

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Activación y arranque de la planta de tratamiento aeróbica de
aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones

Unitarias

Trabajo de graduación presentado por Diego Alejandro Gracias
Herrera para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería
Química

Guatemala
2018

Activación y arranque de la planta de tratamiento aeróbica de
aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones
Unitarias

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

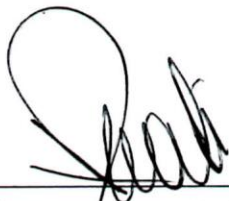
Activación y arranque de la planta de tratamiento aeróbica de
aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones

Unitarias

Trabajo de graduación presentado por Diego Alejandro Gracias
Herrera para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería
Química


Guatemala
2018

Vo.Bo.:

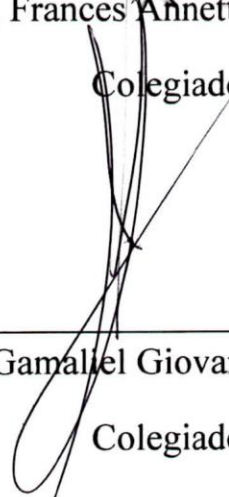
(f) 

Ing. Frances Annette Recari Fernandez
Asesor


Tribunal Examinador:

(f) 

Ing. Frances Annette Recari Fernandez
Colegiado No. 743

(f) 

Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano
Colegiado No. 686

(f) 

Ing. Cristián Rossi Sosa
Colegiado No. 471

Fecha de aprobación: Guatemala, 19 de junio de 2018.

PREFACIO

Este trabajo de graduación está enfocado a la planta de tratamiento aeróbica de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias, la cual busca transmitir a los estudiantes una apreciación del recurso hídrico de Guatemala en nuestra vida diaria, el cual sufre los impactos provenientes de la actividad humana. Por tanto, es imperativo que la industria guatemalteca invierta y ejecute correctamente las estrategias ambientales reactivas y proactivas para protección de los ecosistemas.

CONTENIDO

PREFACIO	vi
LISTA DE CUADROS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
RESUMEN	xvii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO.....	4
A. Aguas residuales.....	4
B. Tratamiento de aguas residuales	5
C. Descripción de la planta aeróbica de tratamiento de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias.....	20
D. Normas nacionales e internacionales para la descarga de agua residual en el alcantarillado público.....	21
III. ANTECEDENTES.....	23
A. Manual de operación para una planta de tratamiento de aguas residuales en una fábrica de productos químicos auxiliares para la industria textil.....	23
B. Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales para una industria alimenticia de Guatemala	24
C. Remoción de contaminantes orgánicos presentes en agua residual doméstica mediante prototipo a escala laboratorio.....	25
D. Descripción de la planta piloto de tratamiento aeróbica de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias	26
IV. OBJETIVOS.....	29
A. Objetivo general	29
B. Objetivos específicos.....	29
V. JUSTIFICACIÓN.....	30

VI.	METODOLOGÍA	33
A.	Etapa de investigación.....	33
B.	Etapa experimental y de análisis	37
C.	Etapa final	58
VII.	RESULTADOS	59
VIII.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	74
IX.	CONCLUSIONES	84
X.	RECOMENDACIONES	88
XI.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
XII.	APÉNDICE A	92
	Manual de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales	92
A.	Introducción	- 1 -
B.	Proceso de tratamiento	- 2 -
C.	Especificaciones de la planta de tratamiento de aguas residuales.....	- 4 -
D.	Operación y mantenimiento	- 12 -
E.	Análisis de muestras.....	- 26 -
XIII.	APÉNDICE B	93
	Calibración de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias.....	93
XIV.	APÉNDICE C	103
A.	Datos originales.....	103
B.	Cálculo de muestra.....	108
C.	Datos calculados.....	109
D.	Análisis de error	123
E.	Análisis estadístico de datos.....	123
F.	Comparación de parámetros utilizados para efectuar la caracterización del agua residual y el agua tratada.....	130

XV. APÉNDICE D	221
Hojas Técnicas de equipos de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias.	221

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1 Equipos en la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales.....	27
Cuadro 2 Rango de operación de la planta aeróbica de tratamiento de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias	59
Cuadro 3 Condiciones de operación de planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales.....	- 7 -
Cuadro 4 Descripción de los equipos en la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales.....	- 7 -
Cuadro 5 Descripción de las válvulas en la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales.....	- 10 -
Cuadro 6 Identificación del equipo de protección requerido para operar las planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias	- 13 -
Cuadro 7 Especificación del diagrama de Gantt para el arranque biológico	- 19 -
Cuadro 8 Plan diario de mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias.	- 23 -
Cuadro 9 Calibración de la bomba de alimentación (P01) de velocidad variable	94
Cuadro 10 Calibración de la bomba de retorno de lodos (P03) de velocidad variable.....	97
Cuadro 11 Calibración de la bomba de dosificación (P04) de solución de hipoclorito	100
Cuadro 12 Caracterización del agua residual a tratar en la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias para las pruebas con el caudal de alimentación de 0.5 m ³ /día	104
Cuadro 13 Caracterización del agua residual a tratar en la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias para las pruebas con el caudal de alimentación de 1.0 m ³ /día	105
Cuadro 14 Caracterización del agua residual a tratar en la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias para las pruebas con el caudal de alimentación de 1.5 m ³ /día	106
Cuadro 15 Análisis granulométrico de la solución al 10% de agua residual a tratar en la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias	107

Cuadro 16 Datos calculados para la determinación de condiciones de entrada del afluente con un flujo volumétrico de alimentación de 0.5 m ³ /día y salida del efluente de la planta de tratamiento aeróbico	110
Cuadro 17 Datos calculados para la determinación de condiciones de entrada del afluente con un flujo volumétrico de alimentación de 1.0 m ³ /día y salida del efluente de la planta de tratamiento aeróbico	111
Cuadro 18 Datos calculados para la determinación de condiciones de entrada del afluente con un flujo volumétrico de alimentación de 1.5 m ³ /día y salida del efluente de la planta de tratamiento aeróbico	112
Cuadro 19 Datos calculados del rendimiento de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales a un flujo volumétrico de alimentación de 0.5 m ³ /día	114
Cuadro 20 Datos calculados del rendimiento de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales a un flujo volumétrico de alimentación de 1.0 m ³ /día	115
Cuadro 21 Datos calculados del rendimiento de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales a un flujo volumétrico de alimentación de 1.5 m ³ /día	116
Cuadro 22 Determinación de condiciones de entrada del afluente con un flujo volumétrico de alimentación de 0.5 m ³ /día y salida del efluente de la planta de tratamiento aeróbico.....	117
Cuadro 23 Determinación de condiciones de entrada del afluente con un flujo volumétrico de alimentación de 1.0 m ³ /día y salida del efluente de la planta de tratamiento aeróbico.....	118
Cuadro 24 Determinación de condiciones de entrada del afluente con un flujo volumétrico de alimentación de 1.5 m ³ /día y salida del efluente de la planta de tratamiento aeróbico.....	119
Cuadro 25 Reducción de parámetros físicos y químicos del agua tratada en la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales a un flujo volumétrico de alimentación de 0.5 m ³ /día	120
Cuadro 26 Reducción de parámetros físicos y químicos del agua tratada en la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales a un flujo volumétrico de alimentación de 1.0 m ³ /día	121
Cuadro 27 Reducción de parámetros físicos y químicos del agua tratada en la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales a un flujo volumétrico de alimentación de 1.5 m ³ /día	122
Cuadro 28 Coeficiente de correlación lineal tiempo de operación y parámetros utilizados para efectuar la caracterización del agua residual y el agua tratada con un flujo volumétrico de alimentación de 0.5 m ³ /día	124

Cuadro 29 Coeficiente de correlación lineal tiempo de operación y parámetros utilizados para efectuar la caracterización del agua residual y el agua tratada con un flujo volumétrico de alimentación de 1.0 m ³ /día.....	125
Cuadro 30 Coeficiente de correlación lineal tiempo de operación y parámetros utilizados para efectuar la caracterización del agua residual y el agua tratada con un flujo volumétrico de alimentación de 1.5 m ³ /día.....	126
Cuadro 31 Coeficiente de correlación lineal oxígeno suministrado y parámetros utilizados para efectuar la caracterización del agua residual y el agua tratada.....	127
Cuadro 32 Coeficiente de correlación lineal flujo volumétrico de alimentación y parámetros utilizados para efectuar la caracterización del agua residual y el agua tratada.....	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Tipos de tratamiento de agua residual	6
Figura 2 Esquema de formación de puentes entre partículas en presencia de polímeros orgánicos	10
Figura 3 Organismos filamentosos observados en plantas de tratamiento de aguas residuales.....	11
Figura 4 Protozoos observados en fangos activados: a) Flagelados; b) amebas; c) ciliados nadadores libres y d) ciliados fijos	12
Figura 5 Rotífero observado en fangos activados.....	13
Figura 6 Escala de pH.....	16
Figura 7 Ecuación general de oxígeno consumido por las bacterias	17
Figura 8 Conductividad eléctrica de distintos tipos de agua.....	18
Figura 9 Planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias	28
Figura 10 Balance de masa de la planta aeróbica de tratamiento de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias	61
Figura 11 Rendimiento de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales a distinto caudal de alimentación.....	62
Figura 12 Incremento de pH durante el tratamiento aeróbico del afluente con lodos activados para cada caudal de alimentación	63
Figura 13 Reducción de la conductividad eléctrica durante el tratamiento aeróbico del afluente con lodos activados para cada caudal de alimentación	64
Figura 14 Reducción de los Sólidos Disueltos Totales (SDT) durante el tratamiento aeróbico del afluente con lodos activados para cada caudal de alimentación	65
Figura 15 Reducción de la turbidez durante el tratamiento aeróbico del afluente con lodos activados para cada caudal de alimentación.....	66
Figura 16 Reducción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) durante el tratamiento aeróbico del afluente con lodos activados para cada caudal de alimentación.....	67
Figura 17 Reducción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) durante el tratamiento aeróbico del afluente con lodos activados para cada caudal de alimentación.....	68
Figura 18 Incremento del Oxígeno Disuelto (OD) durante el tratamiento aeróbico del afluente con lodos activados para cada caudal de alimentación	69

Figura 19 Reducción de los Sólidos Suspendidos Totales (SST) durante el tratamiento aeróbico del afluente con lodos activados para cada caudal de alimentación.....	70
Figura 20 Variación de temperatura durante el tratamiento aeróbico del afluente con lodos activados para cada caudal de alimentación.....	71
Figura 21 Reducción de la refracción durante el tratamiento aeróbico del afluente con lodos activados para cada caudal de alimentación.....	72
Figura 22 Diagrama de general del sistema de tratamiento aerobio de biomasa en suspensión en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.....	- 4 -
Figura 23 Diagrama de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias.....	- 5 -
Figura 24 Diagrama de Gantt para el arranque de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias.....	- 22 -
Figura 25 Curva de calibración de la bomba de alimentación (P01) de velocidad variable.....	96
Figura 26 Curva de calibración de la bomba de retorno de lodos (P03) de velocidad variable.....	99
Figura 27 Curva de calibración de la bomba de dosificación (P04) de solución de hipoclorito.....	102
Figura 28 Comparación temperatura y conductividad eléctrica.....	131
Figura 29 Comparación temperatura y Sólidos Disueltos Totales (SDT).....	133
Figura 30 Comparación temperatura y turbidez.....	135
Figura 31 Comparación temperatura y Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	137
Figura 32 Comparación temperatura y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).....	139
Figura 33 Comparación temperatura y Oxígeno Disuelto (OD).....	141
Figura 34 Comparación temperatura – Sólidos Suspendidos Totales (SST).....	143
Figura 35 Comparación temperatura y pH.....	145
Figura 36 Comparación temperatura – refracción.....	147
Figura 37 Comparación pH – conductividad eléctrica.....	149
Figura 38 Comparación pH y Sólidos Disueltos Totales (SDT).....	151
Figura 39 Comparación pH y turbidez.....	153
Figura 40 Comparación pH y Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	155
Figura 41 Comparación pH y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).....	157
Figura 42 Comparación pH y Oxígeno Disuelto (OD).....	159
Figura 43 Comparación pH y Sólidos Suspendidos Totales (SST).....	161
Figura 44 Comparación pH y refracción.....	163

Figura 45 Comparación Oxígeno Disuelto (OD) y conductividad eléctrica.....	165
Figura 46 Comparación Oxígeno Disuelto (OD) y Sólidos Disueltos Totales (SDT).....	167
Figura 47 Comparación Oxígeno Disuelto (OD) y turbidez.....	169
Figura 48 Comparación Oxígeno Disuelto (OD) y Demanda Química de Oxígeno (DQO)	171
Figura 49 Comparación Oxígeno Disuelto (OD) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).....	173
Figura 50 Comparación Oxígeno Disuelto (OD) y Sólidos Suspendidos Totales (SST).....	175
Figura 51 Comparación Oxígeno Disuelto (OD) y refracción.....	177
Figura 52 Comparación conductividad eléctrica y Sólidos Disueltos Totales (SDT)	179
Figura 53 Comparación conductividad eléctrica y turbidez	181
Figura 54 Comparación conductividad eléctrica y Demanda Química de Oxígeno (DQO)	183
Figura 55 Comparación conductividad eléctrica y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).....	185
Figura 56 Comparación conductividad eléctrica y Sólidos Suspendidos Totales (SST).....	187
Figura 57 Comparación conductividad eléctrica y refracción	189
Figura 58 Comparación turbidez y Sólidos Disueltos Totales (SDT)	191
Figura 59 Comparación turbidez y Demanda Química de Oxígeno (DQO)	193
Figura 60 Comparación turbidez y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).....	195
Figura 61 Comparación turbidez y Sólidos Suspendidos Totales (SST).....	197
Figura 62 Comparación turbidez y refracción	199
Figura 63 Comparación Sólidos Disueltos Totales (SDT) y Demanda Química de Oxígeno (DQO)	201
Figura 64 Comparación Sólidos Disueltos Totales (SDT) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).....	203
Figura 65 Comparación Sólidos Disueltos Totales (SDT) y Sólidos Suspendidos Totales (SST)	205
Figura 66 Comparación Sólidos Disueltos Totales (SDT) y refracción	207
Figura 67 Comparación Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	209
Figura 68 Comparación Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST).....	211
Figura 69 Comparación Demanda Química de Oxígeno (DQO) y refracción	213

Figura 70 Comparación Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST).....	215
Figura 71 Comparación Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y refracción.....	217
Figura 72 Comparación Sólidos Suspendidos Totales (SST) y refracción.....	219

RESUMEN

Se efectuó la activación y arranque de la planta aeróbica de tratamiento de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias, y su respectivo Manual de Operación y Mantenimiento. Se definió el procedimiento de activación de lodos y los requerimientos para el arranque. El agua residual seleccionada para desarrollar este proyecto provenía del digester anaerobio del Laboratorio de Operaciones Unitarias. La cantidad de agua residual requerida para operar la planta de forma continua, la disponibilidad de la misma en el digester anaeróbico y los límites de medición de los sólidos presentes por análisis gravimétrico fueron los factores para establecer una solución de agua residual con una concentración al 10% v/v de material orgánico. La solución de agua residual se empleó tanto en la activación de lodos, el arranque de la planta de tratamiento y la evaluación del funcionamiento de la planta de tratamiento.

La activación de lodos requiere tres horas para iniciar los procesos biológicos (oxígeno disuelto a 20.0 ppm y agitador a 1,320 rpm) y nueve horas para la generación constante de lodos (oxígeno disuelto a 3.0 ppm y agitador a 330 rpm). El arranque de la planta de tratamiento requirió de dos semanas después de activar los lodos. La evaluación del funcionamiento se desarrolló con tres configuraciones definidas por las combinaciones de las variables controladas más representativas. Además, se determinó que la planta aeróbica de tratamiento de aguas residuales trabaja de forma continua con la relación de retorno de lodos de 1.0.

Las pruebas con el afluente de 1.5 m³/día y oxígeno disuelto de 3.0 ppm (tercer configuración) presentaron el mejor funcionamiento evaluado en la planta aeróbica de tratamiento de aguas residuales. En promedio, los parámetros fueron reducidos en un rango del 27.90% al 73.92%. Adicionalmente, la combinación de variables controladas antes mencionadas, cumplieron con límites máximos permisibles para la descarga de agua residuales no domésticas al alcantarillado público, establecidas en las normativas de Guatemala (acuerdo gubernativo No. 236-2006 “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y la disposición de lodos”), Costa Rica, México, Perú, Colombia, entre otros.

I. INTRODUCCIÓN

El agua es una necesidad básica de los seres vivos para su salud y vida, en el caso particular de los seres humanos están constituidos por un 70% de agua. A través de los siglos, las civilizaciones se han beneficiado del uso de los cuerpos de agua existentes en el planeta. En la antigua Roma, realizaron distintas construcciones arquitectónicas para la distribución de agua y sistemas de tratamiento por aireación para la purificación de la misma. La preocupación por enfermedades fatales debidas a la contaminación del agua, condujo a la construcción y uso de una planta de tratamiento de agua en París en 1806. (LENNTECH, 2017)

El tratamiento de aguas residuales persigue la eliminación de contaminantes presentes en las mismas por medios físicos, químicos, biológicos o combinación de los antes mencionados para mejorar las características de los efluentes. La finalidad de estos tratamientos radica en la protección del recurso hídrico de los impactos provenientes de la actividad humana, la recuperación de los cuerpos receptores de agua en proceso de eutrofización y la promoción del desarrollo de los ríos, lagos y manto freático con visión de gestión integrada. Por estos motivos en Guatemala se estableció el acuerdo gubernativo No. 236-2006 “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y la disposición de lodos”, emitido por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

Los efluentes descargados por la mayoría de industrias en Guatemala, contienen una alta concentración de materia orgánica, por lo que se recurren a tratamientos biológicos. Los procesos biológicos se subdividen en cultivo: suspensión (como lodos activados, lagunas aireadas y lagunaje) y soporte sólido (como filtros percoladores, biodiscos y lechos de turba), en los cuales es esencial conservar en el sistema la biomasa creada a fin que el procedimiento funcione (Ferrer, 2008). A inicios del siglo XX Fowler, Arden, Mumford y Locked desarrollaron el proceso de lodos activados en la planta de

tratamiento de Manchester. Los lodos activados cuentan con el principio de operación aeróbico para el tratamiento secundario de aguas residuales domésticas e industriales.

Por tanto este trabajo de graduación se centra en dos áreas principales: la activación de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto, del Laboratorio de Operaciones Unitarias del departamento de Ingeniería Química y la elaboración del manual de operación y mantenimiento de la misma. Su finalidad, es ser de utilidad para los estudiantes de Ingeniería Química, complementando su conocimiento teórico, con la aplicación práctica.

En el primer caso, la activación de lodos requiere de tres horas para iniciar los procesos biológicos, nueve horas para la generación constante de lodos y completar el arranque de la planta de tratamiento requiere de dos semanas después de activar los lodos. En el caso de la elaboración del manual de operación y mantenimiento, se realizaron pruebas para evaluar el funcionamiento y determinar rendimiento de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto, del Laboratorio de Operaciones Unitarias del departamento de Ingeniería Química con el rango de afluentes de 0.5, 1.0 y 1.5 m³/día por la capacidad del tanque de agua residual (1 m³ [1025 L]) así como la variación en la caracterización de la misma, y manteniendo respectivamente el tanque de lodos activados (T02) con oxígeno disuelto a 2.0, 2.5 y 3.0 ppm, para que los microorganismos usen el oxígeno tan rápido como es suministrado y que ocurra el proceso de nitrificación.

En promedio, los parámetros físicos y químicos con el afluente de 1.5 m³/día y oxígeno disuelto de 3.0 ppm fueron reducidos: turbidez 27.90%, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) 39.58%, Sólidos Disueltos Totales (SDT) 42.44%, conductividad eléctrica 43.27% y Sólidos Suspendidos Totales (SST) 73.92%; presentando el mejor funcionamiento evaluado y cumpliendo con límites

máximos permisibles para la descarga de agua residuales no domésticas al alcantarillado público, establecidas en las normativas de Guatemala (acuerdo gubernativo No. 236-2006 “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y la disposición de lodos”), Costa Rica (decreto N° 33601-MINAE-S de 2007 “Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales”), México (norma ambiental para el Distrito Federal NADIF-015-AGUA-2009 “Límites máximos permisibles de contaminantes en la descarga de aguas residuales de procesos y servicios al sistema de drenaje y alcantarillado del Distrito Federal, provenientes de las fuentes fijas”), Perú (decreto supremo N° 003-2010-MINAM “Límites máximos permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas y municipales”), Colombia (resolución 0631 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de 2015 “Los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos superficiales y a los sistemas de alcantarillado público”), entre otros.

En este documento la información se ordena en diferentes secciones. Inicia con un resumen con los principales resultados de la investigación. En la sección de marco teórico se identifican las definiciones con mayor relevancia respecto al tema de investigación. De igual forma, en la sección de antecedentes se muestra información destacada en estudios realizados con anterioridad. Seguidamente, se presentan los objetivos y justificación del trabajo de graduación, con la finalidad explicar y dar importancia al mismo. A continuación, se exponen los resultados así como su respectiva discusión y análisis. Posteriormente, establecen las conclusiones y recomendaciones prácticas del estudio. Finalmente, en la sección de apéndice se incluye el Manual de Operación y Mantenimiento la Planta de Tratamiento Aeróbico de Aguas Residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias; calibración de la planta de tratamiento, datos originales, cálculo de muestra, datos calculados, análisis de error, análisis estadístico de datos, comparación de parámetros físicos y químicos utilizados para efectuar la caracterización del agua residual y el agua tratada y hojas técnicas de equipos de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales

II. MARCO TEÓRICO

A. Aguas residuales

De acuerdo a la Ley de Aguas Nacionales de México, se define agua residual como “aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos público urbano, doméstico, industrial, comercial, de servicios, agrícola, pecuario, de las plantas de tratamiento y en general, de cualquier uso, así como la mezcla de ellas”. Usualmente, las aguas residuales se mezclan con aguas subterráneas infiltradas en la red, aguas superficiales o de lluvia (Noyola, Morgan & Güereca, 2013).

En la planeación, la selección y diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales se debe considerar los costos, las características del agua residual, el caudal, tipos y concentraciones de los contaminantes, tomar en cuenta los criterios para la descarga en el efluente seleccionado o su reuso. Todas estas medidas se toman para proteger la salud pública y el medio ambiente, de modo que evitan las enfermedades de origen patógeno así como la conservación de la fauna y flora que se encuentran en el cuerpo de agua (Méndez, L. *et al.* 2012).

Existen varias actividades donde se puede emplear el agua tratada, sin correr con ningún riesgo de salud, tales como: el riego de áreas verdes, irrigación de cultivos, llenado de lagunas, estanques, arroyos artificiales en parques o jardines, el control de polvo en vías de comunicación rurales, carga de cisternas para el control de incendios, lavado de carros y pisos, descarga de sanitarios, inyección en mantos freáticos, recarga de cuerpos de agua superficial, industria de la construcción, en sistemas de enfriamiento, intercambiadores de calor, calderas, etc. (Tello, Mijailova & Chamy, 2016). Se debe resaltar que la OMS, proporciona guías para el uso seguro de aguas residuales tratadas en la agricultura y la acuicultura, así como un manual de laboratorio de parasitología y técnicas bacteriológicas para determinar si el agua puede reusarse.

Se pueden identificar tres tipos de aguas residuales que se clasifican de acuerdo a su origen, las cuales son: aguas residuales domésticas, municipales o industriales. De estos tipos de aguas residuales, el más complejo es el industrial, puesto que las características del agua dependerán del tipo de industria, época del año, régimen de operación e inclusive de la lluvia que puede diluir la concentración de las cargas, pero aumentarán el costo de operación. El modo de tratar el agua residual, se determinará con base en la recopilación de muestras y análisis de laboratorio (D'Alessandri, 2012).

B. Tratamiento de aguas residuales

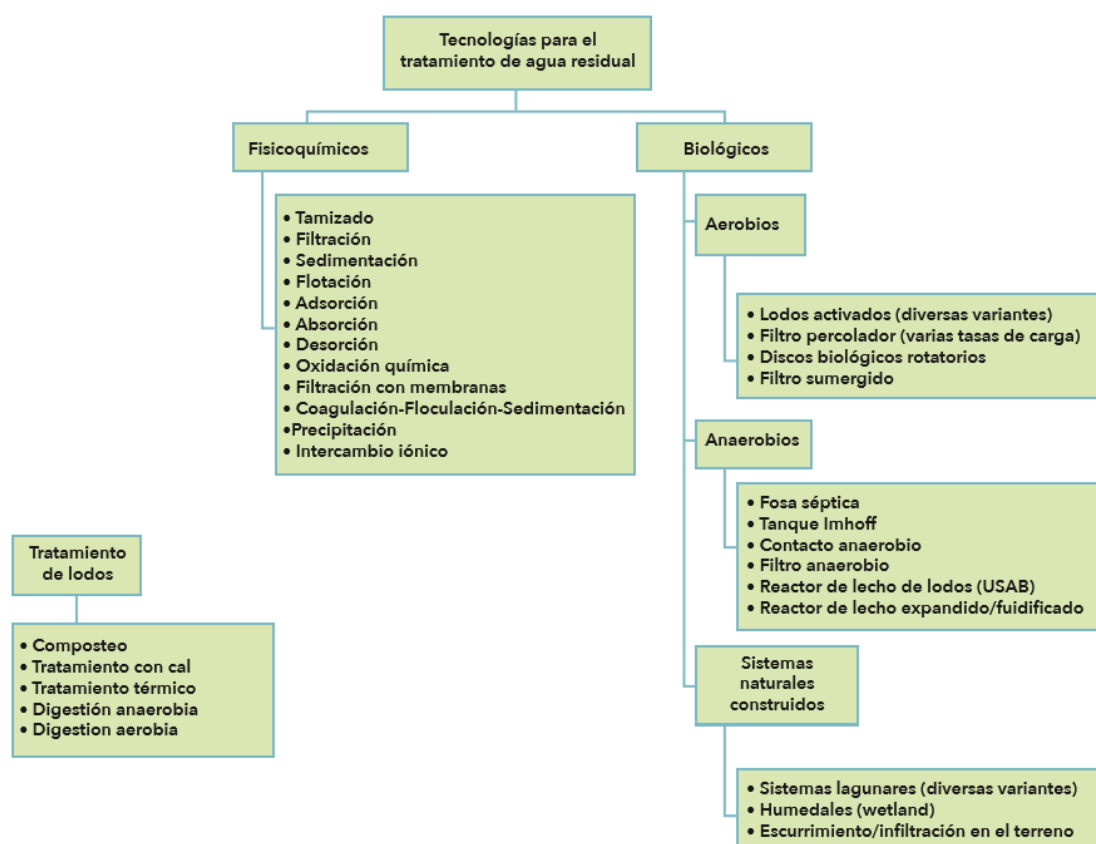
La finalidad del tratamiento de aguas residuales, es la prevención de la contaminación en los cuerpos de agua y suelos, de modo que se garantice la salud pública y el equilibrio ambiental. Cumplir con la calidad requerida de acuerdo a la normativa o para el tipo de reutilización a la que se destinará (Méndez, L. *et al.* 2012).

Para determinar el tipo de tratamiento utilizar, se debe realizar una caracterización de los efluentes; el parámetro más relevante para tomar en consideración es el de la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Si en la entrada de la planta de tratamiento hay una concentración menor a 150 ppm de DQO, se utilizará un tratamiento primario, para DQO mayores será necesario la instalación de plantas de tratamiento complejas que incluyen tratamiento primario, secundario y se puede dar un terciario. En el tratamiento primario, se elimina un porcentaje alto de sólidos en suspensión y materia orgánica. En la secundaria, se reduce el contenido de materia orgánica acelerando los procesos biológicos naturales. La terciaria se utiliza si se reutiliza el agua, se elimina el 99% de sólidos y se hacen procesos químicos para garantizar que el agua esté libre de impurezas (D'Alessandri, 2012).

Así mismo, la caracterización del agua y la calidad del agua tratada que se desee, servirán de guía para integrar operaciones físicas y procesos unitarios (químicos y biológicos). Sin embargo, se debe considerar los costos de la implementación de la planta de tratamiento, de los procesos unitarios, de la energía eléctrica y reactivos químicos a usar, para seleccionar el proceso más viable que cumpla con el tratamiento, pero también con los recursos económicos disponibles (AWWA, 2002).

A continuación, se presenta un esquema de los procesos que pueden implementarse para el tratamiento de agua residual.

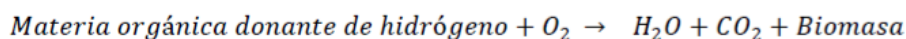
Figura 1 Tipos de tratamiento de agua residual



(Noyola, Morgan & Güereca, 2013).

1. Tratamientos biológicos de aguas residuales. Los procesos biológicos pueden eliminar de las aguas residuales las sustancias biodegradables disueltas, conocido como sustrato. El sustrato es el que alimenta a los microorganismos y en condiciones aerobias se transforma en biomasa, dióxido de carbono y agua. Los microorganismos aerobios necesitan oxígeno para respirar. También, se debe remover del agua residual, los compuestos de nitrógeno como el amonio y los nitratos. Primero un grupo de microorganismos convierten el amonio en nitrato; proceso conocido como nitrificación. Luego, otro grupo reduce el nitrato a nitrógeno elemental, mediante la desnitrificación. Finalmente, el nitrógeno producido escapa como gas a la atmósfera (Méndez, L. *et al.* 2012).

Aunque las reacciones involucradas en el metabolismo microbiológico son complejas, se puede representar el proceso de oxidación aeróbica por:



(D'Alessandri, 2012).

Los procesos biológicos se subdividen respecto al tipo de cultivo en: suspensión (como lodos activados, lagunas aireadas y lagunaje) y soporte sólido (como filtros percoladores, biodiscos y lechos de turba), en los cuales es esencial conservar en el sistema la biomasa creada a fin que el procedimiento funcione. (Ferrer, 2008)

a. Lodos activados. En los procesos de lodos activados, los microorganismos se encuentran mezclados con la materia orgánica que digerirán para reproducirse y sobrevivir. Cuando la masa de microorganismo crece y es mezclada con la

agitación introducida al tanque por medios mecánicos e inyección de aire, ésta tiende a agruparse (floculación) para formar una masa activa de microorganismos denominada lodo activado (Méndez, L. *et al.* 2012). La mezcla de lodo activado con el agua residual fluye del tanque de aireación a un clarificador secundario donde el lodo activado sedimenta. Una porción del lodo sedimentado debe ser retornado al tanque de aireación para mantener una apropiada relación sustrato-microorganismo y permitir así una adecuada degradación de la materia orgánica (Noyola, Morgan & Güereca, 2013).

En una planta de lodos activados la depuración del agua residual se realiza mediante un reactor biológico, mediante un proceso de cultivo continuo de fangos activados, realizado a través de un cultivo bacteriano aerobio mixto de microorganismos en suspensión, que son las bacterias filamentosas y formadoras de flóculos, que al momento de accionar causa la oxidación de la materia orgánica en suspensión. Debe pasar un periodo de tiempo determinado, denominado tiempo de retención para que la mezcla de células nuevas con las viejas, conduzca a la oxidación completa de la materia orgánica (D'Alessandri, 2012).

Se debe resaltar que el suministro del aire en el tanque debe ser uniforme para lograr una mezcla completa, ya que durante el periodo de aireación se produce la absorción, floculación y oxidación de la materia orgánica en suspensión. El proceso de lodos activados requiere de aireación prolongada con soplante por aire comprimido y distribución por difusores. El modelo de flujo del proceso es flujo pistón con recirculación y purga. Todas las partículas que entran al biorreactor deben permanecer en el interior del mismo durante idéntico periodo de tiempo. La eficacia de eliminación de DBO₅ debe ser del 75 al 95% (Acuña, 2011).

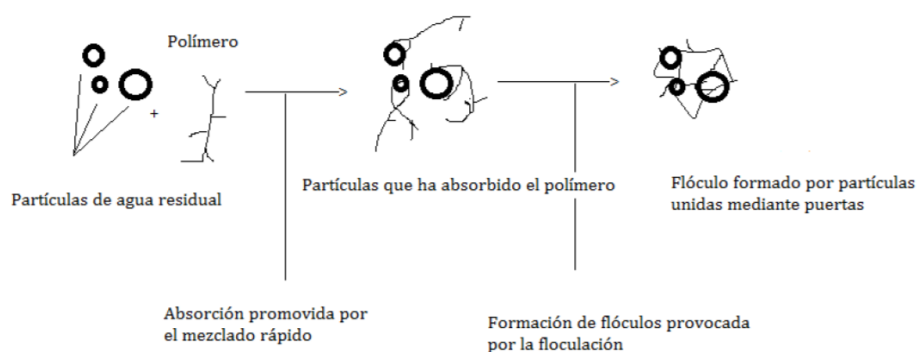
Según Acuña (2011), algunos parámetros de diseño a tomar en cuenta en una planta de lodos activos son:

- a) Carga Diaria de materia orgánica.
- b) Carga Diaria SST.
- c) Tiempo de retención celular $q_c, d = 20 - 30$.
- d) Carga másica aplicada relación $\text{Kg DBO}_5/\text{Kg SSVLM}$. $D = 0.05 - 1.50$
- e) Carga volumétrica $\text{Kg DBO}_5/\text{m}^3 \text{ d} = 0.16 - 0.40$
- f) $\text{SSLM mg/L} = 3000 - 6000$
- g) Tiempo de retención hidráulica = $18 - 36$ hrs.
- h) Coeficiente de recirculación del decantador al tanque biológico = $1 - 1.5$.
- i) Carga de superficie = $1.0 - 1.33 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$.
- j) Oxígeno necesario $\text{KgO}_2/\text{KgDBO}_5 = 2$ a 2.5 kg
- k) Transferencia de oxígeno de los difusores de acuerdo el modelo y fabricante.

