC de 1/2".
- 06 nipples de PVC de 1/2".
- 02 válvulas de bola roscada de PVC 1/2".
- 01 codo 90° roscado de PVC de 1/2".
- 4.60m de manguera pesada de 1/2".
- 03 válvulas esféricas de bronce de 1/2".
- 03 abrazaderas de 3/4".
- 2.30 m de manguera plastificada de 8mm.

4.4.7. Otros

- 04 unidades de cinta aislante.
- 6x1.5m de plástico negro.
- 04 unidades de cinta teflón.
- 01 rollo de cinta de embalaje.
- 01 cronómetro.

5. CAPITULO V: RESULTADOS

5.1.1. Temperatura

La temperatura ambiental tuvo una variación de 17.3°C a 31.4°C; la temperatura en el punto P-01 llegó a un mínimo de 17.1°C y a un máximo de 31°C; en el punto P-02, la temperatura mínima llegó a ser 16.9°C y la máxima 31.2°C; en el Punto P-03, la temperatura mínima llegó a ser 16.8°C y la máxima 31.1°C; en el Punto P-04, la temperatura mínima alcanzó el valor de 16.8°C y la máxima 30.9°C; en el Punto P-05, la temperatura mínima llegó a ser 16.4°C y la máxima 30.8°C; y finalmente en el Punto P-06, la temperatura mínima fue 16.9°C y la temperatura máxima 31.3°C.

En la siguiente tabla se muestran los valores descritos líneas arriba:

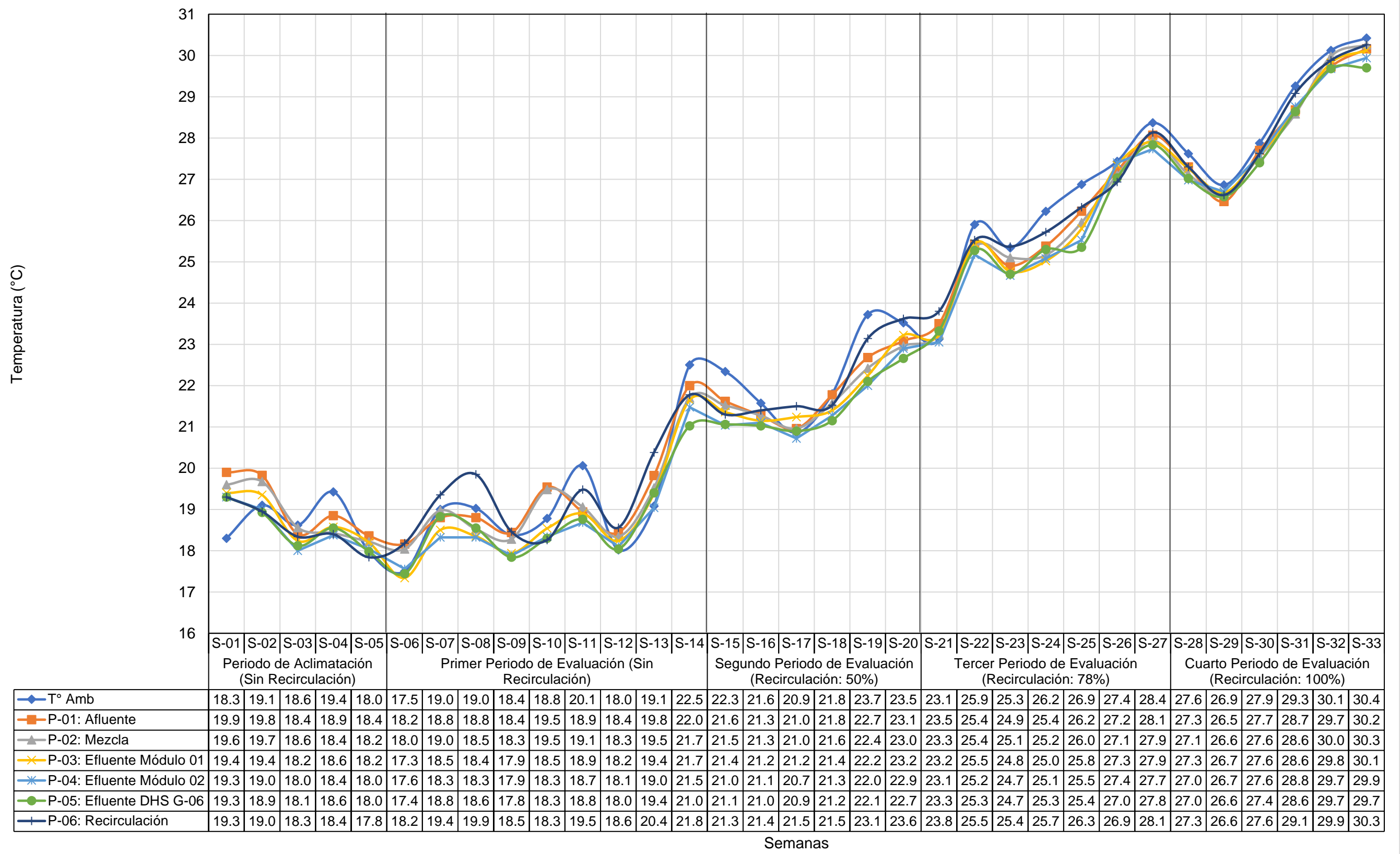
Tabla N° 25: Valores mínimos, máximo y promedios de la Temperatura

Puntos de Monitoreo	Mínimo (°C)	Máximo (°C)	Promedio (°C) ±	Desviación Estándar (σ)	Número de muestras
<i>T. Ambiental</i>	17.3	31.4	24.4 ±	4.2	144
<i>P-01: Afluente</i>	17.1	31.0	24.1 ±	4.0	144
<i>P-02: Mezcla</i>	16.9	31.2	24.1 ±	4.0	144
<i>P-03: Efluente Módulo 01</i>	16.8	31.1	24.0 ±	4.1	144
<i>P-04: Efluente Módulo 02</i>	16.8	30.9	23.9 ±	4.1	144
<i>P-05: Efluente DHS G-06</i>	16.4	30.8	23.6 ±	4.1	144
<i>P-06: Recirculación</i>	16.9	31.3	24.1 ±	4.1	144

Fuente: Elaboración propia

A continuación, el Gráfico N° 1 muestra el comportamiento de la temperatura durante todo el proceso de investigación en base a los datos de la Tabla N° 51 (Anexo 1):

Gráfico N° 1: Temperatura en el Sistema durante todas las semanas de evaluación



Fuente: Elaboración propia

5.1.2. pH

De acuerdo a los valores obtenidos en la investigación; el valor de pH en el punto P-01 llegó a un mínimo de 7.50 y un máximo de 8.70; en el punto P-02, el pH mínimo llegó a ser 7.52 y el máximo 8.85; en el Punto P-03, el pH mínimo llegó a ser 7.82 y el máximo 8.90; en el Punto P-04, el pH mínimo alcanzó el valor de 7.62 y el máximo 8.94; en el Punto P-05, el valor de pH llegó a ser 7.30 y el máximo 8.94; y finalmente en el Punto P-06, el valor mínimo de pH fue 7.37 y el máximo 8.78..

En la siguiente tabla se muestran los valores descritos líneas arriba:

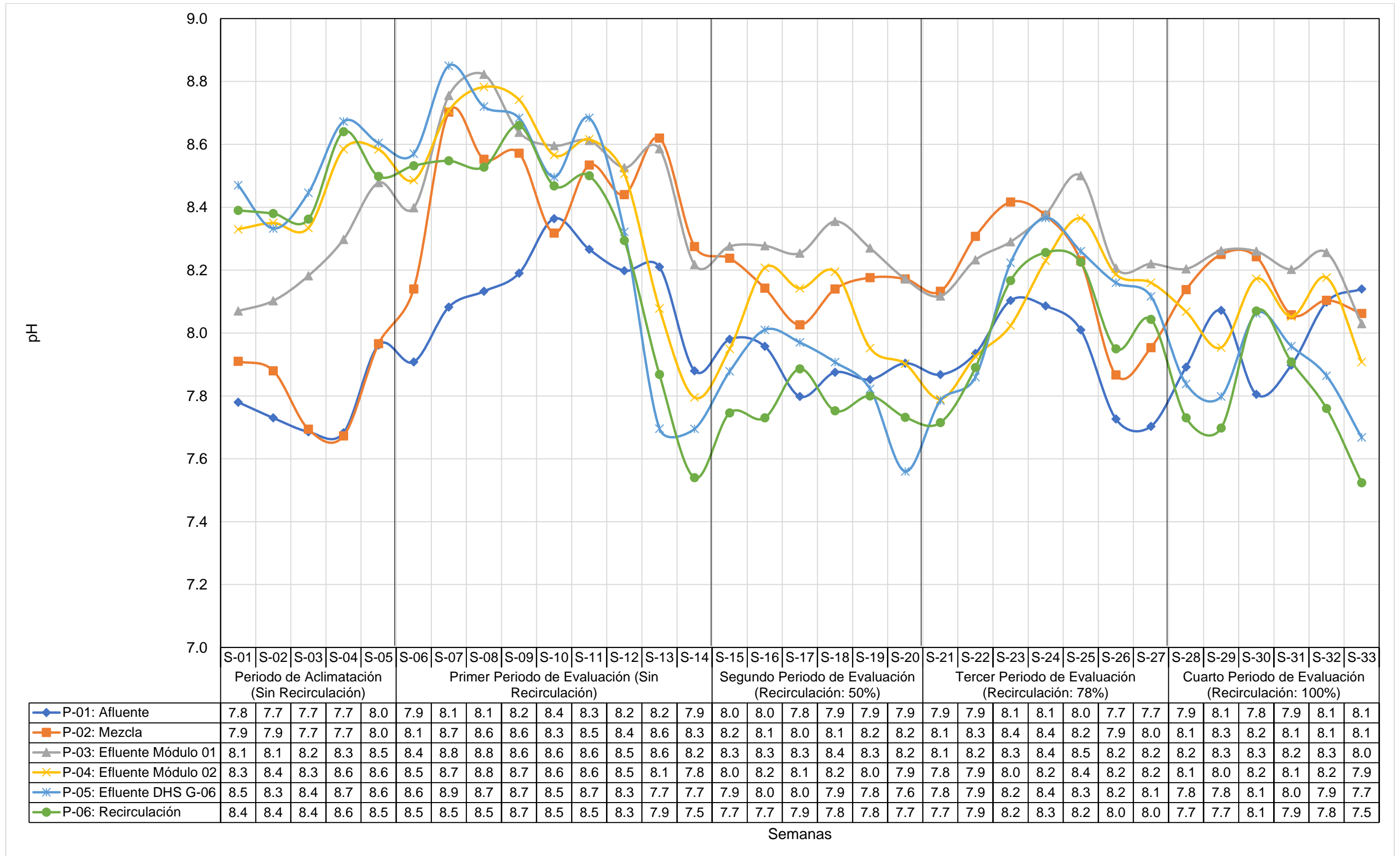
Tabla N° 26: Valores mínimos, máximo y promedios del pH durante toda la investigación

Puntos de Monitoreo	pH mínimo	pH máximo	pH promedio	Desviación Estándar (σ)	Número de Muestras
<i>P-01: Afluente</i>	7.50	8.70	8.10	\pm 0.21	144
<i>P-02: Mezcla</i>	7.52	8.85	8.19	\pm 0.27	144
<i>P-03: Efluente Módulo 01</i>	7.82	8.90	8.36	\pm 0.21	144
<i>P-04: Efluente Módulo 02</i>	7.62	8.94	8.28	\pm 0.30	144
<i>P-05: Efluente DHS G-06</i>	7.30	8.94	8.12	\pm 0.39	144
<i>P-06: Recirculación</i>	7.37	8.78	8.08	\pm 0.37	144

Fuente: Elaboración propia

A continuación, el Gráfico N° 2 muestra el comportamiento del pH durante todo el proceso de investigación en base a los datos de la Tabla N° 52 (Anexo 1):

Gráfico N° 2: pH en el Sistema durante las semanas de evaluación



Fuente: Elaboración propia

5.1.3. Turbiedad

De acuerdo a los valores obtenidos en la investigación, la turbiedad en el punto P-01 llegó a un mínimo de 34.90 UNT y un máximo de 189 UNT; en el punto P-02, la turbiedad mínima llegó a ser 21.10 UNT y la máxima 140.00 UNT; en el Punto P-03, la turbiedad mínima llegó a ser 5.69 UNT y la máxima 91.00 UNT; en el Punto P-04, la turbiedad mínima alcanzó el valor de 1.72 UNT y la máxima 72.3 UNT; en el Punto P-05, la turbiedad mínima llegó a ser 1.17 UNT y la máxima 75.70 UNT; y finalmente en el Punto P-06, la turbiedad mínima fue 1.02 y la turbiedad máxima 19.46 UNT.

En la siguiente tabla se muestran los valores descritos líneas arriba:

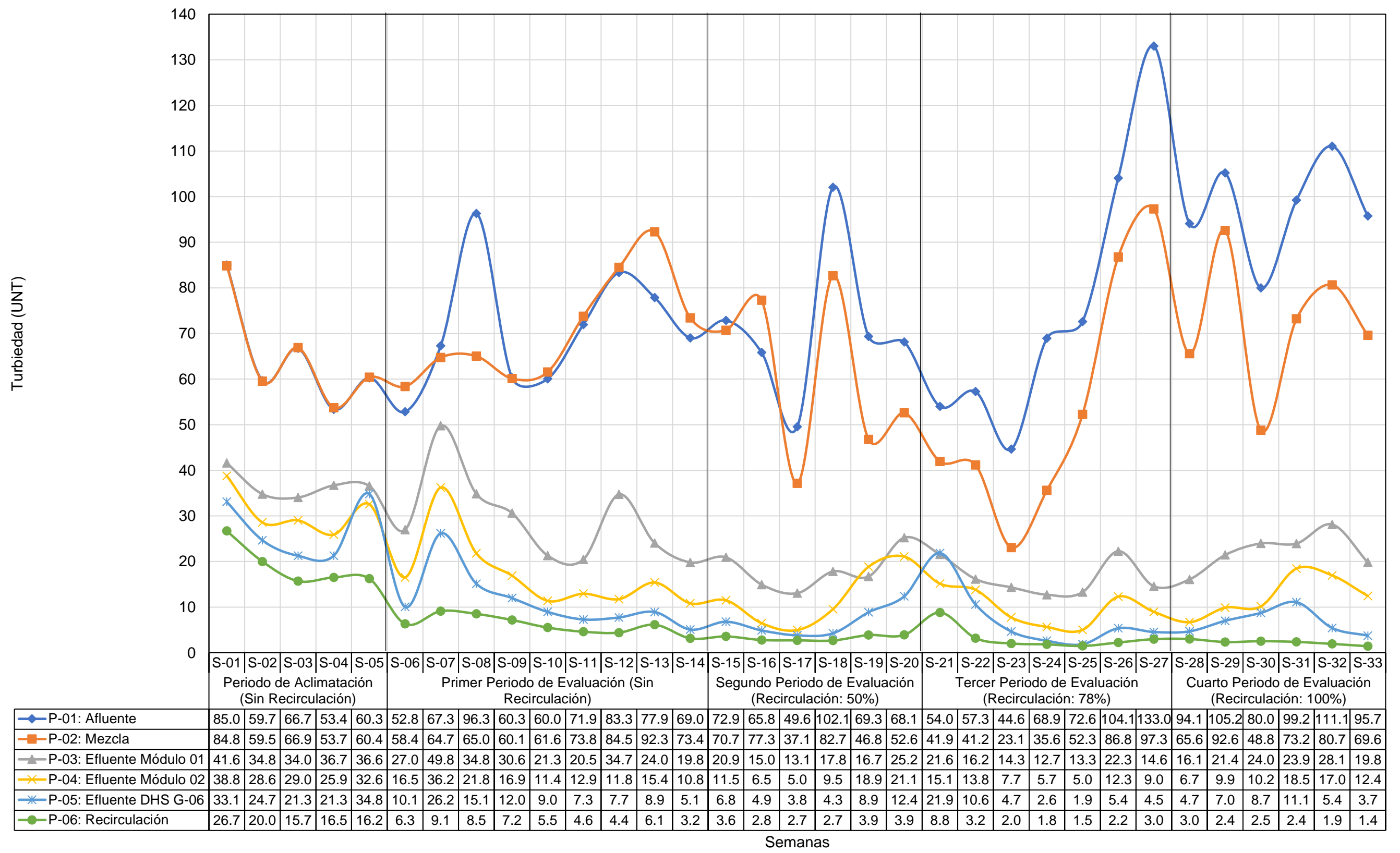
Tabla N° 27: Valores mínimos, máximo y promedios de la Turbiedad durante toda la investigación

Puntos de Monitoreo	Turbiedad Mín. (UNT)	Turbiedad Máx. (UNT)	Turbiedad Prom. (UNT)	±	Desviación Estándar (σ)	Número de Muestras
<i>P-01: Afluente</i>	34.90	189.00	112.00	±	24.64	144
<i>P-02: Mezcla</i>	21.10	140.00	80.60	±	22.98	144
<i>P-03: Efluente Módulo 01</i>	5.69	91.00	48.30	±	10.85	144
<i>P-04: Efluente Módulo 02</i>	1.72	72.30	37.00	±	10.40	144
<i>P-05: Efluente DHS G-06</i>	1.17	75.70	38.40	±	9.63	144
<i>P-06: Recirculación</i>	1.02	19.46	10.20	±	5.37	144

Fuente: Elaboración propia

A continuación, el Gráfico N° 3 muestra el comportamiento de la turbiedad durante todo el proceso de investigación en base a los datos de la Tabla N° 53 (Anexo 1):

Gráfico N° 3: Turbiedad en el Sistema durante las semanas de evaluación



Fuente: Elaboración propia

5.1.4. Oxígeno Disuelto (OD)

De acuerdo a los valores obtenidos en la investigación, el oxígeno disuelto en el punto P-01 llegó a un mínimo de 0.00 mg/L y un máximo de 1.20 mg/L; en el punto P-02, el oxígeno disuelto mínimo llegó a ser 0.00 mg/L y el máximo 1.69 mg/L; en el Punto P-03, el oxígeno disuelto mínimo llegó a ser 4.08 mg/L y el máximo 8.89 mg/L; en el Punto P-04, el oxígeno disuelto mínimo alcanzó el valor de 4.33 mg/L y el máximo 9.46 mg/L; en el Punto P-05, el oxígeno disuelto mínimo llegó a ser 5.06 mg/L y el máximo 9.89 mg/L; y finalmente en el Punto P-06, el oxígeno disuelto mínimo fue 4.28 mg/L y el oxígeno disuelto máximo 9.20 mg/L.

En la siguiente tabla se muestran los valores descritos líneas arriba:

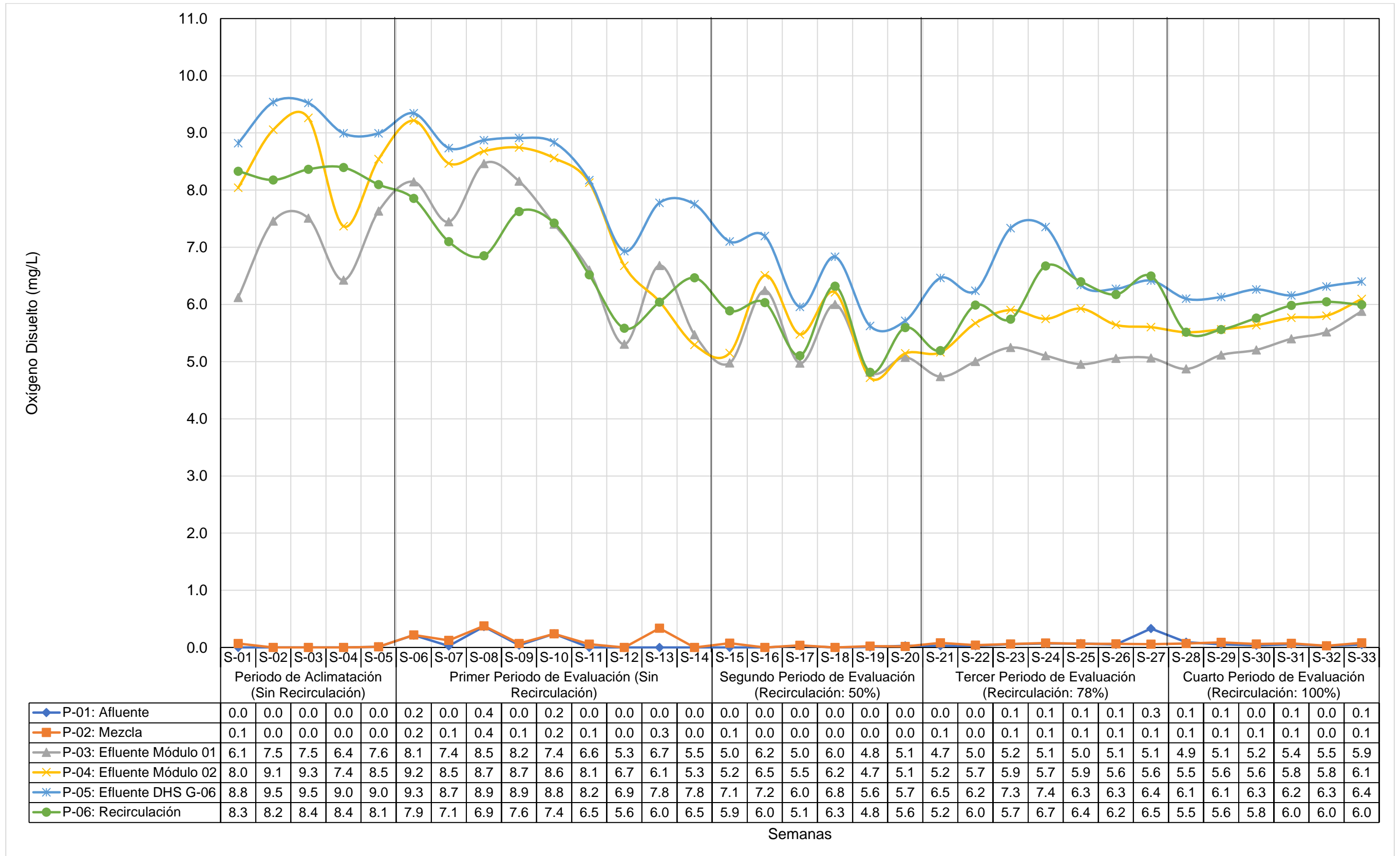
Tabla N° 28: Valores mínimos, máximo y promedios del oxígeno disuelto durante toda la investigación

Puntos de Monitoreo	OD Mín. (mg/L)	OD Máx. (mg/L)	OD Prom. (mg/L)	Desviación Estándar (σ)	Número de muestras
<i>P-01: Afluente</i>	0.00	1.20	0.06	± 0.17	144
<i>P-02: Mezcla</i>	0.00	1.69	0.08	± 0.21	144
<i>P-03: Efluente Módulo 01</i>	4.08	8.89	6.03	± 1.23	144
<i>P-04: Efluente Módulo 02</i>	4.33	9.46	6.64	± 1.52	144
<i>P-05: Efluente DHS G-06</i>	5.06	9.89	7.35	± 1.34	144
<i>P-06: Recirculación</i>	4.28	9.20	6.44	± 1.12	144

Fuente: Elaboración propia

A continuación, el Gráfico N° 4 muestra el comportamiento del oxígeno disuelto durante todo el proceso de investigación en base a los datos de la Tabla N° 54 (Anexo 1):

Gráfico N° 4: Oxígeno Disuelto en el Sistema durante las semanas de evaluación



Fuente: Elaboración propia

5.1.5. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

La DBO₅ se midió semanalmente a partir del 12 de julio del 2018 hasta el 13 de febrero del 2019, durante dicho intervalo de tiempo, hubo semanas en donde no se pudo medir por diversos motivos tales como feriados y falta de insumos.

De acuerdo a los valores obtenidos en la investigación, en el punto P-01, la DBO₅ llegó a un mínimo de 81.76 mg/L y un máximo de 159.71 mg/L; en el punto P-02, la DBO₅ llegó a ser 56.92 mg/L como valor mínimo y el máximo 139.92 mg/L; en el Punto P-05, llegó a un mínimo de 10.01 mg/L y un máximo 32.44 mg/L; finalmente en el Punto P-06, la DBO₅ alcanzó un valor mínimo de 10.20 mg/L y un máximo de 26.91 mg/L.

La eficiencia de remoción de la DBO₅ más baja obtenida en la investigación fue 71.37% correspondiente al periodo de aclimatación y la mayor eficiencia se dio en el tercer periodo de evaluación con un valor de 90.89%.

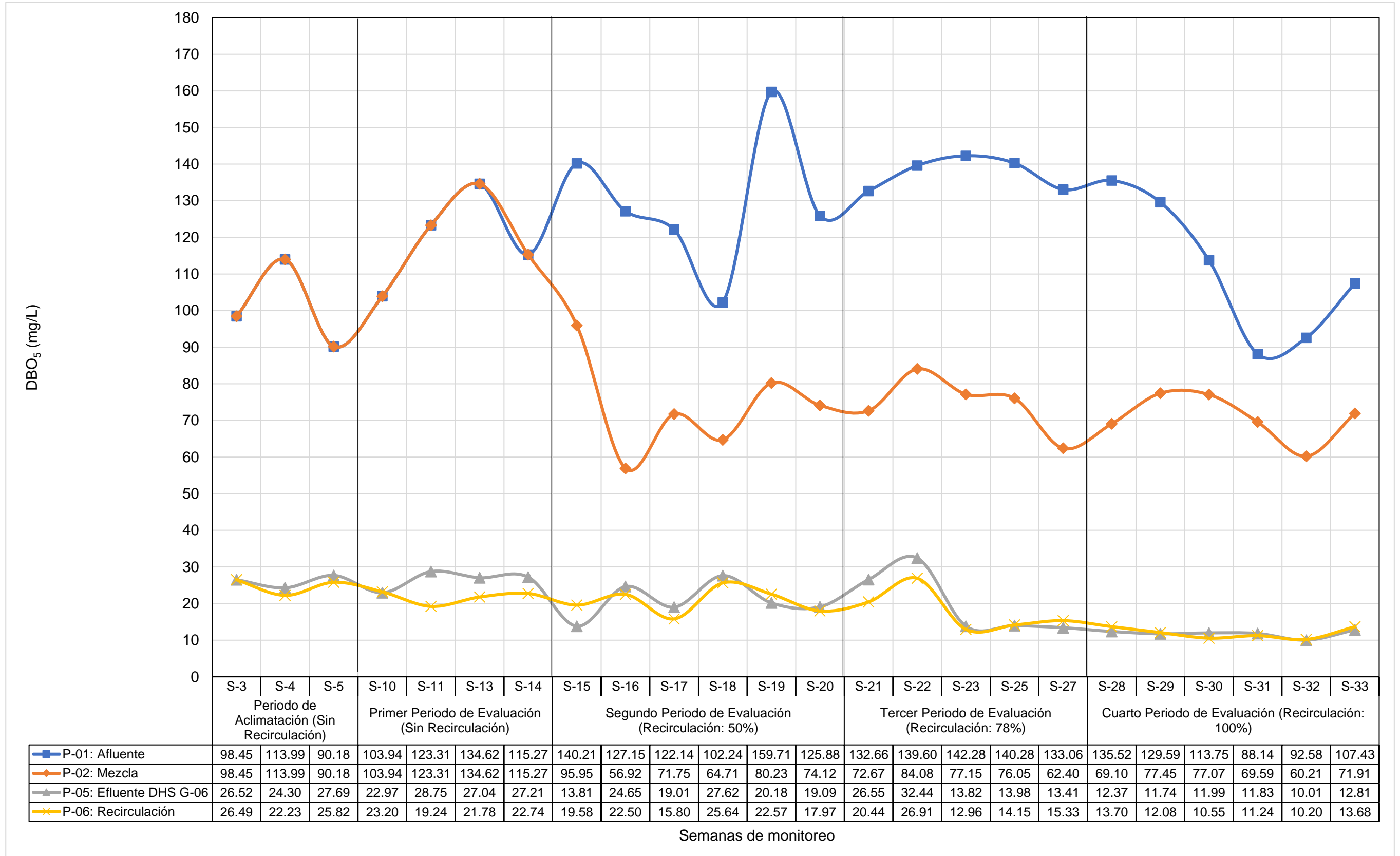
Tabla N° 29: Valores mínimos, máximo y promedios la DBO₅ durante toda la investigación

Puntos de Monitoreo	DBO ₅ Mín. (mg/L)	DBO ₅ Máx. (mg/L)	DBO ₅ Prom. (mg/L)	Desviación Estándar (σ)	Número de Muestras
<i>P-01: Afluente</i>	81.76	159.71	120.53	± 18.84	24
<i>P-02: Mezcla</i>	56.92	139.92	86.26	± 20.93	24
<i>P-05: Efluente DHS G-06</i>	10.01	32.44	19.99	± 7.08	24
<i>P-06: Recirculación</i>	10.20	26.91	18.62	± 5.44	24

Fuente: Elaboración propia

A continuación, el Gráfico N° 5 muestra el comportamiento de la demanda bioquímica de oxígeno durante todo el proceso de investigación en base a los datos de la Tabla N° 55 (Anexo 1):

Gráfico N° 5: Concentración de la DBO₅ durante las semanas de evaluación



Fuente: Elaboración propia

5.1.6. Sólidos Suspendidos Totales (SST) – Sólidos Suspendidos Fijos (SSF) – Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)

Los SST, SSF y SSV se midieron semanalmente con la misma recurrencia que la Demanda Bioquímica de Oxígeno, es decir, a partir del 13 de julio del 2018 hasta el 13 de febrero del 2019, durante los periodos de evaluación se produjeron algunos inconvenientes que no permitieron la evaluación continua.