1) Floculación. La floculación es el fenómeno en el cual los polímeros forman puentes entre los coágulos formando flóculos o grandes aglomerados de partículas. La forma de acción de los polielectrolitos aniónicos o neutros, es la adhesión a la superficie de las partículas del efluente, no depende de las cargas superficiales de las partículas y hace más estable el proceso debido a que no depende de las variaciones de pH (Metcalf & Eddy, 2003).

Para agregar partículas se necesita disminuir las cargas o superar el efecto de estas. Esto se puede lograr adicionando iones que determine el potencial, la adición de productos químicos que formen iones metálicos hidrolizados o la adición de polielectrolitos que producen la eliminación de partículas por medio de absorción y formación de puentes entre ellos (D'Alessandri, 2012).

Figura 2 Esquema de formación de puentes entre partículas en presencia de polímeros orgánicos



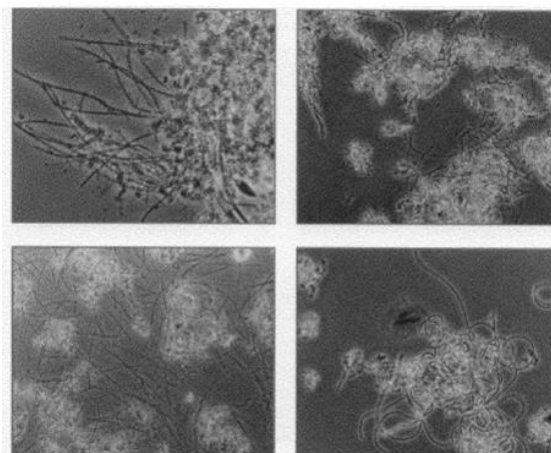
(Metcalf & Eddy, 2003).

2) Microorganismos más importantes

a) **Bacterias.** Las bacterias en los sistemas biológicos de depuración, ayudan a eliminar la materia orgánica por la vía aerobia, que es la oxidación y síntesis de nuevos materiales orgánicos en forma de material celular. Igualmente, intervienen en los procesos de descomposición anaerobia, nitrificación, desnitrificación y acumulación de fósforo en sistemas de eliminación de nutrientes en las plantas de fangos activados (Ferrer & Seco, 2008).

Las bacterias constituyen un 95% de la biomasa en el proceso de fangos activados. Las bacterias aisladas miden 0.5 – 1 μm , por lo que es imposible separarlas del agua tratada, pero en condiciones adecuadas crecen formando agregados que alcanzan tamaños entre 0.05 y 1.0 mm. Las bacterias responsables de la formación de los bio-flóculos son las formadoras de flóculos. De esta forma las bacterias sedimentan en el clarificador secundario, produciendo un efluente final clarificado y un fango espesado (Ferrer & Seco, 2008).

Figura 3 Organismos filamentosos observados en plantas de tratamiento de aguas residuales

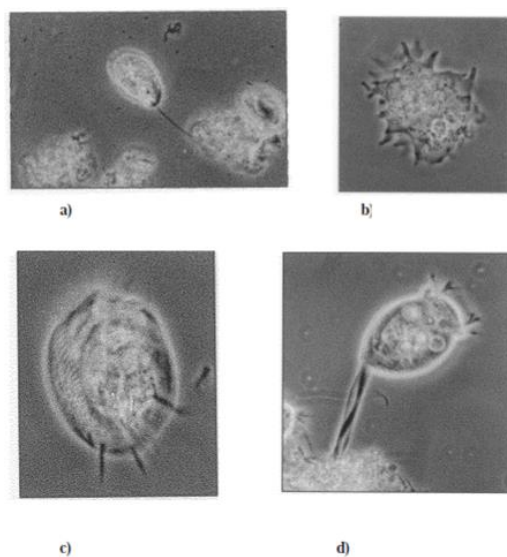


(Ferrer & Seco, 2008).

b) Protozoos. Son microorganismos heterótrofos, su mayoría viven libremente en la naturaleza, algunas especies son parásitas, viviendo en un organismo huésped, desde algas hasta seres humanos. En su mayoría son aerobios o anaerobios facultativos, también hay algunos tipos que son anaerobios. Se alimentan de bacterias, microorganismos o de materia orgánica disuelta, estos no compiten eficazmente con las bacterias por el sustrato soluble. Los protozoos se presentan en mayor proporción en los sistemas de cultivo fijo (Ferrer & Seco, 2008).

Los protozoos constituyen aproximadamente el 5% de la biomasa de los fangos activados, donde eliminan los coliformes y patógenos, clarificando el afluente y contribuye a la floculación de la biomasa. Los cuatro grupos de protozoos en los fangos activados son flagelados, amebas y formas nadadoras libres y fijas de ciliados (Ferrer & Seco, 2008).

Figura 4 Protozoos observados en fangos activados: a) Flagelados; b) amebas; c) ciliados nadadores libres y d) ciliados fijos



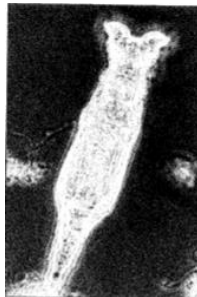
(Ferrer & Seco, 2008).

c) Hongos. En su mayoría los hongos son aerobios estrictos, pueden tolerar valores de pH relativamente bajos y poseen requisitos de nitrógeno mucho más bajos que las bacterias. Pueden usar la materia orgánica disuelta pero rara vez compiten con las bacterias en los sistemas de cultivo de suspensión. Los hongos pueden proliferar cuando se presenta pH bajos y déficit de nitrógeno, llegando a producir fangos con pobres cualidades de sedimentación. Los hongos constituyen una parte importante de la biomasa en los sistemas de cultivo fijo (Ferrer & Seco, 2008).

d) Algas. Son organismos fotosintéticos, en su mayoría son unicelulares, pero cuando son pluricelulares no forman verdaderos tejidos. Las algas se utilizan en los sistemas de depuración, ya que son una fuente de oxígeno en los sistemas extensivos. Al ser autótrofas su presencia en un sistema de depuración no disminuye el contenido en materia orgánica, sino que lo aumenta pues la sintetizan a partir de las fuentes minerales de carbono existentes. Mientras que, las cianobacterias son capaces de generar cantidades de materia orgánica superiores a las presentes en las aguas de vertido, al suplir los déficits de nitrógeno existentes en las aguas residuales urbanas con nitrógeno atmosférico (Ferrer & Seco, 2008).

e) Rotíferos. Los rotíferos son organismos aerobios y multicelulares cuya extremidad anterior está modificada en un órgano ciliado, el aparato rotador, que usan para la captura de alimentos y el movimiento. Los rotíferos junto a los nemátodos, constituyen en los sistemas de fangos activados, la cima de la pirámide trófica (Ferrer & Seco, 2008).

Figura 5 Rotífero observado en fangos activados



(Ferrer & Seco, 2008).

f) Nemátodos. Los nemátodos actúan como predadores de los organismos inferiores en los sistemas de depuración. Igualmente, conforma la cima de la pirámide trófica en los fangos activados (Ferrer & Seco, 2008).

2. Caracterización del agua residual y el agua tratada. Algunos de los parámetros que se utilizan para realizar la caracterización del agua residual y el agua tratada son:

a. Sólidos disueltos totales (SDT). Los sólidos disueltos totales son la suma de todos los minerales, metales, y sales disueltos en el agua, es un buen indicador de la calidad del agua. Es una medida de la materia en una muestra de agua, más pequeñas de dos micrones y no pueden ser removidos por un filtro tradicional. Se clasifica como un contaminante secundario por la Agencia de Protección Ambiental de los EU (USEPA) y se sugiere un máximo de 500 mg/L en agua potable (Sigler & Bauder 2012).

De igual forma, Metcalf & Eddy, Inc. (2003), definen los sólidos totales como la materia obtenida como residuo después de someter el agua a un proceso de evaporación de 103 a 105 °C. De modo que, los sólidos totales comprenden de todo material orgánico e inorgánico, que no se llegan a evaporar en ese rango de temperatura. Los sólidos totales se clasifican en filtrables (disueltos) y no filtrables (sólidos en suspensión).

Si hay un índice elevado de sólidos disueltos totales, se proporciona al agua una apariencia turbia y disminuye el sabor en esta. Personas no acostumbradas al agua con alto contenido de SDT pueden experimentar irritación gastrointestinal al beber esta. Así mismo, el tratamiento de agua por SDT puede lograrse por ósmosis reversa o destilación (Sigler & Bauder, 2012).

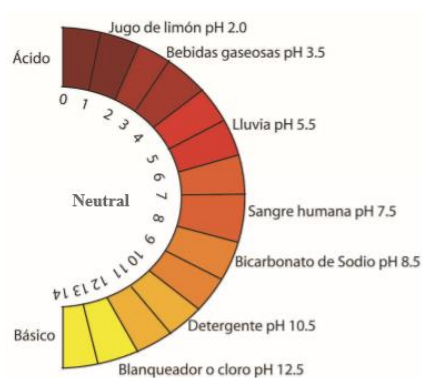
b. Sólidos Suspendidos Totales (SST). Los sólidos suspendidos totales es el parámetro utilizado en la calificación de la calidad del agua y en el tratamiento de aguas residuales. Indica la cantidad de sólidos (en miligramos por litro - mg/l), presentes, en suspensión y que pueden ser separados por medios mecánicos, como por ejemplo la filtración en vacío, o la centrifugación del líquido. Se asocia a la turbidez del agua (Quiñonez, 2009).

c. Oxígeno disuelto. Es un requisito nutricional esencial para la mayoría de los organismos vivos debido al procedimiento de respiración aeróbica para la generación de energía y para la movilización del carbono en la célula. Igualmente, el oxígeno disuelto es esencial en la fotosíntesis, oxidación-reducción, solubilidad de minerales y la descomposición de materia orgánica (Metcalf & Eddy, 2003).

La distribución del oxígeno en cuerpos de agua naturales está determinada por el intercambio gaseoso a través de la superficie del agua, la producción fotosintética, el consumo respiratorio y por procesos físicos de difusión y advección, este último es el movimiento horizontal del aire causado principalmente por variaciones de la presión atmosférica cerca de la superficie (Metcalf & Eddy, 2003).

d. pH. El pH es la medida de la concentración de iones de hidrógeno o la acidez del agua. El pH es clasificado como un contaminante secundario por la USEPA con un rango sugerido de 6.5 a 8.5. Los valores de pH por debajo de 6.5 podría indicar agua corrosiva la cual puede movilizar metales en tuberías. Para valores de pH por debajo de 6.5, se debe realizar un análisis de corrosión y/o uno por metales pesados, especialmente plomo y cobre (Sigler & Bauder 2012).

Figura 6 Escala de pH



(Sigler & Bauder 2012).

e. Demanda Química de Oxígeno (DQO). La demanda química de oxígeno brinda una medida más real de la cantidad de oxígeno requerida para la oxidación de los compuestos orgánicos a CO_2 y H_2O , cuando se utiliza un oxidante fuerte. El mejor método para determinar la DQO es aquel que arroja valores iguales o cercanos a la Demanda Teórica de Oxígeno (DTO) (Menéndez & Pérez, 2007).

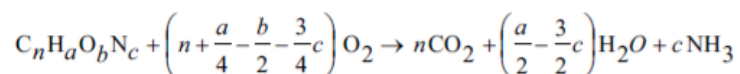
Este método es el estándar del dicromato, el cual utiliza una solución de dicromato de potasio cuya concentración molar equivalente es 0.25, en 50 % de ácido sulfúrico. Bajo estas condiciones, con sulfato de plata como catalizador, la mayoría de los compuestos son oxidados entre 90 y 100 % (Menéndez & Pérez, 2007).

f. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). La DBO brinda un estimado del oxígeno disuelto requerido por los microorganismos en la degradación de los compuestos biodegradables. Durante la prueba de laboratorio de DBO, el mecanismo presente es biológico y depende del oxígeno presente, la velocidad a la que este se consume y del tiempo. Por lo que se requiere de establecer un tiempo y temperatura de incubación estándar, usualmente es de cinco días y 20 °C, respectivamente (Menéndez & Pérez, 2007).

Cuando se quiere conocer la demanda bioquímica de oxígeno total del agua residual, se debe determinar la velocidad a la cual se genera la reacción en toda su extensión. La variación de tiempo de la DBO sigue una cinética de primer orden. La diferencia en el contenido de oxígeno al inicio y al final del análisis, por litro de muestra utilizada constituye la DBO de la muestra expresada en mg de O₂ L⁻¹ (Menéndez & Pérez, 2007).

Así mismo, para determinar la DBO se necesita conocer el oxígeno consumido por las bacterias en un intervalo del tiempo, puesto que se da una relación entre el oxígeno consumido y la concentración del material orgánico que se transforma en dióxido de carbono y amoníaco (Menéndez & Pérez, 2007). Dicha relación se representa con la siguiente ecuación general:

Figura 7 Ecuación general de oxígeno consumido por las bacterias



(Menéndez & Pérez, 2007).

g. Conductividad eléctrica. La conductividad eléctrica es la capacidad de que una sustancia pueda conducir la corriente eléctrica. La unidad de medición utilizada comúnmente es el Siemens/cm (S/cm), en millonésimas (10^{-6}) de unidades, es decir microSiemens/cm ($\mu\text{S/cm}$), o en milésimas (10^{-3}) es decir miliSiemens/cm (mS/cm) (Lin, 2007).

La conductividad en medios líquidos está relacionada con la presencia de sales en solución, cuya disociación genera iones positivos y negativos capaces de transportar la energía eléctrica si se somete el líquido a un campo eléctrico. Estos conductores iónicos se denominan electrolitos o conductores electrolíticos (Lin, 2007).

La conductividad de una solución se determina por un movimiento iónico. La temperatura afecta al movimiento iónico, por ello es necesario compensar la temperatura cuando se realizan mediciones de precisión. Generalmente, para realizar mediciones comparativas, la temperatura estándar es de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ó $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para corregir los efectos de la temperatura, se utiliza un coeficiente de compensación β . Se expresa β en $\%/^{\circ}\text{C}$ y varía de acuerdo con la solución que se está midiendo (Lin, S. 2007).

Figura 8 Conductividad eléctrica de distintos tipos de agua

Tabla de conductividad del Agua	
Agua ultra pura	0,055 $\mu\text{S/cm}$
Agua destilada	0,5 $\mu\text{S/cm}$
Agua de montaña	1,0 $\mu\text{S/cm}$
Agua doméstica	500 a 800 $\mu\text{S/cm}$
Max. Para agua potable	1055 mS/cm
Agua de mar	56 mS/cm
Agua salobre	100 mS/cm

(Lin, S. 2007).

h. Turbiedad. La turbiedad es una expresión de la propiedad óptica que causa la luz al ser dispersada y absorbida en vez de transmitida sin cambios en la dirección del nivel de flujo a través de la muestra. El efecto óptico que se origina al dispersarse o interferirse el paso de los rayos de luz que atraviesan una muestra de agua, a causa de las partículas minerales u orgánicas que el líquido puede contener en forma de suspensión; tales como micro organismos, arcilla, precipitaciones de óxidos diversos, carbonato de calcio precipitado, compuestos de aluminio, etc (AWWA, 2002).

La determinación de turbiedad es de gran importancia en aguas para consumo humano y en un gran número de industrias procesadoras de alimentos y bebidas (AWWA, 2002).

La eliminación de la turbiedad, se lleva a cabo mediante procesos de coagulación, asentamiento y filtración. Los valores de turbiedad sirven para establecer el grado de tratamiento requerido por una fuente de agua cruda, su filtrabilidad y consecuentemente, la tasa de filtración más adecuada, la efectividad de procesos de coagulación, sedimentación y filtración, así como para determinar la potabilidad del agua. La unidad utilizada normalmente es la NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez). El método nefelométrico se basa en la comparación de la intensidad de la luz pasada por una solución patrón bajo las mismas condiciones. A mayor intensidad de luz dispersada mayor turbiedad se encontrará en la muestra (AWWA, 2002).

C. Descripción de la planta aeróbica de tratamiento de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias

La planta aeróbica de tratamiento de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias emplea distintas operaciones unitarias en etapas específicas para modificar la calidad y características del agua que ingresa a la misma. La planta aeróbica de tratamiento cuenta con tres etapas: pre-tratamiento, tratamiento secundario y desinfección.

1. Etapa de pre-tratamiento. Se remueven los constituyentes que causan dificultad en la operación en los procesos posteriores. La primera operación unitaria aplicada es el tamizado para cumplir con el tamaño partícula menor a 283 μm , utilizando el tamiz de metálico Mesh No. 4 y el tamiz con cedazo de acero inoxidable Mesh No. 60. Seguidamente prepara una solución con el agua residual filtrada al 10% respecto a la capacidad del tanque de agua residual (T01).

2. Etapa de tratamiento secundario. Es la etapa de tratamiento biológico, la solución de agua residual ingresa al digestor aeróbico, se insufla aire con el difusor de burbuja fina y se mezcla con un agitador mecánico para disolver oxígeno. Los microorganismos y nitrificación consumen directamente el oxígeno en un rango de 2.0 – 3.0 ppm. Por medio de los procesos biológicos se transforma al contaminante orgánico en dióxido de carbono (CO_2) y producen una masa activa. El licor mixto producido ingresa al tanque de sedimentación (T03) en donde se recupera en el fondo el lodo activado para retornarlo. El lodo activado retorna en la primer parte del tanque de lodos activados (T02) y se mezcla con el afluente.

3. Etapa de desinfección. El líquido en la parte superior del tanque de sedimentación (T03) ingresa por gravedad al tanque de cloración (T04), es un tanque de contacto para contar con el tiempo suficiente para la desinfección, reduciendo el contenido de bacterias del efluente de la planta de tratamiento.

D. Normas nacionales e internacionales para la descarga de agua residual en el alcantarillado público

Se evalúa el funcionamiento de la planta aeróbica de tratamiento de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias comparando los parámetros físicos y químicos del agua tratada en la misma con los límites máximos permisibles para la descarga de agua residual en el alcantarillado público, establecidos en las normativas de Guatemala, Costa Rica, México, Perú Colombia y el Comité de aguas residuales de Great Lakes – Mississippi River.

1. Norma de Guatemala. La normativa de Guatemala se encuentra documentada en el acuerdo gubernativo No. 236-2006 “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y la disposición de lodos” capítulo 6 “Parámetros para aguas residuales y valores de descarga al alcantarillado público”, específicamente los artículos 27 – 28 en las etapas 3 y 4, así como el artículo 30.

2. Norma de Costa Rica. La norma para la descarga de aguas residuales de Costa Rica se especifica en el decreto N° 33601-MINAE-S de 2007 “Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales” capítulo 3 “Límites para vertido de aguas residuales”, especialmente la Tabla 2 “Límites máximos permisibles para los parámetros universales de análisis obligatorio de aguas residuales vertidas en alcantarillados sanitarios”.

3. Norma de México. En el caso de México se toma como referencia norma ambiental para el Distrito Federal NADIF-015-AGUA-2009 “Límites máximos permisibles de contaminantes en la descarga de aguas residuales de procesos y servicios al sistema de drenaje y alcantarillado del Distrito Federal, provenientes de las fuentes fijas” Tabla 2 “Límites Máximos Permisibles de calidad de agua residual”.

4. Norma de Perú. La norma para la descarga de aguas residuales de Perú se especifica en el decreto supremo N° 003-2010-MINAM “Límites máximos permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas y municipales”.

5. Norma de Colombia. La normativa de Colombia se encuentra documentada en la resolución 0631 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia en 2015 estableció “Los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos superficiales y a los sistemas de alcantarillado público” capítulo 8 “Parámetros físicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de agua residuales no domésticas – ArnD al alcantarillado público”.

6. Norma del Comité de aguas residuales de Great Lakes – Mississippi River. En el caso de la ubicación geográfica de Grandes Lagos y el río Mississippi, el Comité de aguas residuales de Great Lakes – Mississippi River, Junta de salud pública del Estado y Provincia, y Gerentes Ambientales publicaron “Los estándares recomendados para la recolección y plantas de tratamiento de aguas residuales”, especificando en la Tabla 2 “Comparación de aguas sépticas y aguas residuales municipales”.

III. ANTECEDENTES

A. Manual de operación para una planta de tratamiento de aguas residuales en una fábrica de productos químicos auxiliares para la industria textil

En este trabajo se elaboró un manual de operación de los equipos que componen el proceso de tratamiento de aguas residuales de una fábrica de productos químicos auxiliares para la industria textil, con el fin de corregir su forma de operar y crear nuevos procedimientos de modo que su operación y mantenimiento sean sencillos y de beneficio para la empresa. La planta no cumplía con los parámetros de descarga de aguas residuales según la propuesta de CONAMA de 1999, siendo estos sólidos sedimentables (SS), sólidos suspendidos totales (SST), y demanda química de oxígeno (DQO) (Luarca, 2004).

Se determinó con la evaluación de desempeño del equipo que el tratamiento primario inicial de la planta con sulfato de aluminio no era el adecuado, incidiendo directamente en un pobre desempeño del filtro prensa y en los parámetros de descarga de la planta. Al emplear un coagulante polimérico a partir de poliDADMAC (dialil-dimetil cloruro de amonio) a una dosis de 100 ppm, y de un floculante aniónico basado en poliamina, con una dosificación de 10 ppm se incrementó el desempeño del filtro prensa en un 2905%. El cambio de químicos en el tratamiento primario significó un ahorro de Q449.78 mensuales con respecto al tratamiento anterior con sulfato de aluminio (Luarca, 2004).

Con la aplicación de correcciones y el manual de operación la planta de tratamiento de aguas residuales remueve el 96.8% de los sólidos totales (ST), 97.5% de los sólidos sedimentables (SS), 98.9% de los sólidos suspendidos totales (SST), 96.5% de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), 98.4% de la demanda química de oxígeno (DQO), 100% del cloro residual, 92.7% de las grasas y aceites totales, y 72.2% del color químico (Luarca, 2004).

B. Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales para una industria alimenticia de Guatemala

En este trabajo se diseñó una planta de tratamiento de aguas residuales de una industria alimenticia, básicamente constituida de agua de cocimiento de maíz y limpieza de freidoras, para obtener un efluente que cumpla con el acuerdo gubernativo 236 – 2006, hasta el último periodo definido para 2024. El diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales se realizó para un caudal de $3.04 \text{ m}^3/\text{h}$, con un contenido de grasas y aceites de 3380.85 mg/L , Demanda Bioquímica de Oxígeno de 20337 mg/L , y sólidos suspendidos de 11450 mg/L (Estrada, 2012).

Se determinó las etapas necesarias para tratamiento de agua residual, siendo estas: equalización del flujo, dos trampas de grasa, tratamiento químico de coagulación y floculación, sedimentación primaria y tratamiento biológico de lodos activados. Así mismo, se definieron los equipos a implementar en la planta de tratamiento de aguas residuales: bombas sumergibles, válvulas reguladoras de flujo de agua residual y de dosificación de químicos, medidores de flujo, impulsores con sus respectivos motores, tanques, un electrodo y controlador de pH, y un soplador. Empleando estos procesos y equipos se obtiene un efluente con Demanda Bioquímica de Oxígeno de 100 mg/L , sólidos suspendidos de 100 mg/L , y con grasas y aceites de 5.66 mg/L . La implementación de la planta diseñada requiere de una inversión total de Q1,682,272.83 y recuperación de la inversión. La cantidad monetaria que la empresa debe incrementar los ingresos anualmente durante 10 años para que se recupere esta inversión es de Q840,759.56 (Estrada, 2012).

C. Remoción de contaminantes orgánicos presentes en agua residual doméstica mediante prototipo a escala laboratorio

En este trabajo se analizó la eficiencia de remoción de contaminantes orgánicos presentes en el agua residual doméstica de la comunidad de Púlinguí, perteneciente a la parroquia de San Andrés del cantón Guano provincia de Chimborazo, Ecuador al combinar el tratamiento anaerobio actual (sistema de tanques sépticos y filtro ascendente) con un tratamiento aerobio por lodos activados en un prototipo a escala de laboratorio; a causa de la baja reducción de la materia orgánica y problemas de mal olor por parte del sistema de tratamiento anaerobio existente (Mejía-López A; M. Cabrera y Y. Carrillo, 2017).

El prototipo a escala laboratorio se construyó con 27.9 L de capacidad, de los cuales 15.8 L corresponden a la zona anaeróbica, 7.7 L a la zona de aireación y 4.4 L a la zona de sedimentación. El sistema fue analizado durante 60 días en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Chimborazo, se determinó diariamente pH, Sólidos Suspendidos y oxígeno disuelto, así mismo se evaluó dos veces por semana la Demanda Química de Oxígeno (DQO). El sistema tendió a estabilizarse durante la semana tres de operación, alcanzando eficiencias de remoción de materia orgánica en términos de DQO en el tratamiento anaeróbico de 53%, en el tratamiento aeróbico de 75%, logrando una reducción total en todo el sistema del 88% y eliminando el olor (Mejía-López A; M. Cabrera y Y. Carrillo, 2017).

D. Descripción de la planta piloto de tratamiento aeróbica de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias

La planta de tratamiento aeróbica de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias cuenta con un marco móvil de acero inoxidable que sostiene la mayoría de equipos utilizado en la experimentación, excepto por el tanque de aguas residuales (T01), se encuentra a la izquierda del marco. El panel de control se ubica en la esquina superior izquierda del marco, contiene los circuitos de control eléctrico, tres controladores y pantallas PID. Un conector USB en la parte inferior del panel de control, permite al usuario conectar una computadora adecuada para el control remoto y el registro de datos.

El tanque central (T02) contiene el lodo activado. En este tanque se incluye la sonda óptica para oxígeno disuelto (OC01), la sonda de medición de pH del lodo activado, un agitador mecánico de palas inclinadas (SO2) y un difusor de burbuja fina con membrana de micro-filtro para agregar oxígeno. Además, incluye un punto de desbordamiento en caso de una operación incorrecta proporciona una salida segura hacia el alcantarillado del laboratorio. El tanque del lado derecho (T03) es el tanque de sedimentación, con un fondo cónico para ayudar a recolectar las partículas más densas (lodo activado) y retornarlo al tanque de lodos activados (T02). Las pantallas muestran el valor de pH en el tanque T02 y la temperatura en el tanque T03.

Una bomba de velocidad variable (P01) mueve las aguas residuales del tanque T01 al tanque de lodos activados (T02). El desbordamiento del tanque T02 fluye al tanque de sedimentación (T03). Otra bomba de velocidad variable (P03) recircula el lodo más denso desde el tanque de sedimentación hasta el tanque de lodos activados. Los sensores de flujo (FI01 y FI02) en las líneas de alimentación y retorno proporcionan la referencia de control para dos controladores PID para regular el flujo.

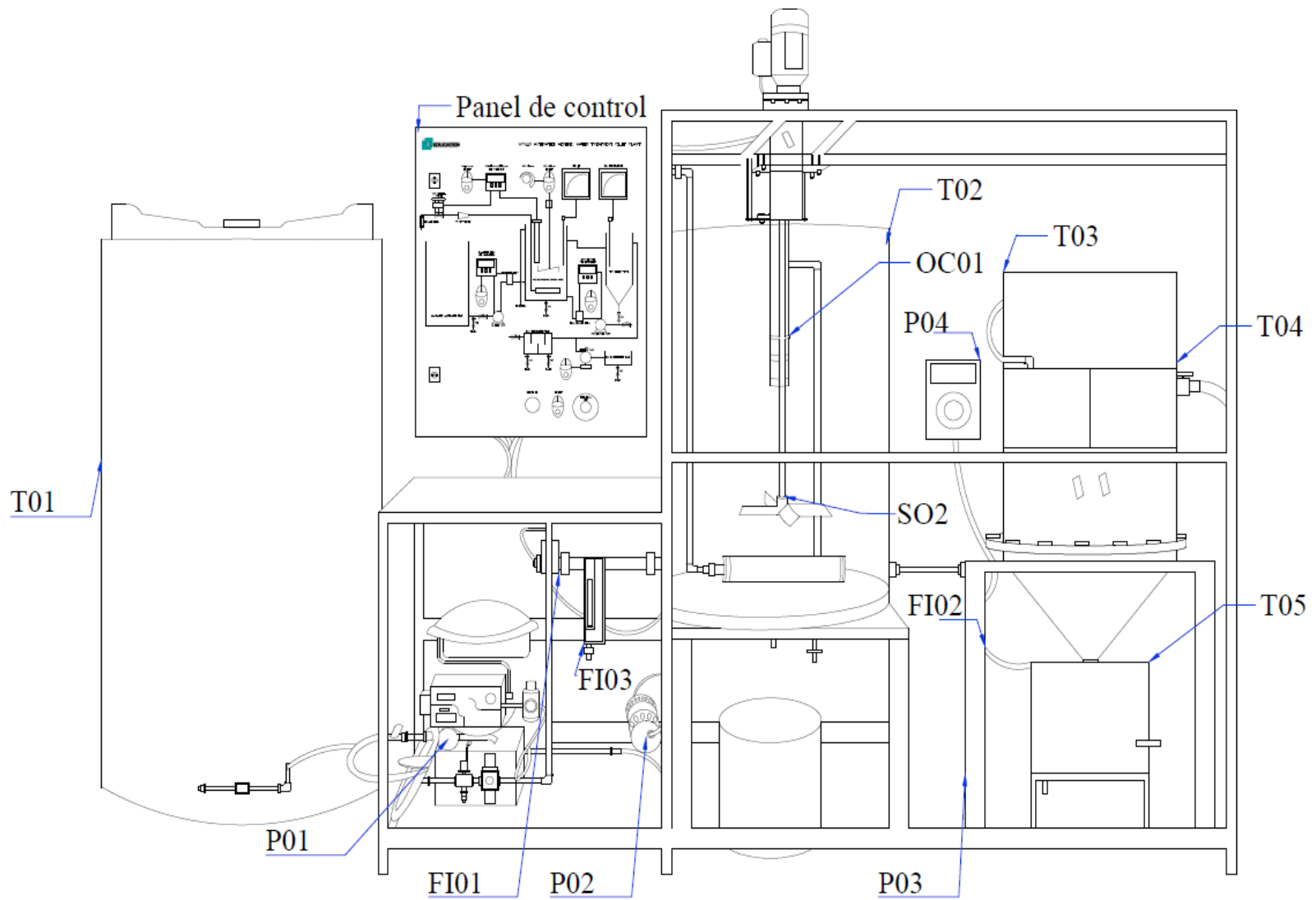
El desbordamiento del tanque T03 fluye hacia un tanque de cloración (T04). Una bomba dosificadora (P04) mueve la solución de hipoclorito de sodio (NaClO) desde un tanque pequeño (T05), instalado en la parte inferior derecha del marco móvil hasta el tanque de cloración (T04), para clorar el agua en tratamiento antes de que abandone el proceso.

El compresor eléctrico (P02) funciona a velocidad fija para proporcionar el flujo de aire al difusor de burbuja fina. La válvula de control neumática (accionada por aire comprimido) en la parte inferior izquierda del marco, funciona con el controlador PID OC01 para regular el flujo de aire que ingresa al difusor; el controlador antes mencionado utiliza el sensor de oxígeno disuelto en el tanque T02 como referencia del control. El colector principal de aire comprimido se conecta al suministro de aire comprimido del laboratorio. Este colector contiene un interruptor de aislamiento, un filtro / secador y un puerto de salida a la válvula neumática. La válvula tiene su propio filtro – regulador.

Cuadro 1 Equipos en la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales

Código	Equipo
T00	Tanque de filtración
T01	Tanque de aguas residuales
P01	Bomba de alimentación
FI01	Sensor magnético inductivo de flujo de alimentación
T02	Tanque de lodos activados
OC01	Sonda óptica para oxígeno disuelto
SO2	Agitador mecánico
P02	Compresor
FI03	Medidor de flujo de aire
T03	Tanque de sedimentación
FI02	Sensor magnético inductivo de flujo de recirculación
P03	Bomba de retorno de lodos
T04	Tanque de cloración
P04	Bomba de dosificación
T05	Tanque de hipoclorito

Figura 9 Planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias



IV. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Activar la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias, trabajando con un rango de afluentes de 0.5 – 1.5 m³/día, de acuerdo a la capacidad nominal de 10.4 m³/día, para la elaboración del manual de operación y mantenimiento de la misma.

B. Objetivos específicos

1. Determinar los parámetros físicos y químicos de entrada del agua a tratar con respecto a pH con potenciómetro portátil digital, oxígeno disuelto con medidor de oxígeno disuelto portátil digital. Así mismo, caracterizar los sólidos presentes (disueltos y suspendidos) por análisis gravimétrico, análisis granulométrico (límites máximos de concentración), conductividad eléctrica y turbidez para evitar un corto circuito en el flujo de recirculación.