Los sólidos suspendidos volátiles se calcularon como la diferencia entre los sólidos suspendidos totales y los sólidos suspendidos fijos.

$$SST_{(mg/L)} = SSF_{(mg/L)} + SSV_{(mg/L)} \rightarrow SSV_{(mg/L)} = SST_{(mg/L)} - SSF_{(mg/L)}$$

5.1.6.1. Punto P-01: Afluyente

En lo que respecta a los sólidos suspendidos totales (SST), el valor mínimo de este parámetro fue 8.92 mg/L en la semana 28 (Cuarto Periodo de Evaluación) y el valor máximo fue 44.77 mg/L correspondiente a la semana 21 (Tercer Periodo de Evaluación).

En el caso de los sólidos suspendidos fijos (SSF), el valor mínimo fue 3.40 mg/L en la semana 2 (Periodo de Aclimatación) y el valor máximo fue 25.08 mg/L en la semana 21 (Tercer Periodo de Evaluación).

En el caso de los sólidos suspendidos volátiles (SSV), el valor mínimo fue 2.46 mg/L en la semana 28 (Cuarto Periodo de Evaluación) y el valor máximo fue 19.69 mg/L en la semana 21 (Tercer Periodo de Evaluación).

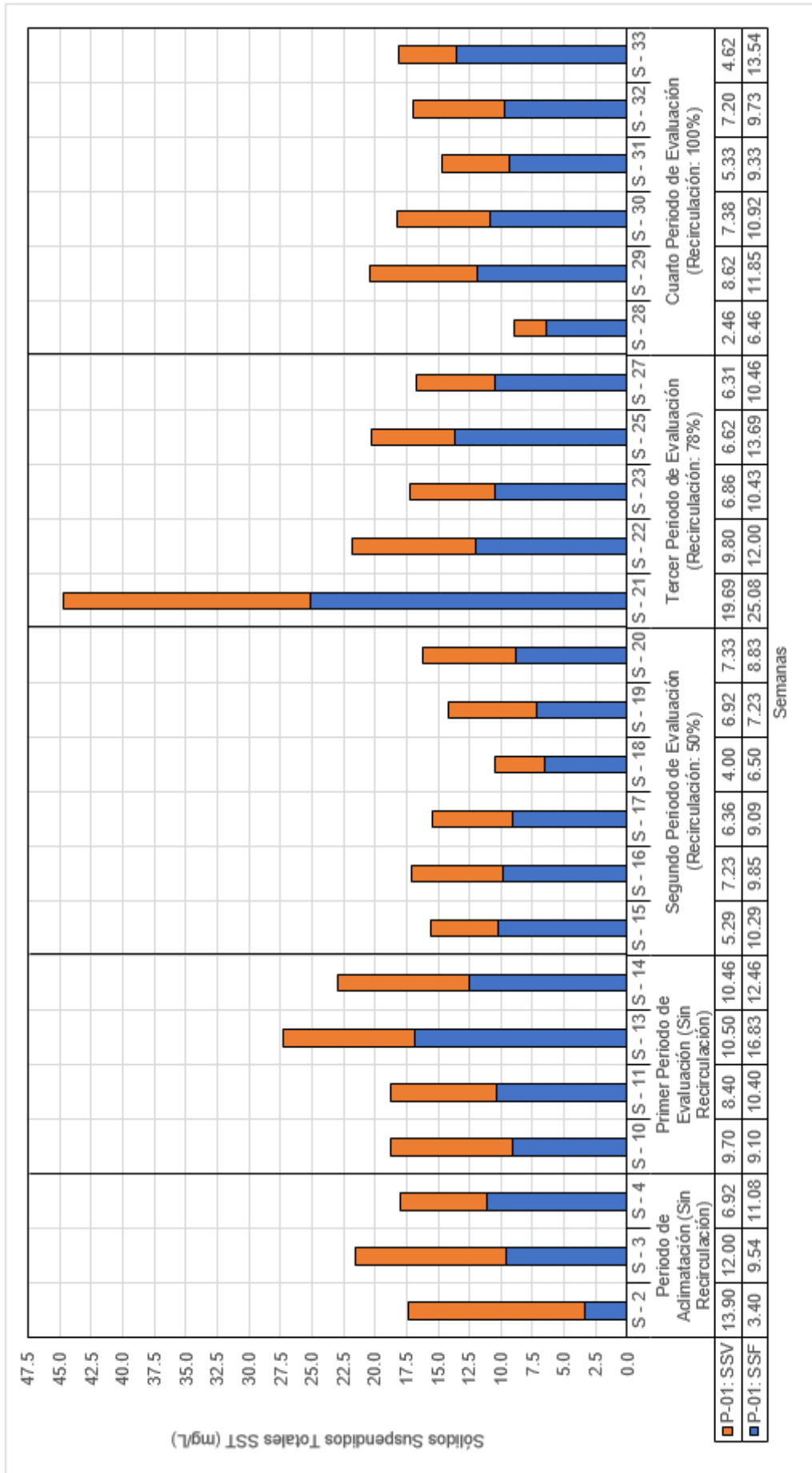
En la siguiente tabla se muestran los valores descritos anteriormente:

Tabla N° 30: Valores mínimos, máximos y promedios de los Sólidos Suspendidos en el punto P-01

Valor	SST (mg/L)	SSF (mg/L)	SSV (mg/L)
<i>Mínimo</i>	8.92	3.40	2.46
<i>Máximo</i>	44.77	25.08	19.69
<i>Promedio</i>	18.83	10.75	12.39
<i>Desviación Estándar (σ)</i>	6.71	3.84	3.37
<i>Número de muestras</i>	24	24	24

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 6: Sólidos Suspendidos Totales en el Punto P-01



Fuente: Elaboración propia

5.1.6.2. Punto P-02: Mezcla

Los sólidos suspendidos totales (SST) en el punto P-02 durante toda la investigación, llegó a un valor mínimo de 7.18 mg/L en la semana 22 (Tercer Periodo de Evaluación) y el valor máximo fue 27.30 mg/L correspondiente a la semana 21 (Tercer Periodo de Evaluación).

En el caso de los sólidos suspendidos fijos (SSF), el valor mínimo fue 4.40 mg/L en la semana 31 (Cuarto Periodo de Evaluación) y el valor máximo fue 14.80 mg/L en la semana 21 (Tercer Periodo de Evaluación).

En el caso de los sólidos suspendidos volátiles (SSV), el valor mínimo fue 1.89 mg/L en la semana 27 (Tercer Periodo de Evaluación) y el valor máximo fue 12.50 mg/L en la semana 21 (Tercer Periodo de Evaluación).

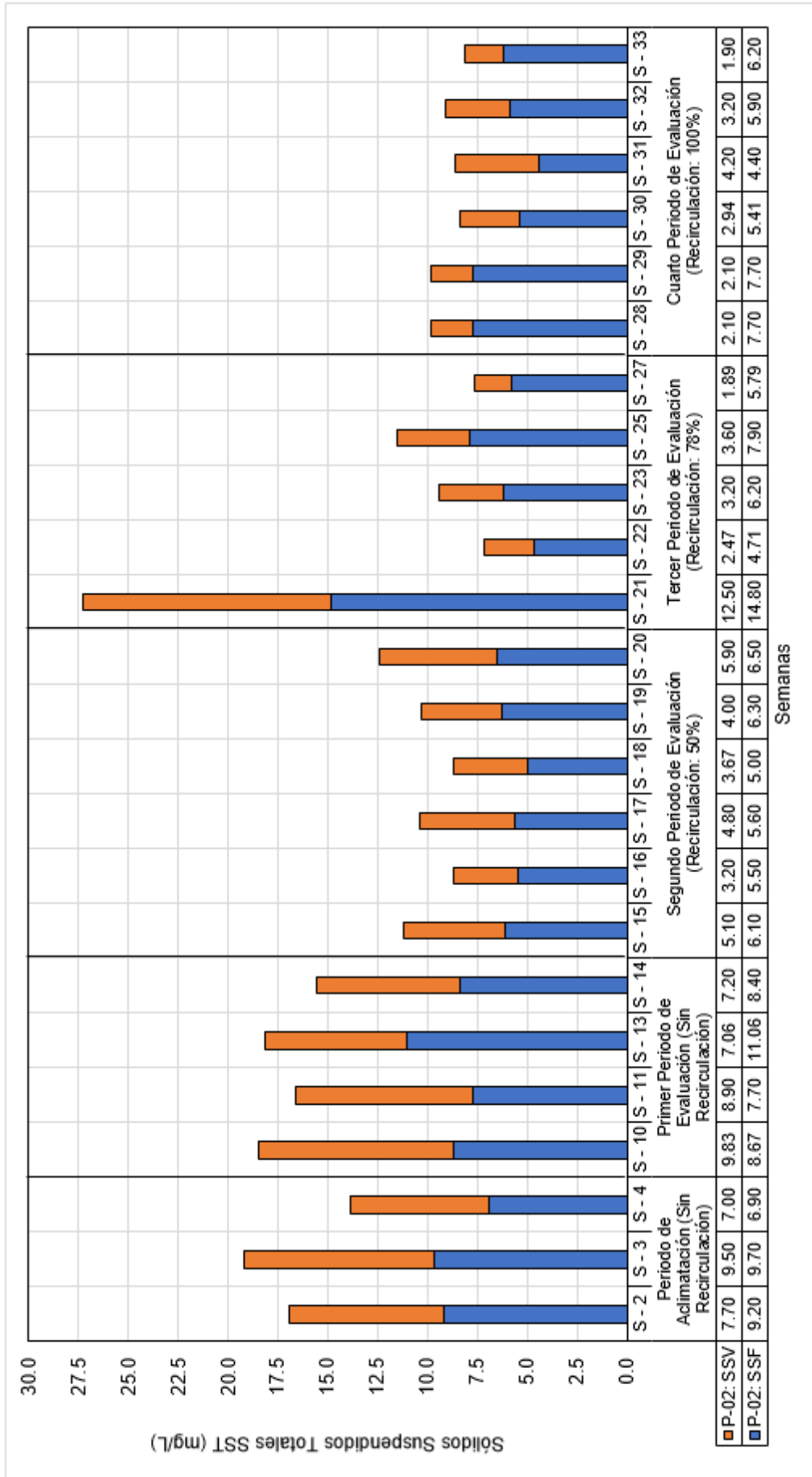
En la siguiente tabla se muestran los valores descritos anteriormente:

Tabla N° 31: Valores mínimos, máximos y promedios de los Sólidos Suspendidos en el punto P-02

Valor	SST (mg/L)	SSF (mg/L)	SSV (mg/L)
<i>Mínimo</i>	7.18	4.40	1.89
<i>Máximo</i>	27.30	14.80	12.50
<i>Promedio</i>	12.39	7.22	5.17
<i>Desviación Estándar (σ)</i>	4.93	2.32	2.93
<i>Número de muestras</i>	24	24	24

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 7: Sólidos Suspendidos Totales en el Punto P-02



Fuente: Elaboración propia

5.1.6.3. Punto P-05: Efluente del Reactor DHS G-06

Los sólidos suspendidos totales (SST) en el punto P-05 durante toda la investigación, llegó a un valor mínimo de 2.53 mg/L en la semana 32 (Cuarto Periodo de Evaluación) y el valor máximo fue 15.30 mg/L correspondiente a la semana 10 (Primer Periodo de Evaluación).

En el caso de los sólidos suspendidos fijos (SSF), el valor mínimo fue 1.60 mg/L en la semana 23 (Tercer Periodo de Evaluación) y el valor máximo fue 8.10 mg/L en la semana 10 (Primer Periodo de Evaluación).

En el caso de los sólidos suspendidos volátiles (SSV), el valor mínimo fue 0.42 mg/L en la semana 32 (Cuarto Periodo de Evaluación) y el valor máximo fue 7.20 mg/L en la semana 10 (Primer Periodo de Evaluación).

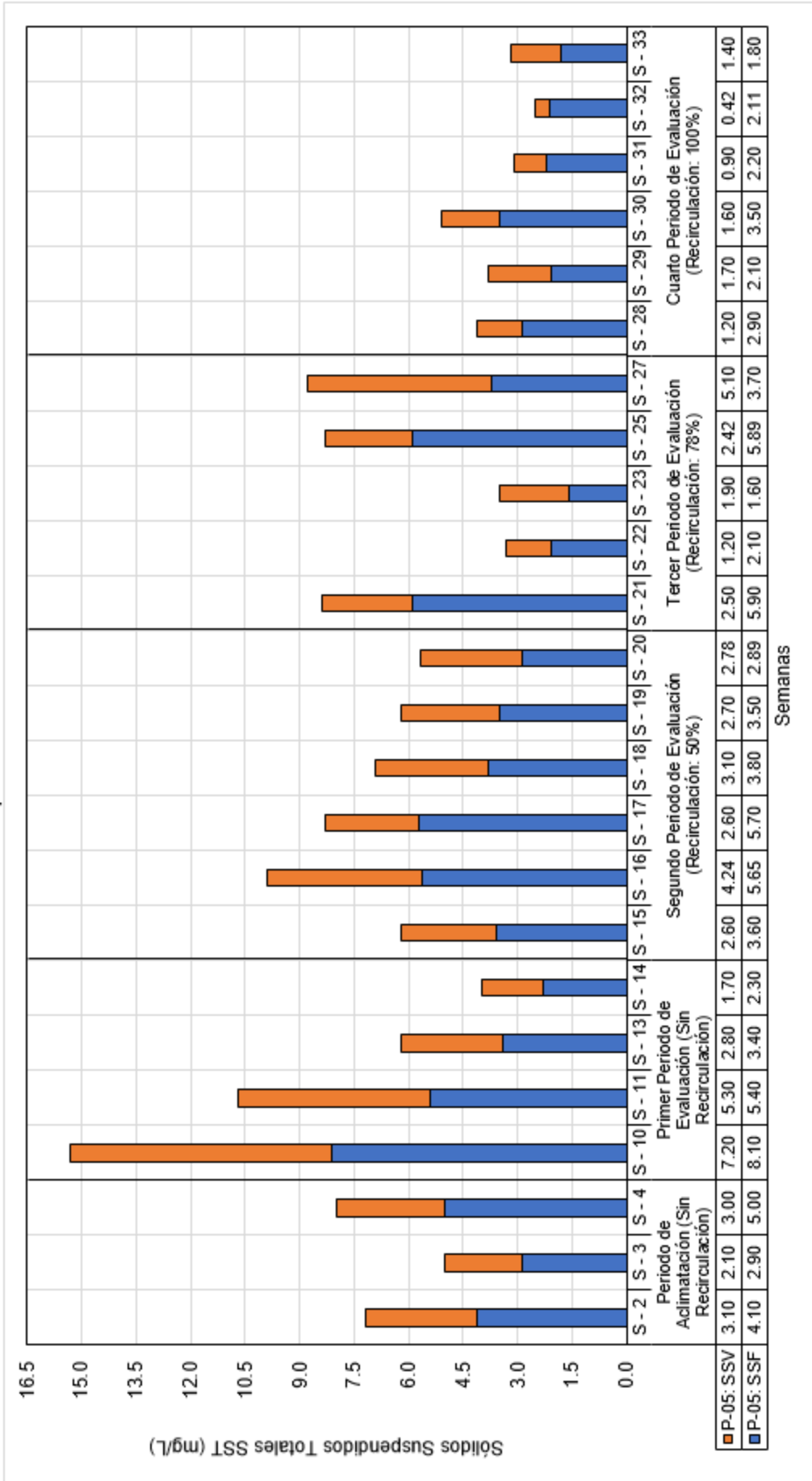
En la siguiente tabla se muestran los valores descritos anteriormente:

Tabla N° 32: Valores mínimos, máximos y promedios de los Sólidos Suspendidos en el punto P-05

Valor	SST (mg/L)	SSF (mg/L)	SSV (mg/L)
<i>Mínimo</i>	2.53	1.60	0.42
<i>Máximo</i>	15.30	8.10	7.20
<i>Promedio</i>	6.40	3.76	2.65
<i>Desviación Estándar (σ)</i>	3.00	1.66	1.54
<i>Número de muestras</i>	24	24	24

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 8: Sólidos Suspendidos Totales en el Punto P-05



Fuente: Elaboración propia

5.1.6.4. Punto P-06: Recirculación

Los sólidos suspendidos totales (SST) en el punto P-06 durante toda la investigación, llegó a un valor mínimo de 0.70 mg/L en la semana 23 y 29 (Tercer y Cuarto Periodo de Evaluación) y el valor máximo fue 5.80 mg/L correspondiente a la semana 2 (Periodo de Aclimatación).

En el caso de los sólidos suspendidos fijos (SSF), el valor mínimo fue 0.30 mg/L en la semana 29 (Cuarto Periodo de Evaluación) y el valor máximo fue 3.80 mg/L en la semana 2 (Periodo de Aclimatación).

En el caso de los sólidos suspendidos volátiles (SSV), el valor mínimo fue 0.20 mg/L en la semana 25 y 28 (Tercer y Cuarto Periodo de Evaluación) y el valor máximo fue 2.00 mg/L en la semana 2 y 16 (Periodo de Aclimatación y Segundo Periodo de Evaluación).

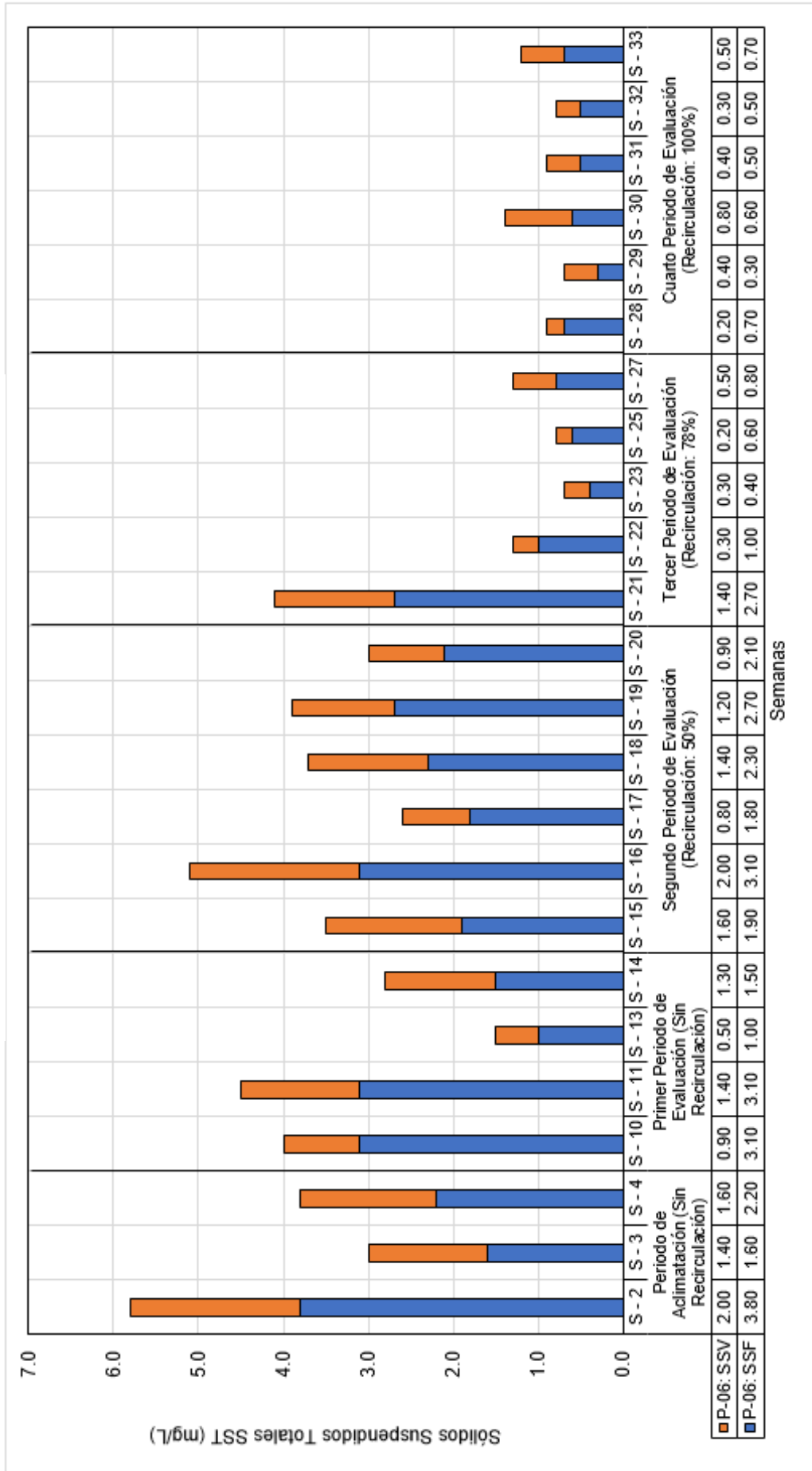
En la siguiente tabla se muestran los valores descritos anteriormente:

Tabla N° 33: Valores mínimos, máximos y promedios de los Sólidos Suspendidos en el punto P-06

Valor	SST (mg/L)	SSF (mg/L)	SSV (mg/L)
<i>Mínimo</i>	0.70	0.30	0.20
<i>Máximo</i>	5.80	3.80	2.00
<i>Promedio</i>	2.55	1.63	0.93
<i>Desviación Estándar (σ)</i>	1.58	0.99	0.68
<i>Número de muestras</i>	24	24	24

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 9: Sólidos Suspendidos Totales en el Punto P-06



Fuente: Elaboración propia

5.1.7. Nitrógeno Amoniacal (NH₃-N)

El nitrógeno amoniacal se midió semanalmente a partir del 03 de agosto del 2018 hasta el 14 de febrero del 2019, durante dicho intervalo de tiempo, hubo semanas en donde no se pudo medir por diversos motivos tales como feriados y falta de insumos.

De acuerdo a los valores obtenidos en la investigación, en el punto P-01, el nitrógeno amoniacal llegó a un valor mínimo de 40.1 mg/L y un máximo de 55.0 mg/L; en el punto P-02, llegó a 20.0 mg/L como valor mínimo y un máximo de 53.0 mg/L; en el Punto P-03, llegó a un mínimo de 11.0 mg/L y un máximo 35.0 mg/L; en el punto P-04 se obtuvieron un valor mínimo de 5.6 mg/L y un máximo de 27.0 mg/L; en el punto P-05 llegó a un valor mínimo de 0.0 mg/L y un máximo de 29.0 mg/L y finalmente en el Punto P-06, el nitrógeno amoniacal alcanzó un valor mínimo de 0.0 mg/L y un máximo de 30.0 mg/L.

En la siguiente tabla se muestran los valores descritos anteriormente:

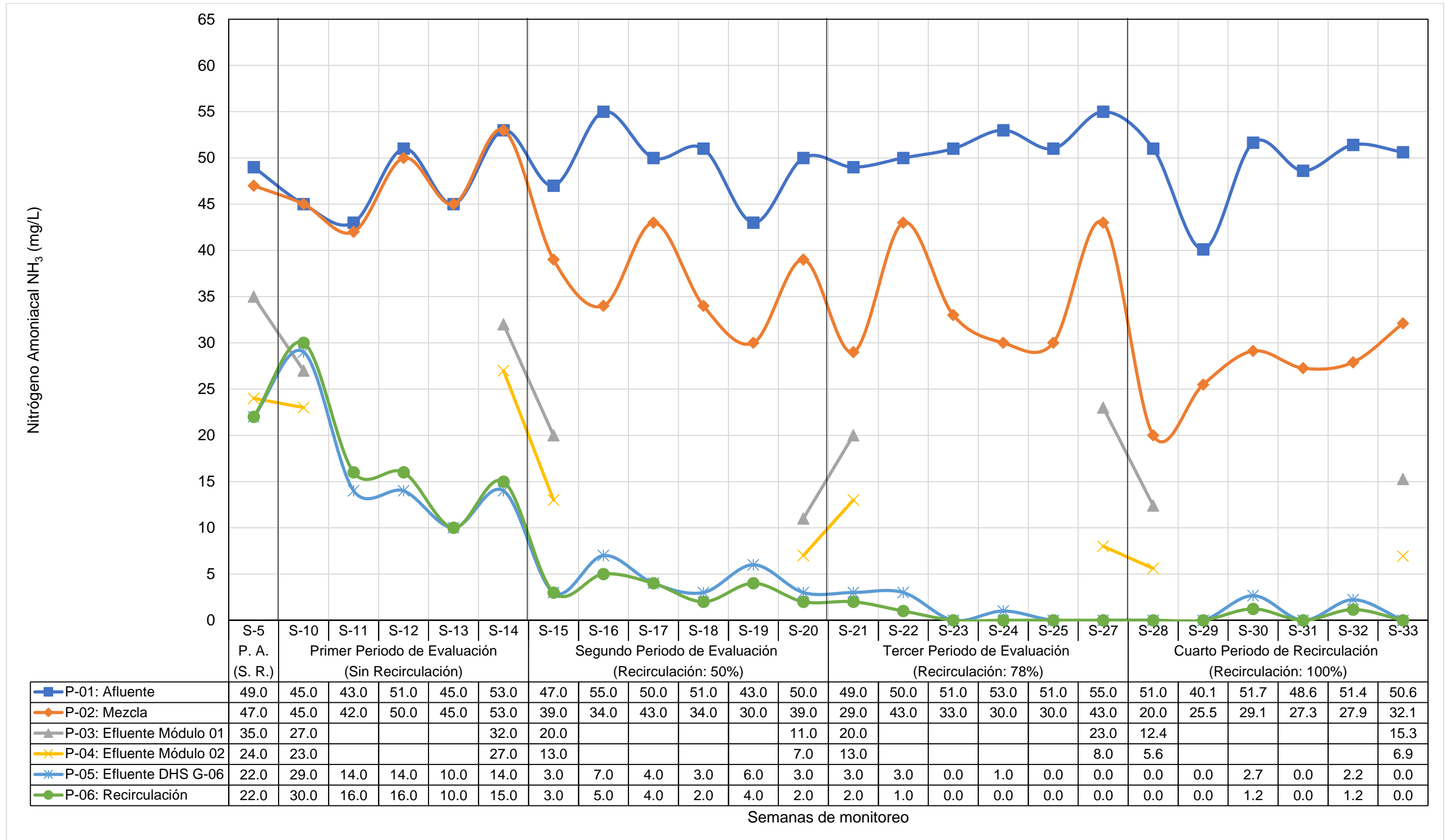
Tabla N° 34: Valores mínimos, máximo y promedios del nitrógeno amoniacal durante toda la investigación

Puntos de Monitoreo	NH ₃ Mín. (mg/L)	NH ₃ Máx. (mg/L)	NH ₃ Prom. (mg/L)	Desviación Estándar (σ)	Número de muestras
<i>P-01: Afluente</i>	40.1	55.0	49.4	± 3.8	24
<i>P-02: Mezcla</i>	20.0	53.0	36.3	± 8.6	24
<i>P-03: Efluente Módulo 01</i>	11.0	35.0	21.7	± 8.4	9
<i>P-04: Efluente Módulo 02</i>	5.6	27.0	14.4	± 8.3	9
<i>P-05: Efluente DHS G-06</i>	0.0	29.0	5.9	± 7.6	24
<i>P-06: Recirculación</i>	0.0	30.0	5.6	± 8.2	24

Fuente: Elaboración propia

A continuación, el Gráfico N° 10 muestra el comportamiento del nitrógeno amoniacal durante todo el proceso de investigación en base a los datos de la Tabla N° 56 (Anexo 1):

Gráfico N° 10: Concentración de Nitrógeno Amoniacoal NH₃ (mg/L) durante el proceso de investigación



Fuente: Elaboración propia

P.A. Periodo de Aclimatación.