2. Determinar los requerimientos y procedimiento de activación de lodos para el arranque de la planta aeróbica de tratamiento de aguas residuales.

3. Determinar las curvas de operación de la planta con respecto al tiempo evaluando cambios en pH con potenciómetro portátil digital, concentración de sólidos por análisis gravimétrico y material orgánico presente con la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅).

4. Realizar el manual de operación y mantenimiento, trabajando con un rango de afluentes de 0.5 – 1.5 m³/día, de acuerdo a la capacidad nominal de la planta aeróbica de tratamiento de aguas residuales.

V. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, el rápido crecimiento poblacional del país, el Banco Mundial determinó para Guatemala una tasa de crecimiento poblacional aproximada de 2.01% para el año 2017, y la alta demanda de insumos para realizar las distintas actividades humanas, ha incrementado el proceso de producción en todas las industrias de Guatemala y la descontrolada generación de desechos en la nación. Este aumento en la producción repercute directamente en el constante consumo de agua de los recursos hídricos; se determinó el consumo promedio aproximado del recurso hídrico en el país para el año 2010: sector industrial 7,643.17 millones m³, riego y ganadería 5,595.04 millones m³, generación eléctrica 5,057.27 millones m³, hogares 461.68 millones m³, servicios 69.85 millones m³ y el resto de actividades 1,146.87 millones m³ (MARN – JICA, 2017). La consecuencia se ve reflejada en la incesante generación de aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas. Sin embargo, el agua que puede ser utilizada en las actividades antes mencionados (agua dulce) se ha vuelto escasa; a nivel mundial se cuenta con menos 2.5% del total de agua del planeta.

La contaminación de los cuerpos acuíferos existentes en Guatemala, por parte de los distintos efluentes descargados por los habitantes ha provocado la muerte de flora y fauna de los mismos. El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) indica que el 90% de los ríos están altamente contaminados por desechos sólidos, aguas residuales domésticas, industriales, entre otros. Un acontecimiento reciente se reporta el 31 de enero del año 2017, con la muerte de cientos de peces a causa de la contaminación del río Lempa en Esquipulas, Chiquimula.

El caso más impactante y problemático en el país, se registra en el Lago de Amatitlán en el departamento de Guatemala. El lago presenta un acelerado proceso de contaminación y eutrofización por efluentes industriales con alta concentración de material orgánico en trazas de materias primas, productos terminados, intermedios y de

limpieza. También es receptor de desechos y aguas residuales domésticas de 16 municipios ubicados en su cuenca. De acuerdo con el Foro Consultivo Científico y Tecnológico (FCCyT), Guatemala cuenta con una oferta o disponibilidad bruta de agua de 97,120 millones m^3 , se utilizan 9,596 millones m^3 de agua de los recursos hídricos; de toda el agua empleada en el país, se generan 1,540 millones m^3 de aguas residuales, únicamente el 5% de las aguas residuales son tratadas y el resto son vertidas sin tratamiento a corrientes de agua superficial. Es necesario que la industria y municipalidades guatemaltecas inviertan en estrategias ambientales reactivas y proactivas que proteja a los ecosistemas.

En el tratamiento de aguas residuales se usan a menudo los procesos biológicos ya que reproducen la degradación que ocurre naturalmente en ríos, lagos y arroyos; los reactores biológicos están diseñados para potenciar la degradación bioquímica en condiciones cuidadosamente controladas, aumentando la eliminación de contaminantes y la estabilización de lodos. Especialmente el tratamiento biológico aeróbico se aplica en aguas residuales domésticas e industriales, obteniendo buena eliminación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la planta se puede operar para facilitar la eliminación de nitrógeno y fósforo. Dentro de las ventajas del tratamiento biológico aeróbico se incluyen libre de olores, rápido, económico comparado con otros métodos (ONU, 2017).

Así mismo, algunas desventajas son frecuencia alta de mantenimiento, ser ineficaces en aguas profundas y en condiciones climáticas de congelación, poca eliminación de cargas bacterianas, a menudo necesitan más energía para mantener las condiciones aeróbicas dentro del reactor, y los desechos orgánicos se convierten en biomasa (lodos activados) y dióxido de carbono (CO_2). Sin embargo, impiden la formación de metano (CH_4), que tiene un mayor potencial en el calentamiento climático que el dióxido de carbono (CO_2) (ONU, 2017).

El sistema de lodos activados en sus variantes completamente mezclado y aireación extendida es uno de los sistemas más utilizados en el mundo para el tratamiento de aguas residuales municipales. Ocupa el primer lugar en caudal tratado y el segundo lugar como número de sistemas usados en América Latina, después de las lagunas de estabilización (Noyola, Morgan & Güereca. 2013). Por consiguiente, este proyecto tiene como objeto la activación y arranque de la planta de tratamiento aeróbica de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias, con el fin de elaborar su respectivo Manual de operación y mantenimiento. De esta forma, los estudiantes de Ingeniería Química obtendrán conocimiento básico del funcionamiento de un tratamiento secundario aeróbico de aguas residuales.

VI. METODOLOGÍA

A. Etapa de investigación

1. Se estudió el tratamiento biológico aerobio de aguas residuales, con el fin de comprender el proceso de biomasa suspendida e identificar de los componentes de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

2. Se determinó el procedimiento de activación de lodos y los requerimientos para el arranque de la planta de tratamiento de aguas, empleando como base las especificaciones descritas por el fabricante de la planta aeróbica de tratamiento de aguas residuales, a escala piloto, del Laboratorio de Operaciones Unitarias en su respectiva guía de usuario.

a. Requerimientos de la alimentación a utilizar en la planta de tratamiento aeróbico.

1) El agua residual determina la presencia bacteriana. Pueden emplearse bacterias del ácido láctico (*Lactobacillus plantarum*, *L. casei*, *streptococcus lactis*), bacterias fotosintéticas (*Rhodopseudomonas palustrus*, *Rhodobacter spaeroides*), levaduras (*Saccharomyces cerevisiae*, *Candida utilis*), actinomicetos (*Streptomyces albus*, *S. griseus*) y hongos de fermentación (*Aspergillus oryzae*, *Mucor hiemalis*).

2) El 90% de las partículas deben ser de un tamaño menor a 283 μm , siendo el máximo permitido 1,000 μm .

3) La viscosidad del agua residual debe situarse en el rango de 0.005 – 0.02 Pa s.

- 4) La concentración de sólidos debe ser de $2.28 - 10.62 \text{ kg/m}^3$ o 62% v/v.
- 5) El límite en la demanda química de oxígeno (DQO) es de 1.7 kg/m^3 .
- 6) La relación alimentación/microorganismos (A/M, en inglés F/M ratio) aceptable es de alrededor de 0.25 a 0.45.
- 7) Los niveles de pH de mejor funcionamiento son de 6.5 a 8.5.
- 8) El rango temperatura del agua residual para operación es de 10 a 37 °C.

b. Procedimiento para el arranque de la planta de tratamiento y activación de lodos

- 1) Se cerraron todas las válvulas.
- 2) Se filtraron 0.11 m^3 de agua residual utilizar con los tamices construidos y llenar el tanque plástico provisional de 0.21 m^3 .
- 3) Se trasvasó el agua residual filtrada necesaria para realizar solución al 10% en el tanque para aguas residuales (T01), (ver Figura 9, página 28).
- 4) Se tomó muestra representativa de la solución de agua residual al 10% del tanque para aguas residuales (T01) y caracterizar la misma.
- 5) Se añadió solución de hipoclorito de sodio (NaClO) en el tanque pequeño (T05), (ver Figura 9, página 28).
- 6) Se encendió la planta de tratamiento colocando en posición vertical el aislador multipolar al costado del panel de control presionando el botón etiquetado con ON/OFF.

7) Se abrió la válvula de control (V02) y encendió la bomba de velocidad variable (P01) para que el caudal llenase el tanque de lodos activados (T02) hasta que el nivel del agua cubrió al agitador, el sensor de pH y sensor de oxígeno disuelto, (ver Figura 9, página 28).

8) Se detuvo la bomba de velocidad variable (P01), (ver Figura 9, página 28).

9) Se inició al agitador a máxima velocidad (1,320 rpm), (ver Figura 9, página 28).

10) Se encendió el compresor (P02) y configuró al controlador del sensor de oxígeno disuelto (OC01) a 20.0 ppm, (ver Figura 9, página 28).

11) Se esperó tres horas a que los procesos biológicos inicien. Fue obligatorio observar la formación irregular de flóculos bilógicos en el tanque de lodos activados (T02), (ver Figura 9, página 28).

12) Se reinició la bomba de alimentación de agua residual (P01) al caudal deseado (flujo volumétrico de $1.5 \text{ m}^3/\text{día}$), estableció el oxígeno disuelto deseado con el sensor de oxígeno disuelto (OC01) (3.0 ppm) y ajustó al agitador a 330 rpm (equivalente a 1/4 de vuelta del controlador) (manteniendo un oleaje suave dentro del tanque de aireación), (ver Figura 9, página 28).

13) Se permitió que el líquido del tanque de lodos activados (T02) fluyera al tanque de sedimentación (T03), hasta aproximarse a 5.0 cm al punto de desbordamiento del mismo, (ver Figura 9, página 28).

14) Se esperó nueve horas a que la generación de lodos fuese constante; fue imperativo verificar que existiera como mínimo una capa de lodos en el fondo del tanque de sedimentación (T03) de 10 cm de altura y el descenso de nuevos flocos bilógicos, (ver Figura 9, página 28).

15) Se encendió la bomba de retorno de lodos activados (P03) al mismo caudal empleado con la bomba de alimentación de agua residual (P01), (ver Figura 9, página 28).

16) Se esperó dos semanas a que el desarrollo biológico fuese completo. Durante éste periodo se efectuaron ajustes en la planta, de la siguiente forma:

a) Se observó la formación de lodo activado muy pegajoso, el aspecto físico del agua era líquido y jabonoso con una coloración café claro.

b) Se removió de las paredes de la planta por medio de raspado el lodo activado pegajoso.

c) Se purgó una porción de lodos activados abriendo la válvula de control (V05) y válvula de descarga (V06), cuando estos se volvieron demasiados para recircularlos y se alimentó la planta con el efluente de prueba. En el caso que no hubo problemas con la recirculación, pero se presentó una lenta formación de los lodos; se retiró una fracción del agua en la superficie del tanque de sedimentación (T03) y se alimentó la planta con nueva agua a tratar, (ver Figura 9, página 28).

d) Se modificó del agua en tratamiento a una coloración café oscuro en el tanque de lodos activados (T02) y en el área cónica del tanque de sedimentación (T03), olor a tierra mojada y una apariencia más viscosa, (ver Figura 9, página 28). A partir de éste cambio, el lodo activado se desarrolló en la planta de tratamiento.

B. Etapa experimental y de análisis

1. Calibración de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales empleando agua potable.

a. Bomba de alimentación de agua residual de velocidad variable (P01).

1) Se instaló la conexión de entrada a la bomba de velocidad variable (P01).

a) 1 buje reductor hexagonal de acero inoxidable NPT (0.95 cm [3/8 in] rosca macho – 0.64 cm [1/4 in] rosca hembra).

b) 1 niple roscado (macho en ambos extremos) NTP de acero inoxidable (0.64 cm [1/4 in] de diámetro – 5.08 cm [2 in] de largo).

c) 1 válvula de bola de acero inoxidable 316 NPT de 0.64 cm (1/4 in).

d) 1 conector para manguera de acero inoxidable NPT (0.64 cm [1/4 in] rosca macho – 0.64 cm [1/4 in] espiga para manguera).

e) 1 manguera para aire de 0.64 cm (1/4 in) diámetro – 5 m de largo.

2) Se determinó la cantidad de volumen de agua potable a ingresar (20 L) y la altura que ocupó dicha cantidad (8.03 cm), en el tanque de lodos activados (T02).

3) Se llenó tanque plástico provisional de 0.21 m³ con agua potable.

4) Se encendió la planta de tratamiento colocando en posición vertical el aislador multipolar al costado del panel de control presionando el botón etiquetado con ON/OFF.

5) Se abrió la válvula de control (V02), configuró controlador PID (FC01) que regula el flujo de aguas residuales ($1.5 - 9.0 \text{ m}^3/\text{día}$) y encendió la bomba de velocidad variable (P01) para que el caudal ingrese al tanque de lodos activados (T02).

6) Se midió el tiempo que requirió llenar el volumen de agua potable seleccionado según el afluente de alimentación configurado en el controlador PID (FC01) ($1.5 - 9.0 \text{ m}^3/\text{día}$), se realizó pruebas en triplicado.

7) Se comparó el resultado experimental del paso anterior respecto al valor teórico y se determinó el error porcentual.

8) Se generó la curva de calibración para la bomba de alimentación de velocidad variable (P01).

b. Bomba de retorno de lodos de velocidad variable (P03).

1) Se llenó el tanque de sedimentación (T03) con agua potable hasta aproximarse a 5.0 cm del punto de desbordamiento al tanque de cloración (T04).

2) Se determinó la cantidad de volumen de agua potable a ingresar (20 L) y la altura que ocupa dicha cantidad (8.03 cm), en el tanque de lodos activados (T02).

3) Se encendió la planta de tratamiento colocando en posición vertical el aislador multipolar al costado del panel de control presionando el botón etiquetado con ON/OFF.

4) Se configuró controlador PID (FC02) que regula el flujo de lodos ($0.5 - 9.0 \text{ m}^3/\text{día}$, excepto $1.0 \text{ m}^3/\text{día}$), abrió la válvula de control (V05) y encendió la bomba de velocidad variable (P03) para que el afluente ingrese al tanque de lodos activados (T02).

5) Se midió el tiempo que requiere llenar el volumen de agua potable seleccionada según el caudal de retorno de lodos configurado en el controlador PID (FC02) ($0.5 - 9.0 \text{ m}^3/\text{día}$, excepto $1.0 \text{ m}^3/\text{día}$), se realizó pruebas en triplicado.

6) Se comparó el resultado experimental del paso anterior respecto al valor teórico y se determinó el error porcentual.

7) Se generó la curva de calibración para la bomba de retorno de lodos de velocidad variable (P03).

c. Bomba de dosificación de cloro.

1) Se llenó tanque de hipoclorito (T05) con agua potable.

2) Se encendió la planta de tratamiento colocando en posición vertical el aislador multipolar al costado del panel de control presionando el botón etiquetado con ON/OFF.

3) Se encendió la bomba de dosificación (P04) presionando su respectivo botón en el panel de control.

4) Se configuró la bomba de dosificación (P04) la pulsaciones/minuto (12.0 – 120.0 pulsaciones/minuto).

5) Se midió el volumen de agua dosificada en 1 minuto utilizando una probeta graduada de 10 mL, en triplicado por cada configuración seleccionada en el paso cuatro; se determinó el volumen promedio de dosificación de cada configuración seleccionada en el paso cuatro.

6) Se determinó flujo del fluido de cada resultado obtenido en el paso cinco.

7) Se generó curva de calibración para la bomba de dosificación de cloro (P04).

d. Sonda de medición de pH.

1) Se tomó muestra de 500 mL de agua residual y vertió en un vaso de precipitados.

2) Se realizó la medición de pH con medidor multi-parámetro PCSTestrTM 35 OAKTON.

3) Se realizó la medición de pH con sonda de medición de potencial de hidrogeno.

4) Se comparó el resultado del paso dos con el resultado del paso tres y se determinó si existía diferencia.

e. Termocupla de medición de temperatura.

1) Se adquirió un termómetro de alcohol con escala -10 – 100 °C.

2) Se colocó en un recipiente metálico hielo fundente (temperatura que por definición corresponde a 0 °C) que ocupó como mínimo de 75% del volumen disponible dentro del recipiente.

3) Se midió la altura que la columna de alcohol alcanzó cuando el bulbo se colocó en contacto con hielo fundente y se anotó el resultado correspondiente.

4) Se calentó con estufa eléctrica el recipiente metálico con hielo fundente hasta que alcanzó la ebullición.

5) Se midió la altura que la columna de alcohol alcanzó cuando el bulbo se colocó en contacto con agua en ebullición (correspondiente a 100 °C a nivel del mar) y se anotó el resultado correspondiente.

6) Se tomó muestra de 50 mL de agua potable a temperatura ambiente y vertió en un vaso de precipitados, se midió la temperatura con el termómetro de alcohol calibrado.

- 7) Se realizó la medición de la temperatura con termocupla.
- 8) Se comparó el resultado del paso seis con el resultado del paso siete y se determinó si existe diferencia.

2. Construcción de tamices para cumplir con el requerimiento de tamaño de partícula.

a. Análisis granulométrico de arena fina.

1) Se secó la muestra en el horno a una temperatura de 105 a 110 °C por un período de tiempo de 12 a 24 horas.

2) Se enfrió la muestra a temperatura ambiente en desecador y se pesó 200 g de la misma.

3) Se vació el contenido de la tara sobre el tamiz No. 200, con cuidado y con la ayuda de agua, se lavó lo mejor posible el suelo para que todos los finos pasen por el tamiz.

4) El material retenido en el tamiz No. 200 después de lavado, se colocó en una tara, lavando el tamiz con agua.

5) Se secó el contenido de la tara en el horno a una temperatura de 100 – 110 °C por 24 horas.

6) Con el material seco en el paso anterior, se colocó el juego de tamices en orden progresivo, No. 20, No. 60, No. 100, No. 140, No. 200 y al final el fondo, vaciando el material previamente pesado.

7) Se agitó el juego de tamices horizontalmente con movimientos de rotación y verticalmente en la tamizadora de laboratorio Ro-Tap® desarrollada por W.S. Tyler™. El tiempo de agitación fue de 15 minutos.

8) Inmediatamente realizado el paso anterior, se pesó las fracciones retenidas en cada tamiz, y se anotó en el registro correspondiente.

b. Se seleccionó el Mesh adecuado para cumplir con el requerimiento de tamaño de partícula (Mesh No. 60).

c. Se dimensionó el tamaño del tamiz a construir respecto a la boca del tanque plástico provisional de 0.21 m^3 .

d. Se adquirió el cedazo de acero inoxidable del Mesh determinado en el paso b.

e. Se ensambló el tamiz con las dimensiones del paso c y el cedazo adquirido en el paso d.

f. Se comparó la capacidad de remoción de partículas del tamiz construido con su equivalente en el juego de tamices.

g. Se ensambló otro tamiz con las mismas dimensiones del paso c y cedazo de menor Mesh (Mesh No. 4).

3. Instalación de componentes para la operación continua de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales.

a. Se colocó el tanque de agua residual (T01) a la izquierda del marco móvil de acero inoxidable.

b. Se ajustó la tubería de salida del tanque de agua residual (T01) con la válvula de control (V01) y válvula de purga (V02), a la bomba de alimentación de velocidad variable (P01) empleando tubo flexible suministrado por el fabricante.

c. Se colocó manguera plástica (de longitud suficiente para descargar en el alcantarillado) en las válvulas purga (V01), (V06), (V09) y (V010) y se aseguró en cada ubicación con abrazaderas metálicas tornillo sin fin (1.91 cm [3/4 in] – 3.81 cm [1-1/2 in]).

d. Se conectó un compresor de aire al colector de aire comprimido en el filtro – regulador de aire (dentro del marco móvil de acero inoxidable, abajo a la izquierda).

4. Determinación de las condiciones de entrada del agua a tratar.

a. Medición de la temperatura del agua a tratar (en triplicado)

1) Se tomó muestra de 500 mL de agua residual y se vertió en un vaso de precipitados.

2) Se colocó el termómetro de alcohol escala -10 – 100 °C calibrado dentro del vaso de precipitados con el líquido de muestra, se realizó medición de temperatura.

3) Se anotó el resultado correspondiente cuando la lectura en el medidor sea estable.

b. Medición del oxígeno disuelto en agua a tratar (en triplicado).

1) Se tomó muestra de 50 mL de agua residual y se vertió en un vaso de precipitados.

2) Se realizó la medición del oxígeno disuelto con medidor de oxígeno disuelto portátil digital.

- a) Se ensambló la sonda de oxígeno disuelto sension **156** del medidor multiparámetro HACH.
- b) Al menos 30 minutos antes de la medición, se polarizó la sonda conectando al medidor.
- c) Se aseguró el cable de la sonda a la cámara de almacenamiento y calibración.
- d) Se preparó la cámara de almacenamiento y calibración, sosteniendo debajo el agua apretando varias veces para ingresar agua en la parte inferior de la cámara a través de la entrada; evitando llenar por completo la parte inferior de la cámara. De forma alternativa, se abrió el fondo de la cámara e insertó la esponja empapada en agua.
- e) Se insertó la sonda de oxígeno disuelto en la cámara de almacenamiento y calibración. (No debe inundarse la punta con agua o sostener una gota en la membrana).
- f) Se esperó al menos 10 minutos para que se estabilice la atmosfera en la cámara de almacenamiento y calibración.
- g) Se presionó el botón CAL y en la pantalla se reflejó 100%.
- h) Se presionó el botón READ/ENTER. El ícono de estabilización apareció mientras el medidor completa la calibración.
- i) Se insertó la sonda en el líquido de muestra, cubriendo el termistor (botón metálico) ubicado a un lado de la sonda.
- j) Se agitó la sonda en la muestra para remover las burbujas de aire en el área de detección de la punta de la sonda.
- k) Se utilizó agitador y barra magnética para revolver la muestra vigorosamente.

3) Se anotó el resultado correspondiente cuando la lectura en el medidor fue estable.

4) Se comparó el resultado del paso tres con resultado registrado con la sonda de oxígeno disuelto en el panel de control de la planta de tratamiento aeróbico de agua residual.

c. Medición del pH del agua a tratar (en triplicado).

1) Se tomó muestra de 25 mL de agua residual y se verterió en un vaso de precipitados.

2) Se realizó la medición de pH con medidor multi-parámetro PCSTestr™ 35 OAKTON.

a) Se encendió el medidor multi-parámetro PCSTestr™ 35 OAKTON con el botón ON/OFF.

b) Se seleccionó el modo pH con el botón MODE/ENT.

c) Se removió el tapón protector de la sonda e insertarlo en el líquido de muestra.

3) Se anotó el resultado correspondiente cuando la lectura del medidor sea estable.

4) Se comparó el resultado del paso tres con resultado registrado con la sonda de medición de potencial de hidrógeno en el panel de control de la planta de tratamiento aeróbico de agua residual.

d. Determinación de sólidos suspendidos en agua a tratar (en triplicado).

1) Turbidez

a) Se tomó muestra de 10 mL de agua residual empleando probeta graduada de 10 mL, se vertió en celda especial de medición con tapadera y se cerró correctamente.

b) Se lavó el exterior con la celda agua potable y se secó un paño limpio y seco.

c) Se aplicó el aceite de silicona en el exterior de la celda y se removió con otro paño limpio y seco.

d) Se encendió el turbidímetro portátil HI 98703 HANNA instruments.

e) Se insertó la celda especial en el equipo de medición, alineando la marca de la celda con la muesca del equipo y se cerró la tapa del turbidímetro.

f) Se realizó medición de turbidez con medidor de turbidez.

g) Se anotó el resultado correspondiente.

2) Análisis gravimétrico

a) Se encendió estufa eléctrica a 103 - 105 °C.

b) Se enumeró suavemente con lápiz de grafito HB cada papel filtro AP40 Millipore.

c) Se instaló kitazato, se conectó con manguera de hule al vacío y se colocó el filtro (con la cara rugosa hacia arriba).

d) Se aplicó vacío y se lavó el filtro con tres porciones sucesivas de 20 mL de agua destilada. Se desconectó el vacío hasta la remoción total de las trazas de agua destilada.

e) Se retiró el filtro, se colocó el filtro en un pedazo (limpio y nuevo) de papel aluminio y se secó en la estufa eléctrica durante una hora.

f) Se transportó y colocó el papel filtro en el desecador hasta su empleo, se pesó el filtro, y anotó el resultado correspondiente (P1).

g) Se repitieron los pasos b - f hasta que la variación de peso fue menor a 4% o 0.0005 g.

h) Se retiró el papel filtro previamente tarado del desecador, se colocó el mismo en el equipo de filtración e inició la succión.

i) Se tomó una muestra de 25 mL de agua residual, se vertió en el en el papel filtro y esperó a que no existan trazas del agua residual.

j) Se lavó con tres porciones de 10 mL de agua destilada (esperando a que el filtro se secase entre lavados) y desconectó el vacío.

k) Se retiró el filtro del equipo de filtración y colocó en el pedazo de papel aluminio utilizado en el paso e.

l) Se secó el papel filtro con el material filtrado y pedazo de papel aluminio en la estufa eléctrica a 103 - 105 °C durante una hora.

m) Se transportó y colocó el papel filtro con el pedazo de papel aluminio en el desecador.

n) Se esperó a que el filtro se encuentre a temperatura ambiente, se pesó en balanza analítica el papel filtro y anotó el resultado correspondiente (P2).

o) Se repitieron los pasos h - n hasta que la variación de peso fue menor a 4% o 0.0005 g.

p) Se colocó el papel filtro con el material filtrado y el pedazo de papel aluminio en la mufla a 600 °C durante 20 minutos. Se esperó a que la mufla disminuyera su temperatura a 400 °C para abrirla.

q) Se transportó y colocó el papel filtro con el pedazo de papel aluminio en la estufa eléctrica a 105 °C durante 15 minutos.

r) Se transportó y colocó papel filtro con el material remanente en el desecador a temperatura ambiente.

s) Se pesó en balanza analítica papel filtro con el material remanente a temperatura ambiente y se anotó el resultado correspondiente (P3).

t) Se calculó los sólidos suspendidos totales utilizando la ecuación No.1

$$SST \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{P2 - P1}{25 mL} * 10^6$$

u) Se calculó los sólidos suspendidos volátiles aplicando la ecuación No.2

$$SSV \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{P2 - P3}{25 mL} * 10^6$$

e. Análisis granulométrico de sólidos suspendidos del agua a tratar.

1) Con los sólidos suspendidos recolectados, se realizó un análisis granulométrico por tamices (para tamaños de partículas con un diámetro máximo de 0.074 mm):

a) Se secó la muestra en el horno a una temperatura de 105 a 110 °C por un período de tiempo de 12 a 24 horas.

- b) Se enfrió la muestra a temperatura ambiente en el desecador y se pesó 200 g de la misma.
- c) Se disgregó los grumos, del material con un pisón de madera para evitar el rompimiento de los gramos.
- d) Se colocó la muestra en una tara, agregó agua y dejó remojar hasta que se deshicieron completamente los grumos.
- e) Se vació el contenido de la tara sobre el tamiz No. 200, con cuidado y con la ayuda de agua, se lavó lo mejor posible el suelo para que todos los finos pasaran por el tamiz.
- f) El material retenido en el tamiz No. 200 después de lavado, se colocó en una tara, lavando el tamiz con agua.
- g) Se secó el contenido de la tara en el horno a una temperatura de 100 – 110 °C por 24 horas.
- h) Con el material seco en el paso anterior, se colocó el juego de tamices en orden progresivo, No. 20, No. 60, No. 100, No. 140, No. 200 y al final el fondo, vaciando el material previamente pesado.
- i) Se agitó el juego de tamices horizontalmente con movimientos de rotación y verticalmente con golpes secos de vez en cuando en la tamizadora de laboratorio Ro-Tap® desarrollada por W.S. Tyler™. El tiempo de agitación fue de 15 minutos.
- j) Inmediatamente realizado el paso anterior se pesó las fracciones retenidas en cada tamiz, y anotó en el registro correspondiente.

f. Determinación de sólidos disueltos en agua a tratar (en triplicado).

1) Conductividad eléctrica

a) Se tomó muestra de 25 mL de agua residual y se vertió en un vaso de precipitados.

b) Se encendió el medidor multi-parámetro PCSTestrTM 35 OAKTON con el botón ON/OFF.

c) Se seleccionó el modo Conductividad Eléctrica (EC) con el botón MODE/ENT.

d) Se removió el tapón protector de la sonda e insertarlo en el líquido de muestra.

e) Se realizó la medición de la Conductividad Eléctrica con medidor multi-parámetro PCSTestrTM 35 OAKTON.

f) Se anotó el resultado correspondiente cuando la lectura del medidor fue estable.

2) Análisis gravimétrico

a) Se ajustó a peso constante una cápsula de porcelana.

b) Se pesó en balanza analítica la cápsula de porcelana y anotar el resultado correspondiente (P4).

c) Se tomó muestra de 25 mL de agua residual y se vertió en la cápsula de porcelana.

d) Se evaporó la muestra de agua residual hasta secarse en baño maría, durante dos horas a 302 °C.

e) Durante 15 minutos, se colocó la cápsula de porcelana en una estufa eléctrica a 105 °C.

f) Se transportó y colocó la cápsula de porcelana en el desecador a temperatura ambiente.

g) Se pesó en balanza analítica la cápsula de porcelana a temperatura ambiente y anotó el resultado correspondiente (P5).

h) Se calculó los sólidos totales utilizando la ecuación No. 4

$$ST \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{P5 - P4}{25 \text{ mL}} * 10^6$$

i) Se calculó los sólidos disueltos totales aplicando la ecuación No. 5

$$SDT \left(\frac{mg}{L} \right) = ST \left(\frac{mg}{L} \right) - SST \left(\frac{mg}{L} \right)$$

g. Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) del agua a tratar.

1) Se conectó el reactor DRB 200 a la corriente eléctrica y encendió el mismo presionando el botón ON/OFF ubicado en la parte posterior del equipo.

2) Se seleccionó la programación para pruebas de COD de dos horas a 150 °C y precalentó el reactor DRB 200.

3) Se tomó muestra de 500 mL de agua residual y vertió en un vaso de precipitados.

4) Se agregó la barra magnética en el vaso de precipitados con el agua de muestra y colocó ambos sobre el agitador magnético.

5) Se homogenizó la muestra dentro del vaso de precipitados aplicando la máxima revolución por minuto (rpm) disponible durante cinco minutos.

6) Se removió la tapa del vial reactivo de digestión para COD.

7) Se tomó una alícuota de 2 mL de la muestra homogenizada con pipeta volumétrica de 10 mL, se sostuvo el vial en un ángulo de 45° y descargó la alícuota dentro del vial reactivo de digestión para COD.

8) Se colocó la tapadera al vial, enjuagó el exterior de vial para COD con agua desionizada y secó la superficie con un paño para tareas delicadas.

9) Se tomó el vial seco de la tapadera, se agitó varias veces en el área de lavado y colocó dentro del reactor precalentado DRB 200.

10) Se repitieron los pasos 6 – 9 sustituyendo el agua residual homogenizada por agua desionizada.

11) Para medir la Demanda Química de Oxígeno soluble (DQOs) fue necesario repetir los pasos 3 – 5, se filtró el agua residual homogenizada y se repitió el paso 10 sustituyendo el agua desionizada por el líquido filtrado homogenizado.

12) Se calentaron los viales por dos horas. Al finalizar el tipo de digestión, se esperó 20 minutos para que los viales redujeran su temperatura como mínimo a 120 °C.

13) Se invirtió cada vial de posición varias veces mientras su temperatura es mayor a la temperatura ambiente, se colocó los viales en un rack para viales y esperó a que alcancen la temperatura ambiente.

14) Se encendió el colorímetro DR/890 HACH con el botón ON/OFF/EXIT.

15) Se presionó el botón “PRGM”, seguidamente se presionó los botones “1 7 ENTER”.

16) Se insertó el adaptador COD/TNT área de retención de celdas, se rotó el adaptador hasta quedar en su lugar y finalmente se empujó hacia abajo para completar su instalación.

17) Se limpió el exterior del blanco con un paño para tareas delicadas, se colocó el blanco en el adaptador empujando hacia abajo en la parte superior del vial hasta que quede completamente fijo y cubrió firmemente el vial con la tapa del instrumento de medición.

18) Se presionó el botón “ZERO”, el cursor se movió a la derecha y después se desplegó “0 mg/L COD”.

19) Se repitió el paso 17 con cada vial de muestra.

20) Se presionó el botón “READ”, el cursor se movió a la derecha y después se desplegó el resultado en mg/L COD.

21) Se anotó el resultado correspondiente de cada vial de muestra.

h. Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) del agua a tratar.

1) Se agregó 150 mL del agua a tratar en tres matraz de Erlenmeyer de 250 mL.

2) Se realizó la medición del oxígeno disuelto con medidor de oxígeno disuelto portátil digital a cada una de las muestras.

3) Se anotó el resultado correspondiente, se selló cada matraz de Erlenmeyer con tapón de hule y envolvió con papel aluminio.

4) Se incubó a 20 °C durante cinco días en la oscuridad, cada muestra de agua residual en su respectivo matraz de Erlenmeyer y tapón de hule.

5) Al finalizar el tiempo de incubación, se realizó la medición del oxígeno disuelto con medidor de oxígeno disuelto portátil digital a cada una de las muestras.

6) La diferencia entre los valores de oxígeno disuelto medidos representa la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5).

7) Para medir la Demanda Bioquímica de Oxígeno soluble ($DBOs$) fue necesario filtrar el agua residual de muestra a tratar con el equipo de filtración y el papel filtro AP40 Millipore, posteriormente se repitieron los pasos 1 – 6.

5. Determinación de pruebas y operación de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

a. Las variables controlables del proceso de tratamiento aeróbico de aguas con lodos activados fueron el oxígeno disuelto y el afluente de alimentación de aguas residuales; se definieron tres valores de estudio para cada una:

1) Oxígeno disuelto: 2.0 ppm, 2.5 ppm y 3.0 ppm.

2) Caudal de alimentación de aguas residuales: 0.5 m³/día, 1.0 m³/día y 1.5 m³/día.

b. Se definieron tres combinaciones de las variables controladas de estudio para evaluación de la operación de la planta de tratamientos aeróbico de aguas a escala piloto del laboratorio de operaciones unitarias.

1) Oxígeno disuelto en el agua a 2.0 ppm y caudal de alimentación de aguas residuales a 0.5 m³/día.

2) Oxígeno disuelto en el agua a 2.5 ppm y caudal de alimentación de aguas residuales a 1.0 m³/día.

3) Oxígeno disuelto en el agua a 3.0 ppm y caudal de alimentación de aguas residuales a $1.5 \text{ m}^3/\text{día}$.

c. Operar la planta de tratamiento aeróbico con cada una de las combinaciones especificadas anteriormente.

1) Se filtró 0.11 m^3 de agua residual utilizada con los tamices construidos y se llenó el tanque plástico provisional de 0.21 m^3 .

2) Se trasvasó el agua residual filtrada necesaria para realizar solución al 10% en el tanque para aguas residuales (T01).

3) Se tomó muestra representativa de la solución de agua residual al 10% del tanque para aguas residuales (T01) y se caracterizó la misma.

4) Se calculó el desarrollo de características necesarias del agua residual.

5) Se determinó la producción de biomasa.

6) Se calculó la masa de sólidos suspendidos volátiles (SSV) y sólidos suspendidos totales (SST) en el tanque de aireación.

7) Se determinó el tiempo de residencia en el tanque de lodos activados.

8) Se calculó la relación de alimentación/microorganismos (A/M, en inglés F/M ratio) y la carga volumétrica de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).

9) Se determinó el rendimiento observado de masa de sólidos suspendidos volátiles (SSV) y sólidos suspendidos totales (SST).

10) Se calculó la demanda de oxígeno.

11) Se determinó el flujo volumétrico de aire.

12) Se abrió la válvula de control (V02).

13) Se reinició la bomba de alimentación (P01) al flujo volumétrico deseado y también se estableció el oxígeno disuelto deseado con el controlador del sensor de oxígeno disuelto (OC01).

14) Se ajustó la bomba de retorno de lodos activados (P03) con la misma configuración utilizada con la bomba de alimentación (P01).

15) Se permitió que el líquido del tanque de lodos activados (T02) fluyese al tanque de sedimentación (T03) y que el agua en la superficie del tanque de sedimentación (T03) fluyese al tanque de cloración (T04).

16) Se encendió la bomba de dosificación de hipoclorito (P04) para afinar el vertido final configurando 12 pulsaciones/hora a fin de permitir los 20 minutos requeridos para actuar.

17) Se tomó una muestra fluido clarificado en el tanque de cloración (T04) a 5, 19 y 24 horas de operación, se caracterizó la muestra y comparó con el agua residual caracterizada.

6. Evaluación de las condiciones de salida del agua tratada.

Las condiciones de salida del agua tratada se evaluaron empleando el procedimiento detallado en la metodología, etapa experimental y análisis, división 4 “Determinación de las condiciones de entrada del agua a tratar”.

7. Comprobación del funcionamiento planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias

a. Se construyó las curvas de operación de la planta con respecto al tiempo evaluando cambios en pH con potenciómetro portátil digital, concentración de sólidos por análisis gravimétrico y material orgánico presente con la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅).

b. Se adquirió y revisó el acuerdo gubernativo No. 236-2006 “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y la disposición de lodos” capítulo 6 “Parámetros para aguas residuales y valores de descarga al alcantarillado público”, específicamente los artículos 27 – 28 en las etapas 3 y 4, así como el artículo 30.

c. Se buscó, adquirió y revisó normas internacionales respecto a los límites máximos permitidos para la descarga agua residual en el alcantarillado público.

1) Costa Rica (decreto N° 33601-MINAE-S de 2007 “Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales”).

2) México (norma ambiental para el Distrito Federal NADIF-015-AGUA-2009 “Límites máximos permisibles de contaminantes en la descarga de aguas residuales de procesos y servicios al sistema de drenaje y alcantarillado del Distrito Federal, provenientes de las fuentes fijas”).

3) Perú (decreto supremo N° 003-2010-MINAM “Límites máximos permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas y municipales”).

4) Colombia (resolución 0631 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de 2015 “Los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos superficiales y a los sistemas de alcantarillado público”).

5) Grandes Lagos y el río Mississippi, (el Comité de aguas residuales de Great Lakes – Mississippi River, Junta de salud pública del Estado y Provincia, y Gerentes Ambientales publicaron “Los estándares recomendados para la recolección y plantas de tratamiento de aguas residuales”, especificando en la tabla 2 “Comparación de aguas sépticas y aguas residuales municipales”).

d. Se comparó las condiciones de salida del agua tratada en la planta de tratamiento aeróbico con la información recopilada en los pasos b y c.

C. Etapa final

1. Análisis estadístico de datos aplicando la técnica de correlación lineal.

2. Elaboración del manual de operación respondiendo a las condiciones establecidas.

a. Se describió el tratamiento aeróbico de aguas residuales con lodos activados.

b. Se realizó el diagrama de flujo del funcionamiento de la planta de tratamiento aeróbico de aguas a escala piloto del laboratorio de operaciones unitarias.

c. Se identificaron y especificaron los equipos utilizados en la planta de tratamiento del laboratorio de operaciones unitarias.

d. Se establecieron los riesgos, seguridad y equipo de protección para los usuarios de la planta de tratamiento.

e. Se definió el procedimiento para la obtención de muestras así como el análisis del afluente y efluente de la planta de tratamiento del laboratorio de operaciones unitarias.

f. Se determinó el proceso de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento aeróbico de aguas, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias respondiendo a las condiciones establecidas.

VII. RESULTADOS

Cuadro 2 Rango de operación de la planta aeróbica de tratamiento de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias

CAUDAL DE ALIMENTACIÓN	1.5 m ³ / día ^a				
SUMINISTRO DE OXÍGENO DISUELTO	3.0 ppm ^b				
CARACTERIZACIÓN	AGUA RESIDUAL (HORAS) ^c		AGUA TRATADA (HORAS) ^d		% REMOCIÓN DEL AGUA TRATADA ^e
PARÁMETRO	0	Incertidumbre	24	Incertidumbre	
pH	6.56	± 0.01	8.59	± 0.01	-
Conductividad eléctrica (µS)	715	± 17.99	405.87	± 17.99	43.24%
SDT (ppm)	501.98	± 0.07	288.94	± 0.07	42.44%
TURBIDEZ (NTU)	78.49	± 0.12	56.59	± 0.02	27.90%
DQO (mg/L COD)	223.67	± 16	135.14	± 16	39.58%
DBO (mg/L BOD)	123.02	± 16	74.33	± 16	39.58%
OD (ppm)	3.66	± 0.10	6.77	± 0.10	-
SST (ppm)	284.07	± 0.06	74.09	± 0.07	73.92%
Temperatura (°C)	23.8	± 0.10	21.4	± 0.10	-
Refracción (% Brix)	2.21	± 0.10	0.03	± 0.10	98.48%

Notas:

a. Mejor valor reportado: 1.5 m³/día, de igual forma se evaluó 0.5 y 1.0 m³/día (ver Apéndice C, página 110 – 122).

b. Mejor valor reportado: 3.0 ppm, de igual manera se evaluó 2.0 y 2.5 ppm (ver Apéndice C, páginas 110 – 122).

c. Los valores de los parámetros físicos y químicos del agua residual se caracterizaron en triplicado (ver Apéndice C, página 110 – 112).

d. Los valores de los parámetros físicos y químicos del agua tratada se caracterizaron en triplicado con pruebas de 24 horas (ver Apéndice C, página 110 – 112).

Notas (continuación):

e. Los valores de porcentaje de reducción se calculan tomando en cuenta los promedios de tres pruebas desarrolladas con la tercer configuración (flujo volumétrico de alimentación $1.5 \text{ m}^3/\text{día}$ y oxígeno disuelto 3.0 ppm), (ver Apéndice C, página 120 – 122).

Figura 10 Balance de masa de la planta aeróbica de tratamiento de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias

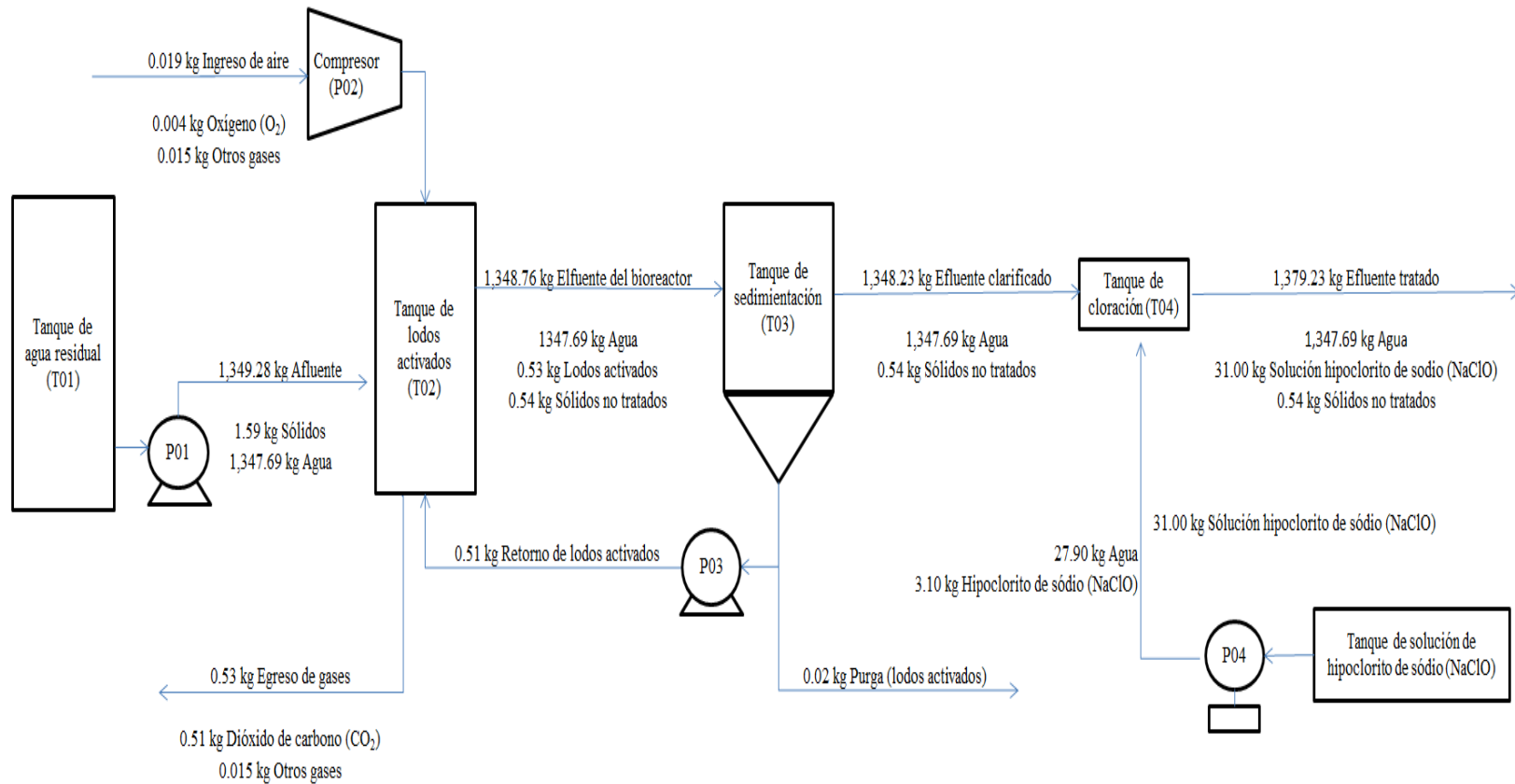


Figura 11 Rendimiento de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales a distinto caudal de alimentación

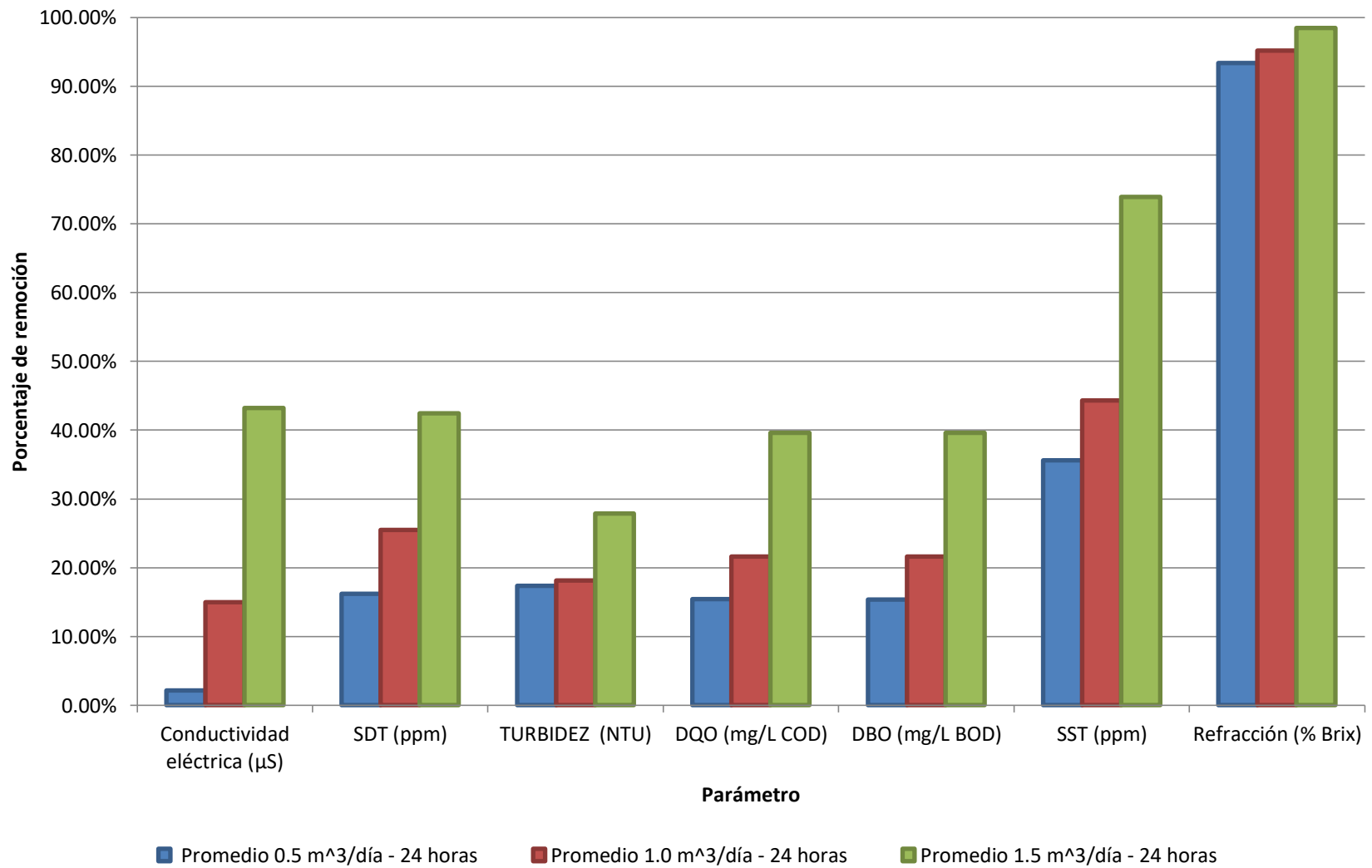


Figura 12 Incremento de pH durante el tratamiento aeróbico del afluente con lodos activados para cada caudal de alimentación

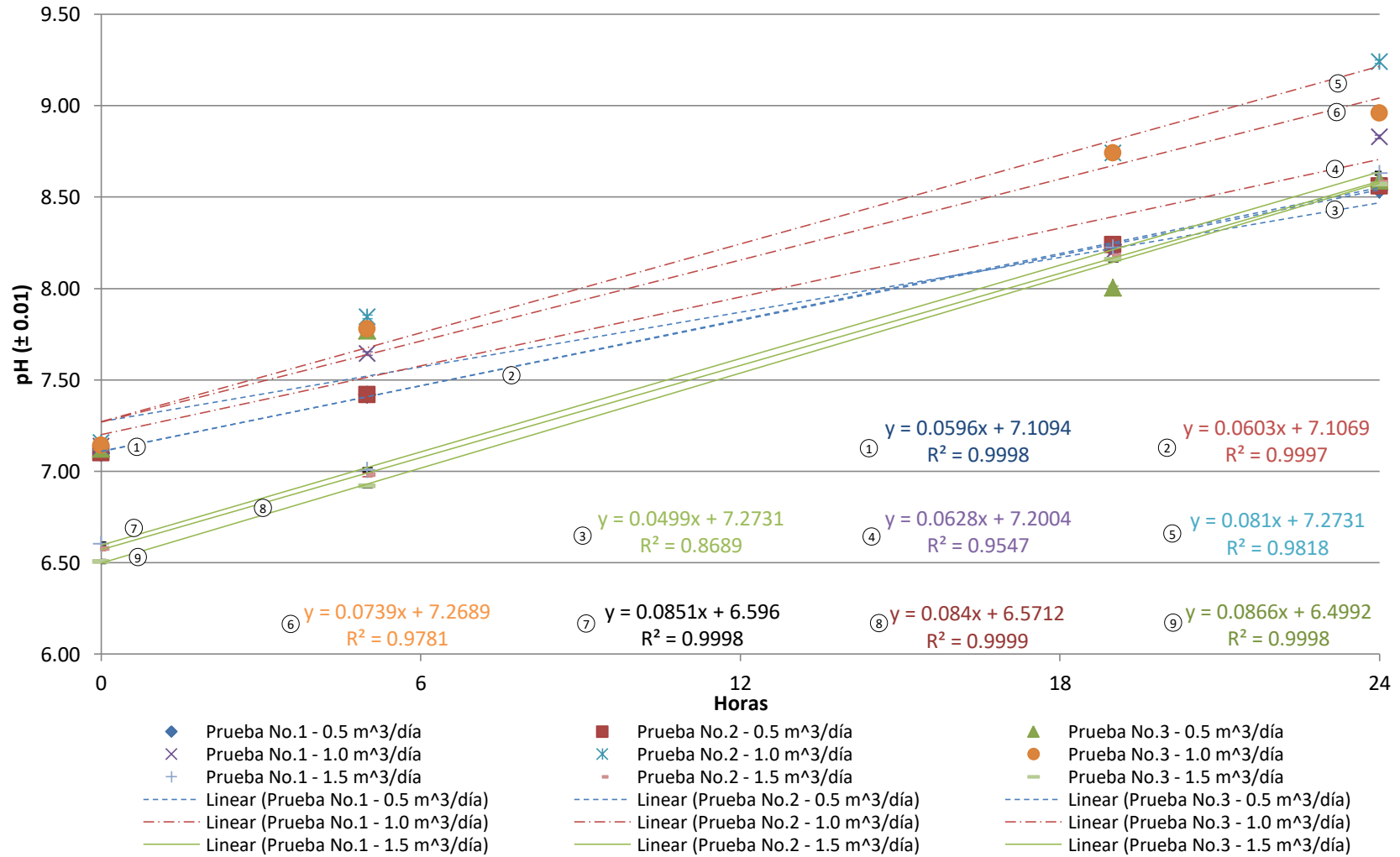


Figura 13 Reducción de la conductividad eléctrica durante el tratamiento aeróbico del afluente con lodos activados para cada caudal de alimentación

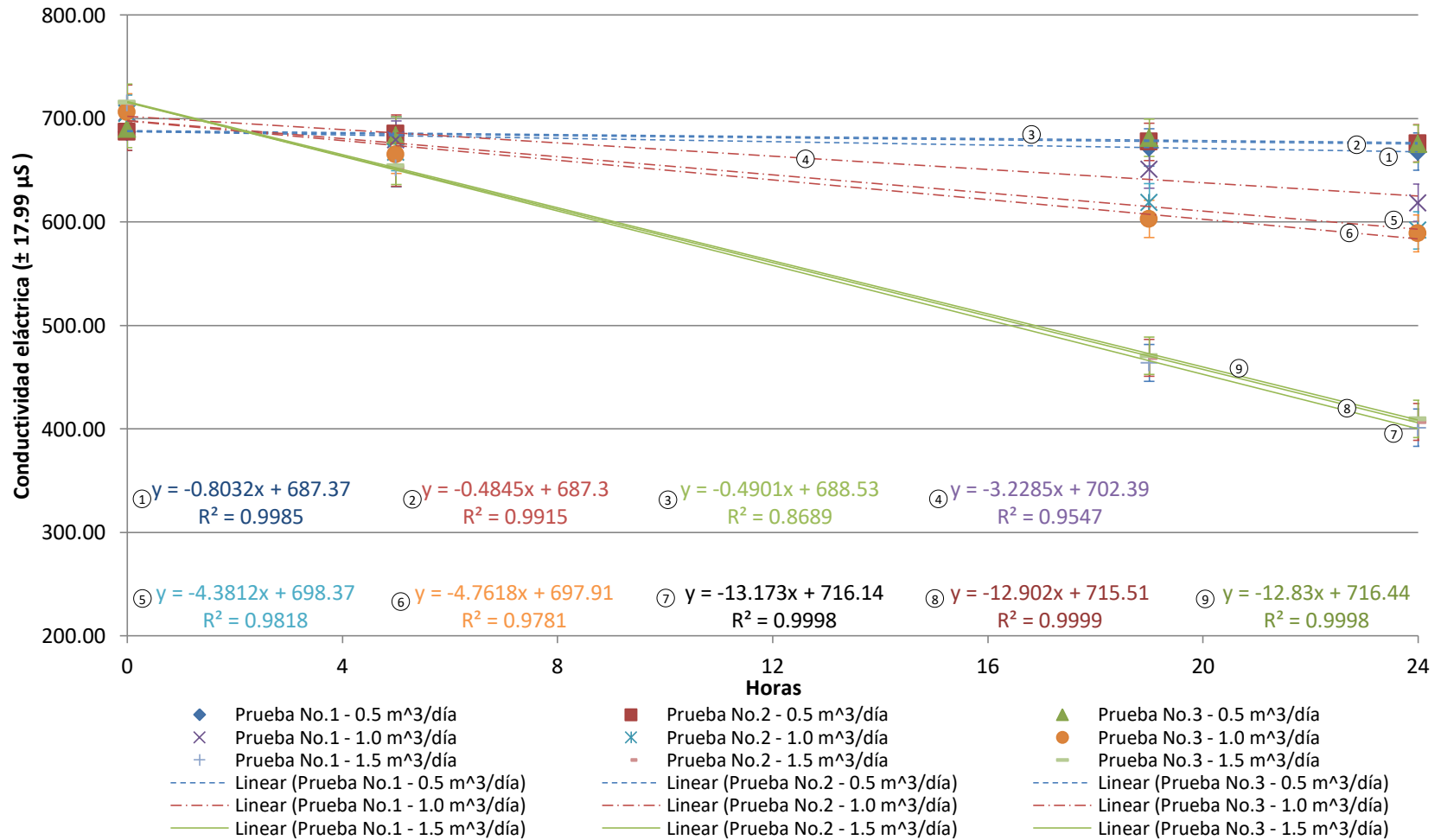


Figura 14 Reducción de los Sólidos Disueltos Totales (SDT) durante el tratamiento aeróbico del afluente con lodos activados para cada caudal de alimentación

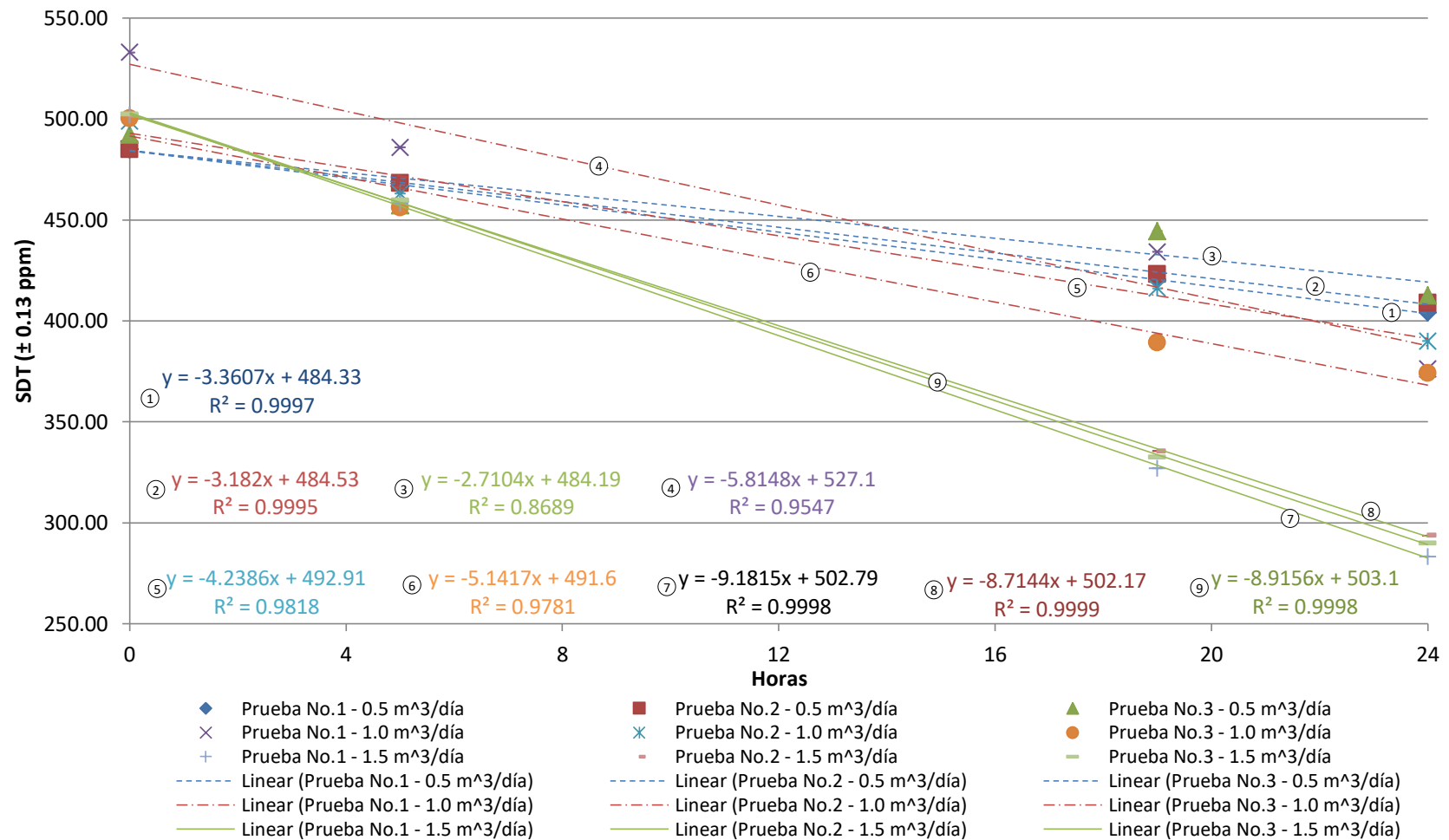


Figura 15 Reducción de la turbidez durante el tratamiento aeróbico del afluente con lodos activados para cada caudal de alimentación

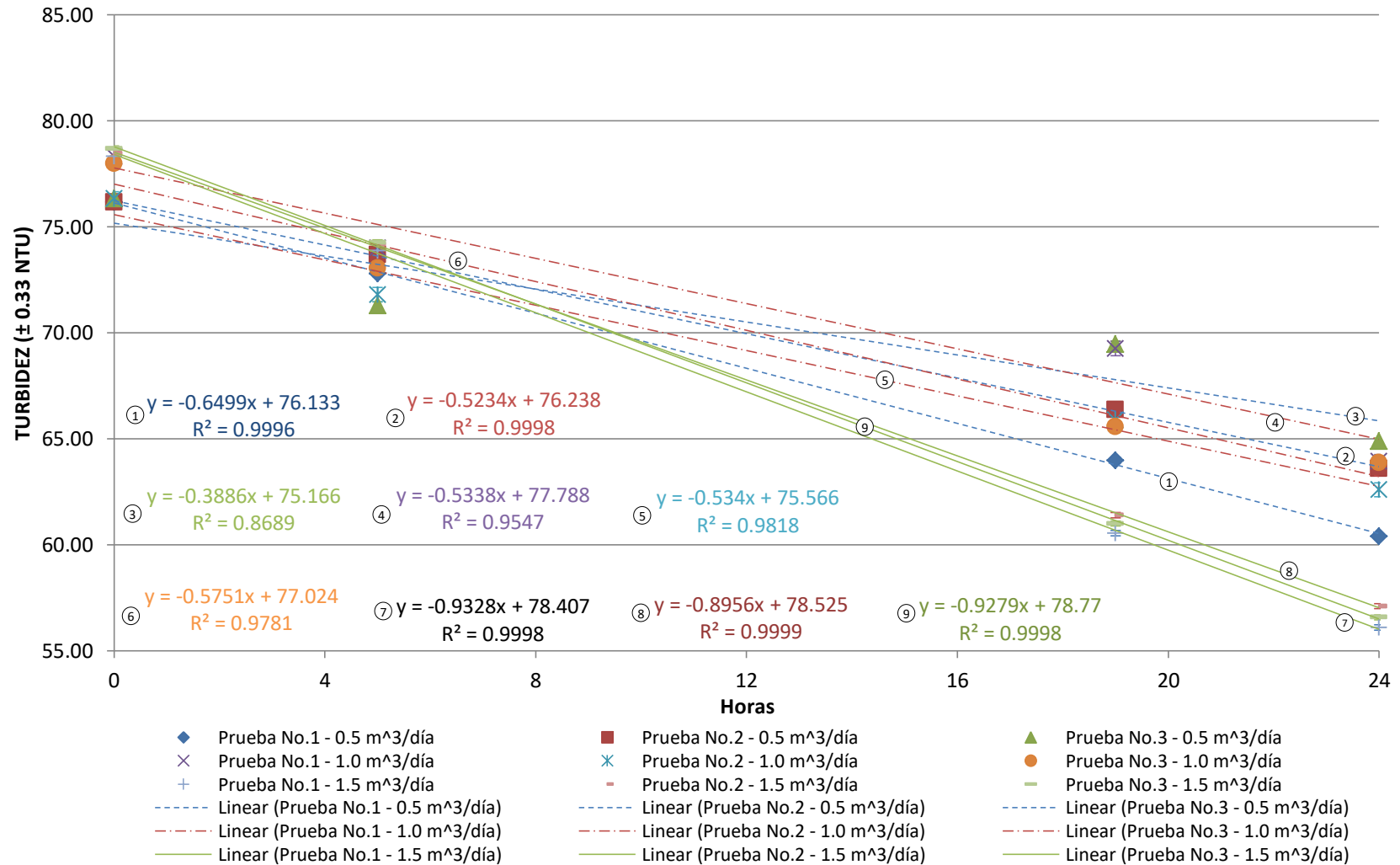


Figura 16 Reducción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) durante el tratamiento aeróbico del afluente con lodos activados para cada caudal de alimentación