S.R. Sin Recirculación.

5.1.8. Nitrógeno Total (NT)

Los nitritos se midieron semanalmente a partir del 03 de agosto del 2018 hasta el 14 de febrero del 2019, durante dicho intervalo de tiempo, hubo semanas en donde no se pudo medir por diversos motivos tales como feriados y falta de insumos.

De acuerdo a los valores obtenidos en la investigación, en el punto P-01, el NT llegó a un valor mínimo de 60.0 mg/L y un máximo de 95.8 mg/L; en el punto P-02, llegó a 40.0 mg/L como valor mínimo y un máximo de 92.4 mg/L; en el Punto P-03, llegó a un mínimo de 42.0 mg/L y un máximo 73.7 mg/L; en el punto P-04 se obtuvieron un valor mínimo de 30.5 mg/L y un máximo de 82.4 mg/L; en el punto P-05 llegó a un valor mínimo de 19.4 mg/L y un máximo de 78.4 mg/L y finalmente en el Punto P-06, el nitrógeno total alcanzó un valor mínimo de 17.7 mg/L y un máximo de 84.2 mg/L.

En la siguiente tabla se muestran los valores descritos anteriormente:

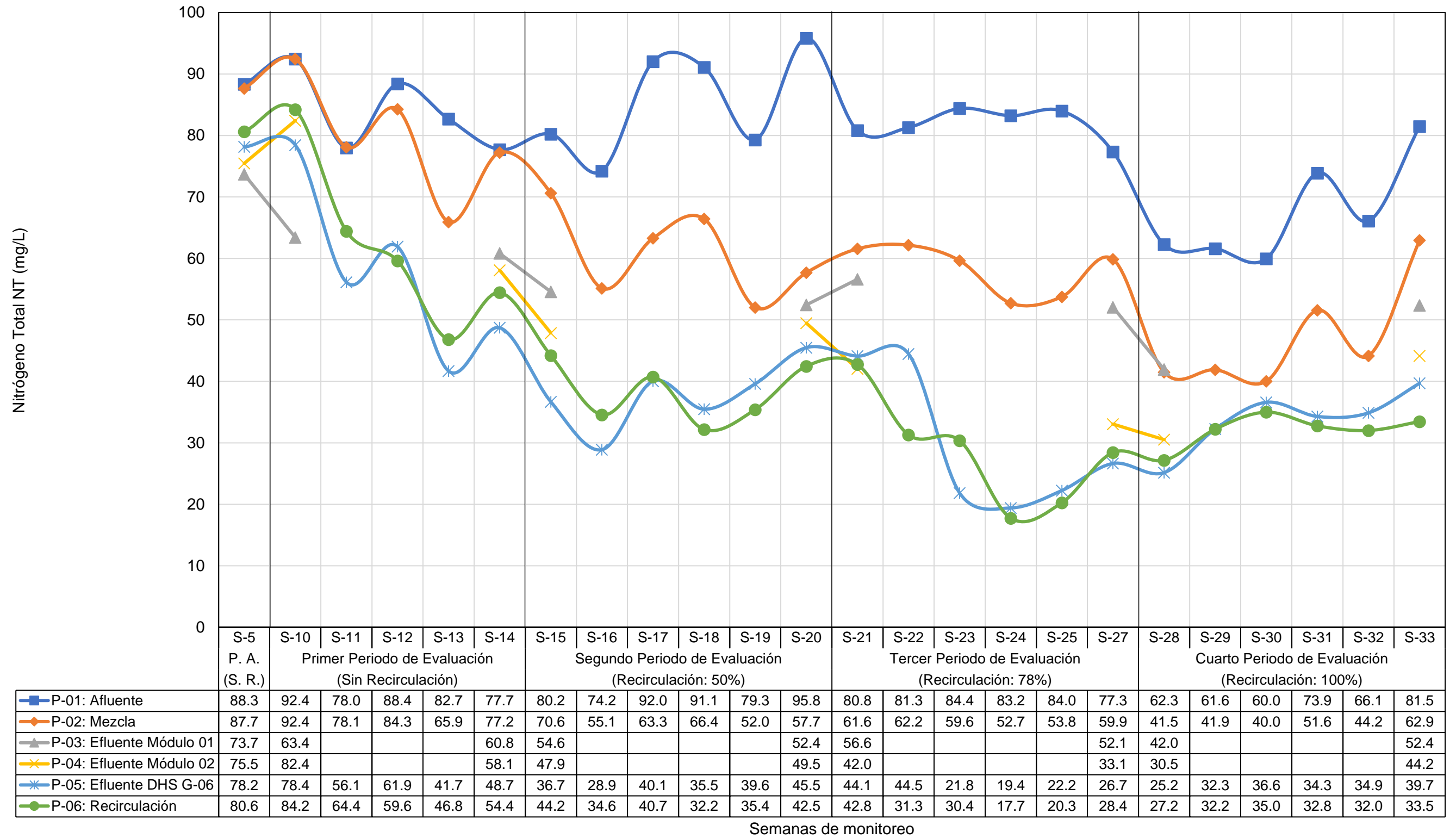
Tabla N° 35: Valores mínimos, máximo y promedios de nitrógeno total durante toda la investigación

Puntos de Monitoreo	NT Mín. (mg/L)	NT Máx. (mg/L)	NT Prom. (mg/L)	Desviación Estándar (σ)	Número de muestras
<i>P-01: Afluente</i>	60.0	95.8	79.9 ±	9.8	24
<i>P-02: Mezcla</i>	40.0	92.4	61.8 ±	14.4	24
<i>P-03: Efluente Módulo 01</i>	42.0	73.7	56.4 ±	8.9	9
<i>P-04: Efluente Módulo 02</i>	30.5	82.4	51.7 ±	17.7	9
<i>P-05: Efluente DHS G-06</i>	19.4	78.4	40.5 ±	15.6	24
<i>P-06: Recirculación</i>	17.7	84.2	41.0 ±	16.9	24

Fuente: Elaboración propia

A continuación, el Gráfico N° 11 muestra el comportamiento del nitrógeno total durante todo el proceso de investigación en base a los datos de la Tabla N° 57:

Gráfico N° 11: Concentración de Nitrógeno Total NT (mg/L) durante el proceso de investigación



Fuente: Elaboración propia

P.A. Periodo de Aclimatación.

S.R. Sin Recirculación.

5.1.9. Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK)

El nitrógeno total Kjeldahl se midió semanalmente a partir del 03 de agosto del 2018 hasta el 14 de febrero del 2019, durante dicho intervalo de tiempo, hubo semanas en donde no se pudo medir por diversos motivos tales como feriados y falta de insumos.

De acuerdo a los valores obtenidos en la investigación, en el punto P-01, el NTK llegó a un valor mínimo de 46.9 mg/L y un máximo de 69.9 mg/L; en el punto P-02, llegó a 23.4 mg/L como valor mínimo y un máximo de 58.7 mg/L; en el Punto P-03, llegó a un mínimo de 14.6 mg/L y un máximo de 36.3 mg/L; en el punto P-04 se obtuvieron un valor mínimo de 6.8 mg/L y un máximo de 30.9 mg/L; en el punto P-05 llegó a un valor mínimo de 1.1 mg/L y un máximo de 30.2 mg/L y finalmente en el Punto P-06, el nitrógeno NTK alcanzó un valor mínimo de 1.0 mg/L y un máximo de 32.4 mg/L.

En la siguiente tabla se muestran los valores descritos líneas arriba:

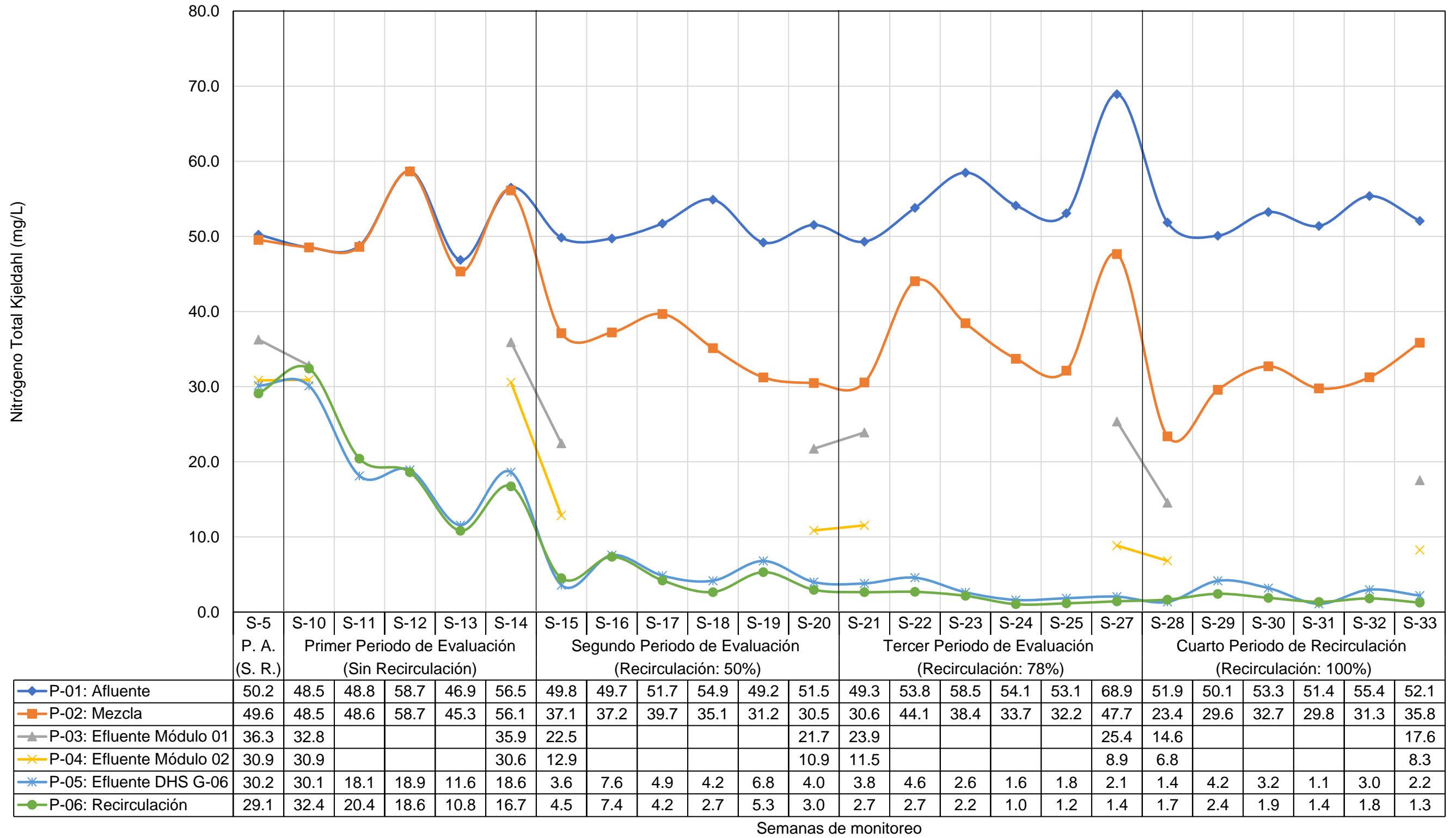
Tabla N° 36: Valores mínimos, máximo y promedios de Nitrógeno Total Kjeldahl durante toda la investigación

Puntos de Monitoreo	NTK Mín. (mg/L)	NTK Máx. (mg/L)	NTK Prom. (mg/L)	Desviación Estándar (σ)	Número de muestras
<i>P-01: Afluente</i>	46.9	68.9	52.8	\pm 4.6	24
<i>P-02: Mezcla</i>	23.4	58.7	38.6	\pm 9.2	24
<i>P-03: Efluente Módulo 01</i>	14.6	36.3	25.6	\pm 7.8	9
<i>P-04: Efluente Módulo 02</i>	6.8	30.9	16.8	\pm 10.6	9
<i>P-05: Efluente DHS G-06</i>	1.1	30.2	7.9	\pm 8.7	24
<i>P-06: Recirculación</i>	1.0	32.4	7.4	\pm 9.2	24

Fuente: Elaboración propia

A continuación, el Gráfico N° 12 muestra el comportamiento del nitrógeno total durante todo el proceso de investigación en base a los datos de la Tabla N° 58:

Gráfico N° 12: Concentración de Nitrógeno NTK (mg/L) durante el proceso de investigación



Fuente: Elaboración propia

P.A. Periodo de Aclimatación.

S.R. Sin Recirculación.

5.1.10. Nitritos (NO_2^-)

Los nitritos se midieron semanalmente a partir del 03 de agosto del 2018 hasta el 14 de febrero del 2019, durante dicho intervalo de tiempo, hubo semanas en donde no se pudo medir por diversos motivos tales como feriados y falta de insumos.

De acuerdo a los valores obtenidos en la investigación, en el punto P-01, el nitrito llegó a un valor mínimo de 5.0 mg/L y un máximo de 21.0 mg/L; en el punto P-02, llegó a 4.0 mg/L como valor mínimo y un máximo de 19.0 mg/L; en el Punto P-03, llegó a un mínimo de 8.0 mg/L y un máximo 14.0 mg/L; en el punto P-04 se obtuvieron un valor mínimo de 5.0 mg/L y un máximo de 17.0 mg/L; en el punto P-05 llegó a un valor mínimo de 2.0 mg/L y un máximo de 18.0 mg/L y finalmente en el Punto P-06, el nitrito alcanzó un valor mínimo de 1.0 mg/L y un máximo de 20.0 mg/L.

En la siguiente tabla se muestran los valores descritos líneas arriba:

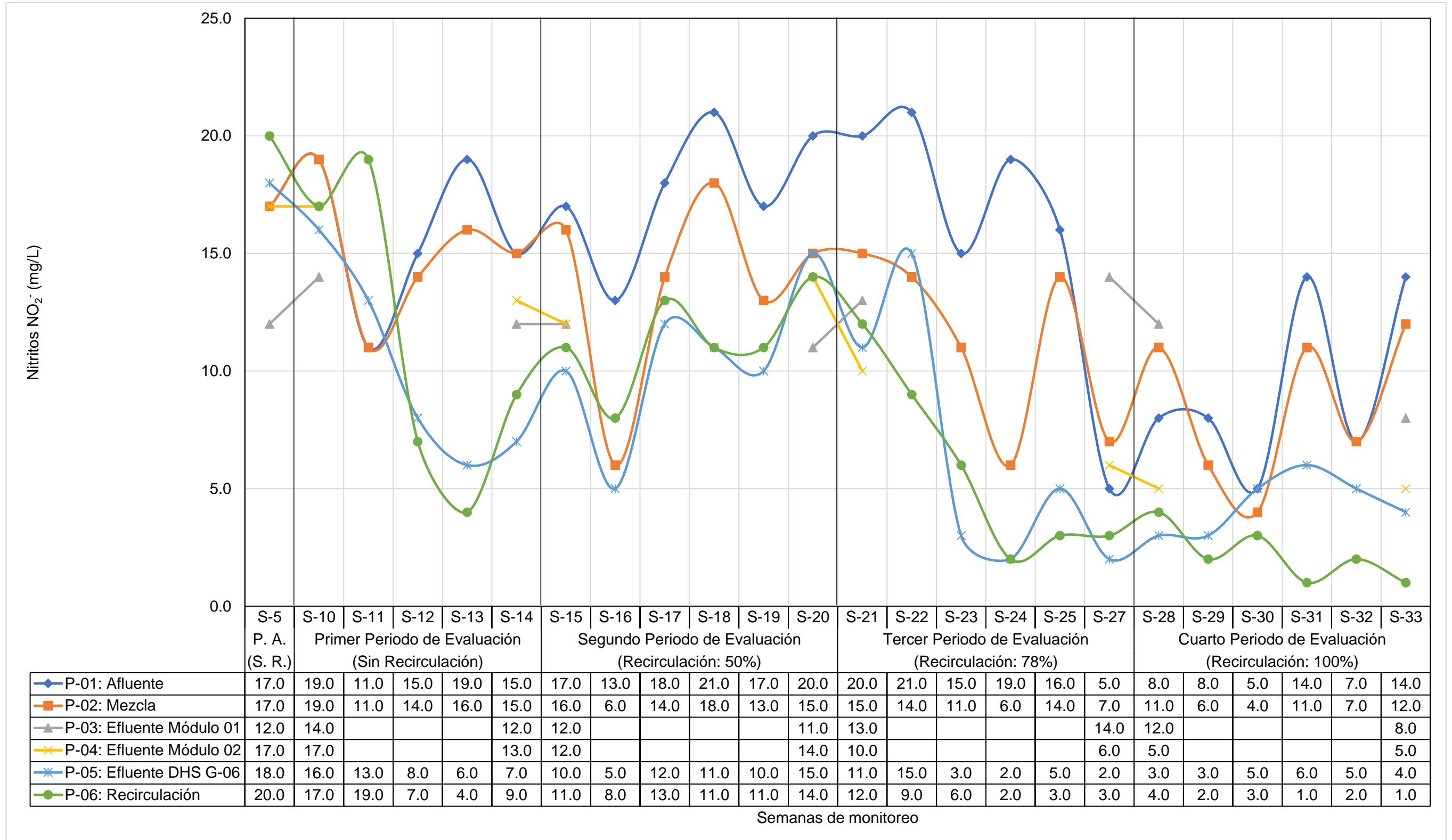
Tabla N° 37: Valores mínimos, máximo y promedios de nitritos durante toda la investigación

Puntos de Monitoreo	NO_2^- Mín. (mg/L)	NO_2^- Máx. (mg/L)	NO_2^- Prom. (mg/L)	Desviación Estándar (σ)	Número de muestras
<i>P-01: Afluente</i>	5.0	21.0	14.8	\pm 5.0	24
<i>P-02: Mezcla</i>	4.0	19.0	12.2	\pm 4.2	24
<i>P-03: Efluente Módulo 01</i>	8.0	14.0	12.0	\pm 1.8	9
<i>P-04: Efluente Módulo 02</i>	5.0	17.0	11.0	\pm 4.8	9
<i>P-05: Efluente DHS G-06</i>	2.0	18.0	8.1	\pm 4.8	24
<i>P-06: Recirculación</i>	1.0	20.0	8.0	\pm 5.8	24

Fuente: Elaboración propia

A continuación, el Gráfico N° 13 muestra el comportamiento de los nitritos durante todo el proceso de investigación en base a los datos de la Tabla N° 59:

Gráfico N° 13: Concentración de Nitritos NO₂⁻ (mg/L) durante el proceso de investigación



Fuente: Elaboración propia

P.A. Periodo de Aclimatación.

S.R. Sin Recirculación.

5.1.11. Nitratos (NO_3^-)

Los nitritos se midieron semanalmente a partir del 03 de agosto del 2018 hasta el 14 de febrero del 2019, durante dicho intervalo de tiempo, hubo semanas en donde no se pudo medir por diversos motivos tales como feriados y falta de insumos.

De acuerdo a los valores obtenidos en la investigación, en el punto P-01, el nitrato llegó a un valor mínimo de 1.7 mg/L y un máximo de 24.9 mg/L; en el punto P-02, llegó a 3.3 mg/L como valor mínimo y un máximo de 24.9 mg/L; en el Punto P-03, llegó a un mínimo de 12.7 mg/L y un máximo 26.8 mg/L; en el punto P-04 se obtuvieron un valor mínimo de 14.5 mg/L y un máximo de 34.5 mg/L; en el punto P-05 llegó a un valor mínimo de 15.4 mg/L y un máximo de 35.0 mg/L y finalmente en el Punto P-06, el nitrato alcanzó un valor mínimo de 14.7 mg/L y un máximo de 34.8 mg/L.

En la siguiente tabla se muestran los valores descritos líneas arriba:

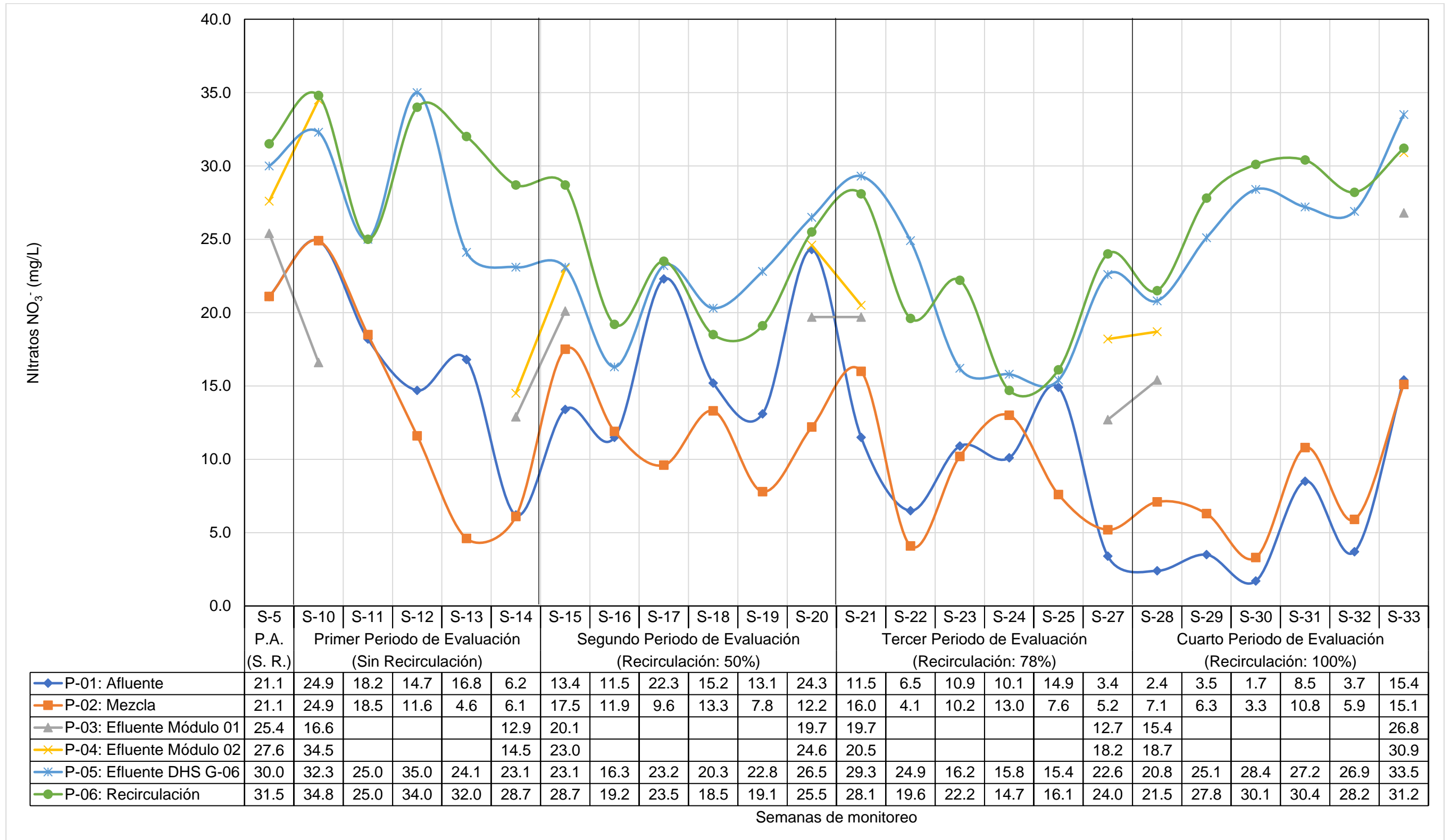
Tabla N° 38: Valores mínimos, máximo y promedios de nitratos durante toda la investigación

Puntos de Monitoreo	NO_2^- Mín. (mg/L)	NO_2^- Máx. (mg/L)	NO_2^- Prom. (mg/L)	Desviación Estándar (σ)	Número de muestras
<i>P-01: Afluente</i>	1.7	24.9	12.3	\pm 6.9	24
<i>P-02: Mezcla</i>	3.3	24.9	11.0	\pm 5.7	24
<i>P-03: Efluente Módulo 01</i>	12.7	26.8	18.8	\pm 5.0	9
<i>P-04: Efluente Módulo 02</i>	14.5	34.5	23.6	\pm 6.5	9
<i>P-05: Efluente DHS G-06</i>	15.4	35.0	24.5	\pm 5.4	24
<i>P-06: Recirculación</i>	14.7	34.8	25.6	\pm 5.7	24

Fuente: Elaboración propia

A continuación, el Gráfico N° 14 muestra el comportamiento de los nitratos durante todo el proceso de investigación en base a los datos de la Tabla N° 60:

Gráfico N° 14: Concentración de Nitratos NO₃⁻ (mg/L) durante el proceso de investigación



Fuente: Elaboración propia

P.A. Periodo de Aclimatación.

S.R. Sin Recirculación

5.1.12. Resumen del Comportamiento del Reactor DHS G-06

Tabla N° 39: Resumen del comportamiento del Reactor DHS G-06

PARÁMETRO	PERIODO DE EVALUACIÓN	P-01: Afluente		P-02: Mezcla		P-03: Efluente Módulo 01		P-04: Efluente Módulo 02		P-05: Efluente DHS G-06		P-06: Recirculación	
		Promedio	± Desv. Est.	Promedio	± Desv. Est.	Promedio	± Desv. Est.	Promedio	± Desv. Est.	Promedio	± Desv. Est.	Promedio	± Desv. Est.
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	ACLIMATACIÓN	100.87	± 12.09	100.87	± 12.09	-	-	-	-	26.17	± 1.72	24.85	± 2.29
	PRIMERO	119.29	± 12.95	119.29	± 12.95	-	-	-	-	26.49	± 2.47	21.74	± 1.77
	SEGUNDO	129.56	± 19.20	73.95	± 13.44	-	-	-	-	20.73	± 4.83	20.68	± 3.57
	TERCERO	137.58	± 4.42	74.47	± 7.92	-	-	-	-	20.04	± 8.88	17.96	± 5.76
	CUARTO	111.17	± 19.13	70.89	± 6.34	-	-	-	-	11.79	± 0.96	11.91	± 1.52
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	ACLIMATACIÓN	18.95	± 2.27	16.67	± 2.66	-	-	-	-	6.73	± 1.55	4.20	± 1.44
	PRIMERO	21.96	± 4.07	17.20	± 1.35	-	-	-	-	9.05	± 5.01	3.20	± 1.34
	SEGUNDO	14.82	± 2.32	10.28	± 1.45	-	-	-	-	7.19	± 1.60	3.63	± 0.86
	TERCERO	24.19	± 11.69	12.61	± 8.38	-	-	-	-	6.46	± 2.80	1.64	± 1.40
	CUARTO	16.24	± 4.06	8.96	± 0.73	-	-	-	-	3.64	± 0.90	0.98	± 0.26
Sólidos Suspendidos Fijos (SSF)	ACLIMATACIÓN	9.34	± 1.85	8.60	± 1.49	-	-	-	-	4.00	± 1.05	2.20	± 0.60
	PRIMERO	12.20	± 3.39	8.96	± 1.46	-	-	-	-	4.80	± 2.55	2.18	± 1.09
	SEGUNDO	8.63	± 1.48	5.83	± 0.56	-	-	-	-	4.19	± 1.19	2.32	± 0.50
	TERCERO	14.33	± 6.15	7.88	± 4.04	-	-	-	-	3.84	± 2.03	1.10	± 0.92
	CUARTO	10.31	± 2.42	6.22	± 1.30	-	-	-	-	2.43	± 0.64	0.55	± 0.15
Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)	ACLIMATACIÓN	9.61	± 2.55	8.07	± 1.29	-	-	-	-	2.73	± 0.55	2.00	± 0.87
	PRIMERO	9.77	± 0.98	8.27	± 1.35	-	-	-	-	4.25	± 2.48	1.02	± 0.41
	SEGUNDO	6.19	± 1.31	4.44	± 1.00	-	-	-	-	3.00	± 0.63	1.32	± 0.45
	TERCERO	9.85	± 5.68	4.73	± 4.39	-	-	-	-	2.62	± 1.48	0.54	± 0.49
	CUARTO	5.94	± 2.24	2.74	± 0.88	-	-	-	-	1.20	± 0.48	0.43	± 0.21
Nitrógeno Total (NT)	PRIMERO	83.80	± 6.50	79.60	± 9.80	62.10	± 1.80	70.20	± 17.20	57.40	± 14.00	61.90	± 14.10
	SEGUNDO	85.40	± 8.70	60.90	± 7.10	53.50	± 1.50	48.70	± 1.10	37.70	± 5.50	38.30	± 4.90
	TERCERO	81.80	± 2.60	58.30	± 4.00	54.30	± 3.20	37.50	± 6.40	29.80	± 11.50	28.50	± 8.90
	CUARTO	67.50	± 8.50	47.00	± 8.80	47.20	± 7.40	37.30	± 9.60	33.80	± 4.90	32.10	± 2.60
Nitrógeno Amoniacal (NH ₃ -N)	PRIMERO	47.40	± 4.30	47.00	± 4.40	29.50	± 3.50	25.00	± 2.80	16.20	± 7.40	17.40	± 7.50
	SEGUNDO	49.30	± 4.00	36.50	± 4.70	15.50	± 6.40	10.00	± 4.20	4.30	± 1.80	3.30	± 1.20
	TERCERO	51.50	± 2.20	34.70	± 6.60	21.50	± 2.10	10.50	± 3.50	1.20	± 1.50	0.50	± 0.80
	CUARTO	48.90	± 4.40	27.00	± 4.10	13.80	± 2.00	6.30	± 0.90	0.80	± 1.30	0.40	± 0.60
Nitritos (NO ₂ ⁻)	PRIMERO	15.80	± 3.30	15.00	± 2.90	13.00	± 1.40	15.00	± 2.80	10.00	± 4.30	11.20	± 6.50
	SEGUNDO	17.70	± 2.80	13.70	± 4.10	11.50	± 0.70	13.00	± 1.40	10.50	± 3.30	11.30	± 2.10
	TERCERO	16.00	± 5.90	11.20	± 3.90	13.50	± 0.70	8.00	± 2.80	6.30	± 5.40	5.80	± 4.00
	CUARTO	9.30	± 3.80	8.50	± 3.30	10.00	± 2.80	5.00	± 0.00	4.30	± 1.20	2.20	± 1.20
Nitratos (NO ₃ ⁻)	PRIMERO	16.20	± 6.80	13.10	± 8.50	14.80	± 2.60	24.50	± 14.10	27.90	± 5.40	30.90	± 4.10
	SEGUNDO	16.60	± 5.30	12.10	± 3.30	19.90	± 0.30	23.80	± 1.10	22.00	± 3.40	22.40	± 4.20
	TERCERO	9.60	± 4.00	9.40	± 4.60	16.20	± 4.90	19.40	± 1.60	20.70	± 5.80	20.80	± 5.00
	CUARTO	5.90	± 5.20	8.10	± 4.20	21.10	± 8.10	24.80	± 8.60	27.00	± 4.20	28.20	± 3.50

Fuente: Elaboración propia

5.1.13. Biomasa en el Reactor DHS G-06

5.1.13.1. Crecimiento de la Biomasa

A continuación, se muestra la distribución de las esponjas en los módulos 01, 02 y 03 el día 20 de julio de 2018, es decir, a los 15 días de iniciada la investigación (Periodo de Aclimatación – 20/07/2018).