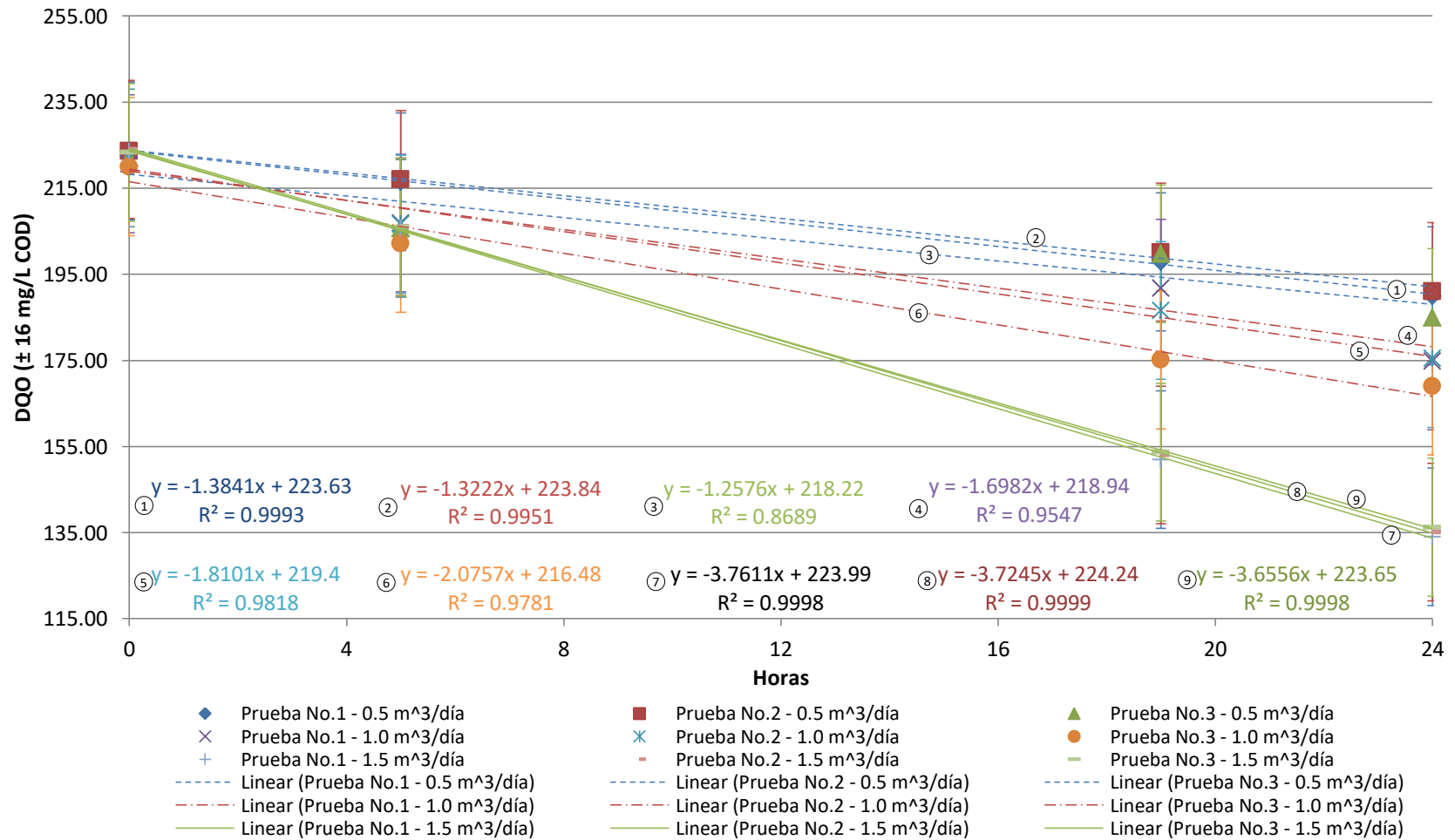


Figura 17 Reducción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) durante el tratamiento aeróbico del afluente con lodos activados para cada caudal de alimentación

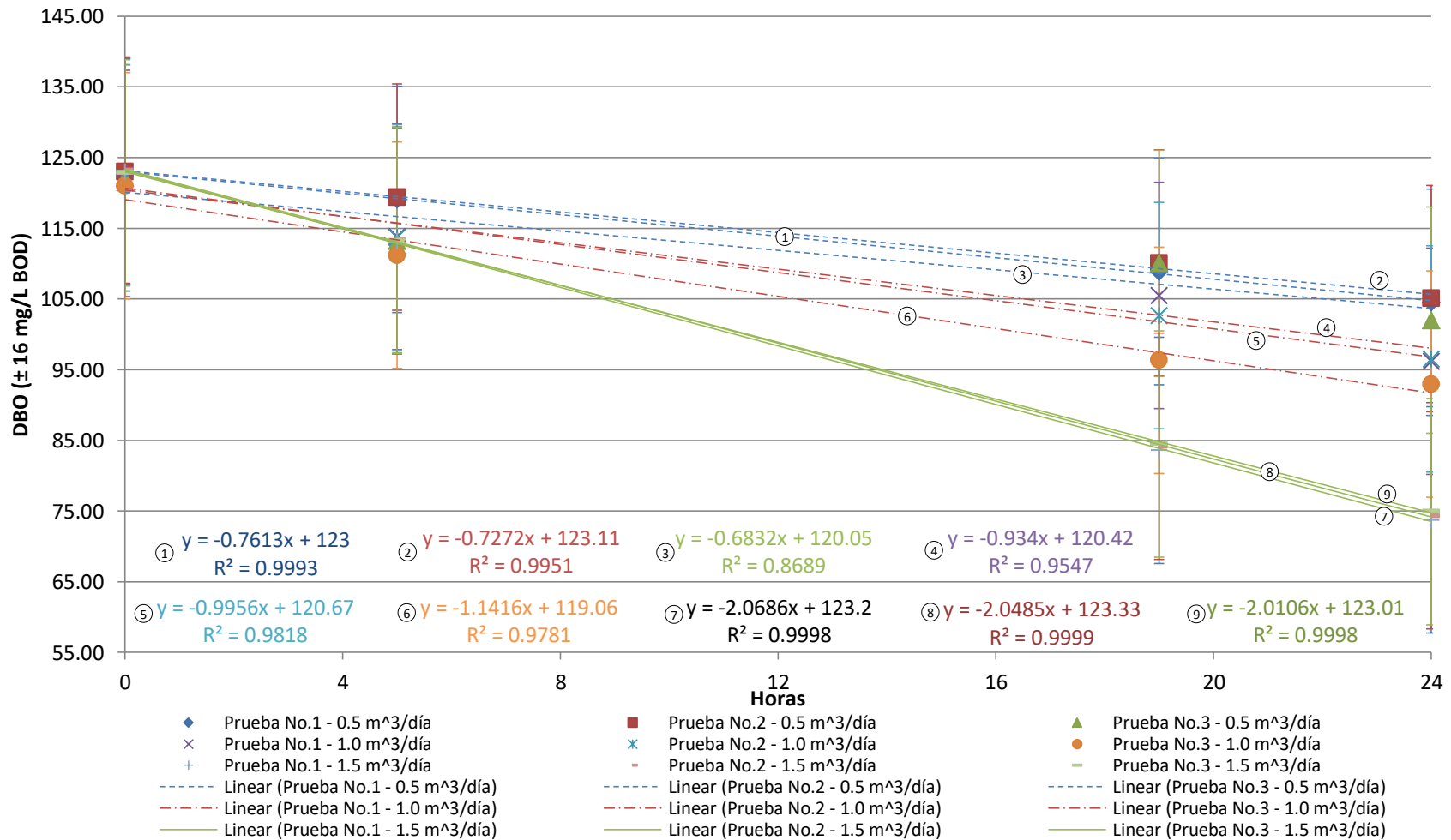


Figura 18 Incremento del Oxígeno Disuelto (OD) durante el tratamiento aeróbico del afluente con lodos activados para cada caudal de alimentación

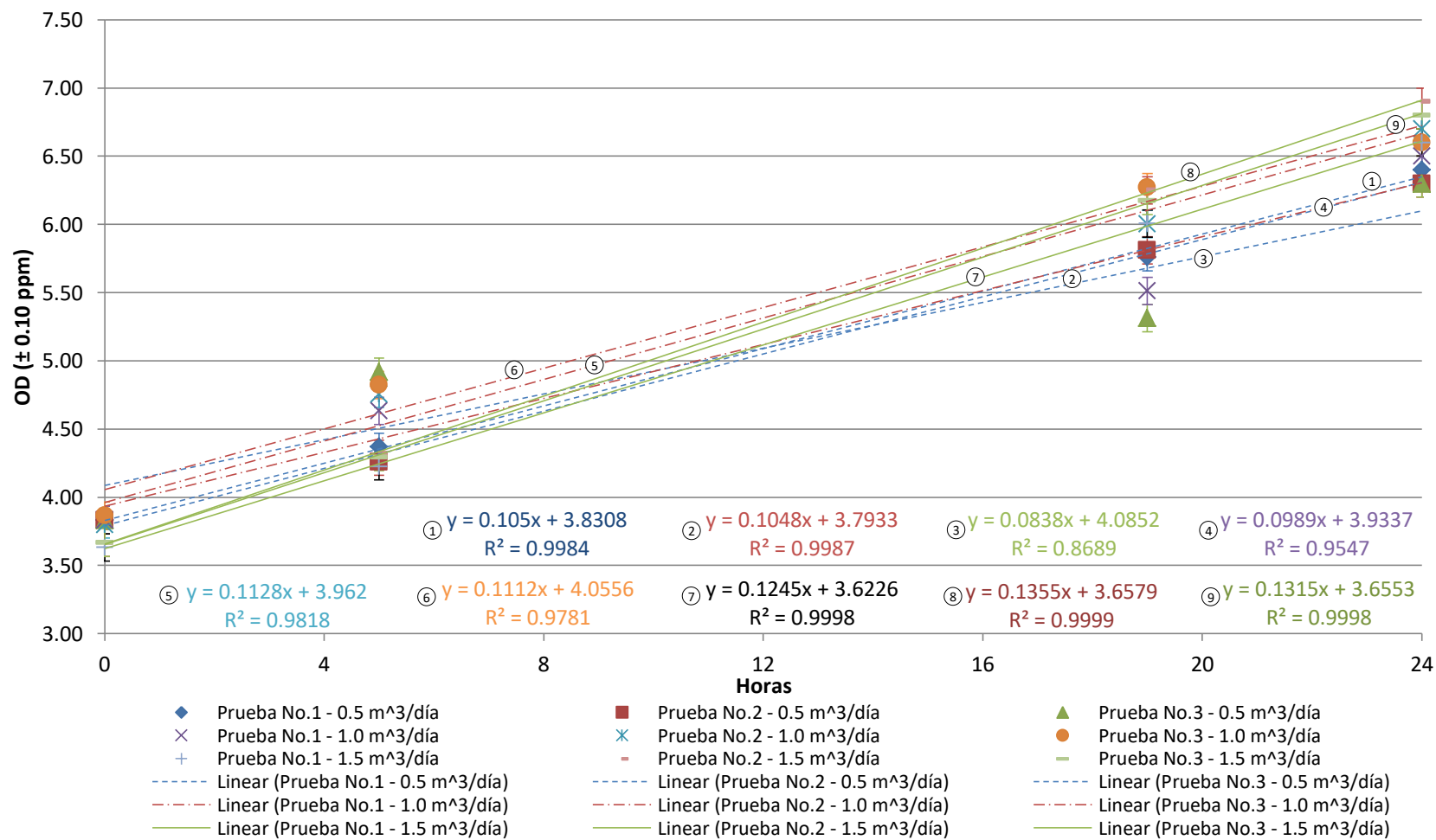


Figura 19 Reducción de los Sólidos Suspendedos Totales (SST) durante el tratamiento aeróbico del afluente con lodos activados para cada caudal de alimentación

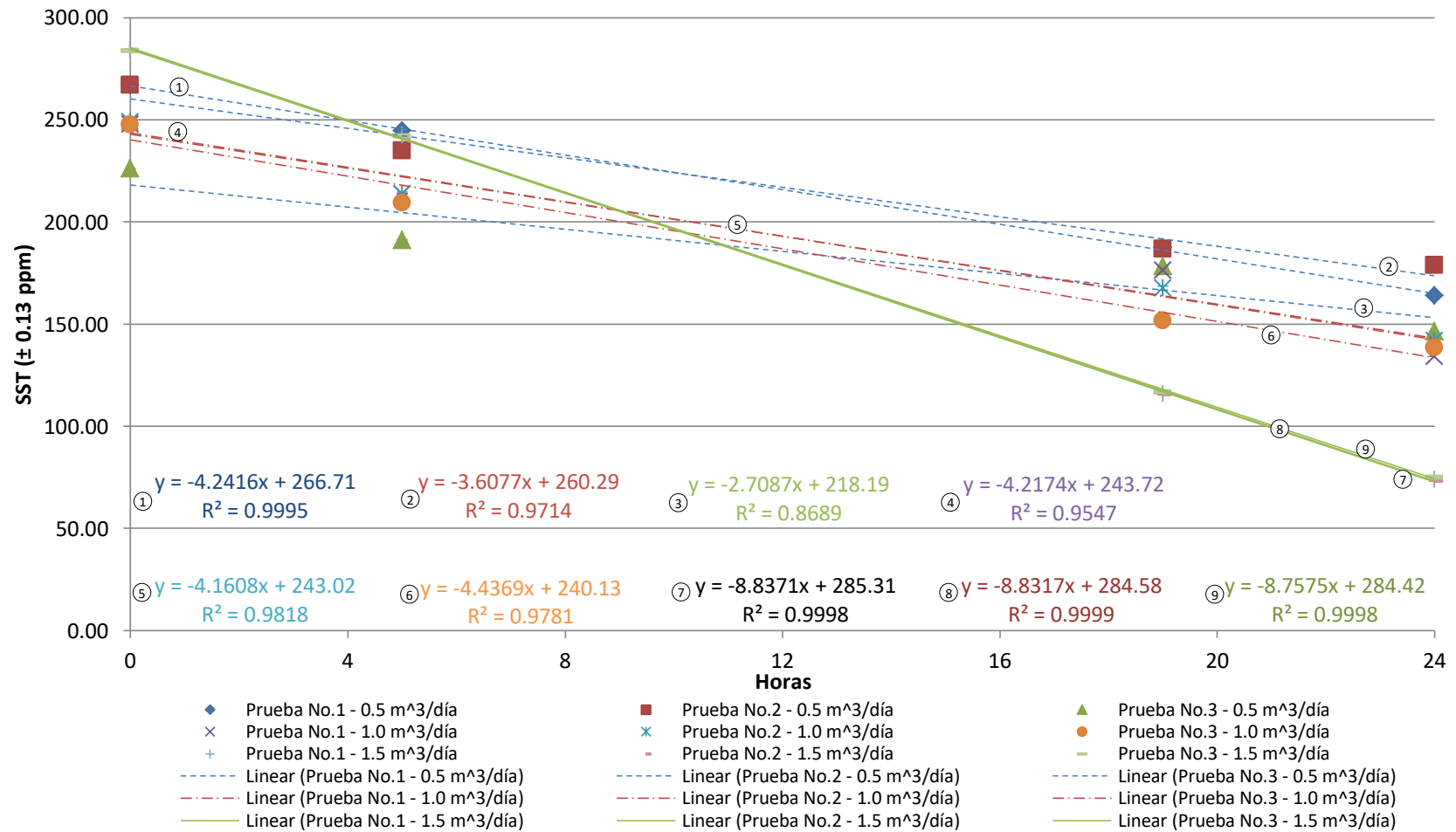


Figura 20 Variación de temperatura durante el tratamiento aeróbico del afluente con lodos activados para cada caudal de alimentación

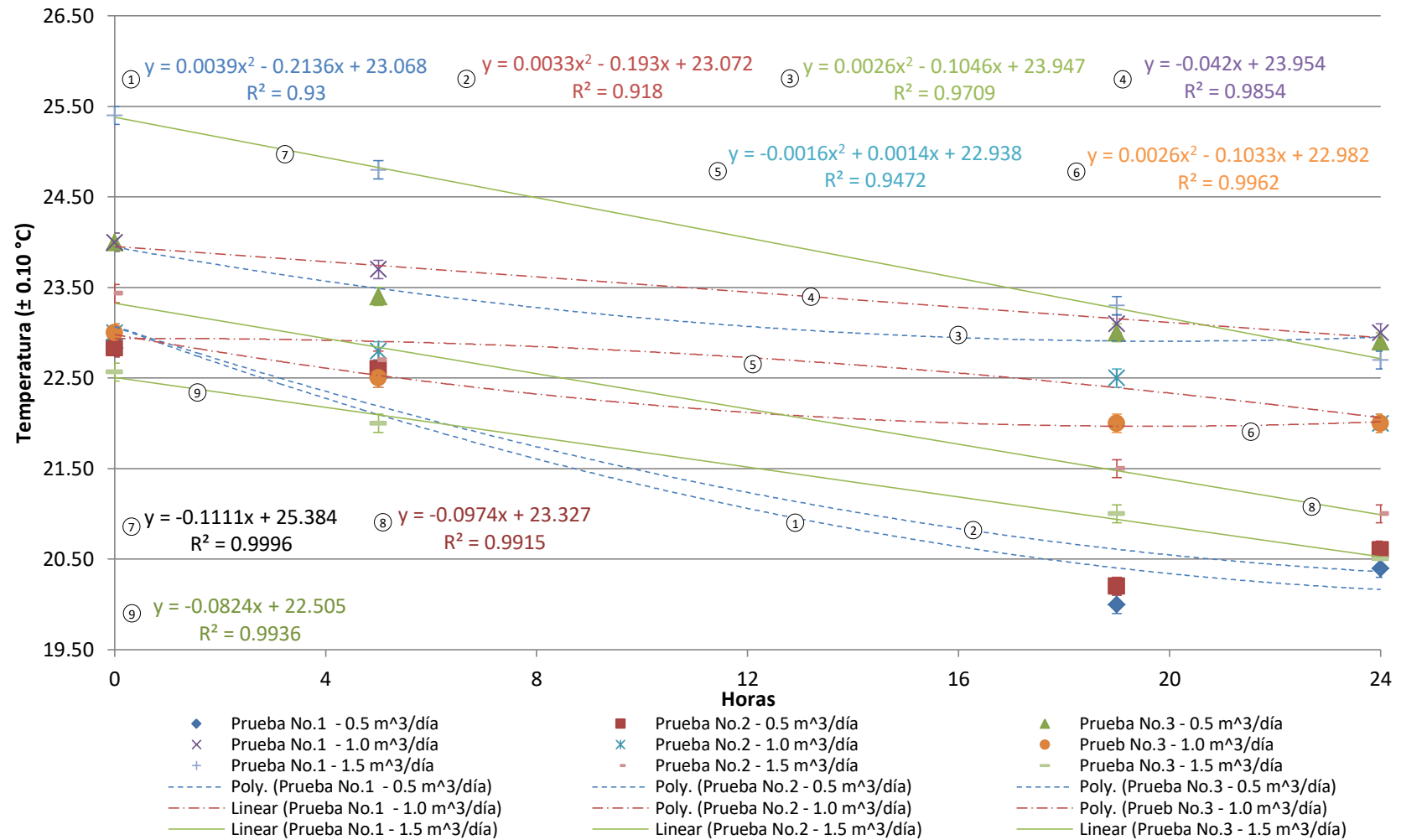
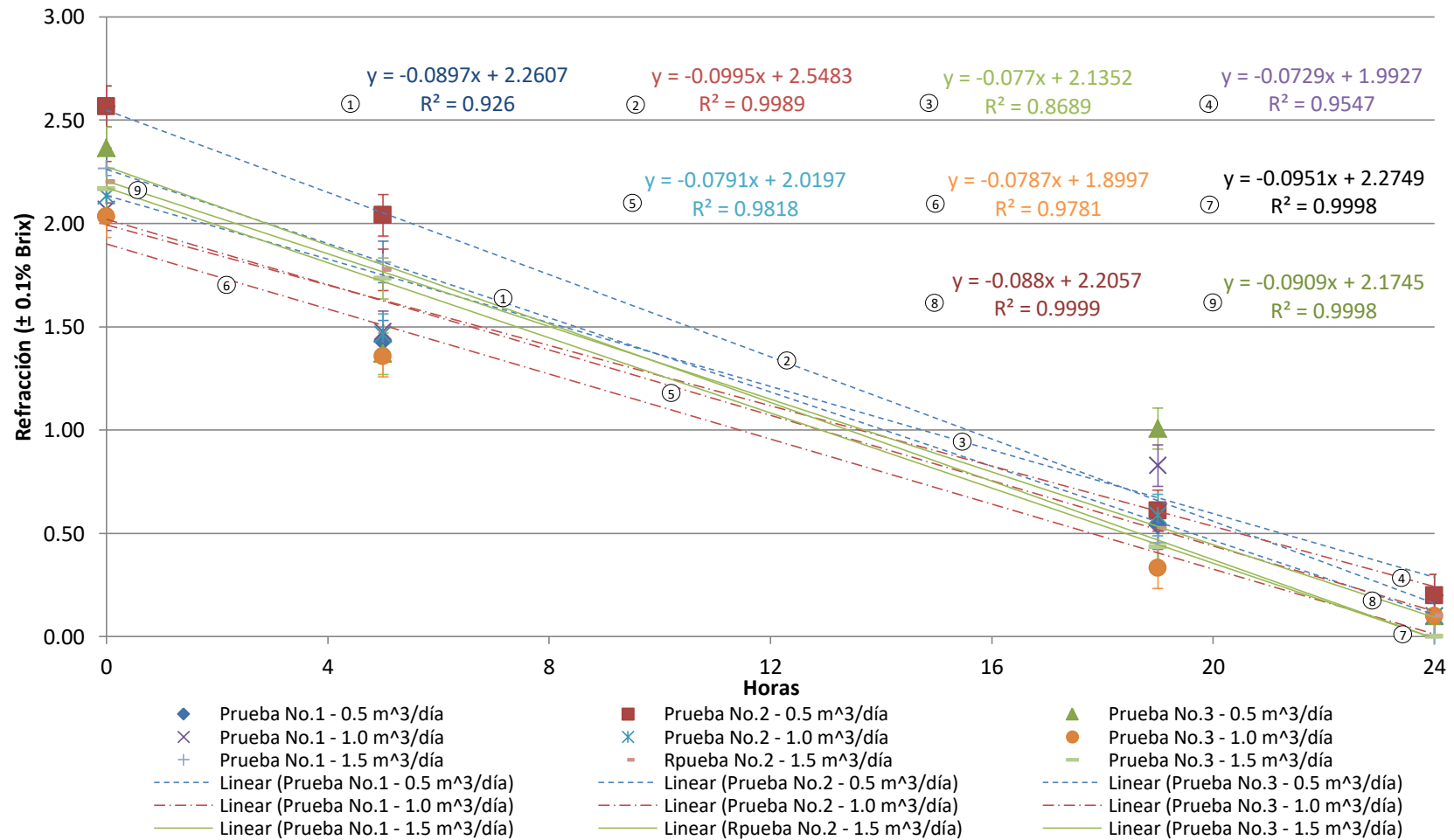


Figura 21 Reducción de la refracción durante el tratamiento aeróbico del afluente con lodos activados para cada caudal de alimentación



El Manual de Operación y Mantenimiento de la Planta de Tratamiento Aeróbico de Aguas Residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias se presenta como apéndice A.

VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El tratamiento de aguas residuales cuenta con distintos medios físicos, químicos, biológicos o combinación de los antes mencionados para la supresión de los contaminantes presentes en los efluentes provenientes de la actividad humana, evitando la contaminación en los cuerpos de agua y suelos. Sin embargo, en Guatemala se aplican pocas estrategias reactivas y proactivas para la protección de los ecosistemas, puesto que el 90% de los ríos están altamente contaminados por desechos sólidos, aguas residuales domésticas, industriales, entre otros. Por los motivos antes mencionados, se inició con la etapa de investigación para ejecutar el presente trabajo de graduación.

En la etapa de investigación se estudió el tratamiento biológico aerobio de biomasa en suspensión por lodos activados para comprender la operación de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias, así como la identificación de sus componentes, los requerimientos y procedimiento de activación de lodos para el arranque de la planta. En cuanto a los requerimientos del agua residual a ingresar en la planta de tratamiento, se emplearon las especificaciones descritas por el fabricante de la planta de tratamiento en su respectiva guía de usuario para evitar un corto circuito en el flujo de recirculación, obstrucción o daño en sensores, bombas y tubería. En el caso del procedimiento de activación de lodos, se utilizó como base la sección 5 (Running the product) de la guía de usuario entregada por el fabricante.

Seguidamente, se aprendió el correcto funcionamiento de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, ya que es imperativo para determinar las curvas de operación de la planta con respecto al tiempo y la elaboración del manual de operación y mantenimiento, por tal motivo fue necesario calibrar y efectuar pruebas previas con agua potable. Al trabajar con las pruebas previas se observó inconvenientes con la planta tales como residuos sólidos de mayor tamaño al permitido en los requerimientos del agua

residual a ingresar dentro de la tubería, disminución del pH del agua potable hasta 6.2, enturbiamiento del agua potable, error de lectura por parte de los sensores de flujo, flujo máximo reflejado en los controladores PID (alimentación de agua residual y retorno de lodos) configurados con el modo automático y desconexión de bombas (alimentación de agua residual y retorno de lodos) sin importar que los equipos estuviesen encendidos o apagados.

Derivado de los problemas anteriores se decidió desinstalar y limpiar las tuberías por donde se transportan los líquidos al igual que los sensores de flujo, realizar lavados y retro-lavados con agua potable para remover residuos sólidos atrapados en las bombas de alimentación de agua residual y retorno de lodos. Se concluyó con la fase de limpieza al momento de desaparecer la turbiedad, acidez y residuos sólidos en el agua potable; se presentó una pequeña mejora en los controladores PID (alimentación de agua residual y retorno de lodos) configurados con el modo automático marcando distintas velocidades de flujo con las bombas encendidas o apagadas, no obstante la desconexión persistió. En consecuencia se optó por configurar el modo manual en los controladores antes mencionados, con la configuración manual las bombas P01 y P03 trabajan sin desconexiones.

La calibración de la bomba de dosificación de cloro, la sonda de medición de pH y la termocupla se desarrollaron sin inconvenientes. La calibración de la bomba de alimentación registró su mejor operación con caudales de 4.0 – 7.0 m³/día con un porcentaje de error menor al 2% respecto al valor teórico configurado en el controlador PID (la calibración se efectuó con la conexión de entrada temporal y tanque plástico de 0.21 m³), no fue posible calibrar con los afluentes de 0.5 y 1.0 m³/día por la disposición en la conexión de entrada temporal y el exceso en la cabeza estática de succión positiva. La calibración de la bomba de retorno de lodos registró su mejor operación con el flujo volumétrico de 2.5 m³/día con un porcentaje de error de 2.19% respecto al valor teórico configurado en el controlador PID.

Después de finalizar la fase de calibración se evaluó el agua residual procedente del digestor anaerobio del Laboratorio de Operaciones Unitarias, compuesta principalmente de excremento animal, follaje y residuos de alimentos, respecto a los requerimientos para el arranque de la planta y activación de lodos. El agua residual reportó: viscosidad de 0.018 Pa s, concentración de sólidos de 10.60 kg/m³, Demanda Química de Oxígeno (DQO) de 1.2 kg/m³, relación Alimento/Microorganismos (A/M, en inglés F/M ratio) de 0.42, pH de 6.6, temperatura de 20.7 °C y no cumplió con el tamaño de partículas (0.05 – 0.2 m) (el 90% de las partículas deben ser de un tamaño menor a 283 µm, siendo el máximo permitido 1,000 µm.). Por consiguiente, se realizó análisis granulométrico de arena fina para simular el material particulado en el agua residual y definir el medio de filtración que cumpla con el tamaño de partícula.

Se comparó con manta para filtración y cedazo disponible en el Laboratorio de Operaciones Unitarias. La manta para filtración permite pasar partículas menores e iguales a 74 µm equivalente a un tamiz Mesh No. 200 y el cedazo permite pasar partículas menores e iguales a 0.47 cm equivalente a un tamiz Mesh No. 4; ambos casos no cumplen con el tamaño de partícula requerido. Para satisfacer el requerimiento del tamaño de partícula se adquirió cedazo de acero inoxidable Mesh No. 60, con este cedazo de acero inoxidable se construyó un tamiz con las dimensiones de la boca del tanque plástico provisional de 0.21 m³. Adicionalmente, se construyó otro tamiz usando el cedazo equivalente a un tamiz Mesh No. 4 para remover sólidos de gran tamaño y protección del primer tamiz construido.

Para la operación continua de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitaria se instalaron: el tanque de agua residual (T01), la tubería de salida con la válvula de control (V01) y válvula de purga (V02) empleando tubo flexible suministrado por el fabricante, y manguera plástica (de longitud suficiente para descargar en el alcantarillado) en las válvulas de purga (V01), (V06), (V09) y (V10). Ahora la planta cuenta con tres etapas.

La primera etapa es de pre-tratamiento, en donde se remueven los sólidos indeseados por tamizado y homogenización del agua a tratar en el tanque de agua residual (T01) por agitación. La segunda etapa es de tratamiento secundario, en donde los procesos biológicos eliminan del agua residual las sustancias biodegradables disueltas. Finalmente, la tercera etapa es de desinfección del efluente dosificando una solución de hipoclorito de sodio (NaClO) para garantizar la reducción de coliformes fecales.

Debido a la cantidad de agua residual requerida para operar la planta de forma continua y la disponibilidad de la misma en el digestor anaerobio del Laboratorio de Operaciones Unitarias, se decidió realizar una dilución de agua residual. La dilución de agua residual se definió por los límites de medición de los equipos utilizados para caracterizar las condiciones del agua que entra y sale de la planta de tratamiento, especialmente en la medición de los sólidos disueltos y suspendidos totales por análisis gravimétrico. Tanto en la activación de lodos, el arranque de la planta de tratamiento y para todas las pruebas se preparó la solución de agua residual al 10% respecto a la capacidad del tanque de agua residual (T01).

Con el fin de activar los lodos, se siguió el procedimiento obligatorio establecido por el fabricante en la sección 5 (Running the product) de la guía de usuario y el tiempo recomendado en la literatura (12 horas) para que inicie la formación de lodos. A pesar de ello se presentó mucha formación de espuma en la parte superior del reactor biológico por exceso de aireación y agitación turbulenta, el agua en tratamiento presentaba una coloración café claro con aspecto líquido y jabonoso, especialmente sin formación de flóculos. Por estos motivos se modificó la aireación a 3.0 ppm para mantener un burbujeo suave y al controlador del agitador a 330 rpm (equivalente a 1/4 de vuelta) para un movimiento del líquido equivalente a las olas.

Se requirieron seis horas adicionales para obtener un proceso continuo en la formación de lodos. Se definieron y comprobaron nuevos tiempos con el objetivo de mejorar la activación de lodos, tres horas para iniciar los procesos biológicos (controlador del sensor de oxígeno disuelto a 20.0 ppm y agitador a máxima velocidad [1,320 rpm]) y nueve horas para la generación constante de lodos (controlador del sensor de oxígeno disuelto a 3.0 ppm y controlador del agitador a 1/4 de vuelta). El agua en tratamiento adquirió una coloración café oscuro con aspecto más viscoso sin ser pegajoso después de dos semanas, completando el arranque de la de la planta de tratamiento.

La evaluación del funcionamiento de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias, se desarrolló con el rango de afluentes de 0.5, 1.0 y 1.5 m³/día por la cantidad de solución al 10% de agua residual requerida para ejecutar las pruebas y la variación en la caracterización de la misma; manteniendo el oxígeno disuelto en niveles de 2.0, 2.5 y 3.0 ppm para que los microorganismos usen el oxígeno tan rápido como es suministrado y que ocurra el proceso de nitrificación (concentración mínima de oxígeno disuelto es de 2.0 ppm). Se cuantificaron en existencia 48 viales reactivos de digestión empleados en la determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), por lo cual se seleccionaron las tres combinaciones de las variables controladas más representativas (oxígeno disuelto de 2.0 ppm y caudal de alimentación de 0.5 m³/día; oxígeno disuelto de 2.5 ppm y caudal de alimentación de 1.0 m³/día; oxígeno disuelto de 3.0 ppm y caudal de alimentación de 1.5 m³/día) a fin de caracterizar en triplicado con pruebas de 24 horas tanto el agua residual antes de ingresar a la planta de tratamiento aeróbico como el agua tratada a las 5, 19 y 24 horas de operación. Además, se configuró una hoja de cálculo para establecer la remoción de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la nitrificación, incluyendo el tiempo de retención en el tanque de aireación.

Al iniciar las pruebas con el rango de afluentes especificados anteriormente, se notó un inconveniente con la bomba de retorno de lodos de velocidad variable (P03). La bomba (P03) se desconectaba minutos después (2 – 6 minutos) de configurarla con la relación de retorno de lodos computada en la hoja de cálculo. Se valoraron distintas relaciones de retorno especificadas en la literatura para reactores biológicos de mezcla completa (0.25 – 1.0). Con la valoración se definió que la planta de tratamiento aeróbico trabaja de forma continua con la relación de retorno de lodos de 1.0. De esta forma lograr la degradación de la materia orgánica por mezcla, reproducción, sobrevivencia y crecimiento de la masa de microorganismos produciendo una masa activa.

A causa de la modificación en el tanque de agua residual y la conexión de entrada a la bomba de alimentación de velocidad variable (P01), se verificó la calibración previa de la bomba (P01) en todas las pruebas efectuadas, comparando el valor teórico configurado en el controlador PID con el volumen de agua residual retirado del tanque (T01). Las comparaciones se realizaron tres veces en forma consecutiva con un intervalo de 2 horas luego de iniciar las pruebas. El flujo volumétrico de alimentación de 1.5 m³/día mantuvo la calibración previa hecha a la bomba de alimentación (P01). A consecuencia de la disposición en la conexión de entrada temporal y exceso en la cabeza estática de succión positiva, los caudales de 0.5 y 1.0 m³/día no se pudieron calibrar, por tanto se evaluó cada flujo sin modificación. Pesé al cambio del tanque y la conexión de entrada, no coincidió el afluente teórico con el experimental. En seguida se extrapoló ambos flujos en la curva de calibración de la bomba (P01), el ajuste por la curva de calibración correspondió al volumen de agua residual retirado del tanque (T01) durante la comprobación. De modo que se validó la calibración previa.