Foto N° 18: Distribución de las esponjas en el Módulo 01 – Día 20/07/2018



Foto N° 19: Distribución de las esponjas en el Módulo 02 – Día 20/07/2018



Foto N° 20: Distribución de las esponjas en el Módulo 03 – Día 20/07/2018



En la Foto N° 18 se observa, que el módulo 01, se generó un crecimiento mayor de biomasa con respecto a los Módulos 02 y 03 (Foto N° 19 y N° 20) además, se observó que la biomasa no fue tan abundante debido al tiempo de operación hasta ese momento.

Gracias a que las esponjas fueron de color blanco, se pudo observar de forma clara que la biomasa adherida fue de color marrón oscuro con una textura viscosa. No se observó un cambio significativo en el aspecto de las esponjas en lo que respecta al crecimiento de la biomasa.

Foto N° 21: Esponjas en la base del Módulo 01 – Día 12/09/2018



Luego de 69 días de iniciada la investigación (Primer Periodo de Evaluación – 12/09/2018), se pudo observar que las esponjas ubicadas en la base del Módulo 01 contaban con una gran cantidad de biomasa adherida (Foto N° 21) sin embargo ello no ocurrió en las esponjas colocadas en la base del Módulo 03 (Foto N° 22).

Foto N° 22: Esponjas en la base del Módulo 03 – Día 12/09/2018



A mediados del primer periodo de evaluación se presentaron larvas que se incrustaron en algunos poros de las esponjas de los módulos 01 y 02.

La biomasa desprendida en las esponjas del Módulo 01, se transfirieron a la siguiente unidad por acción del arrastre hidráulico generado al interior de cada módulo.

Foto N° 23: Distribución de las esponjas en el Módulo 01 – Día 05/12/2018



Foto N° 24: Distribución de las esponjas en el Módulo 02 – Día 05/12/2018



Foto N° 25: Distribución de las esponjas en el Módulo 03 – Día 05/12/2018



Transcurridos 153 días desde el inicio de la investigación (Tercer Periodo de Investigación – 05/12/2018) se observó que la biomasa creció de manera más

predominante en los módulos 01 y 02 mientras que en el Módulo 03, el crecimiento fue menor dando a entender que en las dos primeras unidades se realiza la mayor parte del tratamiento (Foto N° 23, 24 y 25).

También se formó una biopelícula en algunas zonas del acrílico.

Foto N° 26: Distribución de las esponjas en el Módulo 01 y Módulo 02 – Día 15/02/2019



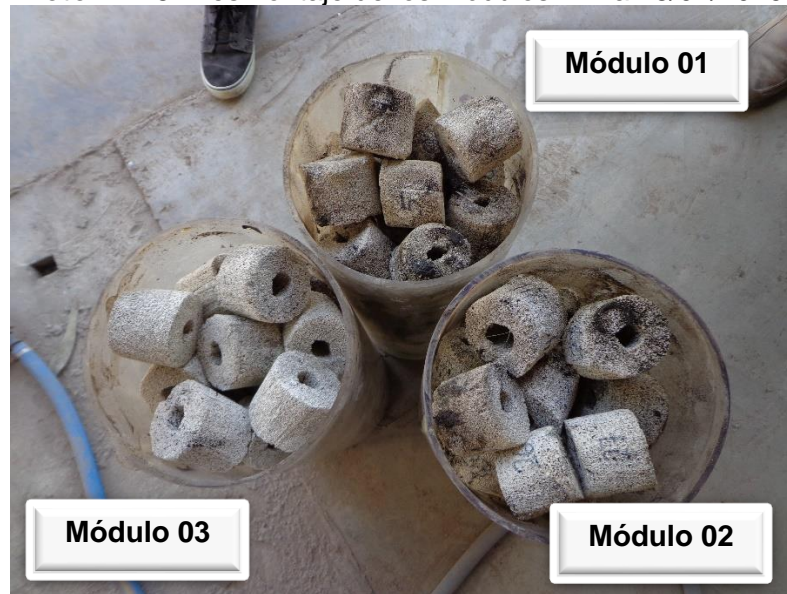
Foto N° 27: Distribución de las esponjas en el Módulo 03 – Día 15/02/2019



Diez días antes del término de la investigación se observó que la biomasa había crecido en gran medida en los módulos 01 y 02 sin embargo el módulo 03 no hubo cambio con respecto al tercer periodo de evaluación.

Cuando se finalizó el periodo de investigación (Cuarto Periodo de Evaluación – 15/02/2019), las esponjas en el módulo 01 y 02 se mantuvieron, visualmente, con la misma cantidad de biomasa que días anteriores, lo cual no ocurrió en el módulo 03 en donde la biomasa adherida a la superficie de las esponjas se había desprendido ya que no eran observables a simple vista (Foto N° 27).

Foto N° 28: Desmontaje de los módulos – Día 18/02/2019



Todas las esponjas endurecidas fueron pesadas antes de dar inicio al periodo de aclimatación (peso inicial) y al finalizar el cuarto periodo de evaluación (peso final) con el fin de estudiar la capacidad de crecimiento y adherencia de la biomasa en el material de soporte.

En cada módulo se colocaron 51 esponjas endurecidas de forma aleatoria y no fueron sustraídas y/o cambiadas hasta culminar con la investigación.

Para poder analizar el crecimiento de la biomasa adherida, se consideraron las esponjas cuya masa final supere a la masa inicial ya que existieron pocos casos donde ocurrió un evento contrario al mencionado, dando como resultado masa negativa. Dichas eventualidades se generaron debido al desprendimiento de pequeñas porciones de la propia esponja endurecida al momento de ser colocadas y retiradas en los módulos.

- Módulo 01: De las 51 esponjas endurecidas, se analizaron 42 dando como resultado una masa inicial total de 1286.9 gr., una masa final total 1825.0 gr. y una variación de 538.1 gr.
- Módulo 02: De las 51 esponjas endurecidas, se analizaron 39 dando como resultado una masa inicial total de 1240.1 gr., una masa final total 1764.5 gr. y una variación de 524.4 gr.

- Módulo 03: De las 51 esponjas endurecidas, se analizaron 44 dando como resultado una masa inicial total de 1405.7 gr., una masa final total 1827.3 gr. y una variación de 421.6 gr.

El término “variación” se refiere a la cantidad de biomasa (en gramos) presentes en las esponjas endurecidas al finalizar el proceso de investigación.

Foto N° 29: Módulos al inicio de la investigación



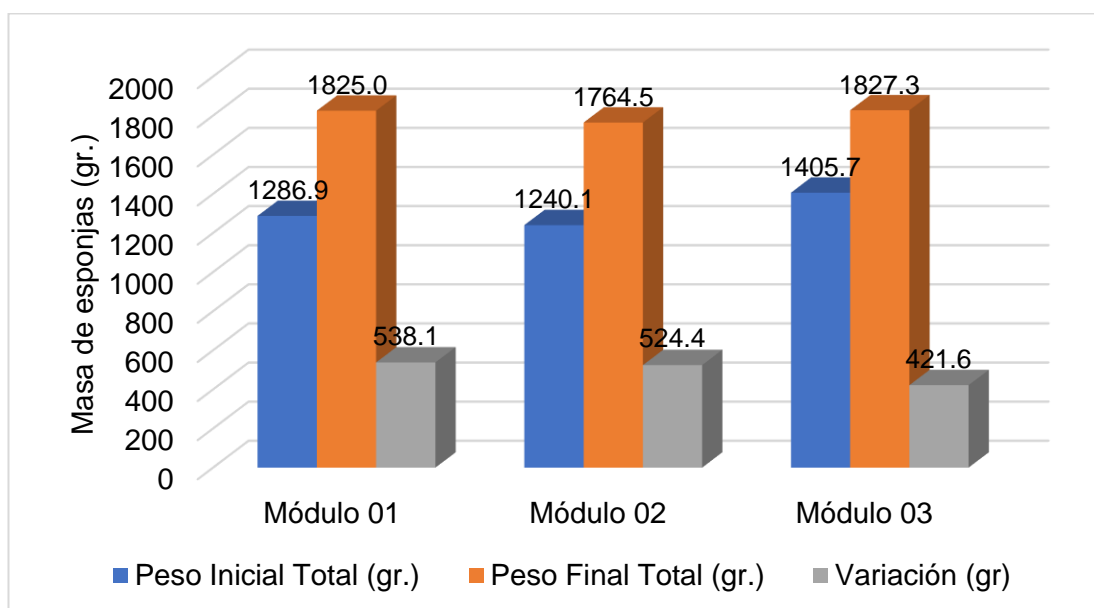
Foto N° 30: Módulos al finalizar de la investigación



Tabla N° 40: Masa de la esponja endurecida (gr.)

	N° Esponjas	Masa Inicial Total (gr.)	Masa Final Total (gr.)	Variación (gr)
<i>Módulo 01</i>	42	1286.9	1825.0	538.1
<i>Módulo 02</i>	39	1240.1	1764.5	524.4
<i>Módulo 03</i>	44	1405.7	1827.3	421.6

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 15: Masa de la esponja endurecida (gr.)

Fuente: Elaboración propia

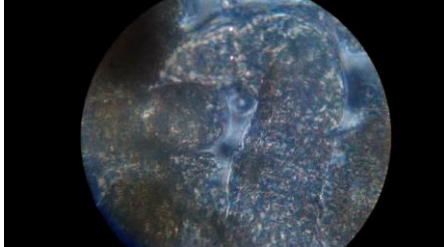


5.1.13.2. Caracterización microbiológica de la Biomasa

Las características microbiológicas fueron analizadas al finalizar el cuarto periodo de evaluación debido a que se necesitó desmontar el sistema para poder retirar las esponjas y con ello la biomasa adherida.

Para poder observar los posibles microorganismos presentes en la biomasa adherida en las esponjas, se procedió a retirar porciones de esponja que luego fueron llevados al microscopio.

En la siguiente tabla se presentan los microorganismos probablemente presentes en la biomasa de los tres módulos.

Tabla N° 41: Microorganismos probablemente presentes en la biomasa - Reactor DHS

Tipo de microorganismo	Fotografía	Descripción
<p><i>Protista / Ciliado / Paramecium</i></p>		<p>Presentes en aguas residuales con alta materia orgánica. Su movimiento se debe a sus numerosos cilios. Se nutren de otros organismos (heterótrofos) y se reproducen sexual y asexualmente mediante conjugación y bipartición, respectivamente.</p>
<p><i>Protista / Ciliado / Pleuronema</i></p>		<p>Es un ciliado que está representado por menos de media docena de especies y todas ellas con una particularidad, presentan una serie de cilios largos soldados junto a su citostoma. Estos cilios sirven para recoger las pequeñas partículas orgánicas y algas de las que se alimentan.</p>
<p><i>Rotífero / Epiphanes</i></p>		<p>Presenta una cutícula poco rígida lo que permite su flexibilidad. Cuenta con dos ojos rudimentarios y una corona en la parte anterior formada por varias hileras de membranas minúsculas. Principalmente se alimenta de microorganismos flagelados.</p>

Fuente: Elaboración propia

En las muestras de biomasa, se pudo encontrar protozoarios ciliados quienes tienen la capacidad de metabolizar elementos solubles e insolubles. Fueron indicadores de un buen funcionamiento del sistema de tratamiento debido a que permiten reducir la turbiedad del efluente. Los ciliados también se alimentan de bacterias patógenas.

En otras muestras se encontraron rotíferos los cuales se encargaban de metabolizar partículas sólidas y, al igual que los protozoarios, ayudaban a la clarificación del efluente.

No se encontró microorganismos flagelados en las muestras analizadas lo que indicó una buena eficiencia de remoción de la DBO_5 .

5.1.13.3. Biomasa presente en el sedimentador

Los lodos generados por el tratamiento del reactor DHS se almacenaron y precipitaron en los sedimentadores 01 y 02.

Foto N° 31: Sedimentador 01



Foto N° 32: Sedimentador 02



El lodo precipitado en los sedimentadores fue medido al término del segundo periodo de evaluación (16/11/2018), tercer periodo de evaluación (04/01/2019) y cuarto periodo de evaluación (15/02/2018) con la ayuda de un cono Imhoff.

El mantenimiento de los sedimentadores fue semanal (purgado y lavado) por tal motivo la cantidad de lodo hallado mediante el cono Imhoff correspondió al generado en 7 días.

A continuación, se muestran los valores de los Sólidos Sedimentables en las fechas correspondientes:

Tabla N° 42: Sólidos sedimentables

Periodo / Tiempo del lodo en sedimentadores	Sedimentador 01 (mL/L/hora)	Sedimentador 02 (mL/L/hora)
<i>Segundo Periodo de Evaluación</i> <i>(Del 10/11/2018 al 16/11/2018)</i>	0.30	0.10
<i>Tercer Periodo de Evaluación</i> <i>(Del 28/12/2018 al 04/01/2019)</i>	0.30	0.20
<i>Cuarto Periodo de Evaluación</i> <i>(Del 08/02/2019 al 15/02/2019)</i>	0.20	0.05

Fuente: Elaboración propia

6. CAPITULO VI: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. PARÁMETROS EVALUADOS

En este capítulo se presenta la discusión de los resultados obtenidos en la investigación realizada en los diversos periodos de evaluación.

6.1.1. Temperatura

Este parámetro fue de suma importancia debido a su impacto en el comportamiento de las reacciones biológicas realizadas por los microorganismos presentes en el reactor DHS G-06.

El periodo de aclimatación y gran parte del primer periodo de evaluación se desarrollaron en la estación invierno, por ello la temperatura fluctuaba entre los 16.4 y 21.2 °C que son valores normales para dicha época del año.

Las últimas dos semanas del primer periodo de evaluación hasta la antepenúltima semana del tercer periodo de evaluación se desarrollaron en la estación primavera en donde se obtuvo una temperatura mínima de 17.6°C a una máxima de 27.4°C. La temperatura iba incrementada en el transcurrir de los días.

Las dos últimas semanas del tercer periodo de evaluación hasta finalizar el cuarto periodo de evaluación (fin de la investigación) se desarrollaron en la estación verano llegando a una temperatura mínima de 25.1°C y una máxima de 31.4°C.

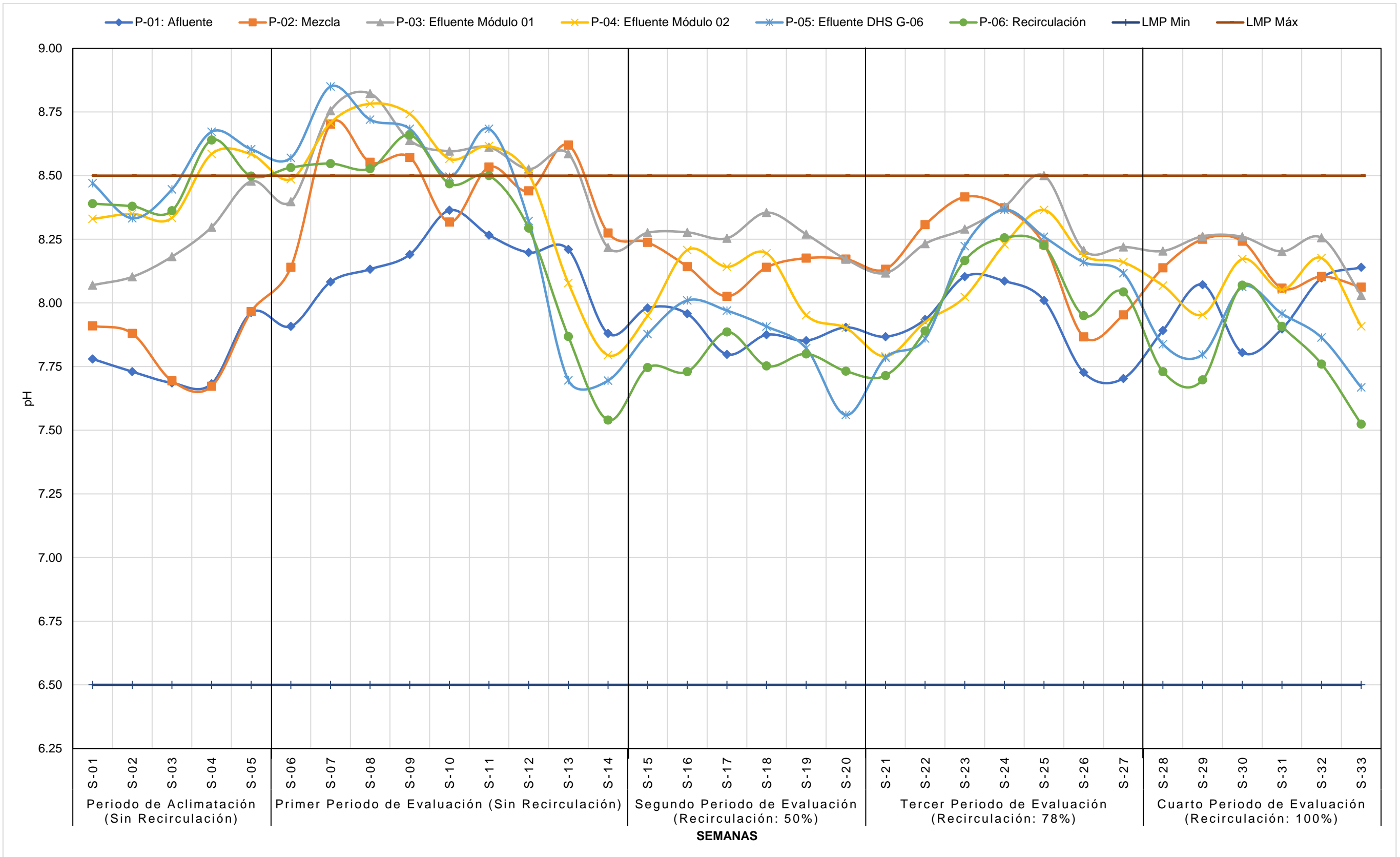
Se pudo determinar que la temperatura al ingreso del reactor DHS G-06 (P-01) fue ligeramente mayor que la temperatura a la salida del reactor (P-05) en gran parte de la investigación. El motivo de este evento fue la pérdida de calor por conducción generado por el contacto del agua residual con el área superficial de la esponja endurecida.

6.1.2. pH

En el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, establece que el valor de pH para los efluentes de una PTAR debe estar en el rango de 6.5 a 8.5.

De acuerdo al Gráfico N° 16, los valores de pH en el reactor DHS G-06 fueron incrementándose en el periodo de aclimatación y en el primer periodo de evaluación para luego mantenerse en el intervalo de valores establecidos en el DS N° 003-2010-MINAM.

Gráfico N° 16: Concentración de pH vs LMP PTAR



Fuente: Elaboración propia

En todos los periodos de investigación, no se obtuvo un valor menor al 6.5, más aún, el mínimo fue 7.30 correspondiente al segundo periodo de evaluación.

En el periodo de aclimatación y en el primer periodo de valuación se encontraron valores de pH mayores a 8.5. Los pH máximos encontrados en estos dos periodos fueron 8.85, 8.94, 8.93, 8.74, 8.62 y 8.86 correspondientes a los puntos P-02, P-03, P-04, P-05 y P-06, respectivamente.

Durante la evaluación del segundo, tercer y cuarto periodo de evaluación, el rango de pH en los puntos de monitoreo estuvo entre 6.5 y 8.5 a excepción del valor 8.54 perteneciente al punto P-03 en el tercer periodo de evaluación. Se puede observar que el pH en el punto P-05 (Efluente del reactor DHS G-06) y P-06 (Recirculación) disminuye con respecto al pH del punto P-01 (Ingreso). La disminución de pH indica que se ha llevado a cabo la acidificación natural debido a la presencia de Dióxido de Carbono (CO₂) producto de la respiración de los microorganismos presentes en la biomasa adherida en las esponjas endurecidas.

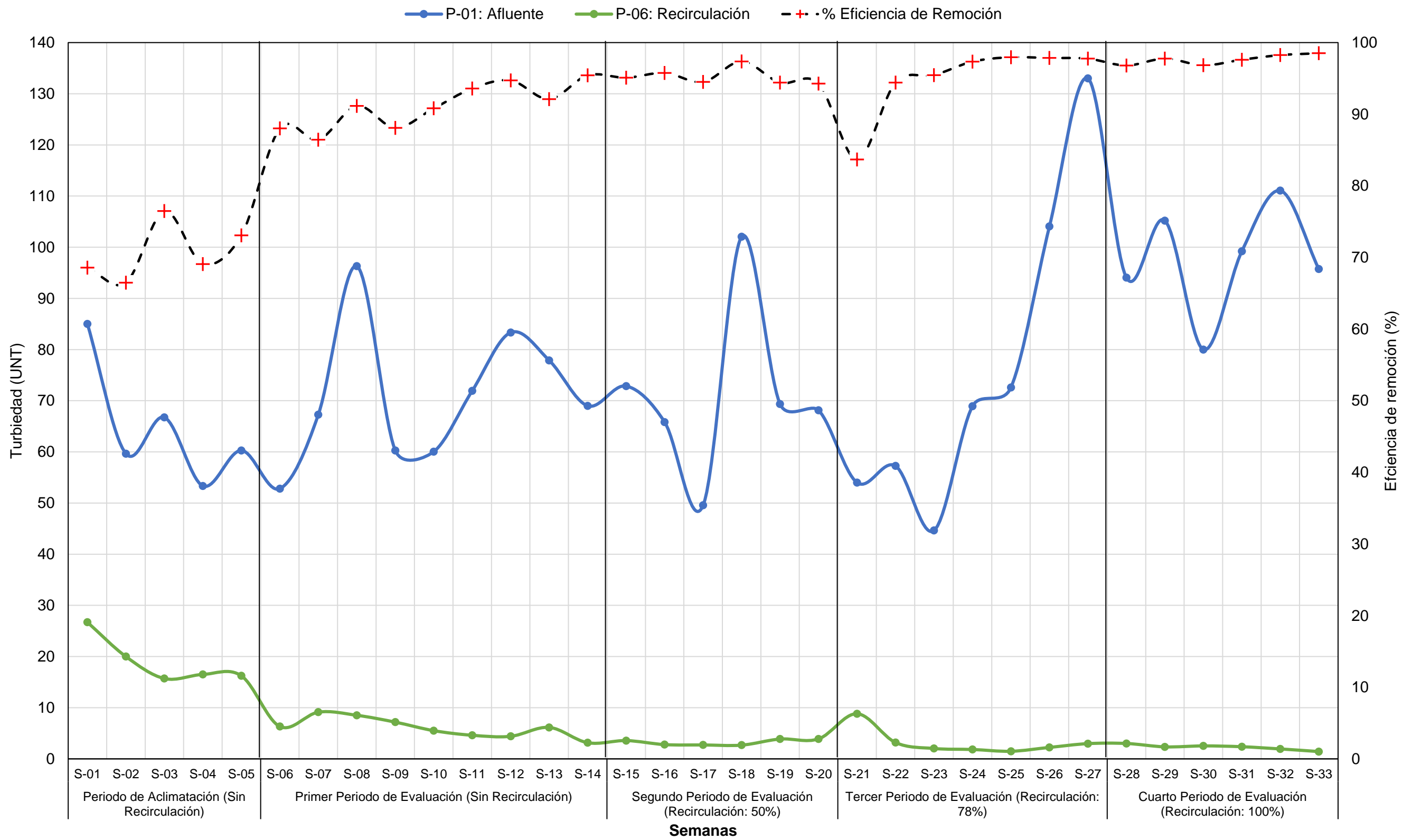
6.1.3. Turbiedad

En el periodo de aclimatación y en el primer periodo de evaluación no hubo mezcla debido a que el efluente no fue recirculado, sin embargo, se realizó el monitoreo del punto P-02 desde el inicio de la investigación para poder observar la variación de la turbiedad del afluente (con o sin mezcla).

En el Gráfico N° 3 se puede observar que la turbiedad en el Punto P-02 (Mezcla) se mantuvo, recurrentemente, con un valor igual o menor que el Punto P-01 (Ingreso) sin embargo existieron algunos valores atípicos que mostraron lo contrario debido a la falta de mantenimiento del tubo repartidor de caudal en donde se almacenaron los sedimentos del agua residual antes de ingresar al reactor. También se muestra la tendencia de reducción de turbiedad en los puntos P-03, P-04, P-05 y P-06.

En dicho gráfico se muestran valores atípicos de los puntos P-04 y P-05 en el periodo de aclimatación y en el primer periodo de evaluación que superaban el valor de turbiedad de ingreso. La justificación de dicho fenómeno se debió al desprendimiento y arrastre de la biomasa en exceso generada en las esponjas.

Gráfico N° 17: Eficiencia de remoción de la Turbiedad (%)



Fuente: Elaboración propia

La remoción de turbiedad desde el periodo de aclimatación hasta el cuarto periodo de evaluación fue elevándose llegando a una eficiencia de remoción máxima del 98.51% correspondiente al último periodo de evaluación y una eficiencia mínima de 66.48% perteneciente al periodo de aclimatación.

Se puede observar en el Gráfico N° 17 que la eficiencia de remoción se mantuvo en un valor cuasi constante (mayor al 90%) a partir de la segunda semana del tercer periodo de evaluación (Semana 22).