Las pruebas con el afluente de 0.5 m³/día y oxígeno disuelto de 2.0 ppm, expusieron el peor rendimiento de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales. Con una reducción del: 2.15% en la conductividad eléctrica, 15.37% en la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), 15.44% en la Demanda Química de Oxígeno (DQO),

16.19% en los Sólidos Disueltos Totales (SDT), 17.39% en la turbidez y 35.58% en los Sólidos Suspendidos Totales (SST). Todos los ensayos efectuaron con un tiempo de retención el tanque de aireación de 14 horas y 24 minutos, y producción de biomasa de 0.03 kg SSV/día. Sin embargo, el consumo total de agua residual del tanque (T01) fue deficiente: 22.00% en la primer prueba, 20.38% en la segunda prueba y 21.48% en la tercer prueba; el problema se atribuye al bombeo intermitente de la bomba de alimentación de agua residual (P01) luego de cinco horas continuas de operación. Conjuntamente, la relación Alimento/Microorganismos (A/M, en inglés F/M ratio) fue de 0.10 (pruebas uno y dos) y 0.11 (prueba tres), valores por debajo al respectivo requerimiento de activación de lodos para el arranque de la planta de tratamiento de aguas.

En cuanto a las prueba con el afluente de 1.0 m³/día y oxígeno disuelto de 2.5 ppm, mostraron un rendimiento menor de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales. Los parámetros en promedio se redujeron en: 14.97% conductividad eléctrica, 18.16% turbidez, 21.64% Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO), 25.51% Sólidos Disueltos Totales (SDT) y 44.29% Sólidos Suspendidos Totales (SST). Los ensayos se llevaron a cabo con un tiempo de retención el tanque de aireación de 7 horas y 12 minutos, y producción de biomasa de 0.07 kg SSV/día. Igualmente relación Alimento/Microorganismos (A/M) fue inferior al respectivo requerimiento de activación de lodos para el arranque de la planta de tratamiento de aguas, siendo de: 0.21 en la primer y segunda prueba, y 0.20 en la tercera prueba. Incluso se presentaron problemas de bombeo intermitente con la bomba alimentación de agua residual (P01), con un consumo total de agua residual del tanque (T01) de: 68.61% en la primer prueba, 63.85% en la segunda prueba y 61.82% en la tercer prueba.

Es necesario especificar que, la variación en el consumo total de agua residual del tanque (T01) para los caudales de alimentación de 0.5 y 1.0 m³/día no tuvo incidencia ni relación con las condiciones de salida del agua tratada de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Por último, las pruebas con el afluente de 1.5 m³/día y oxígeno disuelto de 3.0 ppm presentaron el mejor funcionamiento evaluado en la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales. La bomba alimentación de agua residual (P01) operó sin problemas de forma continua en cada ensayo, cumpliendo con la relación Alimento/Microorganismos (A/M) requerida para la de activación de lodos y el arranque de la planta de tratamiento de aguas; 0.29 en la primer prueba, 0.28 en la segunda prueba y 0.35 en la tercer prueba. Así mismo, en cada ensayo el tiempo de retención el tanque de aireación 4 horas y 48 minutos, y producción de biomasa de 0.10 kg SSV/día. En promedio, los parámetros fueron reducidos: turbidez 27.90%, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) 39.58%, Sólidos Disueltos Totales (SDT) 42.44%, conductividad eléctrica 43.27% y Sólidos Suspendidos Totales (SST) 73.92%.

La determinación de las curvas de operación de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias, exhibió mayor acierto en la reducción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Disueltos Totales (SDT), Sólidos Suspendidos Totales (SST), e incremento de pH y oxígeno disuelto con el flujo volumétrico de 1.5 m³/día. Únicamente con la reducción de la conductividad eléctrica el caudal de alimentación de 0.5 m³/día fue más preciso. La correlación cuadrática de las distintas curvas de operación se aproximan a la unidad, especialmente las pruebas con el afluente de 1.5 m³/día con valores de 0.9998 y 0.9999, demostrando que los resultados del agua tratada a las 5, 19 y 24 horas de operación se apegan al modelo lineal y pueden replicarse.

Finalmente se compararon las condiciones de salida del agua tratada de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales con normas nacionales e internacionales para la descarga de agua residual en el alcantarillado público. En relación con las normas de Guatemala, el acuerdo gubernativo No. 236-2006 “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y la disposición de lodos” capítulo 6 “Parámetros para aguas residuales y valores de descarga al alcantarillado público”, específicamente los artículos 27 – 28 en las etapas 3 y 4, así como el artículo 30; la caracterización del agua tratada con los flujos volumétricos 0.5, 1.0 y 1.5 m³/día cumplen con sus respectivos parámetros en los artículos mencionados anteriormente.

Referente a las normas de Costa Rica, el decreto N° 33601-MINAE-S de 2007 “Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales” capítulo 3 “Límites para vertido de aguas residuales”, especialmente la Tabla 2 “Límites máximos permisibles para los parámetros universales de análisis obligatorio de aguas residuales vertidas en alcantarillados sanitarios”; las condiciones de salida del agua tratada satisfacen con sus respectivos parámetros con los caudales de alimentación 0.5, 1.0 y 1.5 m³/día.

En el caso de las normas de México, norma ambiental para el Distrito Federal NADIF-015-AGUA-2009 “Límites máximos permisibles de contaminantes en la descarga de aguas residuales de procesos y servicios al sistema de drenaje y alcantarillado del Distrito Federal, provenientes de las fuentes fijas” Tabla 2 “Límites Máximos Permisibles de calidad de agua residual”; la caracterización del agua tratada con los flujos volumétricos 0.5, 1.0 y 1.5 m³/día cumplen con sus respectivos límites máximos permisibles. En cuanto a las normas de Perú, el decreto supremo N° 003-2010-MINAM “Límites máximos permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas y municipales”, solamente el afluente de 1.5 m³/día obedecen todos los límites máximos permisibles.

En 2014, el Comité de aguas residuales de Great Lakes – Mississippi River, Junta de salud pública del Estado y Provincia, y Gerentes Ambientales publicaron “Los estándares recomendados para la recolección y plantas de tratamiento de aguas residuales”, especificando en la Tabla 2 “Comparación de aguas sépticas y aguas residuales municipales”; los parámetros evaluados en los caudales de alimentación 0.5, 1.0 y 1.5 m³/día cumplen con los estándares recomendados para el agua residual. Por último, la resolución 0631 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia en 2015 estableció “Los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos superficiales y a los sistemas de alcantarillado público” capítulo 8 “Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de agua residuales no domésticas – ArnD al alcantarillado público”. Exclusivamente, el afluente de 1.5 m³/día obedecen todos los límites máximos permisibles.

IX. CONCLUSIONES

La activación y arranque de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias requiere tres horas para iniciar los procesos biológicos (oxígeno disuelto a 20.0 ppm y agitador a 1,320 rpm), nueve horas para la generación constante de lodos (oxígeno disuelto a 3.0 ppm y agitador a 330 rpm) y dos semanas después de activar los lodos para completar el arranque biológico, operando de forma continua con la relación de retorno de lodos de 1.0.

Los parámetros físicos y químicos de entrada del agua a tratar, determinados en las pruebas con el caudal de alimentación de 0.5 m³/día y oxígeno disuelto de 2.0 ppm, fueron en promedio: pH 7.11 ± 0.01, oxígeno disuelto (OD) 3.83 ± 0.10 ppm, Sólidos Disueltos Totales (SDT) 487.44 ± 0.07 ppm, Sólidos Suspendedos Totales (SST) 253.44 ± 0.06 ppm, conductividad eléctrica 688.00 ± 17.99 µS y turbidez 76.12 ± 0.15 NTU.

Los parámetros físicos y químicos de entrada del agua residual, determinados en las pruebas con el flujo volumétrico de 1.0 m³/día y oxígeno disuelto de 2.5 ppm, fueron en promedio: pH 7.15 ± 0.01, oxígeno disuelto (OD) 3.83 ± 0.10 ppm, Sólidos Disueltos Totales (SDT) 510.78 ± 0.10 ppm, Sólidos Suspendedos Totales (SST) 248.22 ± 0.09 ppm, conductividad eléctrica 705.44 ± 17.99 µS y turbidez 77.55 ± 0.33 NTU.

Los parámetros físicos y químicos de entrada del agua a tratar, determinados en las pruebas con el afluente de 1.5 m³/día y oxígeno disuelto de 3.0 ppm, fueron en promedio: pH 6.56 ± 0.01, oxígeno disuelto (OD) 3.66 ± 0.10 ppm, Sólidos Disueltos Totales (SDT) 501.98 ± 0.07 ppm, Sólidos Suspendedos Totales (SST) 284.07 ± 0.06 ppm, conductividad eléctrica 715.00 ± 17.99 µS y turbidez 78.49 ± 0.12 NTU.

Los requerimientos definidos para la activación de lodos y el arranque de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias son: el 90% de las partículas deben ser de un tamaño menor a 283 μm (siendo el máximo permitido 1,000 μm), viscosidad del agua residual de situarse en el rango de 0.005 – 0.02 Pa s, concentración de sólidos debe ser de 2.28 – 10.62 kg/m^3 o 62% v/v, el límite en la demanda química de oxígeno (DQO) es de 1.7 kg/m^3 , relación Alimento/Microorganismos (A/M, en inglés “F/M ratio”) aceptable es de alrededor de 0.25 a 0.45, los niveles de pH de mejor funcionamiento son de 6.5 a 8.5, y el rango temperatura del agua residual para operación es de 10 a 37 °C.

El procedimiento de activación de lodos para el arranque de la planta aeróbica de tratamiento de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias se detalla en la metodología, etapa de investigación, división 2, sub-división b, páginas 34 – 36.

La determinación de las curvas de operación de la planta aeróbica de tratamiento de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias se presenta en los resultados, páginas 63 – 72.

Los parámetros físicos y químicos de salida del agua tratada, determinados en las pruebas con el caudal de alimentación de 0.5 $\text{m}^3/\text{día}$ y oxígeno disuelto de 2.0 ppm, fueron en promedio: pH 8.56 ± 0.01 , Sólidos Disueltos Totales (SDT) 408.53 ± 0.04 ppm, Sólidos Suspendidos Totales (SST) 163.21 ± 0.04 ppm, Demanda Química de Oxígeno (DQO) 188.67 ± 16.00 mg/L COD y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) 103.85 ± 16.00 mg/L BOD.

Los parámetros físicos y químicos de salida del agua tratada, determinados en las pruebas con el flujo volumétrico de 1.0 m³/día y oxígeno disuelto de 2.5 ppm, fueron en promedio: pH 9.01 ± 0.01, Sólidos Disueltos Totales (SDT) 380.05 ± 0.13 ppm, Sólidos Suspendidos Totales (SST) 138.30 ± 0.13 ppm, Demanda Química de Oxígeno (DQO) 173.10 ± 16.00 mg/L COD y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) 95.21 ± 16.00 mg/L BOD.

Los parámetros físicos y químicos de salida del agua a tratada, determinados en las pruebas con el efluente de 1.5 m³/día y oxígeno disuelto de 3.0 ppm, fueron en promedio: pH 8.59 ± 0.01, Sólidos Disueltos Totales (SDT) 288.94 ± 0.07 ppm, Sólidos Suspendidos Totales (SST) 74.09 ± 0.07 ppm, Demanda Química de Oxígeno (DQO) 135.14 ± 16.00 mg/L COD y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) 74.33 ± 16.00 mg/L BOD.

El afluente de 1.0 m³/día y oxígeno disuelto de 2.5 ppm, reportaron un rendimiento menor de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, con un deficiente consumo total de agua residual del tanque (T01) del 61.82% al 68.61%. En promedio, los parámetros fueron reducidos: conductividad eléctrica 14.97%, turbidez 18.16%, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) 21.64%, Sólidos Disueltos Totales (SDT) 25.51%, y Sólidos Suspendidos Totales (SST) 44.29%.

Las pruebas con el caudal de alimentación de $1.5 \text{ m}^3/\text{día}$ y oxígeno disuelto de 3.0 ppm, exhibieron el mejor funcionamiento evaluado en la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales y correlación cuadrática que se apegan al modelo lineal. En promedio, los parámetros fueron reducidos: turbidez 27.90%, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) 39.58%, Sólidos Disueltos Totales (SDT) 42.44%, conductividad eléctrica 43.27% y Sólidos Suspendedos Totales (SST) 73.92%.

El Manual de Operación y Mantenimiento de la Planta de Tratamiento Aeróbico de Aguas Residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias se presenta como apéndice A. La información se ordena en diferentes secciones, posee una introducción con la sinopsis del documento. En la sección de proceso de tratamiento se muestra información relevante concerniente al tema de estudio. A continuación se presentan las especificaciones de la planta aeróbica de tratamiento de aguas residuales. Seguidamente en la sección de operación y mantenimiento, se define el método para el arranque, operación, medidas de seguridad y rutina de mantenimiento preventivo. Por último, en la sección análisis de muestra se detalla la determinación de los parámetros físicos y químicos de entrada del afluente y salida del efluente de la planta aeróbica de tratamiento de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

X. RECOMENDACIONES

Usar un agua residual con una concentración al 10% de material orgánico por los límites de medición de los equipos utilizados para caracterizar los sólidos disueltos y suspendidos totales por análisis gravimétrico.

Configurar la bomba de alimentación (P01) y bomba de retorno de lodos (P03) al momento de iniciar la prueba, con caudal mayor (máximo $0.3 \text{ m}^3/\text{día}$) al seleccionado durante 5 minutos, para reducir el tiempo de estabilización del flujo. Al concluir el tiempo antes indicado, es imperativo restablecer las bombas al flujo volumétrico correcto.

Mantener el tanque de lodos activados (T02) con oxígeno disuelto entre 2.0 – 3.0 ppm para que los microorganismos usen el oxígeno tan rápido como es suministrado y que ocurra el proceso de nitrificación.

XI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) American Water Works Association (AWWA). 2002. *Calidad y tratamiento del agua. Manual de suministros de agua comunitaria*. 5ª ed. McGraw-Hill. 133 – 167 pp.
- 2) Braja, D. 2015. *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. 4ª ed. Cengage Learning Inc. México. 33 – 45pp.
- 3) D'Alessandri, Mariana. 2012. *Caracterización y Tratamiento de Agua Residual Proveniente de las Plantas de Producción*. Tesis de la Universidad Simón Bolívar. Bolivia. 98 páginas.
- 4) *Diagnóstico del agua en las Américas*. 2012. Foro Consultivo Científico y Tecnológico (FCCyT). México. 281 – 297pp.
- 5) Estrada, G. 2012. *Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales para una industria alimenticia de Guatemala*. Tesis de la Universidad del Valle de Guatemala. Guatemala. 133 pp.
- 6) Ferrer, J. A. Seco. 2008. *Tratamientos biológicos de aguas residuales*. Alfaomega. España. 9 – 73 pp.
- 7) Garrido, C. 2013. *Tratamiento de aguas. Manual de laboratorio*. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 65 – 106pp.
- 8) Guatemala. 2017. *Manual de educación ambiental sobre el recurso hídrico en Guatemala*. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) & Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA). Guatemala. 80 págs.
- 9) HFT Education. 2016. *User guide. WPN110 Automated Aerobic Water Treatment Pilot Plant*. HFT Gobar Ltd. Estados Unidos. 34 páginas.

- 10) Luarca, J. 2004. *Manual de operación para una planta de tratamiento de aguas residuales en una fábrica de productos químicos auxiliares para la industria textil*. Tesis de la Universidad del Valle de Guatemala. Guatemala. 108 páginas.
- 11) Lin, S. 2007. *Water and Wastewater Calculations Manual*. 2^a ed. McGraw-Hill. Estados Unidos. 87 – 114pp.
- 12) Méndez, L. *et al.* 2012. *Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados*. Editorial Academia Española (EAE). España. 56 páginas.
- 13) Menéndez C. & Pérez J. 2007. *Procesos para el Tratamiento Biológico de Aguas Residuales Industriales*. Editorial Félix Varera: Cuba. 300 pp.
- 14) Metcalf & Eddy. 2003. *Wastewater engineering treatment and reuse*. McGraw-Hill. Estados Unidos. 246 – 513pp.
- 15) Noyola, Morgan & Güereca. 2013. *Selección de Tecnologías para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Guía de Apoyo para Ciudades Pequeñas y Medianas*. Universidad Nacional Autónoma de México: México. 140 pp.
- 16) *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017: Aguas Residuales El Recurso Desaprovechado*. 2017. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). Francia. 202 páginas.
- 17) Quiñonez, Jackeline. 2009. *Análisis y Propuesta de Mejoras en la Descarga de Aguas Residuales, en una Industria Farmacéutica de Medicamentos de Venta Libre*. Tesis de la Universidad San Carlos de Guatemala. 115 pp.
- 18) Seoáñez, M. 2003. *Manual de tratamiento, reciclado, aprovechamiento y gestión de las aguas residuales de las industrias agroalimentarias*. Ediciones Mundi-Prensa. España. 91 – 120pp.

- 19) Severiche, C. *et al.* 2013. *Manual de métodos analíticos para la determinación de parámetros fisicoquímicos básicos en aguas*. Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso. Colombia. 6 – 54pp.
- 20) Tello, P., Mijailova P. & Chamy, R. 2016. *Uso Seguro del Agua para el Reúso*. AIDIS. México. 282 pp.

Páginas de internet

- 21) AGUASISTEC. 2015. *Planta de tratamiento de aguas Residuales*.
<http://www.aguasistec.com/planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales.php>
- 22) Mejía-López A; M. Cabrera y Y. Carrillo. 2017. Remoción de contaminantes orgánicos presentes en agua residual doméstica mediante prototipo a escala de laboratorio. Universidad Politécnica Salesiana (UPS). Ecuador.
https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14793/1/Lgr_n26_Mej%C3%ADa-L%C3%B3pez_Cabrera_Carrillo.pdf
- 23) Reinhardt Acuña. 2011. *Como Funciona una Planta de Lodos Activados*.
<https://bioreactorcrc.wordpress.com/2008/04/30/comofuncionaunaplantadelodosa-ctivados/> [2017]
- 24) RWL Water. 2017. *Aerobic Digestion*. <https://www.rwlwater.com/aerobic-digestion/>

XII. APÉNDICE A

Manual de Operación y Mantenimiento de la Planta de Tratamiento Aeróbico de Aguas Residuales

Manual de Operación y Mantenimiento de la Planta de Tratamiento Aeróbico de Aguas
Residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias

CONTENIDO

A. INTRODUCCIÓN	- 1 -
B. PROCESO DE TRATAMIENTO.....	- 2 -
C. ESPECIFICACIONES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	- 4 -
D. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	- 12 -
E. ANÁLISIS DE MUESTRAS	- 26 -

A. Introducción

El presente documento define el método para el arranque, operación, medidas de seguridad, rutina de mantenimiento preventivo y análisis de muestras, de la planta de tratamiento de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias por lodos activados.

El manual está enfocado a los estudiantes de Ingeniería Química, para obtener conocimiento básico y aplicación práctica del funcionamiento de un tratamiento secundario aeróbico de aguas residuales.

En caso de surgir algún problema superior al control del operador, es necesario reportarlo de inmediato al Jefe de Laboratorio de Operaciones Unitarias.

B. Proceso de tratamiento

Los objetivos principales de los sistemas de tratamiento son: la remoción de sólidos suspendidos, carga orgánica y patógenos, del agua cuya calidad ha sido modificada. De esta forma se busca proteger la salud de seres vivos y preservación de los recursos naturales. La eliminación de los contaminantes se efectúa con un conjunto de operaciones unitarias de tipo físico, químico, biológico o combinación de los antes mencionados.

1. Descripción del proceso de lodos activados. Los tratamientos aeróbicos de aguas residuales son un proceso biológico en donde se descompone la materia orgánica y nutrientes (nitrógeno y fosforo) ante la presencia de oxígeno, aprovechando la capacidad de los microorganismos de asimilarlos para su crecimiento aceptando los electrones durante la oxidación. Los tratamientos aeróbicos son clasificados en función del sistema empleado para el crecimiento de biomasa, en suspensión o fija. La biomasa fija crece adherida a un soporte natural o artificial, formando una película. La biomasa en suspensión crece en el interior de un reactor biológico produciendo flóculos.

La aplicación satisfactoria de estas tecnologías depende de la existencia de contaminantes biodegradables y la inexistencia de sustancias tóxicas, corrosivas, explosivas e inhibidores de tratamiento biológico.

El tratamiento biológico aerobio de aguas residuales por lodos activados es ampliamente utilizado desde inicios del siglo XX, cuando los ingenieros británicos Edward Arden y William Lockett aplicaron por primera vez como tratamiento secundario para aguas residuales domésticas e industriales. El agua residual con una alta carga

orgánica ingresa al reactor biológico en donde las bacterias son los microorganismos descomponedores y los protozoos depuran la población bacteriana, con agitación por medios mecánicos y aireación por difusor de burbuja fina, se consigue una mezcla completa y agrega oxígeno para que el proceso ocurra, gracias a la transferencia de oxígeno al líquido y consumo del mismo por los microorganismos. Los flóculos producidos cuentan con una microestructura como efecto de la interacción entre polímeros extracelulares microbianos y una macro-estructura construida por una red microorganismos bacterianos filamentosos.

La biomasa en suspensión efectúa una depuración natural controlada por procesos de biodegradación y biosíntesis. El licor mixto ingresa al tanque de sedimentación y las partículas más densas se hunden. El exceso de lodos activados se purgan y el resto es recirculado al reactor biológico con el fin de renovar y enriquecer la población de microorganismos activos. Los subproductos del tratamiento biológico son agua y dióxido de carbono (CO_2). El efluente de la planta de tratamiento presenta baja concentración en sólidos suspendidos, de coloración clara y sin olor.

C. Especificaciones de la planta de tratamiento de aguas residuales

Figura 22 Diagrama de general del sistema de tratamiento aerobio de biomasa en suspensión en el Laboratorio de Operaciones

Unitarias

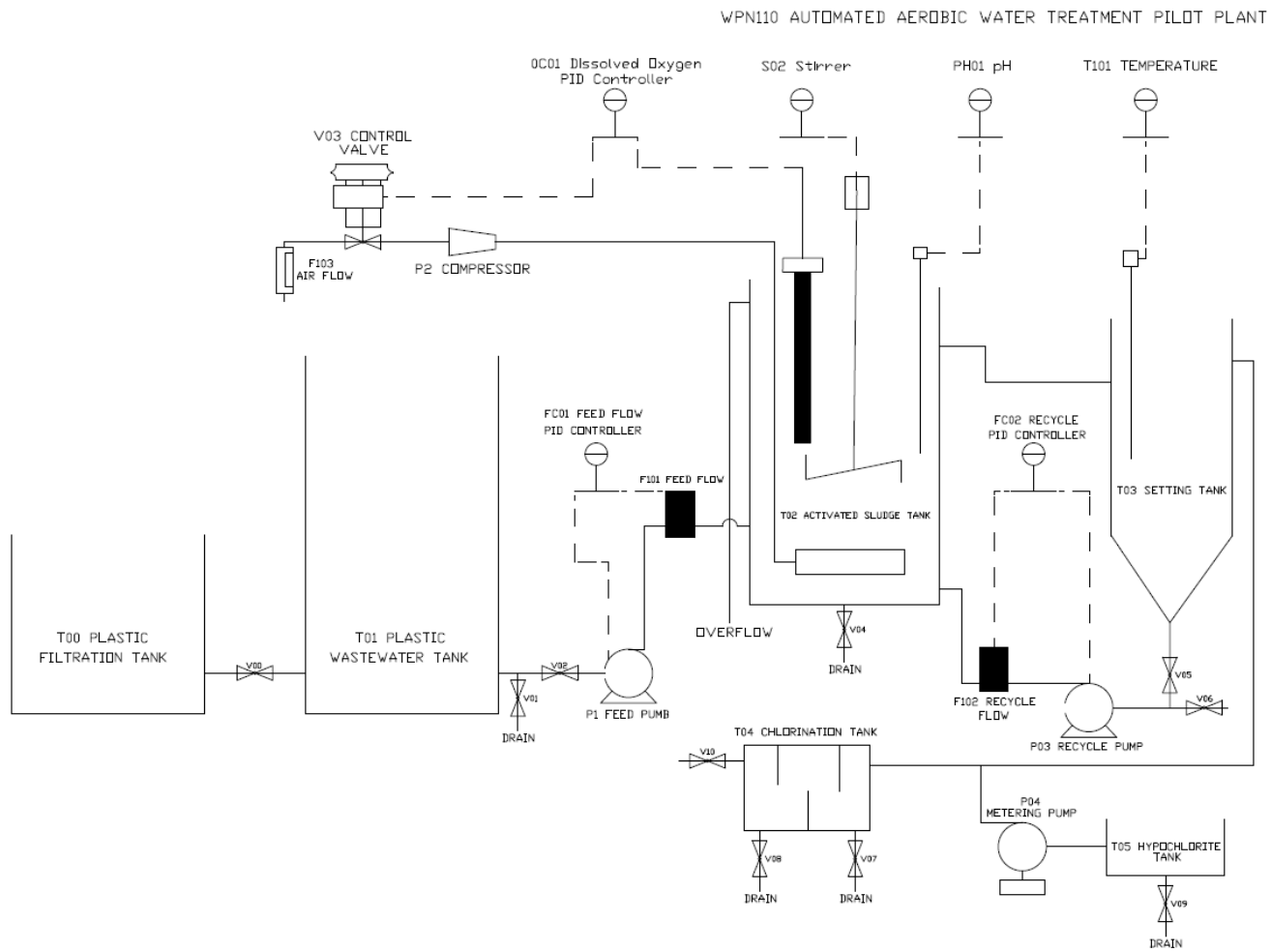
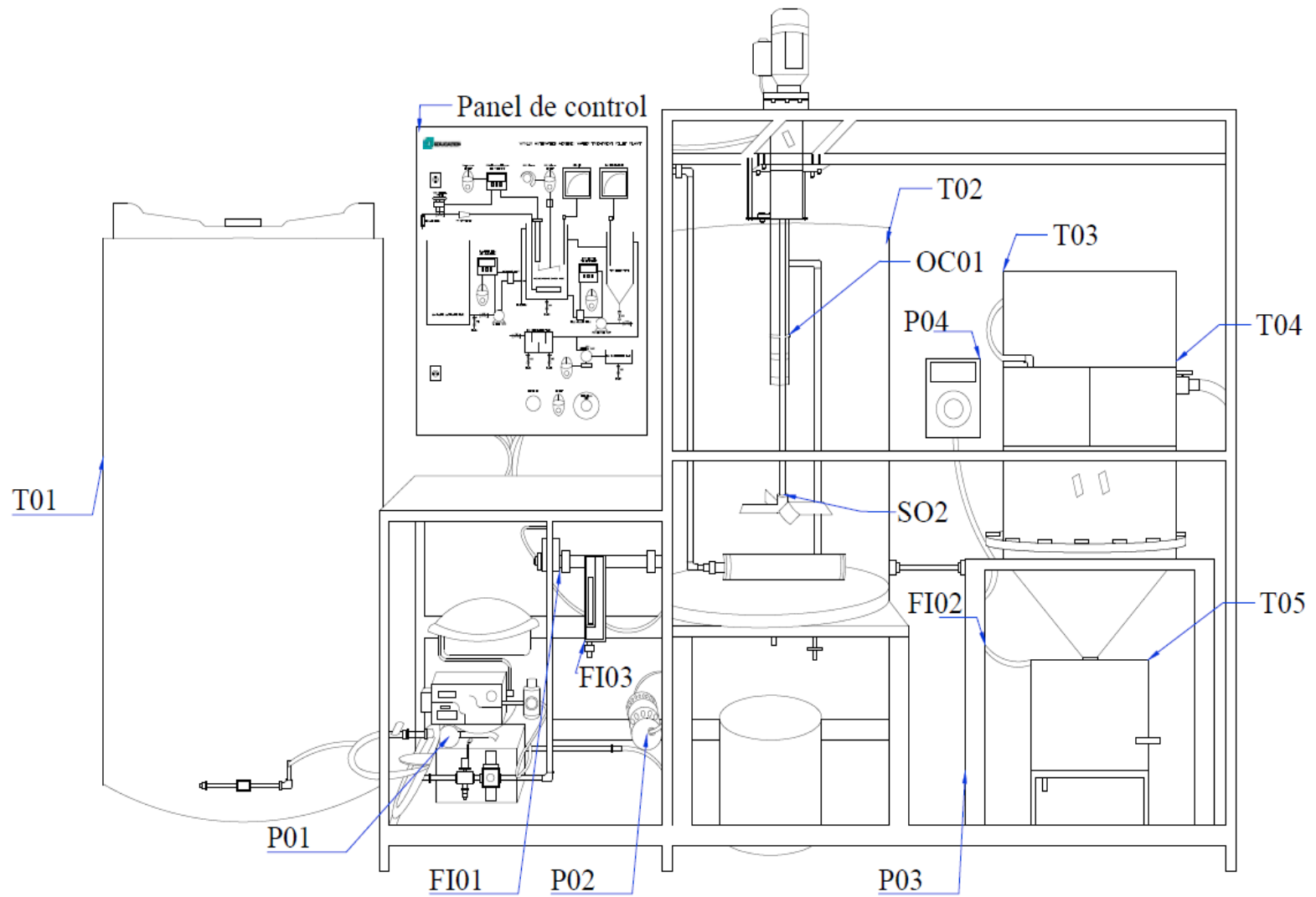


Figura 23 Diagrama de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias



1. Etapas de la planta de tratamiento. La planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, emplean distintas operaciones unitarias en etapas específicas para modificar la calidad y características del agua que ingresa a la misma. Estas son:

a. Etapa de pre-tratamiento: Se remueven los constituyentes que causan dificultad en la operación en los procesos posteriores. La primera operación unitaria aplicada es el tamizado para cumplir con el tamaño partícula menor a $283\ \mu\text{m}$, utilizando el tamiz de metálico Mesh No. 4 y el tamiz con cedazo de acero inoxidable Mesh No. 60. Seguidamente prepara una solución con el agua residual filtrada al 10% respecto a la capacidad del tanque de agua residual (T01).

b. Etapa de tratamiento biológico: La solución de agua residual ingresa al digestor aeróbico, se insufla aire con el difusor de burbuja fina y se mezcla con un agitador mecánico para disolver oxígeno. Los microorganismos y nitrificación consumen directamente el oxígeno en un rango de 2.0 – 3.0 ppm. Por medio de los procesos biológicos se transforma al contaminante orgánico en dióxido de carbono (CO_2) y producen una masa activa. El licor mixto producido ingresa al tanque de sedimentación (T03) en donde se recupera en el fondo el lodo activado para retornarlo. El lodo activado retorna en la primer parte del tanque de lodos activados (T02) y se mezcla con el afluente.

c. Etapa de desinfección: El líquido en la parte superior del tanque de sedimentación (T03) ingresa por gravedad al tanque de cloración (T04), es un tanque de contacto para contar con el tiempo suficiente para la desinfección, reduciendo el contenido de bacterias del efluente de la planta de tratamiento.

2. Especificaciones de planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Cuadro 3 Condiciones de operación de planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales

Datos técnicos	Especificación
Lugar	Dentro del Laboratorio
Condiciones ambientales	Altitud máxima: 2000 m
	Rango de temperatura: 5 - 40 °C
	Humedad relativa máxima: 80% (5 - 31 °C)
Requisitos de seguridad (EN61010-1)	Sobrecarga: Categoría 2
	Contaminación: Grado 2
Suministro eléctrico	Voltaje: 220 voltios de corriente alterna
	Frecuencia: 60 Hz
	Amperaje: 16 amperios
Suministro de aire comprimido	Rango de presión: 0.7 – 1.0 MPa (7 - 10 bar)
Filtro – regulador principal de aire	Presión: 0.6 MPa (6 bar)
Filtro – regulador de válvula de control (V03)	Presión: 0.3 MPa (3 bar)

Cuadro 4 Descripción de los equipos en la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales

Código	Equipo	Especificación
T00	Tanque de filtración	Material: HDPE
		Volumen nominal: 0.22 m ³
		Diámetro: 0.35 m (base); 0.57 m (centro); 0.39 m (tapa)
		Altura: 1.07 m
T01	Tanque de aguas residuales	Material: Plástico en HDPE
		Volumen nominal: 1.025 m ³
		Diámetro: 0.90 m
P01	Bomba de alimentación	Altura: 1.80 m
		Marca: Jabsco
		Tipo: Impulsor flexible, cuerpo de latón
		Modelo: 23620-4103
		Voltaje: 24 V
		Amperaje: 2.5 A
		Máximo flujo nominal: 8.64 m ³ /día (6 L/min)
		Cabeza: 2 m
Auto-cebado: 1.5 m		

Cuadro 4 Descripción de los equipos en la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales (continuación)

Código	Equipo	Especificación
FI01	Sensor magnético inductivo de flujo de alimentación	Marca: SIKA
		Artículo No.: VMZ081S1PEG24320
		No. serie: 06134
		Rango de operación: 0.36 - 7.2 m ³ /día (0.25 - 5 L/min)
		Temperatura máxima: 60 °C (1000 pulsos/litro)
		Presión máxima: 1 MPa (10 bar) a 20 °C 0.6 MPa (6 bar) a 60 °C
T02	Tanque de lodos activados	Material: Plástico transparente
		Volumen nominal: 0.30 m ³
		Diámetro: 0.64 m
		Altura: 0.99 m
OC01	Sonda óptica para oxígeno disuelto	Marca: Van London Co.
		Modelo: OD8325
		Fuente de alimentación: 9/36 V corriente directa
		Salida analógica: 4/20 mA circuito de corriente aislado
		Máxima carga: 600 Ω (24 V corriente directa)
		Salida digital: RS 485
		Rango de operación: 0 - 20 ppm; 0 - 200% aire
		Sensibilidad: ± 0.5% respecto a la escala
		Tiempo de respuesta: 95% en menos de 60 segundos
		Rango de temperatura: -5 - 50 °C
		Presión máxima: 0.1 MPa (1 bar) a 25 °C
		Compensación de temperatura: automática
		Parámetros secundarios: Presión, salinidad, RH
		Auto-limpieza: 0.3 MPa (3 bar) [máxima presión por aire]
Diámetro: 0.06 m		
Altura: 0.165 m		
SO2	Agitador mecánico	Marca: DRUMMOTORS & MORE LTD
		Modelo: Motor reductor helicoidal paralelo ATS
		Tipo: TS5624B14
		Potencia: 0.09 Kw
		Frecuencia: 50 Hz
		Rotación: 1320 RPM
		Voltaje: 220 - 240 V (corriente alterna)
		Fase: 3
		Longitud del eje: 1.10 m
		Agitador: turbina de palas inclinadas a 45° de acero inoxidable

Cuadro 4 Descripción de los equipos en la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales (continuación)

Código	Equipo	Especificación
P02	Compresor	Marca: GAST
		Modelo: 1531-107B-G288X
		Potencia nominal: 74.57 W (1/10 hp)
		Flujo de aire libre: $7.1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (1.5 ft ³ /min)
		Frecuencia: 60 Hz
		Presión máxima: 68.95 kPa (10 psi)
		Vacío máximo: 67.73 kPa (20 inHg)
		Rotación: 3450 RPM
FI03	Caudalímetro de área variable para aire	Marca: MPB INDUSTRIES LTD
		Serie: 1700
		Tipo: Área variable
		Presión absoluta: 0.1 MPa (1.013 bar)
		Temperatura máxima: 60 °C (Nitrilo); 100 °C (Viton)
		Exactitud: 2% escalas FSD calibradas
T03	Tanque de sedimentación	Material: Plástico transparente
		Volumen nominal: 0.15 m ³
		Diámetro superior: 0.48 m
		Diámetro inferior: 0.04 m
		Altura: 1.08 m
FI02	Sensor magnético inductivo de flujo de recirculación	Marca: SIKA
		Artículo No.: VMZ081S1PEG24320
		No. serie: 06134
		Rango de operación: 0.36 - 7.2 m ³ /día (0.25 - 5 L/min)
		Temperatura máxima: 60 °C (1000 pulsos/litro)
		Presión máxima: 1 MPa (10 bar) a 20 °C 0.6 MPa (6 bar) a 60 °C
P03	Bomba de retorno de lodos	Marca: Jabsco
		Tipo: Impulsor flexible, cuerpo de latón
		Modelo: 23620-4103
		Voltaje: 24 V
		Amperaje: 2.5 A
		Máximo flujo nominal: 8.64 m ³ /día (6 L/min)
		Cabeza: 2 m
		Auto-cebado: 1.5 m

Cuadro 4 Descripción de los equipos en la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales (continuación)

Código	Equipo	Especificación
T04	Tanque de cloración	Material: Plástico transparente
		Volumen nominal: 0.006 m ³
		Frente: 0.43 m
		Profundidad: 0.12 m
		Altura: 0.20 m
P04	Bomba de dosificación	Marca: ETARON D.S.
		Tipo: Solenoide - diafragma
		Modelo: DLX-MF/M
		No. Parte: PLX1703801
		S/N: E16B10455
		Potencia/Fusible: 1A
		Voltaje: 230/ 240 V
		Frecuencia: 50/60 Hz
		Capacidad nominal: 1.4x10 ⁻⁶ m ³ /s (5 L/h)
Presión máxima: 0.7 MPa (7 bar)		
T05	Tanque de hipoclorito	Material: Plástico transparente
		Volumen nominal: 0.02 m ³
		Frente, Profundidad y Atura: 0.30 m

Cuadro 5 Descripción de las válvulas en la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales

Código	Válvula	Especificación
V00	Válvula de salida	Uso: Purga del tanque de filtración
		Tamaño: 1.27 cm (1/2 in)
		Tipo: De bola
V01	Válvula de salida	Uso: Purga del tanque de aguas residuales
		Tamaño: 1.91 cm (3/4 in)
		Tipo: De bola
V02	Válvula de entrada	Uso: Admisión del agua residual al tanque de lodos activados
		Tamaño: 1.91 cm (3/4 in)
		Tipo: De bola
V03	Válvula de control	Uso: Admisión de aire al compresor
		Tamaño: --
		Tipo: Válvula reguladora del aire comprimido

Cuadro 5 Descripción de las válvulas en la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales (continuación)

Código	Válvula	Especificación
V04	Válvula de salida	Uso: Purga del tanque de lodos activados
		Tamaño: 1.91 cm (3/4 in)
		Tipo: De bola
V05	Válvula de entrada	Uso: Control del retorno de lodos activados en el tanque de sedimentación
		Tamaño: 1.91 cm (3/4 in)
		Tipo: De bola
V06	Válvula de salida	Purga del exceso de lodos del tanque de sedimentación
		Tamaño: 1.91 cm (3/4 in)
		Tipo: De bola
V07	Válvula de salida	Uso: Purga del tanque de cloración
		Tamaño: 2.54 cm (1 in)
		Tipo: De bola
V08	Válvula de salida	Uso: Purga del tanque de cloración
		Tamaño: 2.54 cm (1 in)
		Tipo: De bola
V09	Válvula de salida	Uso: Purga del tanque de hipoclorito (T05)
		Tamaño: 1.91 cm (3/4 in)
		Tipo: De bola
V10	Válvula de salida	Uso: Muestreo del agua tratada
		Tamaño: 2.54 cm (1 in)
		Tipo: De bola

D. Operación y mantenimiento

El correcto funcionamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales requiere la comprensión de los riesgos implicados, el uso de los equipos de protección para garantizar la seguridad del estudiante, el muestreo del afluente y efluente, la aplicación meticulosa del procedimiento de operación y la ejecución del plan de mantenimiento.

1. Riesgos. La identificación y clasificación de riesgos es de suma importancia para la selección del equipo que minimice los daños físicos e infecciones, conocimiento de las áreas de mayor riesgo y ejecución de rutinas seguras.

a. Infecciones por el contacto de los patógenos con ojos, boca, piel, cortadas y quemaduras.





b. Daño físico por empujar, jalar o levantar de forma inapropiada contendores, tanques o equipos.

c. Exposición a gases, químicos y vapores tóxicos.






d. Ruido emitido por el equipo.

2. Seguridad y equipos de protección. A continuación se detalla el equipo a utilizar durante la operación y mantenimiento de la planta de tratamiento, así como la prevención de riesgos.

Cuadro 6 Identificación del equipo de protección requerido para operar las planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias

Prevención de riesgos	Equipo de protección	Ilustración
Infecciones y exposición a químicos	Mascarilla	
	Lentes para laboratorio	
	Guates de látex	
	Bata blanca para laboratorio	

Cuadro 6 Identificación del equipo de protección requerido para operar las planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias (continuación)

Prevención de riesgos	Equipo de protección	Ilustración
Daño físico y ruido	Botas con punta de acero	
	Escalera plegable de aluminio	
	Faja sacrolumbar para cargar	
	Tapones con cordón	
	Casco industrial	

3. Arranque biológico. El arranque biológico es imperativo para generar un lodo activado rico en contenido de bacterias para efectuar correctamente el proceso de tratamiento del agua residual. El arranque de la planta de tratamiento requiere de dos etapas: la activación de lodos (desde la preparación de la solución de agua residual hasta el inicio de los procesos biológicos) y el completo desarrollo biológico. Es necesario realizar ajustes para mejorar el rendimiento de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias; los ajustes se basan en la coloración del líquido y la masa activa dentro de la planta de tratamiento, de igual manera el olor emitido.

Sucesivamente, se especifica el procedimiento para el arranque de la planta de tratamiento y activación de lodos. Adicionalmente, se identifican los requerimientos a cumplir por parte del agua residual que se evalúa.

a. Requerimientos de la alimentación a utilizar en la planta de tratamiento aeróbico

1) El agua residual determina la presencia bacteriana. Pueden emplearse bacterias del ácido láctico (*Lactobacillus plantarum*, *L. casei*, *streptococcus lactis*), bacterias fotosintéticas (*Rhodopseudomonas palustrus*, *Rhodobacter spaeroides*), levaduras (*Saccharomyces cerevisiae*, *Candida utilis*), actinomicetos (*Streptomyces albus*, *S. griseus*) y hongos de fermentación (*Aspergillus oryzae*, *Mucor hiemalis*).

2) El 90% de las partículas deben ser de un tamaño menor a 283 μm , siendo el máximo permitido 1,000 μm .

3) La viscosidad del agua residual de situarse en el rango de 0.005 – 0.02 Pa s.

4) La concentración de sólidos debe ser de 2.28 – 10.62 kg/m^3 o 62% v/v.

- 5) El límite en la demanda química de oxígeno (DQO) es de 1.7 g/L.
- 6) La relación Alimento/Microorganismos (A/M, en inglés F/M ratio) aceptable es de alrededor de 0.25 a 0.45.
- 7) Los niveles de pH de mejor funcionamiento son de 6.5 a 8.5.
- 8) El rango temperatura del agua residual para operación es de 10 a 37 °C.

b. Procedimiento para el arranque de la planta de tratamiento y activación de lodos.

- 1) Verificar que el cable USB de la planta de tratamiento esté conectado al ordenador y a la parte inferior del panel de control.
- 2) Encender la computadora en donde se ha instalado el software de control de la planta de tratamiento.
- 3) Cerrar todas las válvulas.
- 4) Filtrar 0.11 m³ de agua residual utilizar con los tamices construidos y llenar el tanque plástico provisional de 0.21 m³.
- 5) Trasvasar el agua residual filtrada necesaria para realizar solución al 10% en el tanque para aguas residuales (T01), (ver Figura 23, página – 5 –).
- 6) Tomar muestra representativa de la solución de agua residual al 10% del tanque para aguas residuales (T01) y caracterizar la misma.
- 7) Añadir solución de hipoclorito de sodio (NaClO) en el tanque pequeño (T05), (ver Figura 23, página – 5 –).
- 8) Encender la planta de tratamiento colocando en posición vertical el aislador multipolar al costado del panel de control presionando el botón etiquetado con ON/OFF.

9) En el folder Profilab, encuentra e inicia el archivo “WPN110vX.exe”. Se despliega la ventana de “Controllers and Meters”. Permite visualizar y configurar los flujos de las bombas, temperatura, pH y oxígeno disuelto.

10) Abrir la válvula de control (V02) y encender la bomba de velocidad variable (P01) para que el caudal llene el tanque de lodos activados (T02) hasta que el nivel del agua cubra al agitador, el sensor de pH y sensor de oxígeno disuelto, (ver Figura 23, página – 5 –).

Para configurar el caudal de alimentación en el controlador PID (FC01) es necesario:

a) Presionar el botón “SET” hasta que muestre en el setpoint (pantalla inferior; color rojo) la palabra “AUTO”.

b) Usar los botones con flechas hacia abajo o hacia arriba para cambiar a “MAN” y apretar el botón “SET”.

c) Configurar el flujo volumétrico de alimentación con las flechas hacia abajo o hacia arriba (considerar como 100% el flujo máximo de alimentación 432 L/h).

11) Detener la bomba de velocidad variable (P01), (ver Figura 23, página – 5 –).

12) Iniciar al agitador a máxima velocidad (1,320 rpm).

13) Encender el compresor (P02) y configurar al controlador del sensor de oxígeno disuelto (OC01) a 20.0 ppm, (ver Figura 23, página – 5 –).

14) Agregar el cultivo bacteriano al tanque de lodos activados (T02), (ver Figura 23, página – 5 –).

15) Esperar tres horas a que los procesos biológicos inicien. Es obligatorio observar la formación irregular de flóculos bilógicos en el tanque de lodos activados (T02).

16) Reiniciar la bomba de alimentación de agua residual (P01) al caudal deseado (se recomienda un flujo volumétrico de 1.5 m³/día), establecer el oxígeno disuelto deseado con el sensor de oxígeno disuelto (OC01) (se recomiendan 3.0 ppm) y ajustar al agitador a un cuarto de la velocidad máxima (manteniendo un oleaje suave dentro del tanque de aireación), (ver Figura 23, página – 5 –).

17) Permitir que el líquido del tanque de lodos activados (T02) fluya al tanque de sedimentación (T03), hasta aproximarse a 5.0 cm al punto de desbordamiento del mismo, (ver Figura 23, página – 5 –).

18) Esperar nueve horas a que la generación de lodos sea constante; es imperativo verificar que existan como mínimo una capa de lodos en el fondo del tanque de sedimentación (T03) de 10 cm de altura y el descenso de nuevos flocos bilógicos. En caso contrario, esperar a que la descripción anterior se cumpla, (ver figura F3, página – 5 –).

19) Encender la bomba de retorno de lodos activados (P03) al mismo caudal empleado con la bomba de alimentación de agua residual (P01), (ver Figura 23, página – 5 –).

Para configurar el caudal de recirculación en el controlador PID (FC01) es necesario:

a) Presionar el botón “SET” hasta que muestre en el setpoint (pantalla inferior; color rojo) la palabra “AUTO”.

b) Usar los botones con flechas hacia abajo o hacia arriba para cambiar a “MAN” y apretar el botón “SET”.

c) Configurar el flujo volumétrico de retorno de lodos con las flechas hacia abajo o hacia arriba (considerar como 100% el flujo máximo de alimentación 432 L/h).

20) Esperar dos semanas a que el desarrollo biológico sea completo. Durante éste periodo se debe ajustar la planta de la siguiente forma:

a) Observar la formación de lodo activado muy pegajoso, el aspecto físico del agua es líquido y jabonoso con una coloración café claro.

b) Remover de las paredes de la planta por medio de raspado el lodo activado pegajoso.

c) Purgar una porción de lodos activados abriendo la válvula de control (V05) y válvula de descarga (V06), cuando estos se vuelven demasiados para recircularlos y alimentar la planta con el efluente de prueba. En caso de no tener problemas con la recirculación, pero se presenta una lenta formación de los lodos; retirar una fracción del agua en la superficie del tanque de sedimentación (T03) y alimentar la planta con nueva agua a tratar, (ver Figura 23, página – 5 –).

d) Modificación del agua en tratamiento a una coloración café oscuro en el tanque de lodos activados (T02) y en el área cónica del tanque de sedimentación (T03), olor a tierra mojada y una apariencia más viscosa, (ver Figura 23, página – 5 –). A partir de éste cambio, el lodo activado se ha desarrollado en la planta de tratamiento.

Cuadro 7 Especificación del diagrama de Gantt para el arranque biológico

Clave	Actividades	Predecesora	Tiempo esperado (horas)
A	Verificar que el cable USB de la planta de tratamiento esté conectado al ordenador y a la parte inferior del panel de control	N/A	0.05
B	Encender la computadora en donde se ha instalado el software de control de la planta de tratamiento	N/A	0.05
C	Cerrar todas las válvulas	N/A	0.06
D	Filtrar 0.11 m ³ de agua residual utilizar con los tamices construidos y llenar el tanque plástico provisional de 0.21 m ³	N/A	0.54

Cuadro 7 Especificación del diagrama de Gantt para el arranque biológico (continuación)

Clave	Actividades	Predecesora	Tiempo esperado (horas)
E	Trasvasar el agua residual filtrada necesaria para realizar solución al 10% en el tranque para aguas residuales (T01) y preparar la solución al 10%	C, D	0.54
F	Tomar muestra representativa de la solución de agua residual al 10% del tanque para aguas residuales (T01) y caracterizar la misma	E	2.7
G	Añadir solución de hipoclorito en el tanque pequeño (T05)	C	0.17
H	Encender la planta de tratamiento (colocar en posición vertical el aislador multipolar y presionar el botón etiquetado con ON/OFF)	F, G	0.03
I	Encuentra e iniciar Profilab, "WPN110vX.exe", "Controllers and Meters" (visualización y configuración de los flujos de las bombas, temperatura, pH y oxígeno disuelto)	A, B	0.03
J	Abrir la válvula de control (V02), encender la bomba de velocidad variable (P01)	E, H	0.03
K	Llenar el tanque de lodos activados (T02) hasta que el nivel del agua cubra al agitador, el sensor de pH y sensor de oxígeno disuelto	J	0.33
L	Detener la bomba de alimentación de velocidad variable (P01)	K	0.02
M	Iniciar al agitador a máxima velocidad (1,320 rpm)	L	0.02
N	Encender el compresor (P02) y configurar al controlador del sensor de oxígeno disuelto (OC01) a 20.0 ppm	L	0.03
O	Agregar el cultivo bacteriano al tanque de lodos activados (T02)	M, N	0.03
P	Inicio de los procesos biológicos (observar la formación irregular de flocos biológicos en el tanque de lodos activados [T02])	O	3
Q	Reiniciar la bomba (P01) (se recomienda 1.5 m ³ /día) y establecer el oxígeno disuelto en el sensor (OC01) (se recomiendan 3.0 ppm)	P	0.03
R	Ajustar al agitador a 330 rpm (equivalente a 1/4 de vuelta del controlador)	P	0.02
S	Permitir que el líquido del tanque de lodos activados (T02) fluya al tanque de sedimentación (T03), hasta aproximarse a 5.0 cm al punto de desbordamiento del mismo	Q, R	2.4
T	Generación de lodos constante (mínimo una capa de lodos en el fondo del tanque (T03) de 10 cm de altura y el descenso de nuevos flocos biológicos)	S	9
U	Encender la bomba de retorno de lodos activados al mismo caudal empleado con la bomba de alimentación de agua residual (P01)	T	0.02
V	Observar la formación de lodo activado muy pegajoso (aspecto físico del agua es líquido y jabonoso con una coloración café claro)	T	48
W	Remover de las paredes de la planta por medio de raspado el lodo activado pegajoso	V	0.67
X	Purgar exceso de lodos activados abriendo la válvula de control (V05) y válvula de descarga (V06) y alimentar la planta con el efluente de prueba	T, V	0.08
Y	Desarrollo biológico completo (coloración café oscuro en el tanque (T02) y en el área cónica del tanque (T03), olor a tierra mojada y una apariencia más viscosa)	T, U, V, W, X	336

Seguidamente, se muestra el diagrama de Gantt para el arranque de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Figura 24 Diagrama de Gantt para el arranque de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias

Actividades	Tiempo de duración (días)															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Verificar que el cable USB de la planta de tratamiento esté conectado al ordenador y a la parte inferior del panel de control																
Encender la computadora en donde se ha instalado el software de control de la planta de tratamiento																
Cerrar todas las válvulas																
Filtrar 0.11 m ³ de agua residual a utilizar con los tamices contruidos y llenar el tanque plástico provisional de 0.21 m ³																
Trasvasar el agua residual filtrada necesaria para realizar solución al 10% en el tanque para aguas residuales (T01) y preparar la solución al 10%																
Tomar muestra representativa de la solución de agua residual al 10% del tanque para aguas residuales (T01) y caracterizar la misma																
Añadir solución de hipoclorito de sodio (NaClO) en el tanque pequeño (T05)																
Encender la planta de tratamiento (colocar en posición vertical el aislador multipolar y presionar el botón etiquetado con ON/OFF)																
Encuentra e iniciar Profilab, "wPN110vX.exe", "Controllers and Meters" (visualización y configuración de los flujos de las bombas, temperatura, pH y oxígeno disuelto)																
Abrir la válvula de control (V02), encender la bomba de velocidad variable (P01)																
Llenar el tanque de lodos activados (T02) hasta que el nivel del agua cubra al agitador, el sensor de pH y sensor de oxígeno disuelto																
Detener la bomba de alimentación de velocidad variable (P01)																
Iniciar al agitador a máxima velocidad (1,320 rpm)																
Encender el compresor (P02) y configurar al controlador del sensor de oxígeno disuelto (OC01) a 20.0 ppm																
Agregar el cultivo bacteriano al tanque de lodos activados (T02)																
Inicio de los procesos biológicos (observar la formación irregular de floculos bilógicos en el tanque de lodos activados)																
Reiniciar la bomba (P01) (se recomienda 1.5 m ³ /día) y establecer el oxígeno disuelto en el sensor (OC01) (se recomiendan 3.0 ppm)																
Ajustar al agitador a 330 rpm (equivalente a 1/4 de vuelta del controlador)																
Permitir que el líquido del tanque de lodos activados (T02) fluya al tanque de sedimentación (T03), hasta aproximarse a 5.0 cm al punto de desbordamiento del mismo																
Generación de lodos constante (mínimo una capa de lodos en el fondo del tanque (T03) de 10 cm de altura y el descenso de nuevos floculos bilógicos)																
Encender la bomba de retorno de lodos activados (P03) al mismo caudal empleado con la bomba de alimentación de agua residual (P01)																
Observar la formación de lodo activado muy pegajoso (aspecto físico del agua es líquido y jabonoso con una coloración café claro)																
Remover de las paredes de la planta por medio de raspado el lodo activado pegajoso																
Purgar exceso de lodos activados abriendo la válvula de control (V05) y válvula de descarga (V06) y alimentar la planta con el efluente de prueba																
Desarrollo biológico completo (coloración café oscuro en el tanque (T02) y en el área cónica del tanque (T03), olor a tierra mojada y una apariencia más viscosa)																

4. Plan de mantenimiento. Mantener el correcto funcionamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales demanda un monitoreo y mantenimiento diario, evitando problemas mecánicos, desbordamiento del fluido por los tanque de lodos activados (T02) y de sedimentación (T03), producción de espuma, obstrucción en las tuberías y sensores de flujo, o muerte de la masa activa.

Por tal motivo, se puntualiza el mantenimiento diario a realizar durante la operación de la planta de tratamiento.

Cuadro 8 Plan diario de mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Inspección		Inconveniente	Corrección
Equipos y accesorios	Procedimiento		
Bombas P01, P03 y P04 ; Compresor P02	<ol style="list-style-type: none"> 1. Revisar que la bomba o compresor está encendida en el panel de control 2. Acercarse a la ubicación de la bomba o compresor 3. Sentir la vibración del equipo 	Bomba o compresor encendida en el panel de control pero sin vibración	<ol style="list-style-type: none"> 1. Apagar cada equipo de la planta de tratamiento y cerrar todas las válvulas abiertas 2. Colocar en posición horizontal el aislador multipolar al costado del panel de control 3. Esperar 2 minutos y reencender la planta de tratamiento
Suministro de aire comprimido	Verificar que el compresor para suministro de aire comprimido opera en un rango 7 - 10 bar	1. Compresor para suministro de aire comprimido fuera del rango de operación	Ajustar la salida de aire comprimido del compresor para suministro en el rango de presión de 7 - 10 bar
		2. Compresor para suministro de aire comprimido sin funcionamiento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Cerrar la salida de aire comprimido del compresor para suministro 2. Apagar el compresor para suministro y desconectarlo de la corriente eléctrica 3. Encender nuevamente el compresor para suministro y configurar el rango de operación de 7 - 10 bar

Cuadro 8 Plan diario de mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias (continuación)

Inspección		Inconveniente	Corrección
Equipos y accesorios	Procedimiento		
Filtros - reguladores de aire	<ol style="list-style-type: none"> 1. Examinar que el filtro – regulador principal de aire está fijado a 6 bar con el mando de presión 2. Comprobar que el filtro – regulador de válvula de control (V03) fijado a 3 bar con el mando de presión 3. Observar que el depósito de cada filtro - regulador se encuentra vacío 	El depósito de cada filtro - regulador de aire está completamente lleno de agua	<ol style="list-style-type: none"> 1. Cerrar el paso de aire comprimido de la planta de tratamiento de aguas residuales 2. Esperar a que el filtro – regulador principal de aire retire toda el agua en su interior por el punto de purga 3. Girar la tuerca plástica en el punto de purga del filtro – regulador de válvula de control (V03) para retirar todo el líquido en su interior
Caudalímetro de área variable para aire	Revisar el flotador medidor se levante de forma constante por el flujo del aire	No se observa movimiento en el flotador medidor	Repetir el mantenimiento para el suministro de aire comprimido y filtros - reguladores de aire
Agitador mecánico	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verificar que el agitador mecánico esté encendido en el panel de control 2. Acercarse a la ubicación del agitador mecánico 3. Sentir la vibración del equipo 	Agitador mecánico encendido en el panel de control pero sin vibración	<ol style="list-style-type: none"> 1. Apagar cada equipo de la planta de tratamiento y cerrar todas las válvulas abiertas 2. Colocar en posición horizontal el aislador multipolar al costado del panel de control 3. Esperar 2 minutos y reencender la planta de tratamiento
Sensores magnéticos inductivos de flujo	Examinar que los led indicadores en los sensores magnéticos inductivos emitan su respectiva señal	El sensor magnético inductivo no emiten ninguna señal	<ol style="list-style-type: none"> 1. Desconectar la señal de salida del sensor magnético inductivo 2. Esperar 1 minuto, apagar la bomba y cerrar las válvulas respectivas al sensor con problema 3. Conectar la señal de salida del sensor magnético inductivo, abrir las válvulas cerradas previamente y encender la bomba respectiva
Tanques, válvulas y tuberías	Comprobar que no existan fugas en los tanques, válvulas y tuberías	Las paredes exteriores de los tanques, válvulas o tuberías presentan manchas de agua	<ol style="list-style-type: none"> 1. Cerrar las válvulas de la sección en donde se observan las manchas de agua 2. Emplear solución de agua con jabón y observar si surgen burbujas 3. Aplicar sellador en el punto en donde exista fuga

Cuadro 8 Plan diario de mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias (continuación)

Inspección		Inconveniente	Corrección
Equipos y accesorios	Procedimiento		
Tanque T02	1. Acercarse a la parte superior del tanque de lodos activados	1. Formación excesiva de espuma, coloración café rojizo y olor a tierra mojada en el tanque (T02)	1. Reducir la agitación y aireación hasta que el fluido tenga un movimiento equivalente al oleaje 2. Remover la espuma de forma manual con un instrumento esterilizado
	2. Observar el movimiento y velocidad de mezclado del líquido en el tanque (T02); así mismo percibir el olor emitido y la coloración	2. Olor fuerte y coloración café	Reducción del flujo volumétrico del retorno de lodos
		3. Coloración oscura y olor putrefacto	Incrementar la agitación y aireación
Tanque T03	1. Acercarse a la parte superior del tanque de sedimentación 2. Verificar el color y la sedimentación	1. Masa activa flotando y color café claro	1. Remover la masa activa de forma manual con un instrumento esterilizado 2. Retornar el material flotante al tanque de lodos activados (T02)
	1. Acercarse a la parte inferior del tanque de sedimentación 2. Verificar la coloración y lodos activados	2. Cloración café claro y lodo pegajoso adherido a la pared del tanque	Retirar hacia el fondo del tanque T03 el lodo pegajoso, muy lentamente para no modificar el proceso de sedimentación
		3. El retorno de lodos no funciona	Retro lavar el retorno de lodos

E. Análisis de muestras

La determinación de las condiciones de entrada del afluente y salida del efluente de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias se desarrolla con el siguiente procedimiento. Todos los parámetros deben de evaluarse como mínimo en triplicado, para obtener un resultado válido estadísticamente.

1. Medición de la temperatura.

a. Tomar muestra de 500 mL de agua residual y verterla en un vaso de precipitados.

b. Colocar el termómetro de alcohol escala $-10 - 100$ °C calibrado dentro del vaso de precipitados con el líquido de muestra, realizar medición de temperatura.

c. Anotar el resultado correspondiente cuando la lectura en el medidor sea estable.

2. Medición del oxígeno disuelto.

a. Tomar muestra de 50 mL de agua residual y verterla en un vaso de precipitados.

b. Realizar la medición del oxígeno disuelto con medidor de oxígeno disuelto portátil digital.

1) Ensamblar la sonda de oxígeno disuelto **sensior 156** del medidor multiparámetro HACH.

- 2) Al menos 30 minutos antes de la medición, polarizar la sonda conectando al medidor.
- 3) Asegurar el cable de la sonda a la cámara de almacenamiento y calibración.
- 4) Preparar la cámara de almacenamiento y calibración, sosteniendo debajo el agua apretando varias veces para ingresar agua en la parte inferior de la cámara a través de la entrada; evitar llenar por completo la parte inferior de la cámara. De forma alternativa, abrir el fondo de la cámara e insertar la esponja empapada en agua.
- 5) Insertar la sonda de oxígeno disuelto en la cámara de almacenamiento y calibración. (No debe inundarse la punta con agua o sostener una gota en la membrana).
- 6) Esperar al menos 10 minutos para que se establezca la atmósfera en la cámara de almacenamiento y calibración.
- 7) Presionar el botón CAL y en la pantalla se refleja 100%.
- 8) Presionar el botón READ/ENTER. El icono de estabilización aparece mientras el medidor completa la calibración.
- 9) Insertar la sonda en el líquido de muestra, debe cubrirse el termistor (botón metálico) ubicado a un lado de la sonda.
- 10) Agita la sonda en la muestra para remover las burbujas de aire en el área de detección de la punta de la sonda.
- 11) Revolver la muestra vigorosamente con la sonda o utilizar agitador y barra magnética

c. Anotar el resultado correspondiente cuando la lectura en el medidor sea estable.

d. Comparar el resultado del paso 3 con resultado registrado con la sonda de oxígeno disuelto en el panel de control de la planta de tratamiento aeróbico de agua residual.

3. Medición del pH.

a. Tomar muestra de 25 mL de agua residual y verterla en un vaso de precipitados.

b. Realizar la medición de pH con medidor multi-parámetro PCSTestr™ 35 OAKTON.

1) Encender el medidor multi-parámetro PCSTestr™ 35 OAKTON con el botón ON/OFF.

2) Seleccionar el modo pH con el botón MODE/ENT.

3) Remover el tapón protector de la sonda e insertarlo en el líquido de muestra.

c. Anotar el resultado correspondiente cuando la lectura del medidor sea estable.

d. Comparar el resultado del paso 3 con resultado registrado con la sonda de medición de potencial de hidrógeno en el panel de control de la planta de tratamiento aeróbico de agua residual.

4. Determinación de Sólidos Suspendidos Totales (SST).

a. Turbidez

- 1) Tomar muestra de 10 mL de agua residual empleando probeta graduada de 10 mL, verterla en celda especial de medición con tapadera y cerrarla correctamente.
- 2) Lavar el exterior de la celda con agua potable y secarla un paño limpio y seco.
- 3) Aplicar el aceite de silicona en el exterior de la celda y removerla con otro paño limpio y seco.
- 4) Encender el turbidímetro portátil HI 98703 HANNA instruments.
- 5) Insertar la celda especial en el equipo de medición, alineando la marca de la celda con la muesca del equipo y cierre la tapa del turbidímetro.
- 6) Realizar medición de turbidez con medidor de turbidez.
- 7) Anotar el resultado correspondiente.

b. Análisis gravimétrico

- 1) Encender estufa eléctrica a 103 – 105 °C.
- 2) Enumerar suavemente con lápiz de grafito HB cada papel filtro AP40 Millipore.
- 3) Instalar kitazato, conectarlo con manguera de hule al vacío y colocar el filtro (con la cara rugosa hacia arriba).
- 4) Aplicar vacío y lavar el filtro con tres porciones sucesivas de 20 mL de agua destilada. Desconectar el vacío hasta la remoción total de las trazas de agua destilada.

- 5) Retirar el filtro, colocar el filtro en un pedazo (limpio y nuevo) de papel aluminio y secar en la estufa eléctrica durante una hora.
- 6) Transportar y colocar el papel filtro en el desecador hasta su empleo, pesar el filtro, y anotar el resultado correspondiente (P1)
- 7) Repetir este pasos 2 – 6 hasta que la variación de peso sea menor a 4% o 0.0005 g.
- 8) Retirar el papel filtro previamente tarado del desecador, colocar el mismo en el equipo de filtración e iniciar la succión.
- 9) Tomar muestra de 25 mL de agua residual, verterla en el en el papel filtro y esperar a que no existan trazas del agua residual.
- 10) Lavar con tres porciones de 10 mL de agua destilada (esperando a que el filtro se seque entre lavados) y desconectar el vacío.
- 11) Retirar el filtro del equipo de filtración y colocarlo en el pedazo de papel aluminio utilizado en el paso 5.
- 12) Secar el papel filtro con el material filtrado y pedazo de papel aluminio en la estufa eléctrica a 103 – 105 °C durante una hora.
- 13) Transportar y colocar el papel filtro con el pedazo de papel aluminio en el desecador.
- 14) Esperar a que el filtro se encuentre a temperatura ambiente, pesar en balanza analítica el papel filtro y anotar el resultado correspondiente (P2).
- 15) Repetir este pasos 8 – 14 hasta que la variación de peso sea menor a 4% o 0.0005 g.
- 16) Colocar el papel filtro con el material filtrado y el pedazo de papel aluminio en la mufla a 600 °C durante 20 minutos. Esperar a que la mufla disminuya su temperatura a 400 °C para abrirla.

17) Transportar y colocar el papel filtro con el pedazo de papel aluminio en la estufa eléctrica a 105 °C durante 15 minutos.