Tabla N° 43: Valores mínimos, máximos y promedios de la eficiencia de remoción de Turbiedad (%)

Eficiencia de Remoción	Mínimo (%)	Máximo (%)	Promedio (%)
<i>Periodo de Aclimatación</i> (Sin Recirculación)	66.48	76.48	70.74 ± 4.00
<i>Primer Periodo de Evaluación</i> (Sin Recirculación)	86.43	95.43	91.15 ± 3.15
<i>Segundo Periodo de Evaluación</i> (Recirculación: 50%)	94.27	97.37	95.24 ± 1.18
<i>Tercer Periodo de Evaluación</i> (Recirculación: 78%)	83.67	97.95	94.92 ± 5.15
<i>Cuarto Periodo de Evaluación</i> (Recirculación: 100%)	96.80	98.51	97.63 ± 0.71

Fuente: Elaboración propia

6.1.4. Oxígeno Disuelto

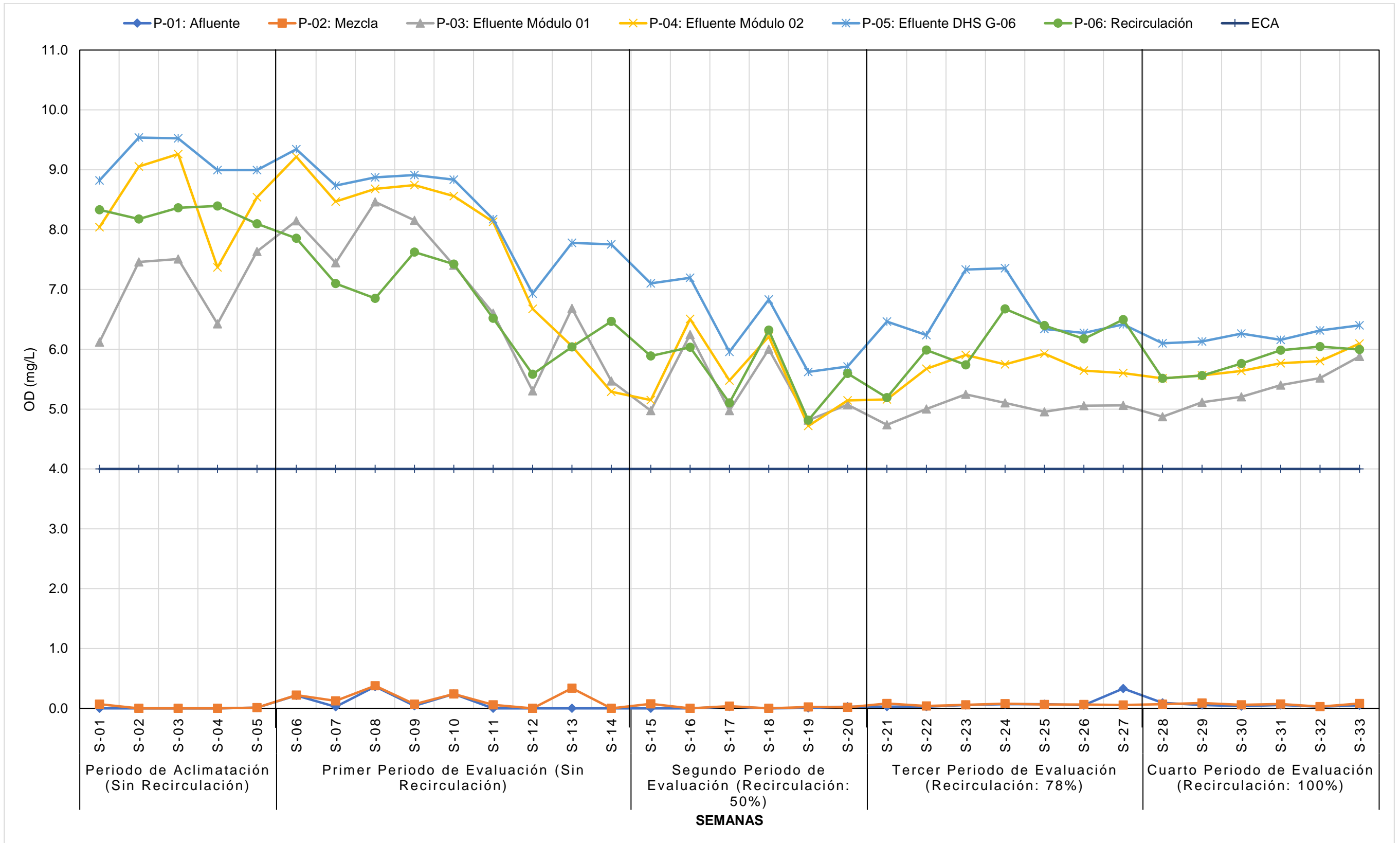
De acuerdo al ECA – Categoría 3: Riego de Vegetales y Bebidas para Animales, el oxígeno disuelto debe ser mayor o igual a 4 mg/L.

Para poder observar el comportamiento del oxígeno disuelto en los puntos de monitoreo con respecto al valor establecido en el ECA, se ha elaborado el Gráfico N° 18.

El oxígeno disuelto (OD) en el punto P-01 (Ingreso) fue nulo o muy cercano a cero en todos periodos de evaluación debido a que el afluente provenía de un proceso de tratamiento anaerobio.

Se puede observar que el punto P-02 (Mezcla) tuvo un comportamiento similar al P-01. Si bien el punto P-02 se generaba a partir de la mezcla entre el afluente y el efluente, el oxígeno disuelto de este último era consumido rápidamente por las bacterias presentes en el agua residual sin tratar (proveniente del UASB).

Gráfico N° 18: Concentración de Oxígeno Disuelto vs ECA



Fuente: Elaboración Propia

Como se puede apreciar en el Gráfico N° 18, el valor de oxígeno disuelto en los puntos P-03, P-04, P-05 y P-06 superaron al valor mínimo ECA en toda la investigación.

Cabe considerar que, a lo largo de la investigación, el oxígeno disuelto en el punto P-05 (Efluente Reactor DHS G-06) superó levemente al OD en el punto P-06 (Recirculación). Este suceso se debió a que la recirculación partía del sedimentador 02 en donde el agua residual tratada se mantenía almacenada un tiempo determinado con lo cual el oxígeno disuelto se iba disipando.

6.1.5. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

En el Grafico N° 19 se muestra el incremento de la eficiencia de remoción de carga orgánica y la comparación de los valores de DBO₅ semanales con respecto al Límite Máximo Permisible cuyo valor es 100 mg/L (DS 003-2010-MINAM).

El incremento de la remoción de materia orgánica fue gracias al crecimiento de la biomasa o biofilm adherida a las esponjas endurecidas durante la investigación.

Los valores de DBO₅ obtenidos en los puntos P-05 (Efluente DHS) y P-06 (Recirculación) resultan ser mucho menores al LMP y a partir del segundo periodo de evaluación, el punto P-02 (Mezcla) se encuentra por debajo de dicho valor límite.

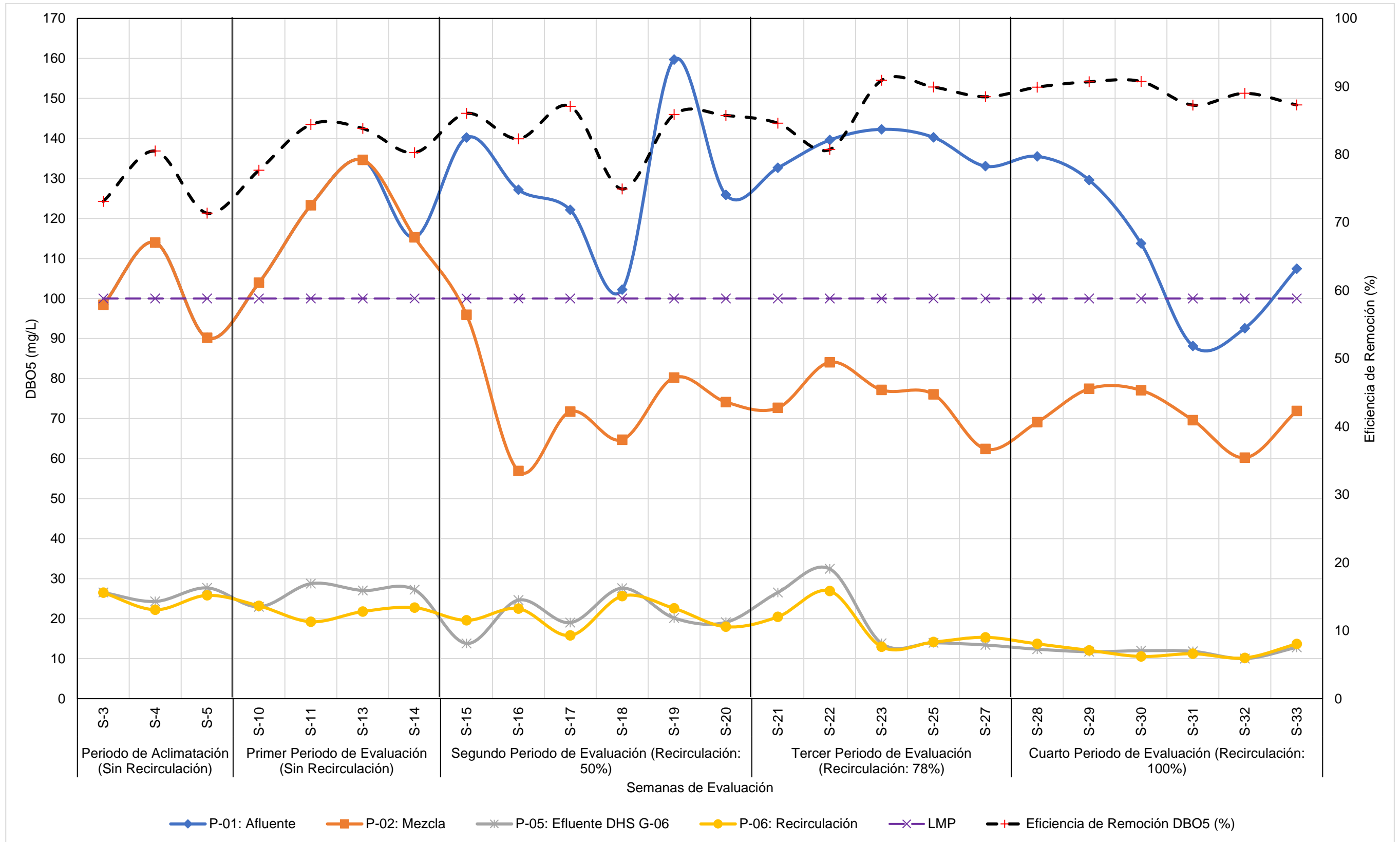
La diferencia entre los valores de DBO₅ en los puntos P-05 y P-06 tienden a ser cero, siguiendo un comportamiento similar a lo largo de los periodos de evaluación.

De la semana 11 a la 14 y de la semana 21 a la 22 se puede observar que la DBO₅ en el efluente del DHS es mayor a la recirculación.

A partir de la semana 23, se puede apreciar una tendencia lineal en lo referente a la remoción de carga orgánica con valores menores a 15 mg/L a la salida del reactor DHS y en la recirculación.

En el Gráfico N° 19, se aprecia que la remoción de la DBO₅ llegó a una eficiencia máxima del 90.89% en el tercer periodo de evaluación y una eficiencia mínima de 71.37% correspondiente al periodo de aclimatación.

Gráfico N° 19: Valores Semanales de la DBO₅ vs LMP – Eficiencia de Remoción de la DBO₅ (%)



Fuente: Elaboración Propia

Tabla N° 44: Valores mínimos, máximos y promedios de la eficiencia de remoción de DBO₅ (%)

Eficiencia de Remoción	Mínimo (%)	Máximo (%)	Promedio (%)
Periodo de Aclimatación (Sin Recirculación)	71.37	80.50	74.99 ± 4.85
Primer Periodo de Evaluación (Sin Recirculación)	77.68	84.40	81.54 ± 3.16
Segundo Periodo de Evaluación (Recirculación: 50%)	74.92	87.06	83.65 ± 4.57
Tercer Periodo de Evaluación (Recirculación: 78%)	80.72	90.89	86.92 ± 4.21
Cuarto Periodo de Evaluación (Recirculación: 100%)	87.25	90.72	89.13 ± 1.58

Fuente: Elaboración propia

6.1.6. Sólidos Suspendidos Totales (SST)

La eficiencia de remoción de los SST es representada en el Gráfico N° 20 donde se muestra una eficiencia mínima del 64.76% en el segundo periodo de evaluación y una eficiencia máxima de remoción del 96.58% correspondiente al cuarto periodo de evaluación.

En la semana 21, el efluente del UASB presentó una cantidad inusual de sólidos suspendidos los cuales fueron observables al momento de realizar el monitoreo del punto P-01 sin embargo el reactor DHS G-06 pudo remover a un 90.84% dicho parámetro.

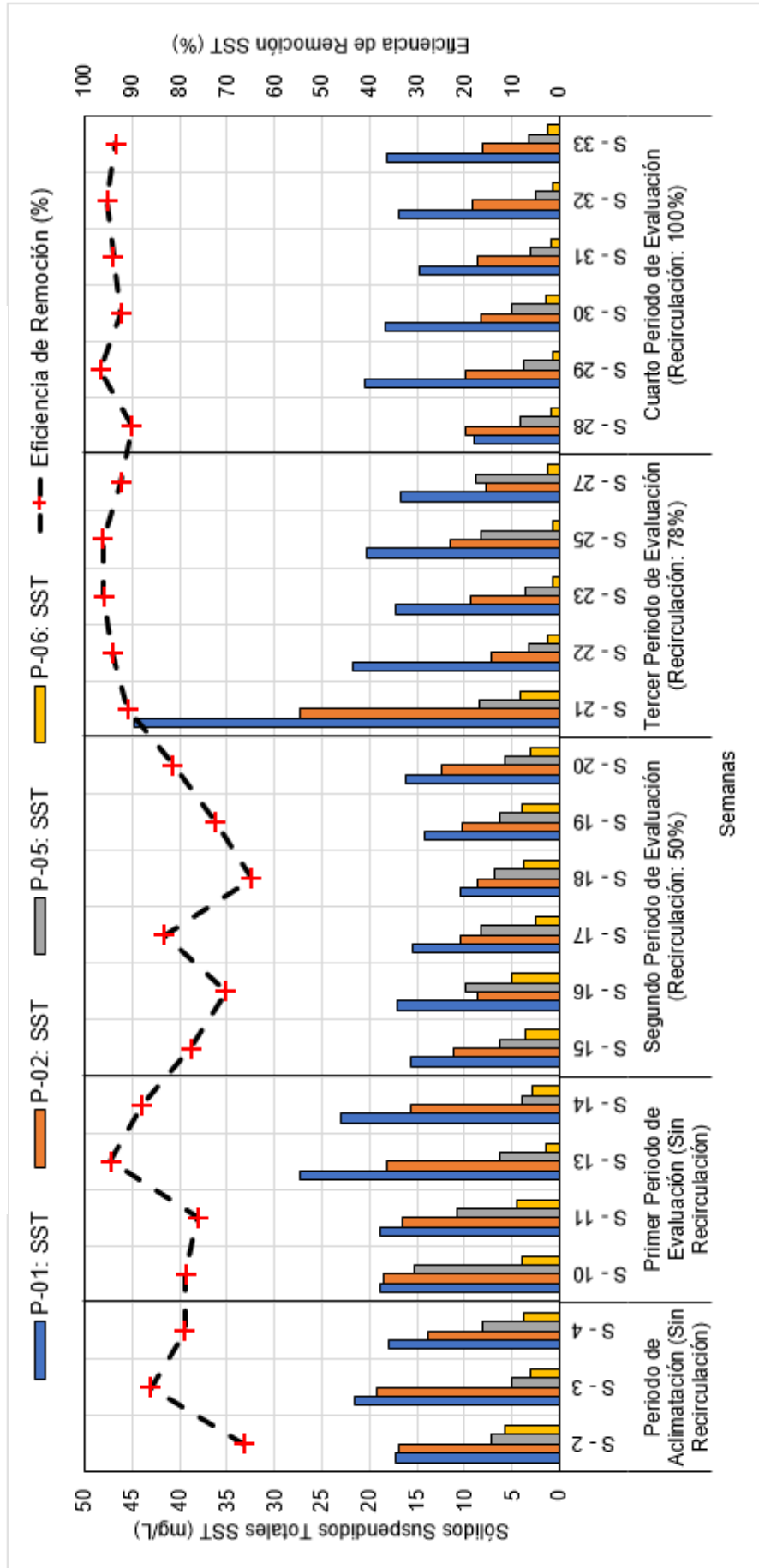
Es a partir de la semana 23 donde se observa una tendencia constante de remoción de los sólidos suspendidos totales.

Tabla N° 45: Valores mínimos, máximos y promedios de la eficiencia de remoción de SST (%)

Eficiencia de Remoción	Mínimo (%)	Máximo (%)	Promedio (%)
Periodo de Aclimatación (Sin Recirculación)	66.47	86.07	77.14 ± 9.91
Primer Periodo de Evaluación (Sin Recirculación)	76.06	94.51	84.27 ± 8.47
Segundo Periodo de Evaluación (Recirculación: 50%)	64.76	83.18	74.91 ± 7.07
Tercer Periodo de Evaluación (Recirculación: 78%)	90.84	96.06	93.83 ± 2.29
Cuarto Periodo de Evaluación (Recirculación: 100%)	89.91	96.58	93.56 ± 2.32

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 20: Eficiencia de Remoción de los Sólidos Suspendedos Totales



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al DS 003-2010-MINAM, los Sólidos Suspendedos Totales no deben exceder los 150 mg/L y como se puede apreciar en el Gráfico N° 20, ninguno de los valores en los puntos de monitoreo supera dicho límite.

6.1.7. Sólidos Suspendidos Fijos (SSF)

La eficiencia de remoción de los SSF es representada en el Gráfico N° 21 donde se muestra una reducción mínima del 62.16% en el periodo de aclimatación y una eficiencia máxima de remoción del 97.47% correspondiente al cuarto periodo de evaluación.

Tabla N° 46: Valores mínimos, máximos y promedios de la eficiencia de remoción de SSF (%)

Eficiencia de Remoción	Mínimo (%)	Máximo (%)	Promedio (%)
Periodo de Aclimatación (Sin Recirculación)	62.16	83.23	75.18 ± 11.38
Primer Periodo de Evaluación (Sin Recirculación)	65.93	94.06	79.54 ± 13.59
Segundo Periodo de Evaluación (Recirculación: 50%)	62.66	81.53	72.29 ± 8.12
Tercer Periodo de Evaluación (Recirculación: 78%)	90.84	96.06	93.01 ± 2.88
Cuarto Periodo de Evaluación (Recirculación: 100%)	89.17	97.47	94.25 ± 2.72

Fuente: Elaboración propia

6.1.8. Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)

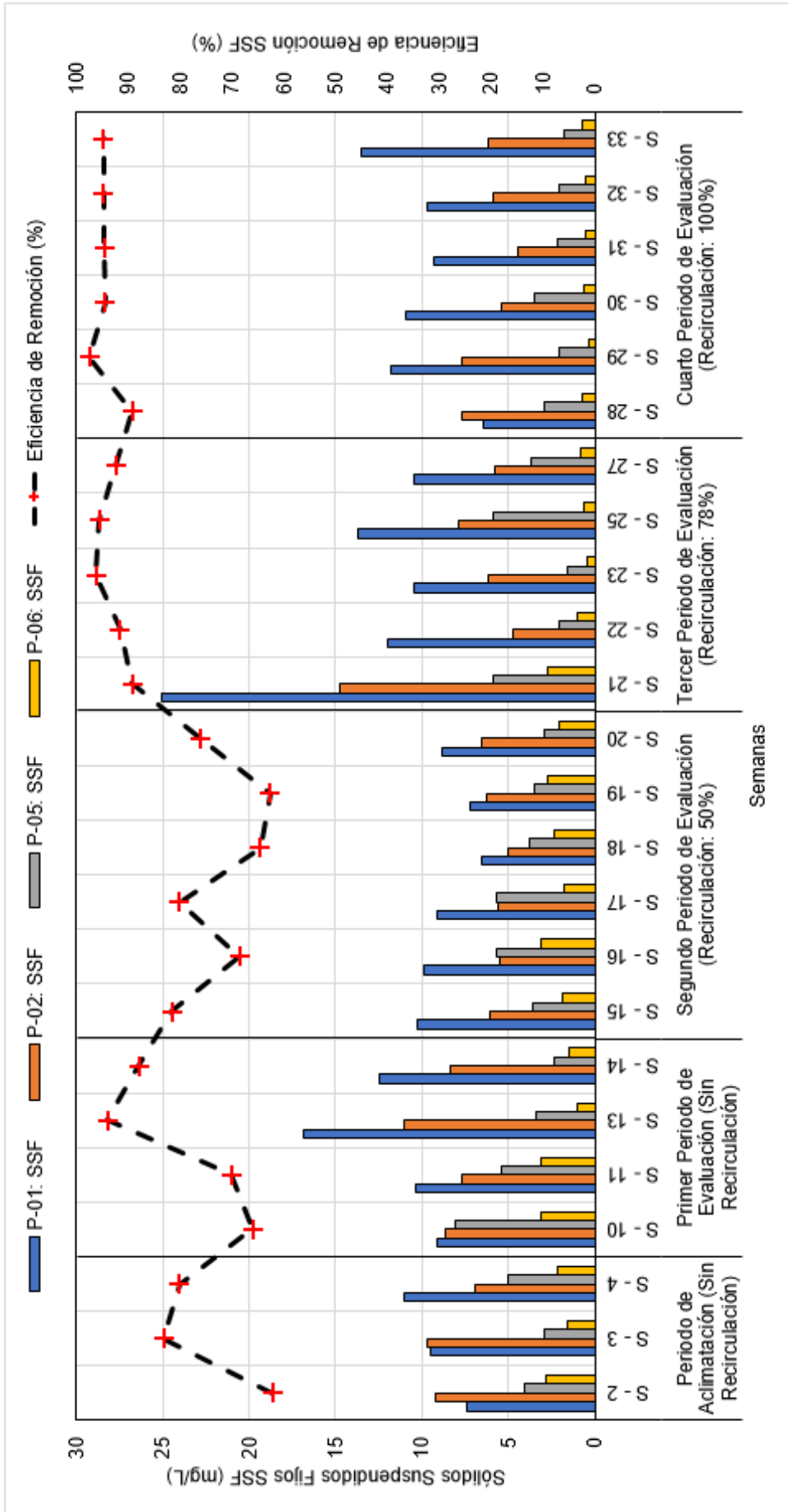
La eficiencia de remoción de los SSV es representada en el Gráfico N° 22 donde se muestra una reducción mínima del 65.00% en el segundo periodo de evaluación y una eficiencia máxima de remoción del 96.98% correspondiente al tercer periodo de evaluación.

Tabla N° 47: Valores mínimos, máximos y promedios de la eficiencia de remoción de SSV (%)

Eficiencia de Remoción	Mínimo (%)	Máximo (%)	Promedio (%)
Periodo de Aclimatación (Sin Recirculación)	69.70	88.33	78.31 ± 9.40
Primer Periodo de Evaluación (Sin Recirculación)	83.33	95.24	89.22 ± 5.03
Segundo Periodo de Evaluación (Recirculación: 50%)	65.00	87.73	77.48 ± 9.73
Tercer Periodo de Evaluación (Recirculación: 78%)	92.07	96.98	94.90 ± 2.29
Cuarto Periodo de Evaluación (Recirculación: 100%)	89.17	95.83	92.32 ± 2.89

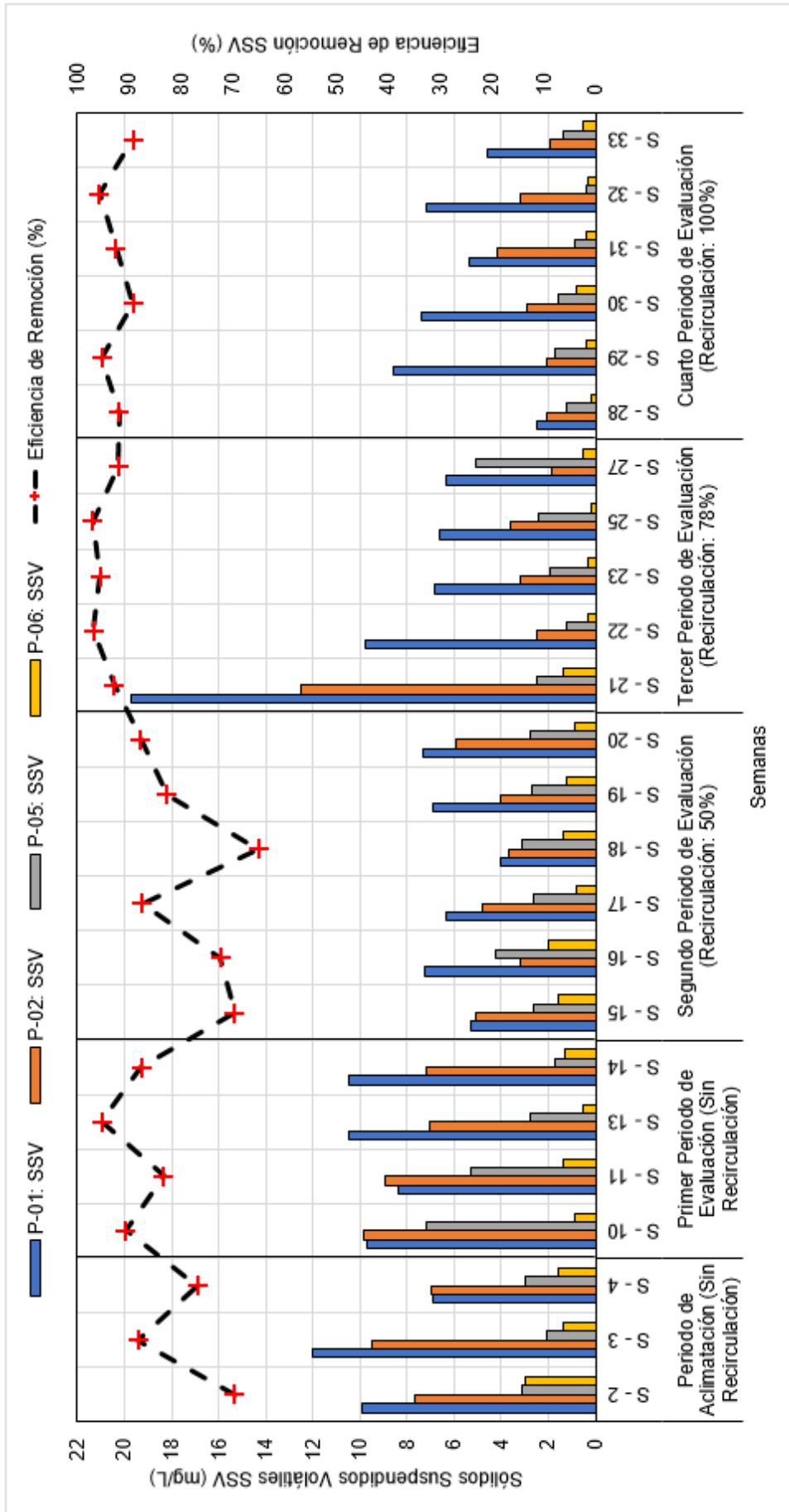
Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 21: Eficiencia de Remoción de los Sólidos Suspendedos Fijos



Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 22: Eficiencia de Remoción de los Sólidos Suspendidos Volátiles



Fuente: Elaboración propia

6.1.9. Nitrógeno Amoniacal (NH₃-N)

La eficiencia de remoción de nitrógeno amoniacal representada en el Gráfico N° 23, muestra una reducción mínima de 33.33% en el primer periodo de evaluación y una reducción máxima de 100% correspondiente al tercer y cuarto periodo de evaluación.

A partir del segundo periodo de evaluación (semana 15) se puede apreciar en el Gráfico N° 23, un comportamiento creciente llegando a un comportamiento, relativamente, constante al inicio del tercer periodo en lo que respecta a la eficiencia de remoción de NH₃.

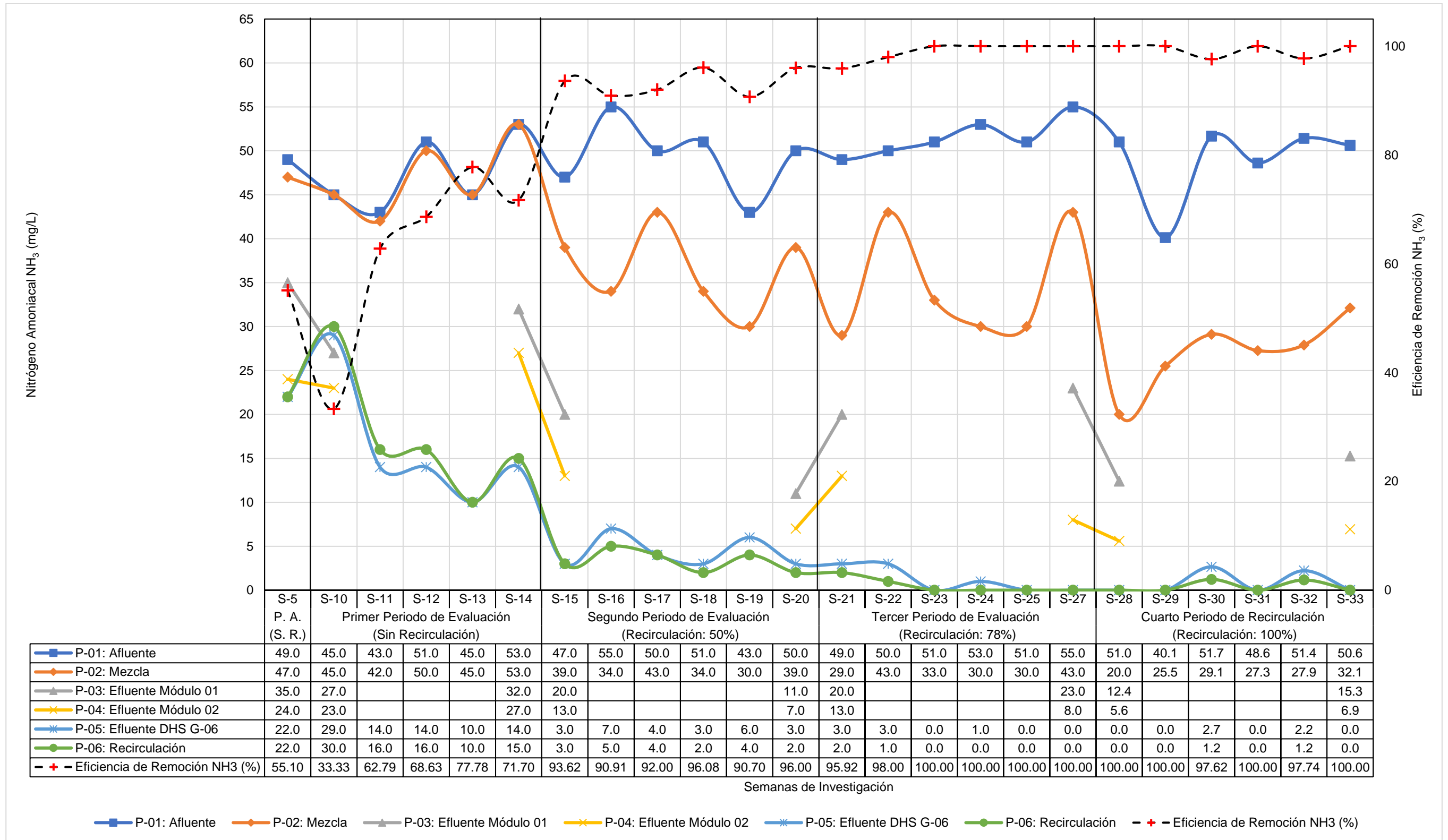
En lo correspondiente al punto de Mezcla (es decir P-02) y con los datos de la Tabla N° 56, se puede afirmar que, al iniciar el segundo periodo de evaluación, la mezcla entre el afluente y el efluente disminuyeron la concentración del nitrógeno amoniacal inicial, llegando a una remoción de 38.18% para el periodo en mención. En el tercer periodo, la mezcla llegó una remoción del 43.40% y en el cuarto periodo alcanzó una remoción de 60.78%.

Tabla N° 48: Valores mínimos, máximos y promedios de la eficiencia de remoción de Nitrógeno Amoniacal NH₃ (%)

Eficiencia de Remoción	Mínimo (%)	Máximo (%)	Promedio (%)
Primer Periodo de Evaluación (Sin Recirculación)	33.33	77.78	62.85 ± 17.36
Segundo Periodo de Evaluación (Recirculación: 50%)	90.70	96.08	93.22 ± 2.42
Tercer Periodo de Evaluación (Recirculación: 78%)	95.92	100.00	98.99 ± 1.70
Cuarto Periodo de Evaluación (Recirculación: 100%)	97.62	100.00	99.23 ± 1.20

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 23: Eficiencia de Remoción del Nitrógeno Amoniacoal NH₃ (mg/L)



Fuente: Elaboración propia

P.A. Periodo de Aclimatación.

S.R. Sin Recirculación

6.1.9.1. Primer Periodo de Evaluación

En este periodo se logró una remoción promedio de nitrógeno amoniacal de 62.85%, una mínima de 33.33% en la semana 10 y una eficiencia máxima de 77.78% en la semana 13.

6.1.9.2. Segundo Periodo de Evaluación

En este periodo se logró una remoción promedio de nitrógeno amoniacal de 93.22%, una mínima de 90.70% en la semana 16 y una eficiencia máxima de 96.08% en la semana 18.

6.1.9.3. Tercer Periodo de Evaluación

En este periodo se logró una remoción promedio de nitrógeno amoniacal de 98.99%, una mínima de 95.92% en la semana 21 y una eficiencia máxima de 100% a partir de la semana 23.

6.1.9.4. Cuarto Periodo de Evaluación

En este periodo se logró una remoción promedio de nitrógeno amoniacal de 99.23%, una mínima de 97.62% en la semana 30 y una eficiencia máxima de 100% en las semanas 29, 29, 31 y 33.

6.1.10. Nitrógeno Total (NT)

La eficiencia de remoción de nitrógeno total (NT) representada en el Gráfico N° 24, muestra una reducción mínima de 8.89% en el primer periodo de evaluación y una reducción máxima de 78.68% correspondiente al tercer periodo de evaluación.

A partir del primer periodo de evaluación (semana 10) se puede apreciar un comportamiento relativamente fluctuante con tendencia creciente correspondiente a los valores de la eficiencia de remoción del nitrógeno total.

Se puede observar que, la remoción de nitrógeno total fue en aumento desde el primer periodo de evaluación, sin embargo, tuvo una caída en la semana 14 previo al inicio del segundo periodo de evaluación.

Tabla N° 49: Valores mínimos, máximos y promedios de la eficiencia de remoción de Nitrógeno Total (%)

Eficiencia de Remoción	Mínimo (%)	Máximo (%)	Promedio (%)
Primer Periodo de Evaluación (Sin Recirculación)	8.89	43.37	26.43 ± 13.48
Segundo Periodo de Evaluación (Recirculación: 50%)	44.90	64.70	54.97 ± 6.32
Tercer Periodo de Evaluación (Recirculación: 78%)	47.09	78.68	65.07 ± 11.33
Cuarto Periodo de Evaluación (Recirculación: 100%)	41.63	58.94	51.98 ± 6.44

Fuente: Elaboración propia

6.1.10.1. Primer Periodo de Evaluación

En este periodo se logró una remoción promedio de nitrógeno total de 26.43%, una mínima de 8.89% en la semana 10 y una eficiencia máxima de 43.37% en la semana 13.

6.1.10.2. Segundo Periodo de Evaluación

En este periodo se logró una remoción promedio de nitrógeno total de 54.97%, una mínima de 44.90% en la semana 15 y una eficiencia máxima de 64.70% en la semana 18.

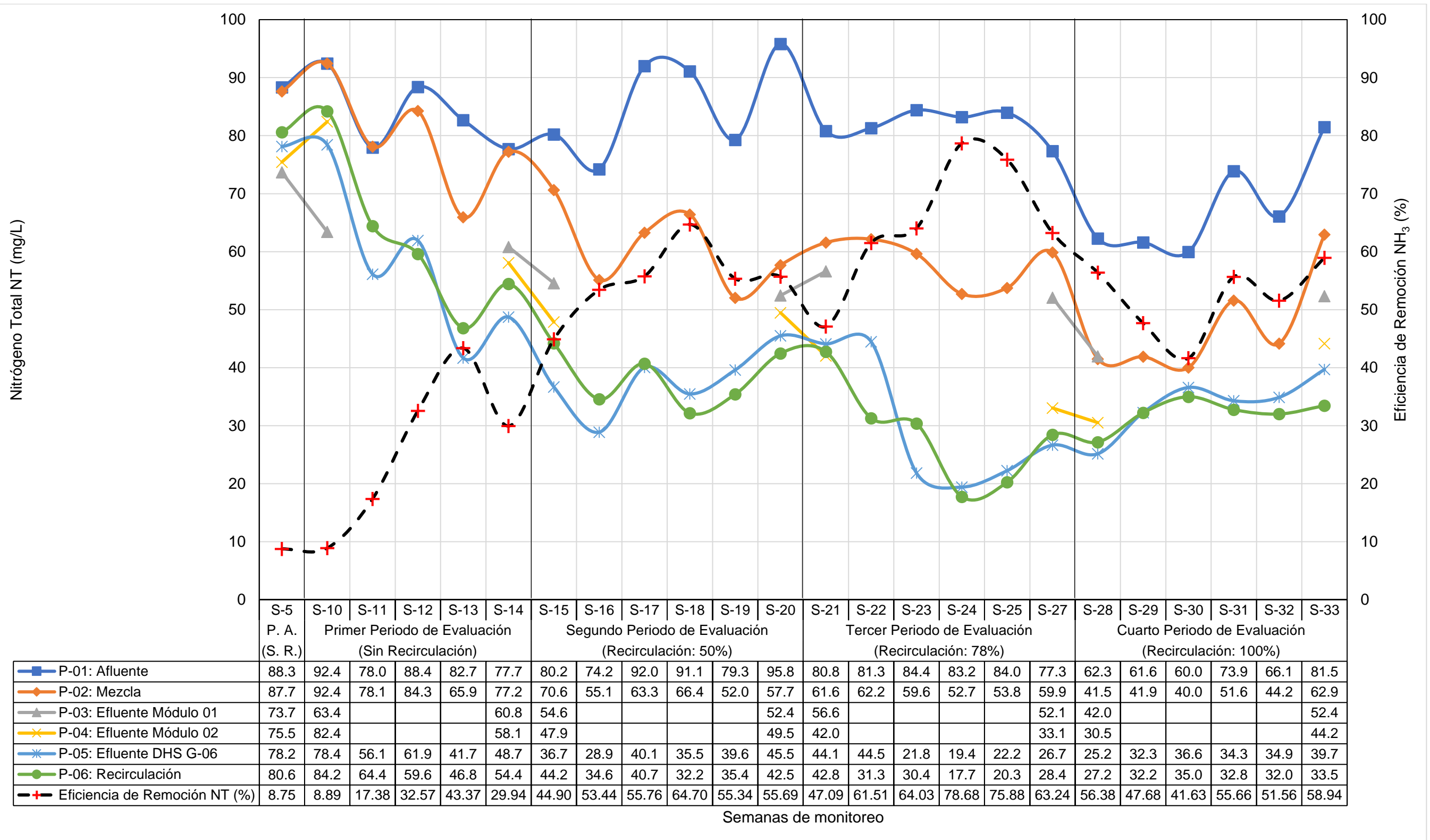
6.1.10.3. Tercer Periodo de Evaluación

En este periodo se logró una remoción promedio de nitrógeno total de 65.07%, una mínima de 47.09% en la semana 21 y una eficiencia máxima de 78.68% en la semana 24.

6.1.10.4. Cuarto Periodo de Evaluación

En este periodo se logró una remoción promedio de nitrógeno total de 51.98%, una mínima de 41.63% en la semana 30 y una eficiencia máxima de 58.94% en la semana 33.

Gráfico N° 24: Eficiencia de Remoción del Nitrógeno Total NT (mg/L)



Fuente: Elaboración propia

P.A. Periodo de Aclimatación.

S.R. Sin Recirculación.

6.1.11. Nitritos (NO_2^-) y Nitratos (NO_3^-)

En los Gráficos N° 13 y N° 14 se aprecia que el agua residual proveniente del UASB (Afluente) contiene nitritos y nitratos.

En los gráficos mencionados se muestra que a partir de la semana 23 (Tercer periodo de evaluación) hasta el término de la investigación, la concentración de nitritos en el efluente del reactor DHS G-06 y en la recirculación va disminuyendo mientras que la cantidad de nitratos, en dichos puntos, va aumentando con respecto a la concentración del afluente durante todos los periodos de investigación.

En ninguna muestra analizada se logró obtener una concentración nula de nitritos por tal motivo, siempre existió una convivencia entre ambos estados oxidados de nitrógeno amoniacal.

6.1.12. Relación DBO_5/NTK

Con los valores obtenidos de la DBO_5 y del NTK, se ha calculado el cociente de dichos parámetros y se obtuvieron los siguientes valores: en el punto P-01, llegó a un valor mínimo de 1.67 y un máximo de 3.25; en el punto P-02, llegó a 1.31 como valor mínimo y un máximo de 2.97; en el punto P-05 llegó a un valor mínimo de 0.76 y un máximo de 10.85 y finalmente en el Punto P-06 se alcanzó un valor mínimo de 0.72 y un máximo de 12.19.

En la siguiente tabla se muestran los valores descritos líneas arriba:

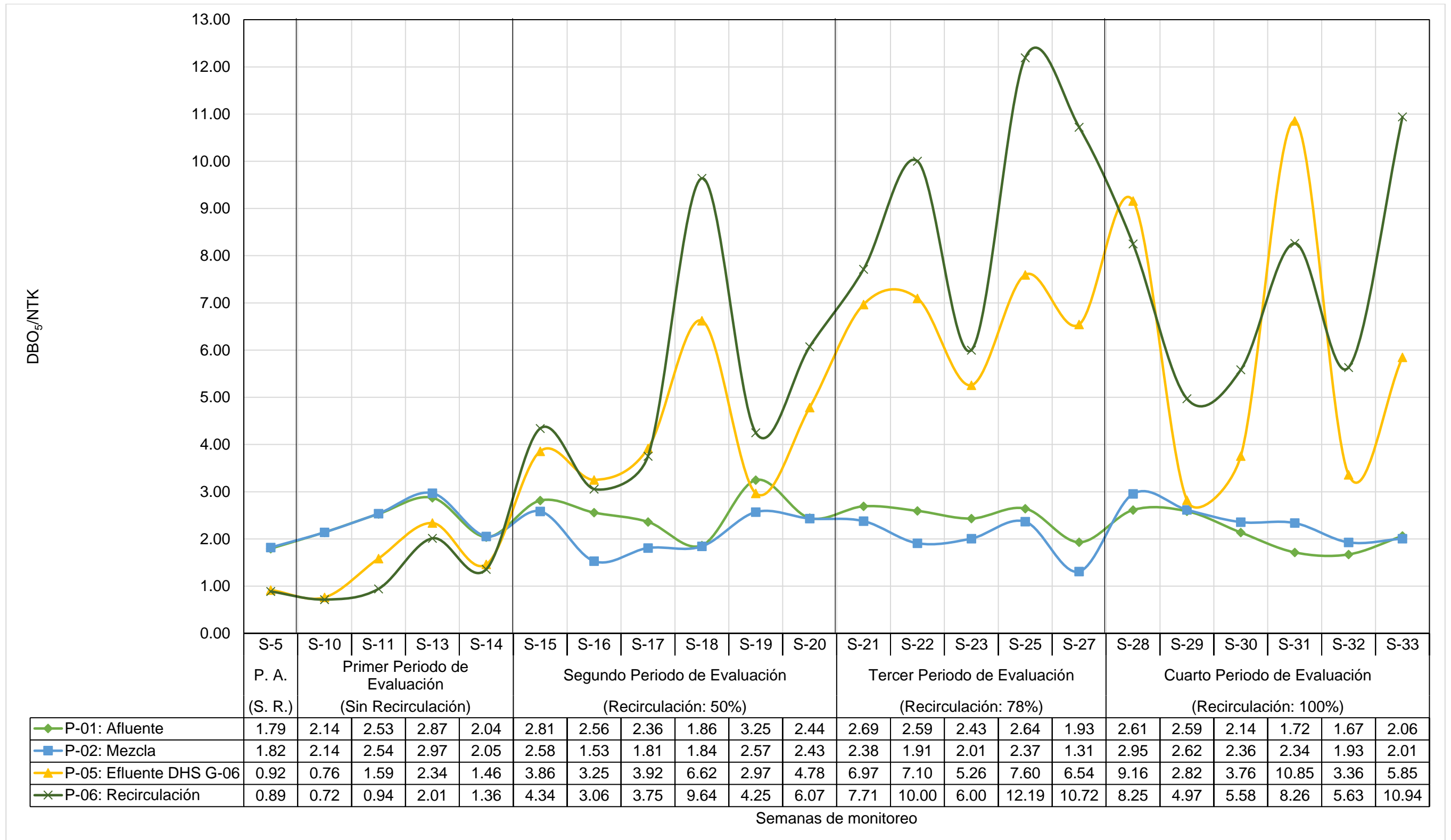
Tabla N° 50: Valores mínimos, máximo y promedios de la DBO_5/NTK

Puntos de Monitoreo	DBO_5/NTK Mín.	DBO_5/NTK Máx.	DBO_5/NTK Prom.	Desviación Estándar (σ)	Número de muestras
<i>P-01: Afluente</i>	1.67	3.25	2.35	± 0.42	21
<i>P-02: Mezcla</i>	1.31	2.97	2.20	± 0.42	21
<i>P-05: Efluente DHS G-06</i>	0.76	10.85	4.62	± 0.43	21
<i>P-06: Recirculación</i>	0.72	12.19	5.79	± 2.71	21

Fuente: Elaboración propia

A continuación, el Gráfico N° 25 muestra el comportamiento de la relación DBO_5/NTK durante todo el proceso de investigación en base a los datos de la Tabla N° 61:

Gráfico N° 25: Relación DBO₅/NTK



Fuente: Elaboración propia

P.A. Periodo de Aclimatación.

S.R. Sin Recirculación.

6.2. PROCESOS DE NITRIFICACIÓN Y DESNITRIFICACIÓN EN EL REACTOR DHS G-06

6.2.1. Nitrificación

En la investigación se pudo determinar que existió nitrificación en el reactor DHS G-06.

El afluente de la investigación provenía de un tratamiento primario (Reactor UASB) el cual contenía una concentración de nitrógeno amoniacal en el rango de 40.1 a 55.0 mg/L.

En el reactor DHS G-06 se pudieron desarrollar los microorganismos especializados nitrificantes debido a que el agua a tratar contaba con las concentraciones de nitrógeno amoniacal mencionadas.

Tal como muestran los resultados, la concentración de nitrógeno amoniacal iba disminuyendo a lo largo del proceso de tratamiento (desde la mezcla hasta la recirculación) llegando a una remoción total (100%) a partir del tercer periodo de evaluación.

En el primer periodo de evaluación los nitritos en el afluente llegaron a una concentración promedio de 16.0 mg/L, en el segundo periodo de evaluación llegó a un valor promedio de 17.7 mg/L, en el tercer periodo de evaluación logró llegar a un valor promedio de 16.0 mg/L y, 9.3 mg/L en el cuarto periodo de evaluación. Los nitritos en el efluente disminuyeron llegando a valores promedios de 12.7 mg/L, 11.3 mg/L, 5.8 mg/L y 2.2 mg/L para el primer, segundo, tercer y cuarto periodo de evaluación, respectivamente.

Al disminuir las concentraciones de nitritos, se puede inferir que han sido oxidados a nitratos.

Con respecto a los nitratos presentes en el afluente, se llegaron a valores promedios de 17.0, 16.6, 9.6 y 5.9 mg/L en el primer, segundo, tercer y cuarto periodo de evaluación, respectivamente. En el efluente, se llegó a un valor promedio de 31.0 mg/L para el primer periodo de evaluación, 22.4 mg/L para el segundo periodo, 20.8 mg/L en el tercer periodo y finalmente, 28.2 mg/L en el cuarto periodo de evaluación.

Debido a la toxicidad de los nitritos, el ECA Categoría 3 admite un valor máximo de 0.06 mg/L y para los nitratos 10 mg/L. Cabe resaltar que el nitrato no es tóxico, es un indicador de estabilización del nitrógeno con respecto al oxígeno sin

embargo su exceso en los cuerpos de agua provoca la proliferación de algas y otras plantas que generan eutrofización.

Al aumentar la concentración de nitratos y disminuir la concentración de nitrógeno amoniacal en el efluente del reactor DHS G-06, se puede indicar que se llevó a cabo el proceso de nitrificación.

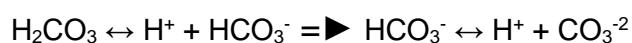
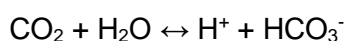
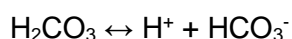
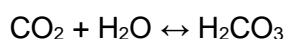
La concentración de la DBO_5 está relacionada con el proceso de nitrificación debido a que menor carga orgánica involucra mayor presencia de bacterias autótrofas (nitrificantes).

Como se puede observar en el Gráfico N° 25, a partir del tercer periodo de evaluación, existen valores elevados de DBO_5/NTK (mayores a 5) correspondientes al efluente del DHS G-06 (P-05) y a la recirculación (P-06) lo cual indica que, para dichos valores, la materia orgánica tuvo una gran relevancia en el proceso de nitrificación.

En lo que respecta a la concentración de pH se muestra que, a partir del segundo periodo de evaluación dichas concentraciones se encontraron en el rango establecido por la norma, sin embargo, de acuerdo a Metcalf & Eddy, el pH óptimo para que exista un proceso de nitrificación eficiente se puede dar entre 7.2 y 9.0, aproximadamente. Además, se observó la tendencia del pH a descender desde el punto de mezcla hasta la recirculación.

El descenso de pH corresponde a un proceso de oxidación del ion amonio NH_4^+ a nitritos (NO_2) en el que se desarrolla la acidificación del medio acuoso tal como se muestra en la ecuación 2.1 donde se desprende los iones H^+ .

También se puede aseverar que la disminución del pH se generó por la actividad microbiana de las bacterias quimioorganótrofas que producen dióxido de carbono (CO_2) cuando degradan la materia orgánica. Las reacciones de degradación de las bacterias en mención, se muestran a continuación (Fuentes & Massol – Deyá, 2002):



El oxígeno disuelto en el reactor DHS G-06 se mantuvo a una concentración mayor a 4mg/L, lo que permitió la nitrificación y por ende el crecimiento de los microorganismos especializados en dicho proceso.

6.2.2. Desnitrificación

El proceso de desnitrificación probablemente estuvo presente en el punto de Mezcla, en el Reactor DHS G-06 y en el Sedimentador 02 en base a los resultados de los puntos de monitoreo analizados.

6.2.2.1. Desnitrificación en la mezcla

En el punto P-02 se dio la mezcla entre el agua reactor UASB depositada en el tanque de almacenamiento (P-01: Afluente) y el agua tratada a la salida del sedimentador 02 (P-06: Recirculación).

Los valores promedios de oxígeno disuelto en el afluente (P-01) del reactor DHS G-06 durante los periodos de investigación estuvieron entre 0.00 y 0.10 mg/L (Ver Tabla N° 54).

La concentración de nitratos en la recirculación (P-06) estuvo en el rango de 14.7 a 34.8 mg/L (Ver Tabla N° 60).

La DBO₅ en el punto P-02 varió entre 56.92 y 139.92 mg/L durante toda la investigación (Ver Tabla N° 55).

Las bajas concentraciones de oxígeno disuelto presentes en el punto P-01, la presencia de nitratos en el punto P-06 y la cantidad de materia orgánica presentes en el punto P-02, propiciaron el ambiente adecuado para que se desarrolle la desnitrificación del tipo heterótrofa.

6.2.2.2. Desnitrificación en el Reactor DHS G-06

De acuerdo al Gráfico N° 24 y a la Tabla N° 57, el reactor DHS G-06 tuvo diferentes remociones de Nitrógeno Total a lo largo de los periodos de evaluación.

La remoción de nitrógeno total indica que se ha llevado a cabo la desnitrificación y la remoción promedio más eficiente de NT se logró en el tercer periodo de evaluación con un valor de 64.87% y un valor máximo de 78.68% (Semana 24).

No es posible hacer una comparación del Nitrógeno Total con la carga orgánica en dicha semana debido a que no se elaboró medición de la DBO₅.

El proceso de desnitrificación pudo haberse desarrollado por las zonas anóxicas/anaerobias (zona endógena) de la biomasa adherida a las esponjas endurecidas, además, en el módulo 01 se infiere que la desnitrificación fue del tipo heterótrofa por la alta carga orgánica al ingreso del reactor DHS, el aumento de oxígeno disuelto a lo largo del módulo y a la presencia de nitratos.

En el Módulo 03, pudo haberse generado la desnitrificación del tipo autótrofa debido a las zonas anóxicas mencionadas anteriormente, a la baja concentración de materia orgánica de su efluente (P-05), así como la presencia de nitratos, los cuales actuaban como aceptores de electrones.

Cabe la posibilidad, que en el Módulo 02 y 03, pudo presentarse desnitrificación aerobia por el aumento de nitratos y la alta concentración de oxígeno disuelto.

6.2.2.3. Desnitrificación en el Sedimentador 02 / Recirculación

En la Tabla N° 57 y en el Gráfico N° 24 se puede apreciar la disminución de la concentración del nitrógeno total del efluente del reactor DHS G-06 (P-05) hacia la salida del Sedimentador 02 (P-06) a partir del segundo periodo de evaluación. Al removerse nitrógeno total en el sedimentador, puede considerarse que ha ocurrido desnitrificación.

De acuerdo a la Tabla N° 38, hubo una concentración promedio de nitratos de 25.6 mg/L a la salida del sedimentador 02 (P-06) y de acuerdo a la Tabla N° 30 y N° 31, la cantidad de oxígeno disuelto promedio en el mismo punto de monitoreo es 6.44 mg/L y la DBO₅ promedio 18.62, por tales motivos se infiere que la desnitrificación es del tipo autótrofa y/o aerobia.

6.3. Discusión de la eficiencia de remoción de los parámetros evaluados

Es importante aclarar que los mejores resultados de remoción de nitrógeno amoniacal, carga orgánica y sólidos sedimentables se dieron en las semanas pertenecientes a las estaciones de primavera – verano y, como se puede observar en el Gráfico N° 1, la temperatura ambiental fue en aumento con el transcurrir de las semanas, lo que conlleva a inferir que dicho parámetro tuvo una implicancia directa en el tratamiento; no obstante, la temperatura ambiental fue mayor en el cuarto periodo de evaluación (Recirculación al 100%) y ello no generó una mejor eficiencia de tratamiento ya que en el tercer periodo de evaluación (Recirculación 78%) se obtuvo una eficiencia del 100% de remoción de nitrógeno amoniacal.

La recirculación al 78% del caudal tratado logró obtener una eficiencia igual o mayor que la alcanzada con la recirculación del 100% debido, probablemente, a que los microorganismos especializados en degradar la materia orgánica se adecuaron a las condiciones ambientales y a la carga orgánica presente en el afluente al igual que los microorganismos encargados de realizar el proceso de nitrificación y desnitrificación.

El acondicionamiento y maduración de dichos microorganismos pudo haberse dado gracias a la recirculación debido a que fueron reincorporados al sistema DHS G-06 mediante el bombeo del efluente lo que los llevó adaptarse mejor al medio y a las condiciones anteriormente mencionadas.

7. CAPITULO VII: CONCLUSIONES

Durante todos los periodos de evaluación del Reactor DHS G-06, se produjo nitrificación llevándose a cabo, en el tercer periodo de (Recirculación al 78%) la mayor remoción de DBO₅, Nitrógeno Amoniacal (NH₃) y Nitrógeno Total (NT).

La disminución del pH tuvo en efecto favorable que ayudó a la nitrificación.

Desde el inicio de la evaluación del nitrógeno en el Reactor DHS G-06, la concentración de nitratos en el efluente fue mayor que los nitritos por tal motivo se concluyen que las bacterias nitritoxidantes (transformadoras de nitritos a nitratos) fueron más predominantes que las bacterias amonioxidantes (transformadoras de amonio a nitritos).

En la semana 25 perteneciente al tercer periodo de evaluación, la relación DBO₅/NTK tuvo un valor pico (mayor a los demás) y en esa misma fecha se llegó al mayor valor de eficiencia de remoción de carga orgánica y nitrógeno.

La desnitrificación del tipo heterótrofa pudo haberse producido en la mezcla (punto P-02) debido a la baja concentración de oxígeno disuelto, a la concentración de nitratos en la recirculación, al incremento del pH (alcalinidad por desnitrificación) y finalmente, por la presencia de carga orgánica en el afluente.

Se presume que la desnitrificación del tipo heterótrofa y/o aerobia se realizó en el Módulo 01 por la presencia de carga orgánica en el afluente del reactor DHS G-06, la concentración de nitratos, posibles zonas anóxicas en la biomasa adherida a las esponjas endurecidas y altas concentraciones de oxígeno disuelto en el tratamiento.

Se concluye que la mejor eficiencia promedio de remoción de sólidos suspendidos totales (SST) se dio en el tercer periodo de evaluación con un valor de 93.83% lo cual indica que, posiblemente, la inyección de un mayor caudal de recirculación (78%) en el reactor DHS G-06 genera una mejor remoción de los sólidos suspendidos totales considerando que la carga orgánica en el punto de recirculación se mantuvo en un valor promedio de 18.62 mg/L.

Cabe mencionar que la recirculación al 100% logró una remoción promedio de sólidos suspendidos totales de 93.56% siendo dicho porcentaje muy cercano al valor promedio anteriormente mencionado.

Con el mismo concepto con el que se infiere la conclusión de los sólidos suspendidos totales (SST), se concluye que la eficiencia promedio de remoción de sólidos suspendidos volátiles (SSV) se dio en el tercer periodo de evaluación con un valor de 94.90% debido a la incorporación del caudal tratado (78%) al reactor DHS G-06.

Se concluye que la eficiencia promedio de remoción de sólidos suspendidos fijos (SSF) se dio en el cuarto periodo de evaluación con un valor de 93.56%.

La eficiencia de remoción de la DBO_5 en el periodo de aclimatación fue el más bajo con un valor de 71.37% y el más alto se dio en el tercer periodo de evaluación con un valor de 90.89%. Al introducir el 78% del caudal tratado en el reactor DHS G-06 generó una mayor remoción de carga orgánica ya que como se puede observar en la Tabla N° 29, la DBO_5 en el efluente se mantuvo en un valor promedio de 18.62 mg/L.

La eficiencia máxima de nitrificación (remoción del nitrógeno amoniacal) fue 100% en el tercer periodo de evaluación (semana 23, 24, 25 y 27) y en el cuarto periodo de evaluación (semana 28, 29, 31 y 33).

De acuerdo a los resultados obtenidos a partir del tercer periodo de evaluación se concluye que el efluente final del reactor DHS G-06 cumple con los Límites Máximos Permisibles (DS 003-2010-MINAM) con respecto a los parámetros de DBO_5 , pH, temperatura y sólidos suspendidos totales (SST). También cumple con el ECA agua (DS 004-2017-MINAM) en la categoría 3 – Sub categoría D1 y D2 para los parámetros de la DBO_5 , oxígeno disuelto (OD) y pH.

El aumento de la tasa de recirculación en el reactor DHS G-06 permitió una mayor remoción de DBO_5 y NH_3 a lo largo de los periodos de evaluación, por ende, se concluye que la hipótesis general es verdadera, sin embargo, la recirculación al 78% generó una eficiencia equiparable a la recirculación del 100% en lo que respecta a la remoción de los parámetros en mención por tal motivo, se concluye que la hipótesis específica planteada en la presente investigación queda refutada.

8. CAPITULO VIII: RECOMENDACIONES

La presente investigación se ha centrado en evaluar el comportamiento del nitrógeno y de la carga orgánica en un reactor DHS de sexta generación variando la tasa de recirculación.

Las recomendaciones a los futuros investigadores que deseen elaborar un prototipo similar al presentado en este documento, son las siguientes:

Considerar una mayor cantidad de tasas de recirculación (diferentes a las utilizadas en la investigación mostrada) y evaluar el comportamiento del nitrógeno en sus diferentes estados, así como la carga orgánica.

Lo ideal es contar con dos o más reactores DHS G-06 trabajando en paralelo y cada uno con una tasa de recirculación diferente. Con esa propuesta se podrá evaluar de forma más eficiente el comportamiento del nitrógeno y de la DBO.

Evaluar la DBO_5 en el efluente del Módulo 01 y Módulo 02 para poder determinar el comportamiento de la carga orgánica en dichos módulos y relacionarlas con el Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) y Nitrógeno Total (NT).

Mantener constante la tasa de recirculación y variar el giro (rpm) de la tubería de distribución, así como aumentar la cantidad de orificios por donde fluye el agua residual a tratar.

Disminuir o aumentar el tiempo de retención hidráulico teórico con la finalidad de variar la tasa de aplicación y evaluar la capacidad tratamiento del reactor DHS G-06.

Considerar un solo sedimentador desde donde se impulse el agua residual tratada hacia el punto de mezcla.

Se recomienda bombear directamente el efluente del reactor UASB hacia el reactor DHS G-06 con lo cual se evita el tanque de almacenamiento y por ende la sedimentación y algún otro pre tratamiento generado naturalmente en dicha unidad.

Manteniendo las mismas condiciones de operación establecidas en la presente investigación:

- Evaluar los coliformes termotolerantes en cada punto de monitoreo y estudiar el comportamiento de dicho parámetro.
- Evaluar la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en cada punto de monitoreo.
- Evaluar el fósforo total (PO_4) en cada punto de monitoreo.
- Relacionar la DQO y el Nitrógeno Total de los puntos de monitoreo del reactor DHS G-06.

Evaluar semanalmente la cantidad del lodo generado en el sedimentador.

Debido a que el reactor DHS G-06 es un proceso biológico aerobio, este genera la presencia de moscas y mosquitos por tal motivo se recomienda la colocación de mallas protectoras en el sistema de distribución de caudal con el objetivo de evitar el ingreso de los vectores u otros organismos externos y perjudiciales al tratamiento.

Se recomienda realizar un mantenimiento semanal a las mangueras de distribución para evitar la obstrucción por los sólidos presentes en el agua residual.

Para poder determinar fehacientemente el comportamiento del reactor DHS G-06 con respecto a la remoción de nitrógeno amoniacal y carga orgánica mediante recirculación variable, se recomienda evaluar el tratamiento en las cuatro estaciones del año.

En la presente investigación, no se consideró el costo que implica la impulsión del agua residual tratada, por ello, se recomienda evaluar la inversión que genera el sistema bombeo y con dicha información se podría determinar la eficiencia económica al utilizar una recirculación del 78% en vez del 100%.

9. CAPITULO IX: BIBLIOGRAFÍA

- Andersen, I., & J. Levine. (1986). Relative rates of nitric oxide and nitrous oxide production by nitrifier, denitrifiers and nitrate respirers. *Appl. Environ. Microbiol.* 51, 938-945.
- Anthonisen, A., R. Loehr, T. Prakasam, & E. Srinath. (1976). Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid. *J. W.P.C. Fed.* 48, 835-852.
- Arana, F. (1987). *Ecología para principiantes*. México: Trillas.
- Brock, E., Schmidt, I., Stuvén, R., & Zart, D. (1995). Nitrogen loss caused by denitrifying *Nitrosomonas* cells using ammonia or hydrogen as electron donors and nitrite as electron acceptor. *Arch. Microbiol.* Vol. 163, pág. 16-20.
- Brock, T. (1994). *Biology of microorganisms. 7ma. Edición*. Editorial Prentice-Hall International.
- Campos, J., Vásquez-Padín, J. R., Fernández, I., Fajardo, C., Seca, I., Mosquera-Corral, A., y otros. (2009). *Procesos avanzados de eliminación de nitrógeno: nitrificación parcial, Anammox, desnitrificación autótrofa*. Universidad de Santiago de Compostela.
- Campus Tecnológico de la Universidad de Navarra (s.f.). *España. Ciclo del nitrógeno*. Recuperado el 01 de 04 de 2017, de Universidad de Navarra - TECNUN - Escuela de Ingenieros: <http://www.tecnun.com/asigaturas/ecología/Hipertexto/04Ecosis/135CicN.htm>.
- Castignetti D., & Hollocher T.C. (1984). Heterotrophic nitrification among denitrifiers. *Appl. Env. Microbiol.* 47, pág. 620-623.
- Castillo Bravo, D. (2017). *Desnitrificación autótrofa heterótrofa simultánea de ril sintético en filtro anaerobio (lecho fijo) con flujo ascendente*. Valparaíso, Chile.

- Cema G., Wiszniowsky J., Zabczynski S., Zablocka-Godlewska E., Raszka A., & Surmacz-Górska J. (2007). Biological nitrogen removal from landfill leachate by deammonification assisted by heterotrophic denitrification in a rotation biological contactor (RBC). *Wat. Sci. Tech.* 55 (8-9), pág. 35-42.
- Cervantes, F. (2009). *Environmental Technologies to Treat Nitrogen Pollution*. London: IWA Publishing.
- Chuang, H.-P., Ohashi, A., Imachi, H., Tankadur, M., & Harada, H. (2007). Effective partial nitrification to nitrite by down-flow hanging sponge reactor under limited oxygen condition. *Water Research*, 295-302.
- Chuang, H.-P., Yamaguchi, T., Harada, H., & Ohashi, A. (2008). Anoxic Ammonium Oxidation by application of a Down-Flow Hanging Sponge (DHS) Reactor. *J. Environ. Eng. Manage*, 409-417.
- Ciudad G., Rubilar O., Vergara C., Ruiz G., Chamy R., & Jeison D. (2003). *Desnitrificación de aguas residuales con alto contenido de nitrito como parte de una estrategia de nitrificación-desnitrificación vía nitrito*. Temuco, Chile: UFRO.
- Crites, R., & Tchobanoglous, G. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana, S.A.
- Decheco I., & Egusquiza F. (2011). Respiración Anaerobia, Capítulo 20. 177-180.
- Delwiche CC. (1982). *Denitrification, Nitrification and Atmospheric Nitrous Oxide*. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Esteves, F. (1988). *Fundamentos de limnología*. Río de Janeiro: Interciencia.

- Fajardo, C., Mosquerea-Corral, A., Campos, J., & Méndez, R. (2008). Depuración conjunta de aguas ricas en nitratos y efluentes con compuestos reducidos del azufre. *Revista Técnica del Medio Ambiente RETEMA*, Vol. 127, pág. 39-51.
- Fuentes, F., & Massol-Deyá, A. (2002). *Manual de Ecología Microbiana*. Puerto Rico: Universidad de Puerto Rico.
- Garzón-Zúñiga, M. (2005). Mecanismos no convencionales de transformación y remoción del nitrógeno en sistemas de tratamiento de aguas residuales. *Ingeniería hidráulica en México*, Vol. XX, núm. 4, pág. 137-149.
- Hala El-Kamah, Mohamed Mahmoud, & Ahmed Tawfik. (2011). Performance of down-flow hanging sponge (DHS) reactor coupled with up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor for treatment of onion dehydration wastewater. *Bioresource Technology*. Vol 102, pág. 7029-7035.
- Harper, D. (1992). *Eutrophication of freshwaters, principles, problems and restoration*. London: Chapman & Hall.
- Hellinga C., Schellen, A., Mulder, J., Van Loosdrecht, M., & Heijnen, J. (1998). The SHARON process: an innovative method for nitrogen removal from ammonium-rich waste Water. *Wat. Sci. Tech.* 37 (9), pág. 135-142.
- Helmer C., Kunst S., Juretschko S., Schmid M. C., Schleifer K.-H., & Wagner M. (1999). Nitrogen loss in a nitrifying biofilm system. *Wat. Sci. Tech.* 39 (7), pág. 13-21.
- Hui-Ping Chuang, Akiyoshi Ohashi, Hiroyuki Imachi, Mdan Tandukar, & Hdeki Harada. (2007). Effective partial nitrification to nitrite by down-flow hanging sponge reactor under limited oxygen condition. *Water Research*. Volume 41. Issue 2, pág. 295-302.

- Hui-Ping Chuang, Takashi Yamaguchi, Hdeki Harada, & Akiyoshi Ohashi, (2008). Anoxic Ammonium Oxidation by Application of a Down-Flow Hanging Sponge (DHS) Reactor. *J. Environ. Eng. Manage.*, 18(6), pág. 409-417.
- Jairo Alberto Romero Rojas (2010), *Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y Principios de Diseño*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, pág. 553-560.
- K. Agrawal, L., Ohashi, Y., Mochida, E., Okui, H., Ueki, Y., Harada, H., et al. (1997). Treatment of a raw sewage in a temperate climate using a UASB reactor and the hanging sponge cubes process. *Water Science and Technology*, 433-440.
- Kimura, K., Nakamura, M., & Watanabe, Y. (2002). Nitrate removal by a combination of elemental Sulphur-based denitrification and membrane filtration. *Water Research*, Vol. 36, pág. 1758-1766.
- Li, W., Zhao, Q.-I., & Liu, H. (2009). Sulfide removal by simultaneous autotrophic and heterotrophic desulfurization-denitrification process. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 162, pág. 848-853.
- Machdar, I., Harada, H., Ohashi, A., Sekiguchi, Y., Okui, H., & Ueki, K. (1997). A novel and cost-effective sewage treatment system consisting of UASB pre-treatment and aerobic post-treatment units for developing countries *Water Science and Technology*.
- Machdar, I., Sekiguchi, Y., Sumino, H., Ohashi, A., & Harada, H. (2000). Combination of a UASB reactor and curtain type DHS (downflow hanging sponge) reactor as a cost-effective sewage treatment system for developing countries, *IWA Publishing*, 83-88.
- McCarty, P. L. (1975). Stiochiometry of biological reactions. *Progress in Water Technology*, Vol. 7, pág. 157-172.

- Moss, B. (1996). A land awash with nutrients the problem of eutrophication. *Chemistry & Industry, June*, pág. 407-411.
- Oh, S., Bum, M., Yoo, Y., Zubair, A., & Kim, I. (2002). Nitrate removal by simultaneous sulfur utilizing autotrophic and heterotrophic denitrification under different organics and alkalinity conditions: batch experiments. *Water Science and Technology, Vol. 47*, pág. 237-244.
- Prosser, J. (1989). Autotrophic nitrification in bacteria. In: Rose, A and Tempest, D. (Eds.) *Advances in microbial physiology. Academic Press*, pág. 125-181.
- Robertson L.A. (1988). *Aerobic denitrification and heterotrophic nitrification in Thiosphaera pantotropha and other bacteria*. Delft, The Netherlands: PhD thesis, University of Technology.
- Robertson, L., T. Dalsgaard, N. Revsbech, & J. Kuenen. (1995). Confirmation of aerobic denitrification in batch cultures, using gas chromatography and N mass spectrometry. *FEMS Microbiol. Ecol. 18*, 113-120.
- Sánchez J., & Sanabria J. (2009). Metabolismos microbianos involucrados en procesos avanzados para la remoción de Nitrógeno, una revisión prospectiva. *Revista Colombiana de Biotecnología, XI (1)*, 114-124.
- Sans Fonfría, Ramón & Pablo Rivas, Joan. (1989). *Ingeniería ambiental: Contaminación y tratamientos*. España, Maracombó.
- Standard Methods (1995). *Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water, 17th Ed.* Washington, DC: American Public Health Association.
- Sublette, K., & Sylvester, N. (1987). Oxidation of Hydrogen Sulfide by Mixed Cultures of Thionacillus denitrificans and Heterotrophs. *Biotechnology and Bioengineering, XXIX*, pág. 759-761.

- Tandukar, M., Machdar, I., Uemura, S., Ohashi, A., & Harada, H. (2006). Potential of a Combination of UASB and DHS Reactor as a Novel Sewage Treatment System for Developing Countries: Long-Term Evaluation. *Journal of Environmental Engineering*, SOI: 1.1061/(ASCE)0733-9372(2006)132:2(166).
- Van de Graaf, A., de Bruijn, P., Robertson, L., Jetten, M., & Kuenen, J. (1997). Metabolic pathway of anaerobic ammonium oxidation on the basis of ¹⁵N studies in a fluidized bed reactor. *Microbiology*, 143, pág. 2415-2421.
- Van de Graaf, A., Mulder A., de Bruijn, P., Jetten, M., Robertson, L., & Kuenen, J. (1995). Anaerobic oxidation of ammonium is a biologically mediated process. *Appl. Environ. Microbiol*, 61(4), pág. 1246-1251.
- Van Kempem, R., Mulder, J., Uijterlinde, C., & Van loosdrecht, M. (2001). Overview: full scale experience of the SHARON process for treatment of rejection water of digested sludge dewatering. *Wat. Sci. Tech.* 44(1), pág. 145-152.
- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Environment* 380, 48-65.

10. CAPITULO X: ANEXOS

10.1. ANEXO 1: CUADROS RESUMEN DE LOS PARÁMETROS ANALIZADOS

Tabla N° 51: Temperatura (°C)

Periodo	Semana	T° Amb	P-01	P-02	P-03	P-04	P-05	P-06
Periodo de Aclimatación (Sin Recirculación)	S-01	18.3	19.6	19.6	19.4	19.3	19.3	19.3
	S-02	19.1	19.8	19.7	19.4	19.0	18.9	19.0
	S-03	18.6	18.4	18.6	18.2	18.0	18.1	18.3
	S-04	19.4	18.9	18.4	18.6	18.4	18.6	18.4
	S-05	18.0	18.4	18.2	18.2	18.0	18.0	17.8
Primer Periodo De Evaluación (Sin Recirculación)	S-06	17.5	18.2	18.0	17.3	17.6	17.4	18.2
	S-07	19.0	18.8	19.0	18.5	18.3	18.8	19.4
	S-08	19.0	18.8	18.5	18.4	18.3	18.6	19.9
	S-09	18.4	18.4	18.3	17.9	17.9	17.8	18.5
	S-10	18.8	19.5	19.5	18.5	18.3	18.3	18.3
	S-11	20.1	18.9	19.1	18.9	18.7	18.8	19.5
	S-12	18.0	18.4	18.3	18.2	18.1	18.0	18.6
	S-13	19.1	19.8	19.5	19.4	19.0	19.4	20.4
Segundo Periodo De Evaluación (Recirculación: 50%)	S-14	22.5	22.0	21.7	21.7	21.5	21.0	21.8
	S-15	22.3	21.6	21.5	21.4	21.0	21.1	21.3
	S-16	21.6	21.3	21.3	21.2	21.1	21.0	21.4
	S-17	20.9	21.0	21.0	21.2	20.7	20.9	21.5
	S-18	21.8	21.8	21.6	21.4	21.3	21.2	21.5
	S-19	23.7	22.7	22.4	22.2	22.0	22.1	23.1
Tercer Periodo De Evaluación (Recirculación: 78%)	S-20	23.5	23.1	23.0	23.2	22.9	22.7	23.6
	S-21	23.1	23.5	23.3	23.2	23.1	23.3	23.8
	S-22	25.9	25.4	25.4	25.5	25.2	25.3	25.5
	S-23	25.3	24.9	25.1	24.8	24.7	24.7	25.4
	S-24	26.2	25.4	25.2	25.0	25.1	25.3	25.7
	S-25	26.9	26.2	26.0	25.8	25.5	25.4	26.3
	S-26	27.4	27.2	27.1	27.3	27.4	27.0	26.9
Cuarto Periodo De Evaluación (Recirculación: 100%)	S-27	28.4	28.1	27.9	27.9	27.7	27.8	28.1
	S-28	27.6	27.3	27.1	27.3	27.0	27.0	27.3
	S-29	26.9	26.5	26.6	26.7	26.7	26.6	26.6
	S-30	27.9	27.7	27.6	27.6	27.6	27.4	27.6
	S-31	29.3	28.7	28.6	28.6	28.8	28.6	29.1
	S-32	30.1	29.7	30.0	29.8	29.7	29.7	29.9
	S-33	30.4	30.2	30.3	30.1	29.9	29.7	30.3
Desviación Estándar		4.2	4.0	4.0	4.1	4.1	4.1	4.1

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 52: Concentración de pH

Periodo	Semana	P-01	P-02	P-03	P-04	P-05	P-06
Periodo de Aclimatación (Sin Recirculación)	S-01	7.8	7.9	8.1	8.3	8.5	8.4
	S-02	7.7	7.9	8.1	8.4	8.3	8.4
	S-03	7.7	7.7	8.2	8.3	8.4	8.4
	S-04	7.7	7.7	8.3	8.6	8.7	8.6
	S-05	8.0	8.0	8.5	8.6	8.6	8.5
Primer Periodo De Evaluación (Sin Recirculación)	S-06	7.9	8.1	8.4	8.5	8.6	8.5
	S-07	8.1	8.7	8.8	8.7	8.9	8.5
	S-08	8.1	8.6	8.8	8.8	8.7	8.5
	S-09	8.2	8.6	8.6	8.7	8.7	8.7
	S-10	8.4	8.3	8.6	8.6	8.5	8.5
	S-11	8.3	8.5	8.6	8.6	8.7	8.5
	S-12	8.2	8.4	8.5	8.5	8.3	8.3
	S-13	8.2	8.6	8.6	8.1	7.7	7.9
S-14	7.9	8.3	8.2	7.8	7.7	7.5	
Segundo Periodo De Evaluación (Recirculación: 50%)	S-15	8.0	8.2	8.3	8.0	7.9	7.7
	S-16	8.0	8.1	8.3	8.2	8.0	7.7
	S-17	7.8	8.0	8.3	8.1	8.0	7.9
	S-18	7.9	8.1	8.4	8.2	7.9	7.8
	S-19	7.9	8.2	8.3	8.0	7.8	7.8
	S-20	7.9	8.2	8.2	7.9	7.6	7.7
Tercer Periodo De Evaluación (Recirculación: 78%)	S-21	7.9	8.1	8.1	7.8	7.8	7.7
	S-22	7.9	8.3	8.2	7.9	7.9	7.9
	S-23	8.1	8.4	8.3	8.0	8.2	8.2
	S-24	8.1	8.4	8.4	8.2	8.4	8.3
	S-25	8.0	8.2	8.5	8.4	8.3	8.2
	S-26	7.7	7.9	8.2	8.2	8.2	8.0
	S-27	7.7	8.0	8.2	8.2	8.1	8.0
Cuarto Periodo De Evaluación (Recirculación: 100%)	S-28	7.9	8.1	8.2	8.1	7.8	7.7
	S-29	8.1	8.3	8.3	8.0	7.8	7.7
	S-30	7.8	8.2	8.3	8.2	8.1	8.1
	S-31	7.9	8.1	8.2	8.1	8.0	7.9
	S-32	8.1	8.1	8.3	8.2	7.9	7.8
	S-33	8.1	8.1	8.0	7.9	7.7	7.5
<i>Desviación Estándar</i>		0.2	0.3	0.2	0.3	0.4	0.4

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 53: Turbiedad (UNT)

Periodo	Semana	P-01	P-02	P-03	P-04	P-05	P-06
Periodo de Aclimatación (Sin Recirculación)	S-01	85.0	84.8	41.6	38.8	33.1	26.7
	S-02	59.7	59.5	34.8	28.6	24.7	20.0
	S-03	66.7	66.9	34.0	29.0	21.3	15.7
	S-04	53.4	53.7	36.7	25.9	21.3	16.5
	S-05	60.3	60.4	36.6	32.6	34.8	16.2
Primer Periodo De Evaluación (Sin Recirculación)	S-06	52.8	58.4	27.0	16.5	10.1	6.3
	S-07	67.3	64.7	49.8	36.2	26.2	9.1
	S-08	96.3	65.0	34.8	21.8	15.1	8.5
	S-09	60.3	60.1	30.6	16.9	12.0	7.2
	S-10	60.0	61.6	21.3	11.4	9.0	5.5
	S-11	71.9	73.8	20.5	12.9	7.3	4.6
	S-12	83.3	84.5	34.7	11.8	7.7	4.4
	S-13	77.9	92.3	24.0	15.4	8.9	6.1
Segundo Periodo De Evaluación (Recirculación: 50%)	S-14	69.0	73.4	19.8	10.8	5.1	3.2
	S-15	72.9	70.7	20.9	11.5	6.8	3.6
	S-16	65.8	77.3	15.0	6.5	4.9	2.8
	S-17	49.6	37.1	13.1	5.0	3.8	2.7
	S-18	102.1	82.7	17.8	9.5	4.3	2.7
	S-19	69.3	46.8	16.7	18.9	8.9	3.9
Tercer Periodo De Evaluación (Recirculación: 78%)	S-20	68.1	52.6	25.2	21.1	12.4	3.9
	S-21	54.0	41.9	21.6	15.1	21.9	8.8
	S-22	57.3	41.2	16.2	13.8	10.6	3.2
	S-23	44.6	23.1	14.3	7.7	4.7	2.0
	S-24	68.9	35.6	12.7	5.7	2.6	1.8
	S-25	72.6	52.3	13.3	5.0	1.9	1.5
	S-26	104.1	86.8	22.3	12.3	5.4	2.2
Cuarto Periodo De Evaluación (Recirculación: 100%)	S-27	133.0	97.3	14.6	9.0	4.5	3.0
	S-28	94.1	65.6	16.1	6.7	4.7	3.0
	S-29	105.2	92.6	21.4	9.9	7.0	2.4
	S-30	80.0	48.8	24.0	10.2	8.7	2.5
	S-31	99.2	73.2	23.9	18.5	11.1	2.4
	S-32	111.1	80.7	28.1	17.0	5.4	1.9
	S-33	95.7	69.6	19.8	12.4	3.7	1.4
<i>Desviación Estándar</i>		24.6	23.0	10.9	10.4	9.6	5.4

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 54: Concentración de Oxígeno Disuelto (mg/L)

Periodo	Semana	P-01	P-02	P-03	P-04	P-05	P-06
Periodo de Aclimatación (Sin Recirculación)	S-01	0.00	0.07	6.12	8.04	8.82	8.33
	S-02	0.00	0.00	7.46	9.06	9.54	8.18
	S-03	0.00	0.00	7.51	9.26	9.52	8.36
	S-04	0.00	0.00	6.43	7.37	8.99	8.40
	S-05	0.01	0.01	7.63	8.54	8.99	8.10
Primer Periodo De Evaluación (Sin Recirculación)	S-06	0.22	0.22	8.15	9.22	9.34	7.85
	S-07	0.03	0.13	7.45	8.47	8.74	7.10
	S-08	0.37	0.38	8.46	8.68	8.87	6.85
	S-09	0.04	0.07	8.16	8.74	8.91	7.62
	S-10	0.24	0.24	7.40	8.56	8.83	7.42
	S-11	0.00	0.06	6.60	8.13	8.17	6.52
	S-12	0.00	0.00	5.30	6.68	6.93	5.58
	S-13	0.00	0.34	6.68	6.05	7.78	6.04
Segundo Periodo De Evaluación (Recirculación: 50%)	S-14	0.00	0.00	5.47	5.29	7.75	6.47
	S-15	0.00	0.08	4.98	5.15	7.10	5.89
	S-16	0.00	0.00	6.25	6.51	7.20	6.03
	S-17	0.03	0.04	4.97	5.48	5.96	5.10
	S-18	0.00	0.00	6.00	6.21	6.83	6.32
	S-19	0.01	0.02	4.82	4.72	5.62	4.81
Tercer Periodo De Evaluación (Recirculación: 78%)	S-20	0.03	0.02	5.07	5.14	5.71	5.60
	S-21	0.03	0.08	4.74	5.16	6.46	5.19
	S-22	0.03	0.04	5.00	5.67	6.24	5.99
	S-23	0.06	0.06	5.25	5.90	7.33	5.74
	S-24	0.07	0.08	5.10	5.75	7.35	6.67
	S-25	0.07	0.07	4.96	5.93	6.34	6.40
	S-26	0.05	0.06	5.06	5.64	6.27	6.17
Cuarto Periodo De Evaluación (Recirculación: 100%)	S-27	0.33	0.06	5.06	5.60	6.42	6.50
	S-28	0.09	0.07	4.87	5.51	6.10	5.51
	S-29	0.06	0.09	5.12	5.56	6.13	5.56
	S-30	0.04	0.06	5.21	5.64	6.26	5.76
	S-31	0.06	0.07	5.40	5.77	6.16	5.98
	S-32	0.03	0.03	5.52	5.80	6.31	6.05
Desviación Estándar	S-33	0.05	0.08	5.88	6.09	6.40	5.99
			0.17	0.21	1.23	1.52	1.34

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 55: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) (mg/L)

Periodo	Semana	P-01	P-02	P-05	P-06
Periodo de Aclimatación (Sin Recirculación)	S-3	98.45	98.45	26.52	26.49
	S-4	113.99	113.99	24.30	22.23
	S-5	90.18	90.18	27.69	25.82
Primer Periodo De Evaluación (Sin Recirculación)	S-10	103.94	103.94	22.97	23.20
	S-11	123.31	123.31	28.75	19.24
	S-13	134.62	134.62	27.04	21.78
	S-14	115.27	115.27	27.21	22.74
Segundo Periodo De Evaluación (Recirculación: 50%)	S-15	140.21	95.95	13.81	19.58
	S-16	127.15	56.92	24.65	22.50
	S-17	122.14	71.75	19.01	15.80
	S-18	102.24	64.71	27.62	25.64
	S-19	159.71	80.23	20.18	22.57
	S-20	125.88	74.12	19.09	17.97
Tercer Periodo De Evaluación (Recirculación: 78%)	S-21	132.66	72.67	26.55	20.44
	S-22	139.60	84.08	32.44	26.91
	S-23	142.28	77.15	13.82	12.96
	S-25	140.28	76.05	13.98	14.15
	S-27	133.06	62.40	13.41	15.33
Cuarto Periodo De Evaluación (Recirculación: 100%)	S-28	135.52	69.10	12.37	13.70
	S-29	129.59	77.45	11.74	12.08
	S-30	113.75	77.07	11.99	10.55
	S-31	88.14	69.59	11.83	11.24
	S-32	92.58	60.21	10.01	10.20
	S-33	107.43	71.91	12.81	13.68
<i>Desviación Estándar</i>		18.84	20.93	7.08	5.44

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 56: Concentración de Nitrógeno Amoniacal (mg/L)

Periodo	Semana	P-01	P-02	P-03	P-04	P-05	P-06
Periodo de Aclimatación (Sin Recirculación)	S-5	49.0	47.0	35.0	24.0	22.0	22.0
Primer Periodo De Evaluación (Sin Recirculación)	S-10	45.0	45.0	27.0	23.0	29.0	30.0
	S-11	43.0	42.0	X	X	14.0	16.0
	S-12	51.0	50.0	X	X	14.0	16.0
	S-13	45.0	45.0	X	X	10.0	10.0
	S-14	53.0	53.0	32.0	27.0	14.0	15.0
Segundo Periodo De Evaluación (Recirculación: 50%)	S-15	47.0	39.0	20.0	13.0	3.0	3.0
	S-16	55.0	34.0	X	X	7.0	5.0
	S-17	50.0	43.0	X	X	4.0	4.0
	S-18	51.0	34.0	X	X	3.0	2.0
	S-19	43.0	30.0	X	X	6.0	4.0
	S-20	50.0	39.0	11.0	7.0	3.0	2.0
Tercer Periodo De Evaluación (Recirculación: 78%)	S-21	49.0	29.0	20.0	13.0	3.0	2.0
	S-22	50.0	43.0	X	X	3.0	1.0
	S-23	51.0	33.0	X	X	0.0	0.0
	S-24	53.0	30.0	X	X	1.0	0.0
	S-25	51.0	30.0	X	X	0.0	0.0
	S-27	55.0	43.0	23.0	8.0	0.0	0.0
Cuarto Periodo De Evaluación (Recirculación: 100%)	S-28	51.0	20.0	12.4	5.6	0.0	0.0
	S-29	40.1	25.5	X	X	0.0	0.0
	S-30	51.7	29.1	X	X	2.7	1.2
	S-31	48.6	27.3	X	X	0.0	0.0
	S-32	51.4	27.9	X	X	2.2	1.2
	S-33	50.6	32.1	15.3	6.9	0.0	0.0
<i>Desviación Estándar</i>		3.8	8.6	8.4	8.3	7.6	8.2

Fuente: Elaboración propia

X No se realizó medición.

Tabla N° 57: Concentración del Nitrógeno Total (mg/L)

Periodo	Semana	P-01	P-02	P-03	P-04	P-05	P-06
Periodo de Aclimatación (Sin Recirculación)	S-5	88.3	87.7	73.7	75.5	78.2	80.6
Primer Periodo De Evaluación (Sin Recirculación)	S-10	92.4	92.4	63.4	82.4	78.4	84.2
	S-11	78.0	78.1	X	X	56.1	64.4
	S-12	88.4	84.3	X	X	61.9	59.6
	S-13	82.7	65.9	X	X	41.7	46.8
	S-14	77.7	77.2	60.8	58.1	48.7	54.4
Segundo Periodo De Evaluación (Recirculación: 50%)	S-15	80.2	70.6	54.6	47.9	36.7	44.2
	S-16	74.2	55.1	X	X	28.9	34.6
	S-17	92.0	63.3	X	X	40.1	40.7
	S-18	91.1	66.4	X	X	35.5	32.2
	S-19	79.3	52.0	X	X	39.6	35.4
	S-20	95.8	57.7	52.4	49.5	45.5	42.5
Tercer Periodo De Evaluación (Recirculación: 78%)	S-21	80.8	61.6	56.6	42.0	44.1	42.8
	S-22	81.3	62.2	X	X	44.5	31.3
	S-23	84.4	59.6	X	X	21.8	30.4
	S-24	83.2	52.7	X	X	19.4	17.7
	S-25	84.0	53.8	X	X	22.2	20.3
	S-27	77.3	59.9	52.1	33.1	26.7	28.4
Cuarto Periodo De Evaluación (Recirculación: 100%)	S-28	62.3	41.5	42.0	30.5	25.2	27.2
	S-29	61.6	41.9	X	X	32.3	32.2
	S-30	60.0	40.0	X	X	36.6	35.0
	S-31	73.9	51.6	X	X	34.3	32.8
	S-32	66.1	44.2	X	X	34.9	32.0
	S-33	81.5	62.9	52.4	44.2	39.7	33.5
Desviación Estándar		3.8	9.8	14.4	8.9	17.7	15.6

Fuente: Elaboración propia

X No se realizó medición.

Tabla N° 58: Concentración de NTK (mg/L)

Periodo	Semana	P-01	P-02	P-03	P-04	P-05	P-06
Periodo de Aclimatación (Sin Recirculación)	S-5	50.2	49.6	36.3	30.9	30.2	29.1
Primer Periodo De Evaluación (Sin Recirculación)	S-10	48.5	48.5	32.8	30.9	30.1	32.4
	S-11	48.8	48.6	X	X	18.1	20.4
	S-12	58.7	58.7	X	X	18.9	18.6
	S-13	46.9	45.3	X	X	11.6	10.8
	S-14	56.5	56.1	35.9	30.6	18.6	16.7
Segundo Periodo De Evaluación (Recirculación: 50%)	S-15	49.8	37.1	22.5	12.9	3.6	4.5
	S-16	49.7	37.2	X	X	7.6	7.4
	S-17	51.7	39.7	X	X	4.9	4.2
	S-18	54.9	35.1	X	X	4.2	2.7
	S-19	49.2	31.2	X	X	6.8	5.3
	S-20	51.5	30.5	21.7	10.9	4.0	3.0
Tercer Periodo De Evaluación (Recirculación: 78%)	S-21	49.3	30.6	23.9	11.5	3.8	2.7
	S-22	53.8	44.1	X	X	4.6	2.7
	S-23	58.5	38.4	X	X	2.6	2.2
	S-24	54.1	33.7	X	X	1.6	1.0
	S-25	53.1	32.2	X	X	1.8	1.2
	S-27	68.9	47.7	25.4	8.9	2.1	1.4
Cuarto Periodo De Evaluación (Recirculación: 100%)	S-28	51.9	23.4	14.6	6.8	1.4	1.7
	S-29	50.1	29.6	X	X	4.2	2.4
	S-30	53.3	32.7	X	X	3.2	1.9
	S-31	51.4	29.8	X	X	1.1	1.4
	S-32	55.4	31.3	X	X	3.0	1.8
	S-33	52.1	35.8	17.6	8.3	2.2	1.3
<i>Desviación estándar</i>		4.6	9.2	7.8	10.6	8.7	9.2

Fuente: Elaboración propia

X No se realizó medición.

Tabla N° 59: Concentración de Nitritos (mg/L)

Periodo	Semana	P-01	P-02	P-03	P-04	P-05	P-06
Periodo de Aclimatación (Sin Recirculación)	S-5	17.0	17.0	12.0	17.0	18.0	20.0
Primer Periodo De Evaluación (Sin Recirculación)	S-10	19.0	19.0	14.0	17.0	16.0	17.0
	S-11	11.0	11.0	X	X	13.0	19.0
	S-12	15.0	14.0	X	X	8.0	7.0
	S-13	19.0	16.0	X	X	6.0	4.0
	S-14	15.0	15.0	12.0	13.0	7.0	9.0
Segundo Periodo De Evaluación (Recirculación: 50%)	S-15	17.0	16.0	12.0	12.0	10.0	11.0
	S-16	13.0	6.0	X	X	5.0	8.0
	S-17	18.0	14.0	X	X	12.0	13.0
	S-18	21.0	18.0	X	X	11.0	11.0
	S-19	17.0	13.0	X	X	10.0	11.0
	S-20	20.0	15.0	11.0	14.0	15.0	14.0
Tercer Periodo De Evaluación (Recirculación: 78%)	S-21	20.0	15.0	13.0	10.0	11.0	12.0
	S-22	21.0	14.0	X	X	15.0	9.0
	S-23	15.0	11.0	X	X	3.0	6.0
	S-24	19.0	6.0	X	X	2.0	2.0
	S-25	16.0	14.0	X	X	5.0	3.0
	S-27	5.0	7.0	14.0	6.0	2.0	3.0
Cuarto Periodo De Evaluación (Recirculación: 100%)	S-28	8.0	11.0	12.0	5.0	3.0	4.0
	S-29	8.0	6.0	X	X	3.0	2.0
	S-30	5.0	4.0	X	X	5.0	3.0
	S-31	14.0	11.0	X	X	6.0	1.0
	S-32	7.0	7.0	X	X	5.0	2.0
	S-33	14.0	12.0	8.0	5.0	4.0	1.0
<i>Desviación estándar</i>		5.0	4.2	1.8	4.8	4.8	5.8

Fuente: Elaboración propia

X No se realizó medición.

Tabla N° 60: Concentración de Nitratos (mg/L)

Periodo	Semana	P-01	P-02	P-03	P-04	P-05	P-06
Periodo de Aclimatación (Sin Recirculación)	S-5	21.1	21.1	25.4	27.6	30.0	31.5
Primer Periodo De Evaluación (Sin Recirculación)	S-10	24.9	24.9	16.6	34.5	32.3	34.8
	S-11	18.2	18.5	X	X	25.0	25.0
	S-12	14.7	11.6	X	X	35.0	34.0
	S-13	16.8	4.6	X	X	24.1	32.0
	S-14	6.2	6.1	12.9	14.5	23.1	28.7
Segundo Periodo De Evaluación (Recirculación: 50%)	S-15	13.4	17.5	20.1	23.0	23.1	28.7
	S-16	11.5	11.9	X	X	16.3	19.2
	S-17	22.3	9.6	X	X	23.2	23.5
	S-18	15.2	13.3	X	X	20.3	18.5
	S-19	13.1	7.8	X	X	22.8	19.1
	S-20	24.3	12.2	19.7	24.6	26.5	25.5
Tercer Periodo De Evaluación (Recirculación: 78%)	S-21	11.5	16.0	19.7	20.5	29.3	28.1
	S-22	6.5	4.1	X	X	24.9	19.6
	S-23	10.9	10.2	X	X	16.2	22.2
	S-24	10.1	13.0	X	X	15.8	14.7
	S-25	14.9	7.6	X	X	15.4	16.1
	S-27	3.4	5.2	12.7	18.2	22.6	24.0
Cuarto Periodo De Evaluación (Recirculación: 100%)	S-28	2.4	7.1	15.4	18.7	20.8	21.5
	S-29	3.5	6.3	X	X	25.1	27.8
	S-30	1.7	3.3	X	X	28.4	30.1
	S-31	8.5	10.8	X	X	27.2	30.4
	S-32	3.7	5.9	X	X	26.9	28.2
	S-33	15.4	15.1	26.8	30.9	33.5	31.2
<i>Desviación estándar</i>		6.9	5.7	5.0	6.5	5.4	5.7

Fuente: Elaboración propia

X No se realizó medición.

Tabla N° 61: Relación de DBO₅/NTK

Periodo	Semana	P-01	P-02	P-05	P-06
Periodo de Aclimatación (Sin Recirculación)	S-5	1.79	1.82	0.92	0.89
Primer Periodo De Evaluación (Sin Recirculación)	S-10	2.14	2.14	0.76	0.72
	S-11	2.53	2.54	1.59	0.94
	S-13	2.87	2.97	2.34	2.01
	S-14	2.04	2.05	1.46	1.36
Segundo Periodo De Evaluación (Recirculación: 50%)	S-15	2.81	2.58	3.86	4.34
	S-16	2.56	1.53	3.25	3.06
	S-17	2.36	1.81	3.92	3.75
	S-18	1.86	1.84	6.62	9.64
	S-19	3.25	2.57	2.97	4.25
	S-20	2.44	2.43	4.78	6.07
Tercer Periodo De Evaluación (Recirculación: 78%)	S-21	2.69	2.38	6.97	7.71
	S-22	2.59	1.91	7.10	10.00
	S-23	2.43	2.01	5.26	6.00
	S-25	2.64	2.37	7.60	12.19
	S-27	1.93	1.31	6.54	10.72
Cuarto Periodo De Evaluación (Recirculación: 100%)	S-28	2.61	2.95	9.16	8.25
	S-29	2.59	2.62	2.82	4.97
	S-30	2.14	2.36	3.76	5.58
	S-31	1.72	2.34	10.85	8.26
	S-32	1.67	1.93	3.36	5.63
	S-33	2.06	2.01	5.85	10.94
Desviación Estándar		0.42	0.42	0.43	2.71

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 62: Valores representativos de la Nitrógeno Total Kjeldahl en base a los periodos de evaluación

Nitrógeno Total Kjeldahl (mg/L)	Primer Periodo de Evaluación	Segundo Periodo de Evaluación	Tercer Periodo de Evaluación	Cuarto Periodo de Evaluación
P-01: Afluente	51.9 ± 5.3	51.1 ± 2.1	56.3 ± 6.9	52.3 ± 1.8
P-02: Mezcla	51.5 ± 5.7	35.1 ± 3.6	37.8 ± 6.9	30.4 ± 4.1
P-03: Efluente Módulo 01	34.4 ± 2.2	22.1 ± 0.5	24.6 ± 1.0	16.1 ± 2.1
P-04: Efluente Módulo 02	30.7 ± 0.2	11.9 ± 1.4	10.2 ± 1.9	7.5 ± 1.0
P-05: Efluente Módulo 03	19.5 ± 6.7	5.2 ± 1.6	2.8 ± 1.2	2.5 ± 1.2
P-06: Recirculación	19.8 ± 7.9	4.5 ± 1.7	1.9 ± 0.7	1.7 ± 0.4

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 63: Valores representativos de la Temperatura en base a los periodos de evaluación

Temperatura (°C)	Periodo de Aclimatación	Primer Periodo de Evaluación	Segundo Periodo de Evaluación	Tercer Periodo de Evaluación	Cuarto Periodo de Evaluación
Ambiental	18.7 ± 1.0	19.1 ± 1.0	22.3 ± 1.7	26.1 ± 1.7	28.7 ± 1.6
P-01: Afluente	18.9 ± 0.9	19.2 ± 1.3	21.9 ± 1.4	25.7 ± 1.5	28.4 ± 1.6
P-02: Mezcla	18.7 ± 0.8	19.1 ± 1.3	21.8 ± 1.4	25.6 ± 1.5	28.4 ± 1.6
P-03: Efluente Módulo 01	18.6 ± 0.8	18.7 ± 1.4	21.8 ± 1.4	25.5 ± 1.5	28.4 ± 1.6
P-04: Efluente Módulo 02	18.4 ± 0.8	18.6 ± 1.4	21.5 ± 1.4	25.4 ± 1.6	28.3 ± 1.5
P-05: Efluente Módulo 03	18.4 ± 0.8	18.6 ± 1.3	21.5 ± 1.3	25.4 ± 1.5	28.2 ± 1.5
P-06: Recirculación	18.4 ± 0.8	19.3 ± 1.6	22.1 ± 1.7	25.9 ± 1.4	28.5 ± 1.6

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 64: Valores representativos del pH en base a los periodos de evaluación

pH	Periodo de Aclimatación	Primer Periodo de Evaluación	Segundo Periodo de Evaluación	Tercer Periodo de Evaluación	Cuarto Periodo de Evaluación
P-01: Afluente	7.77 ± 0.21	8.14 ± 0.22	7.89 ± 0.09	7.93 ± 0.16	7.99 ± 0.16
P-02: Mezcla	7.81 ± 0.21	8.46 ± 0.23	8.15 ± 0.10	8.22 ± 0.20	8.14 ± 0.11
P-03: Efluente Módulo 01	8.26 ± 0.21	8.57 ± 0.19	8.26 ± 0.08	8.29 ± 0.14	8.20 ± 0.12
P-04: Efluente Módulo 02	8.46 ± 0.17	8.48 ± 0.33	8.05 ± 0.15	8.10 ± 0.21	8.05 ± 0.13
P-05: Efluente Módulo 03	8.51 ± 0.17	8.41 ± 0.44	7.85 ± 0.21	8.11 ± 0.23	7.86 ± 0.14
P-06: Recirculación	8.46 ± 0.18	8.34 ± 0.37	7.78 ± 0.14	8.04 ± 0.22	7.77 ± 0.20

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 65: Valores representativos de turbiedad en base a los periodos de evaluación

Turbiedad (UNT)	Periodo de Aclimatación	Primer Periodo de Evaluación	Segundo Periodo de Evaluación	Tercer Periodo de Evaluación	Cuarto Periodo de Evaluación
P-01: Afluente	61.7 ± 12.3	70.5 ± 20.1	70.4 ± 18.5	74.0 ± 31.9	98.2 ± 21.2
P-02: Mezcla	61.8 ± 12.2	70.6 ± 20.5	59.9 ± 23.0	49.9 ± 27.7	72.5 ± 21.0
P-03: Efluente Módulo 01	46.9 ± 6.8	28.8 ± 13.4	18.2 ± 5.7	16.2 ± 5.1	22.2 ± 5.7
P-04: Efluente Módulo 02	71.2 ± 12.5	16.7 ± 10.2	12.4 ± 7.5	9.7 ± 5.3	12.5 ± 5.4
P-05: Efluente Módulo 03	75.7 ± 13.5	11.0 ± 6.7	7.0 ± 3.7	7.5 ± 8.5	6.7 ± 3.1
P-06: Recirculación	27.3 ± 4.1	6.1 ± 2.4	3.3 ± 0.9	3.3 ± 3.0	2.3 ± 0.8

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 66: Valores representativos del oxígeno disuelto en base a los periodos de evaluación

Oxígeno Disuelto (mg/L)	Periodo de Aclimatación	Primer Periodo de Evaluación	Segundo Periodo de Evaluación	Tercer Periodo de Evaluación	Cuarto Periodo de Evaluación
P-01: Afluente	0.00 ± 0.01	0.10 ± 0.28	0.01 ± 0.03	0.08 ± 0.16	0.05 ± 0.04
P-02: Mezcla	0.01 ± 0.02	0.16 ± 0.37	0.03 ± 0.07	0.06 ± 0.03	0.07 ± 0.05
P-03: Efluente Módulo 01	7.23 ± 0.72	7.07 ± 1.18	5.29 ± 0.64	5.02 ± 0.42	5.34 ± 0.44
P-04: Efluente Módulo 02	8.57 ± 1.02	7.78 ± 1.36	5.48 ± 0.74	5.66 ± 0.48	5.73 ± 0.37
P-05: Efluente Módulo 03	9.24 ± 0.42	8.36 ± 0.80	6.36 ± 0.90	6.65 ± 0.74	6.23 ± 0.31
P-06: Recirculación	8.26 ± 0.55	6.83 ± 0.92	5.59 ± 0.87	6.11 ± 0.64	5.81 ± 0.46

Fuente: Elaboración propia

10.2. ANEXO 2: PANEL FOTOGRAFICO

Foto N° 33: Preparación de las esponjas con resina epóxica



Foto N° 34: Baño de resina epóxica a las esponjas blandas



La preparación se realizó combinando los componentes de la resina epóxica y el aditivo endurecedor.

Foto N° 35: Esponjas Endurecidas

Realizada la adición de la resina epóxica en las esponjas blandas, se procedió a colocarlas al medio ambiente para que sequen y al mismo tiempo endurezcan.

Foto N° 36: Acrílico cilíndrico

Tres acrílicos de las mismas dimensiones, fueron utilizados para contener las esponjas endurecidas.

Foto N° 37: Esponjas endurecidas dentro del acrílico



Las esponjas endurecidas fueron colocadas de manera aleatoria dentro del acrílico tratando de evitar espacios vacíos.

Foto N° 38: Turbidímetro



Foto N° 39: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)



Foto N° 40: Bomba de aire de 1/3 HP



Foto N° 41: Frascos para determinar nitritos y nitratos

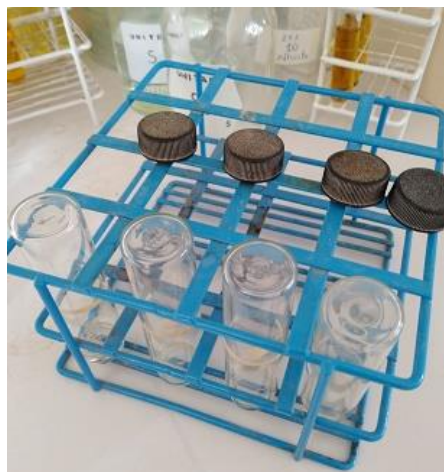


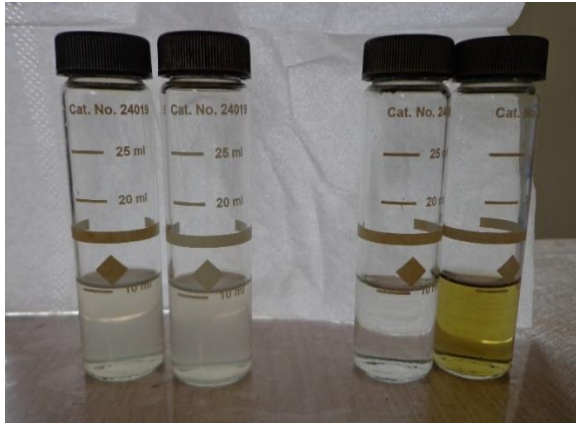
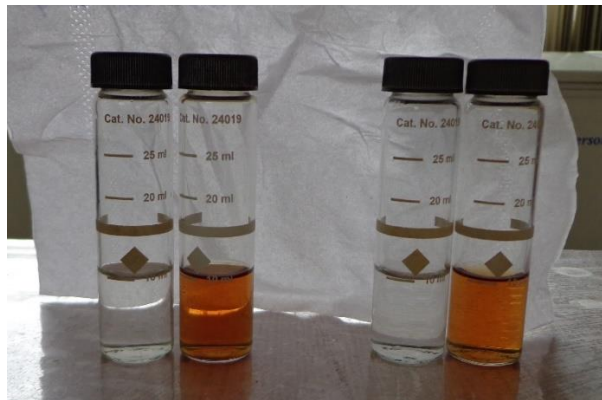
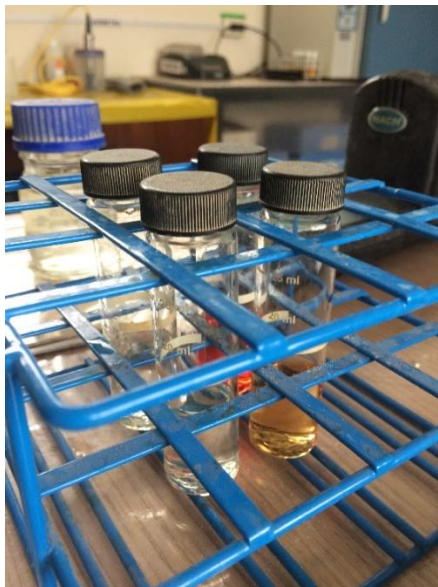
Foto N° 42: Frascos con muestras – Análisis de Nitratos**Foto N° 43:** Frascos con muestras – Análisis de Nitritos**Foto N° 44:** Frascos con muestras en reposo – Nitritos (01)

Foto N° 45: Frascos con muestras en reposo – Nitritos (02)



Foto N° 46: Frascos con muestras en reposo - Nitratos



Los nitritos y nitratos fueron analizados en el laboratorio de CITRAR. Ambas pruebas se realizaron con ayuda del colorímetro DR890 y siguiendo el procedimiento de dicho equipo.

Foto N° 47: Monitoreo en el Reactor DHS G-06



Foto N° 48: Muestra obtenida del Módulo 01



Foto N° 49: Prueba de Sólidos con Membranas de Fibra de Vidrio



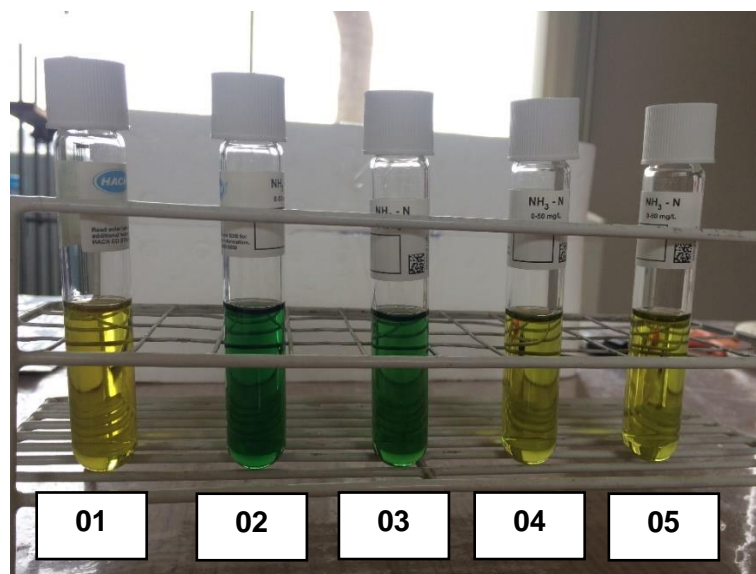
Foto N° 50: Prueba de Sólidos Suspendidos Totales (T=105°C)



Foto N° 51: Preparación de la muestra – Nitrógeno Total Kjeldahl



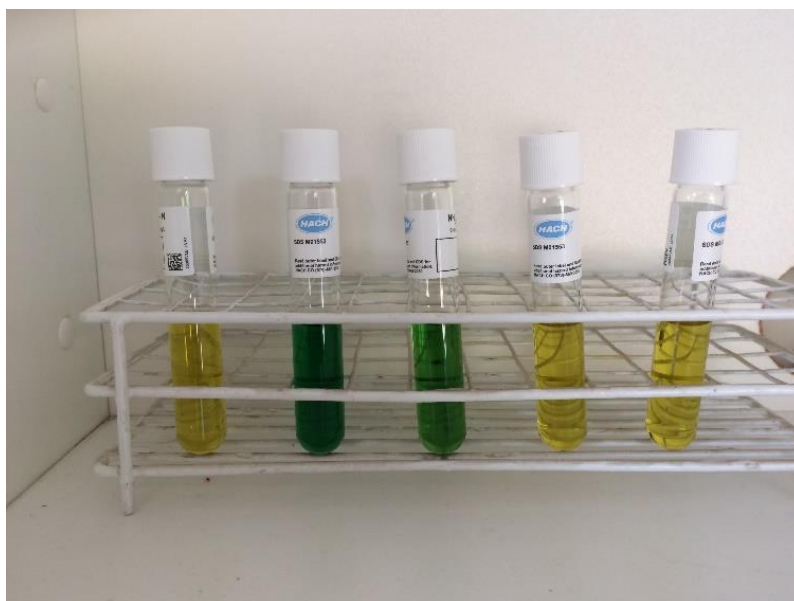
La determinación del Nitrógeno Total Kjeldahl, se realizó en un laboratorio acreditado. La preservación de la muestra fue mediante ácido sulfúrico 2N.

Foto N° 52: Análisis 01 – Nitrógeno Amoniacal

En la Foto N°59, se puede observar 5 viales. El vial 01 correspondía al “blanco”, que es el patrón de color equivalente a 0 (cero); los viales 02, 03, 04 y 05 correspondían al afluente (P-01), mezcla (P-02), salida del reactor DHS G-06 (P-05) y a la recirculación (P-06).

Se puede apreciar que a partir del vial 02, la intensidad de color va disminuyendo (verde brillante a amarillo claro) lo que indicaba la remoción del nitrógeno amoniacal.

Foto N° 53: Análisis 02 – Nitrógeno Amoniacal

Foto N° 54: Análisis 03 – Nitrógeno Amoniacal

La foto N° 60 muestra el análisis de nitrógeno amoniacal en el tercer periodo de evaluación mientras que las fotos N° 61 y 62 pertenecían a muestra tomadas en el cuarto periodo de evaluación.

La prueba de Nitrógeno Amoniacal pudo realizarse gracias a los viales Hach de alto Rango (1 – 100 mg/L).

Foto N° 55: Sistema Giratorio Repartidor de Caudal

En la Foto N° 63, se aprecian los componentes del sistema giratorio: Transformador 12V, motor giratorio, tablero electrónico simple, ventilador de AC y vaso plástico.

Foto N° 56: Lodo adherido a las paredes internas del Sedimentador 02



Foto N° 57: Esponjas endurecidas en el Módulo 01



En la Foto N° 66, se aprecian las esponjas en la parte superior del Módulo 01 al finalizar el cuarto periodo de evaluación.

Foto N° 58: Esponjas endurecidas en el Módulo 03



La Foto N° 66 muestra las esponjas en el Módulo 03 al finalizar el cuarto periodo de evaluación.

Foto N° 59: Desmontaje del Sedimentador 01



Foto N° 60: Desmontaje del Módulo 03



Foto N° 61: Desmontaje de los Módulos 01, 02 y 03



Foto N° 62: Esponjas del Módulo 02 al finalizar la investigación



Foto N° 63: Esponja con biomasa adherida – Final de la investigación