18) Transportar y colocar papel filtro con el material remanente en el desecador a temperatura ambiente.

19) Pesar en balanza analítica papel filtro con el material remanente a temperatura ambiente y anotar el resultado correspondiente (P3).

20) Calcular los sólidos suspendidos totales utilizando la ecuación No.1

$$SST \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{P2 - P1}{25 mL} * 10^6$$

21) Calcular los sólidos suspendidos volátiles aplicando la ecuación No.2

$$SSV \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{P2 - P3}{25 mL} * 10^6$$

5. Análisis granulométrico de Sólidos Suspendidos Totales (SST).

a. Con los sólidos suspendidos recolectados, se realiza un análisis granulométrico por tamices (para tamaños de partículas con un diámetro máximo de 0.074 mm):

1) Poner a secar la muestra en el horno a una temperatura de 105 a 110 °C por un período de tiempo de 12 a 24 horas

2) Enfriar la muestra a temperatura ambiente en el desecador y pesar 200 g de la misma.

3) Disgregar los grumos, del material con un pisón de madera para evitar el rompimiento de los grumos.

4) Colocar la muestra en una tara, agregar agua y déjela remojar hasta que se puedan deshacer completamente los grumos.

5) Se vacía el contenido de la tara sobre el tamiz No. 200, con cuidado y con la ayuda de agua, lavar lo mejor posible el suelo para que todos los finos pasen por el tamiz. El material que pasa a través del tamiz No. 200, se analizará por otros métodos en caso sea necesario.

6) El material retenido en el tamiz No. 200 después de lavado, se coloca en una tara, lavando el tamiz con agua.

7) Se seca el contenido de la tara en el horno a una temperatura de 100 – 110 °C por 24 horas.

8) Con el material seco en el paso anterior, se coloca el juego de tamices en orden progresivo, No. 20, No. 60, No. 100, No. 140, No. 200 y al final el fondo, vaciando el material previamente pesado.

9) Se agita el juego de tamices horizontalmente con movimientos de rotación y verticalmente con golpes secos en la tamizadora de laboratorio Ro-Tap® desarrollada por W.S. Tyler™ de vez en cuando. El tiempo de agitación depende de la cantidad de finos de la muestra, pero por lo general no debe ser menor de 15 minutos.

10) Inmediatamente realizado el paso anterior pesar las fracciones retenidas en cada tamiz, y anotar en el registro correspondiente.

6. Determinación de Sólidos Disueltos Totales (SDT)

a. Conductividad eléctrica

1) Tomar muestra de 25 mL de agua residual y verterla en un vaso de precipitados.

- 2) Encender el medidor multi-parámetro PCSTestr™ 35 OAKTON con el botón ON/OFF.
- 3) Seleccionar el modo Conductividad Eléctrica (EC) con el botón MODE/ENT.
- 4) Remover el tapón protector de la sonda e insertarlo en el líquido de muestra.
- 5) Realizar la medición de la Conductividad Eléctrica con medidor multi-parámetro PCSTestr™ 35 OAKTON.
- 6) Anotar el resultado correspondiente cuando la lectura del medidor sea estable.

b. Análisis gravimétrico

- 1) Poner a peso constante una cápsula de porcelana.
- 2) Pesar en balanza analítica la cápsula de porcelana y anotar el resultado correspondiente (P4).
- 3) Tomar muestra de 25 mL de agua residual y verterla en la cápsula de porcelana.
- 4) Evaporar la muestra de agua residual hasta secarse en baño maría, durante dos horas a 302 °C.
- 5) Durante 15 minutos, colocar la cápsula de porcelana en una estufa eléctrica a 105 °C.
- 6) Transportar y colocar la cápsula de porcelana en el desecador a temperatura ambiente.
- 7) Pesar en balanza analítica la cápsula de porcelana a temperatura ambiente y anotar el resultado correspondiente (P5).

8) Calcular los sólidos totales utilizando la ecuación No. 4

$$ST \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{P5 - P4}{25 \text{ mL}} * 10^6$$

9) Calcular los sólidos disueltos totales aplicando la ecuación No. 5

$$SDT \left(\frac{mg}{L} \right) = ST \left(\frac{mg}{L} \right) - SST \left(\frac{mg}{L} \right)$$

7. Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

- a. Conectar el reactor DRB 200 a la corriente eléctrica y encender el mismo presionando el botón ON/OFF ubicado en la parte posterior del equipo.
- b. Seleccionar la programación para pruebas de COD de dos horas a 150 °C y precalentar el reactor DRB 200.
- c. Tomar muestra de 500 mL de agua residual y verterla en un vaso de precipitados.
- d. Agregar la barra magnética en el vaso de precipitados con el agua de muestra y colocar ambos sobre el agitador magnético.
- e. Homogenizar la muestra dentro del vaso de precipitados aplicando la máxima revolución por minuto (rpm) disponible durante 5 minutos.
- f. Remover la tapa del vial reactivo de digestión para COD.
- g. Tomar una alícuota de 2 mL de la muestra homogenizada con pipeta graduada de 2 mL o en su defecto con pipeta volumétrica de 10 mL, sostener el vial en un ángulo de 45° y descargar la alícuota dentro del vial reactivo de digestión para COD.
- h. Colocar la tapadera al vial, enjuagar el exterior de vial para COD con agua desionizada y secar la superficie con un paño para tareas delicadas.

- i. Tomar el vial seco de la tapadera, agitarlo varias veces en el área de lavado y colocarlo dentro del reactor precalentado DRB 200.
- j. Repetir los pasos f – i sustituyendo el agua residual homogenizada por agua desionizada.
- k. Para medir la Demanda Química de Oxígeno soluble (DQOs) es necesario repetir los pasos c – e, filtrar el agua residual homogenizada y repetir el paso j sustituyendo el agua desionizada por el líquido filtrado homogenizado.
- l. Calentar los viales por dos horas. Al finalizar el tipo de digestión, esperar 20 minutos para que los viales reduzcan su temperatura como mínimo a 120 °C.
- m. Invertir cada vial de posición varias veces mientras su temperatura es mayor a la temperatura ambiente, colocar los viales en un rack para viales y esperar a que alcancen la temperatura ambiente.
- n. Encender el colorímetro DR/890 HACH con el botón ON/OFF/EXIT.
- o. Presionar el botón “PRGM”, seguidamente presionar los botones “1 7 ENTER”.
- p. Insertar el adaptador COD/TNT área de retención de celdas, rotar el adaptador hasta quedar en su lugar y finalmente empujar hacia abajo para completar su instalación.
- q. Limpiar el exterior del blanco con un paño para tareas delicadas, colocar el blanco en el adaptador empujando hacia abajo en la parte superior del vial hasta que quede completamente fijo y cubrir firmemente el vial con la tapa del instrumento de medición.
- r. Presionar el botón “ZERO”, el cursor se mueve a la derecha y después se despliega “0 mg/L COD”.
- s. Repetir el paso q con cada vial de muestra.

t. Presionar el botón “READ”, el cursor se mueve a la derecha y después se despliega el resultado en mg/L COD o mg/L O₂.

u. Anotar el resultado correspondiente de cada vial de muestra.

8. Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).

a. Agregar 150 mL el agua tratada en tres matraz de Erlenmeyer de 250 mL.

b. Realizar la medición del oxígeno disuelto con medidor de oxígeno disuelto portátil digital a cada una de las muestras.

c. Anotar el resultado correspondiente, sellar cada matraz de Erlenmeyer con tapón de hule y envolver con papel aluminio.

d. Incubar a 20 °C durante 5 días en la oscuridad, cada muestra de agua residual en su respectivo matraz de Erlenmeyer y tapón de hule.

e. Al finalizar el tiempo de incubación, se debe realizar la medición del oxígeno disuelto con medidor de oxígeno disuelto portátil digital a cada una de las muestras.

f. La diferencia entre los valores de oxígeno disuelto medidos representa la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅).

g. Para medir la Demanda Bioquímica de Oxígeno soluble (DBOs) es necesario filtrar el agua residual de muestra a tratar con el equipo de filtración y el papel filtro AP40 Millipore, posteriormente repetir los pasos a – e.

XIII. APÉNDICE B

Calibración de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

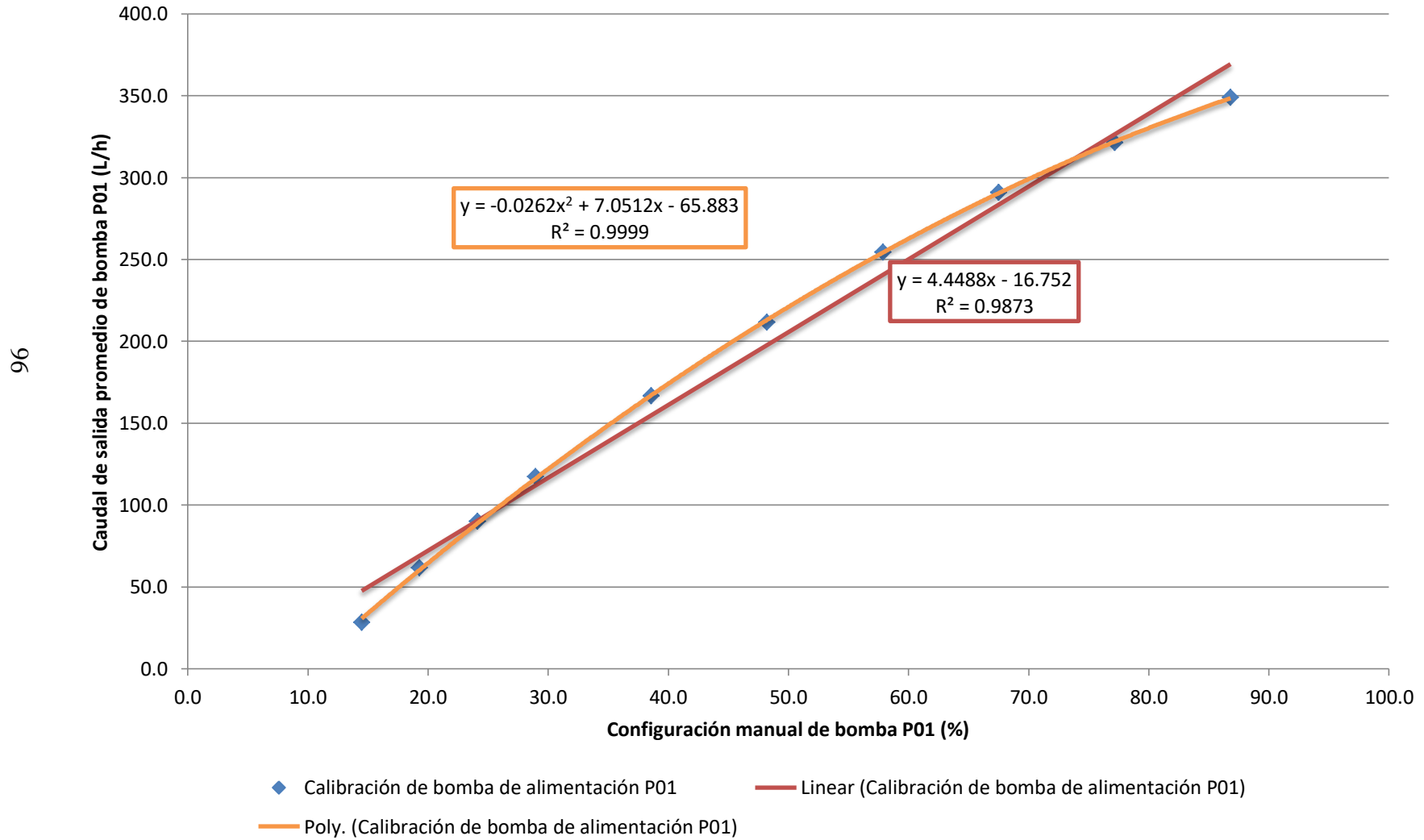
Cuadro 9 Calibración de la bomba de alimentación (P01) de velocidad variable

CAUDAL DE ALIMENTACIÓN (m ³ /día)	CAUDAL DE ALIMENTACIÓN (L/hora)	Configuración de alimentación manual (%)*	Tiempo esperado para llenado de contenedor de 20 L (h:min:s)	Tiempo real requerido para llenado de contenedor de 20 L (h:min:s)	Tiempo excedido (h:min:s)	Caudal de salida del tanque de lodos activados (L/h)	Caudal de salida promedio del tanque de lodos activados (L/h)	Diferencia en caudal (L/h)	Error del caudal (%)
0.5	20.8	4.8	0:57:36	--	--	--	--	20.8	100.00
				--	--	--			
				--	--	--			
1.0	41.7	9.6	0:28:48	--	--	--	--	41.7	100.00
				--	--	--			
				--	--	--			
1.5	62.5	14.5	0:19:12	0:58:09	0:38:57	20.6	28.3	34.2	54.66
				0:31:41	0:12:29	37.9			
				0:45:16	0:26:04	26.5			
2.0	83.3	19.3	0:14:24	0:20:08	0:05:44	59.6	61.8	21.6	25.88
				0:18:27	0:04:04	65.0			
				0:19:47	0:05:23	60.7			
2.5	104.2	24.1	0:11:31	0:13:21	0:01:50	89.9	90.0	14.1	13.56
				0:13:20	0:01:49	90.0			
				0:13:18	0:01:47	90.2			
3.0	125.0	28.9	0:09:36	0:10:14	0:00:38	117.2	117.4	7.6	6.04
				0:10:13	0:00:37	117.5			
				0:10:12	0:00:36	117.6			

Cuadro 9 Calibración de la bomba de alimentación (P01) de velocidad variable (continuación)

CAUDAL DE ALIMENTACIÓN (m ³ /día)	CAUDAL DE ALIMENTACIÓN (L/hora)	Configuración de alimentación manual (%)*	Tiempo esperado para llenado de contenedor de 20 L (h:min:s)	Tiempo real requerido para llenado de contenedor de 20 L (h:min:s)	Tiempo excedido (h:min:s)	Caudal de salida del tanque de lodos activados (L/h)	Caudal de salida promedio del tanque de lodos activados (L/h)	Diferencia en caudal (L/h)	Error del caudal (%)
4.0	166.7	38.6	0:07:12	0:07:11	0:00:01	167.1	166.8	0.1	0.06
				0:07:12	0:00:00	166.7			
				0:07:12	0:00:00	166.7			
5.0	208.3	48.2	0:05:46	0:05:40	0:00:06	211.9	211.6	3.3	1.58
				0:05:41	0:00:05	211.1			
				0:05:40	0:00:06	211.9			
6.0	250.0	57.9	0:04:48	0:04:44	0:00:04	253.5	254.5	4.5	1.78
				0:04:42	0:00:06	255.4			
				0:04:43	0:00:05	254.4			
7.0	291.7	67.5	0:04:07	0:04:07	0:00:00	291.5	291.1	0.6	0.19
				0:04:08	0:00:01	290.3			
				0:04:07	0:00:00	291.5			
8.0	333.3	77.2	0:03:36	0:03:44	0:00:08	321.5	321.5	11.8	3.54
				0:03:44	0:00:08	321.5			
				0:03:44	0:00:08	321.5			
9.0	375.0	86.8	0:03:12	0:03:26	0:00:12	349.7	349.0	26.0	6.92
				0:03:27	0:00:15	347.8			
				0:03:26	0:00:12	349.7			

Figura 25 Curva de calibración de la bomba de alimentación (P01) de velocidad variable



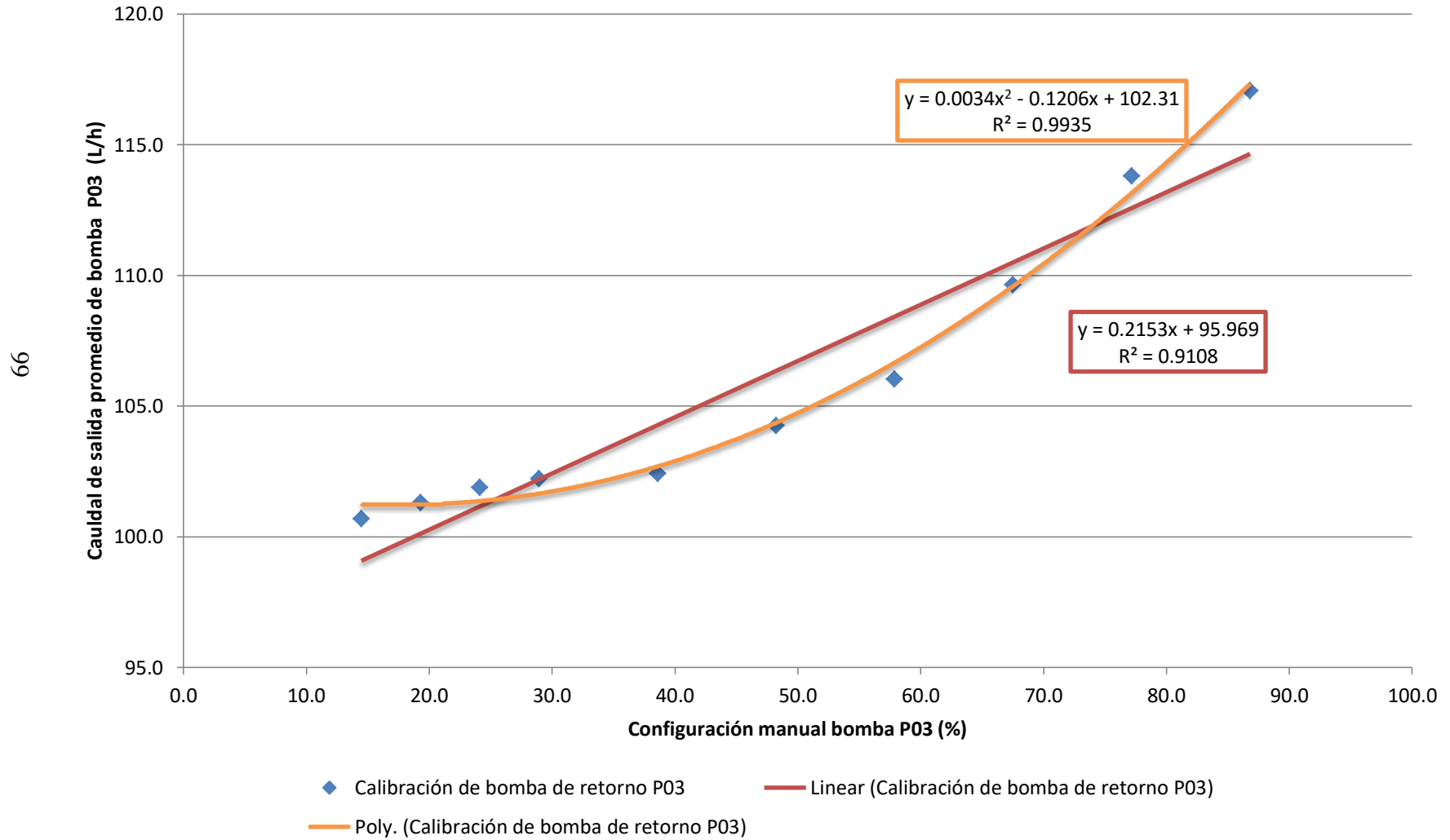
Cuadro 10 Calibración de la bomba de retorno de lodos (P03) de velocidad variable

CAUDAL DE RETOTNO (m ³ /día)	CAUDAL DE RETORNO (L/hora)	Configuración de retorno manual (%)*	Tiempo esperado para llenado de contenedor de 20 L (h:min:s)	Tiempo real requerido para llenado de contenedor de 20 L (h:min:s)	Tiempo excedido (h:min:s)	Caudal de salida del tanque de lodos activados (L/h)	Caudal de salida promedio del tanque de lodos activados (L/h)	Diferencia en caudal (L/h)	Error del caudal (%)
0.5	20.8	4.8	0:57:36	0:16:31	0:41:05	72.7	72.7	51.8	248.74
				0:16:30	0:41:06	72.7			
				0:16:32	0:41:04	72.6			
1.0	41.7	9.6	0:28:48	--	--	---	--	41.7	100.00
				--	--	--			
				--	--	--			
1.5	62.5	14.5	0:19:12	0:11:55	0:07:17	100.7	100.7	38.2	61.12
				0:11:55	0:07:17	100.7			
				0:11:55	0:07:17	100.7			
2.0	83.3	19.3	0:14:24	0:11:50	0:04:34	101.4	101.3	18.0	21.58
				0:11:51	0:04:33	101.3			
				0:11:51	0:04:33	101.3			
2.5	104.2	24.1	0:11:31	0:11:47	0:00:16	101.8	101.9	2.3	2.19
				0:11:46	0:00:15	102.0			
				0:11:47	0:00:16	101.8			
3.0	125.0	28.9	0:09:36	0:11:45	0:01:51	102.1	102.2	22.8	18.22
				0:11:44	0:01:52	102.3			
				0:11:44	0:01:52	102.3			

Cuadro 10 Calibración de la bomba de retorno de lodos (P03) de velocidad variable (continuación)

CAUDAL DE RETOTNO (m ³ /día)	CAUDAL DE RETORNO (L/hora)	Configuración de retorno manual (%)*	Tiempo esperado para llenado de contenedor de 20 L (h:min:s)	Tiempo real requerido para llenado de contenedor de 20 L (h:min:s)	Tiempo excedido (h:min:s)	Caudal de salida del tanque de lodos activados (L/h)	Caudal de salida promedio del tanque de lodos activados (L/h)	Diferencia en caudal (L/h)	Error del caudal (%)
4.0	166.7	38.6	0:07:12	0:11:43	0:04:31	102.4	102.4	64.3	38.56
				0:11:43	0:04:31	102.4			
				0:11:43	0:04:31	102.4			
5.0	208.3	48.2	0:05:46	0:11:30	0:05:44	104.3	104.2	104.1	49.96
				0:11:31	0:05:45	104.2			
				0:11:31	0:05:45	104.2			
6.0	250.0	57.9	0:04:48	0:11:19	0:06:31	106.0	106.0	144.0	57.58
				0:11:18	0:06:30	106.2			
				0:11:20	0:06:32	105.9			
7.0	291.7	67.5	0:04:07	0:10:57	0:06:50	109.6	109.6	182.0	62.41
				0:10:57	0:06:50	109.6			
				0:10:56	0:06:49	109.8			
8.0	333.3	77.2	0:03:36	0:10:33	0:06:57	113.7	113.8	219.5	65.86
				0:10:32	0:06:56	113.9			
				0:10:33	0:06:55	113.7			
9.0	375.0	86.8	0:03:12	0:10:14	0:07:02	117.3	117.1	257.9	68.78
				0:10:15	0:07:03	117.1			
				0:10:16	0:07:04	116.9			

Figura 26 Curva de calibración de la bomba de retorno de lodos (P03) de velocidad variable



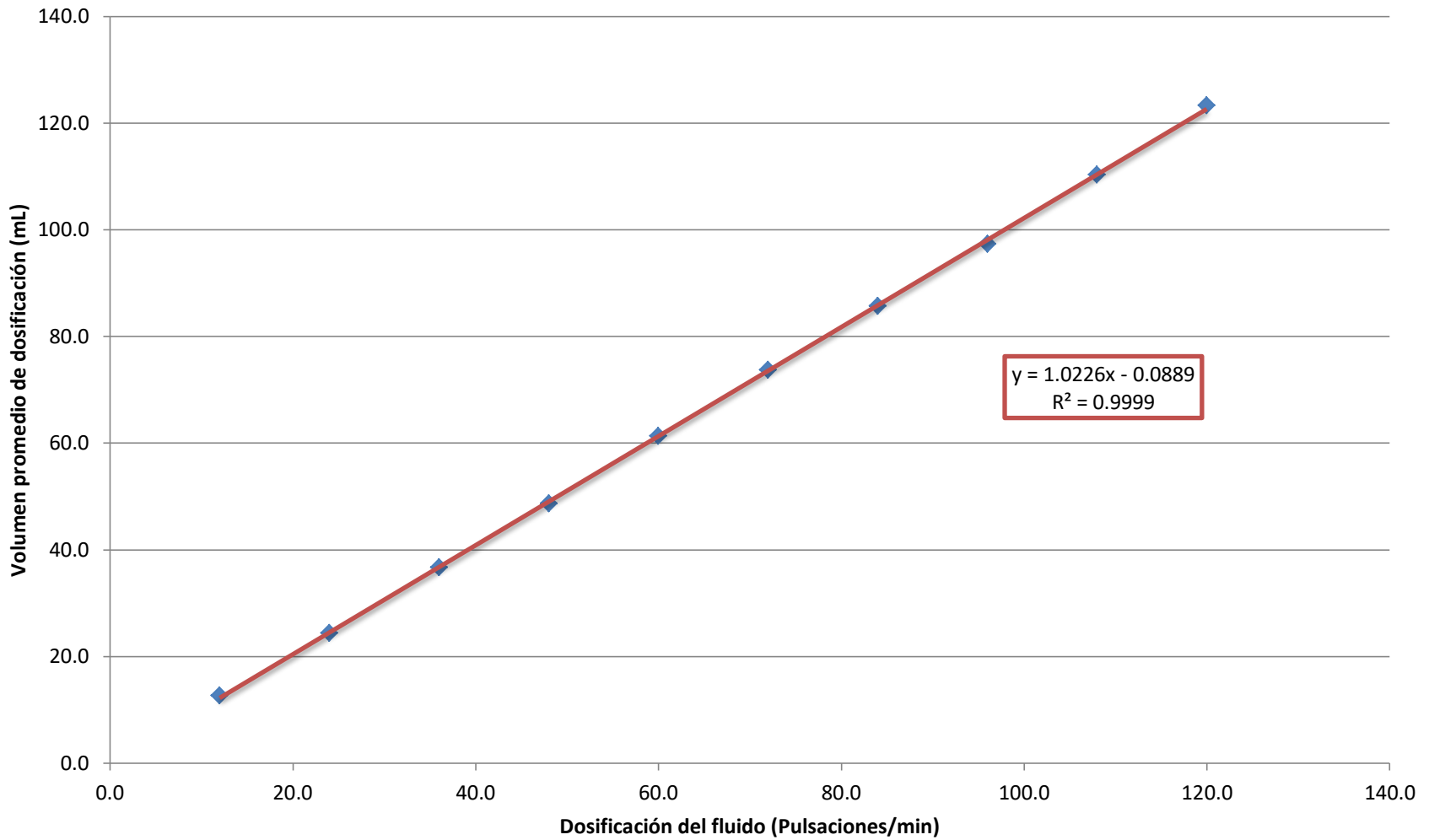
Cuadro 11 Calibración de la bomba de dosificación (P04) de solución de hipoclorito

DOSIFICACIÓN (pulsaciones/min)	Volumen por dosificación en 1 min (mL)	Flujo del fluido (mL/min)	Volumen promedio de dosificación (mL) / Flujo promedio (mL/min)
12.0	13	13	12.7
	13	13	
	12	12	
24.0	24	24	24.3
	25	25	
	24	24	
36.0	37	37	36.7
	36	36	
	37	37	
48.0	49	49	48.7
	49	49	
	48	48	
60.0	61	61	61.3
	62	62	
	61	61	
72.0	74	74	73.7
	74	74	
	73	73	
84.0	85	85	85.7
	86	86	
	86	86	

Cuadro 11 Calibración de la bomba de dosificación (P04) de solución de hipoclorito (continuación)

DOSIFICACIÓN (pulsaciones/min)	Volumen por dosificación en 1 min (mL)	Flujo del fluido (mL/min)	Volumen promedio de dosificación (mL) / Flujo promedio (mL/min)
96.0	98	98	97.3
	97	97	
	97	97	
108.0	110	110	110.3
	110	110	
	111	111	
120.0	124	124	123.3
	123	123	
	123	123	

Figura 27 Curva de calibración de la bomba de dosificación (P04) de solución de hipoclorito



◆ Flujo promedio de dosificación de bomba P04 — Linear (Flujo promedio de dosificación de bomba P04)

XIV. APÉNDICE C

A. Datos originales

A continuación, se presenta la caracterización parcial de la solución al 10% de agua residual preparada para cada una de las pruebas.

Cuadro 12 Caracterización del agua residual a tratar en la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias para las pruebas con el caudal de alimentación de 0.5 m³/día

CARACTERIZACIÓN		Solución al 10% de agua residual								
CAUDAL DE ALIMENTACIÓN		0.5 m ³ / día								
No. PRUEBA	Incertidumbre	1			2			3		
PARÁMETRO		Medición No. 1	Medición No. 2	Medición No. 3	Medición No. 1	Medición No. 2	Medición No. 3	Medición No. 1	Medición No. 2	Medición No. 3
pH	(± 0.01)	7.10	7.11	7.09	7.1	7.11	7.09	7.13	7.12	7.12
Conductividad eléctrica	(± 17.99 µS)	688.00	687.00	686.00	688.00	687.00	686.00	691.00	689.00	690.00
SDT	(± 0.0001 g)	34.2608	34.2610	34.2608	34.2609	34.2609	34.2610	34.2608	34.2609	34.2609
	(± 0.5 mL)	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
TURBIDEZ	(± 0.02 NTU)	76.40	75.90	76.20	76.40	75.90	76.20	77.00	76.00	76.00
DQO	(± 0.1 mL)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
DBO	(± 0.1 mL)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
OD	(± 0.1 ppm)	3.8	3.8	3.9	3.7	3.6	3.6	3.7	3.9	3.9
SST	(± 0.0001 g)	0.6408	0.6407	0.6408	0.6405	0.6405	0.6406	0.6407	0.6406	0.6407
	(± 0.5 mL)	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
Temperatura	(± 0.1 °C)	22.8	22.9	22.8	22.8	22.9	22.8	24.1	24	23.9
Refracción	(± 0.1% Brix)	2.6	2.5	2.6	2.6	2.5	2.6	2.5	2.2	2.4

Cuadro 13 Caracterización del agua residual a tratar en la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias para las pruebas con el caudal de alimentación de 1.0 m³/día

105

CARACTERIZACIÓN	Solución al 10% de agua residual									
CAUDAL DE ALIMENTACIÓN	1.0 m ³ / día									
No. PRUEBA	Incertidumbre	1			2			3		
PARÁMETRO		Medición No. 1	Medición No. 2	Medición No. 3	Medición No. 1	Medición No. 2	Medición No. 3	Medición No. 1	Medición No. 2	Medición No. 3
pH	(± 0.01)	7.13	7.14	7.14	7.15	7.16	7.16	7.15	7.14	7.14
Conductividad eléctrica	(± 17.99 µS)	705.00	706.00	706.00	704.00	705.00	705.00	706.00	707.00	705.00
SDT	(± 0.0001 g)	34.2609	34.2611	34.2609	34.2608	34.2608	34.2609	34.2610	34.2609	34.2610
	(± 0.5 mL)	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
TURBIDEZ	(± 0.02 NTU)	78.42	78.16	78.41	76.00	77.00	76.00	79.00	77.00	78.00
DQO	(± 0.1 mL)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
DBO	(± 0.1 mL)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
OD	(± 0.1 ppm)	3.9	3.8	3.8	3.9	3.7	3.8	3.8	4.0	3.8
SST	(± 0.0001 g)	0.6405	0.6406	0.6405	0.6407	0.6406	0.6406	0.6408	0.6409	0.6409
	(± 0.5 mL)	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
Temperatura	(± 0.1 °C)	24.1	24	23.9	23.1	22.9	23	23	23	23
Refracción	(± 0.1% Brix)	2.1	2	2.1	2	2.2	2.2	2.2	1.9	2.0

Cuadro 14 Caracterización del agua residual a tratar en la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias para las pruebas con el caudal de alimentación de 1.5 m³/día

106

CARACTERIZACIÓN		SOLUCIÓN AL 10% DE AGUA RESIDUAL								
CAUDAL DE ALIMENTACIÓN		1.5 m ³ / día								
No. PRUEBA	Incertidumbre	1			2			3		
PARÁMETRO		Medición No. 1	Medición No. 2	Medición No. 3	Medición No. 1	Medición No. 2	Medición No. 3	Medición No. 1	Medición No. 2	Medición No. 3
pH	(± 0.01)	6.61	6.60	6.60	6.56	6.59	6.58	6.52	6.51	6.49
Conductividad eléctrica	(± 17.99 µS)	714.99	715.00	715.02	714.75	714.6	714.67	716.00	715.00	715.00
SDT	(± 0.0001 g)	34.2611	34.2611	34.2610	34.2608	34.2609	34.2608	34.2611	34.2609	34.2608
	(± 0.5 mL)	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
TURBIDEZ	(± 0.02 NTU)	78.54	77.96	78.48	78.50	78.30	78.60	78.70	78.68	78.69
DQO	(± 0.1 mL)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
DBO	(± 0.1 mL)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
OD	(± 0.1 ppm)	3.6	3.7	3.6	3.7	3.6	3.7	3.6	3.8	3.6
SST	(± 0.0001 g)	0.6407	0.6406	0.6407	0.6405	0.6407	0.6406	0.6408	0.6409	0.6408
	(± 0.5 mL)	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
Temperatura	(± 0.1 °C)	25.5	25.4	25.3	23.4	23.5	23.4	22.6	22.5	22.6
Refracción	(± 0.1% Brix)	2.10	2.30	2.40	2.3	2.1	2.2	2.2	2.1	2.2

Cuadro 15 Análisis granulométrico de la solución al 10% de agua residual a tratar en la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias

Muestra:	Sólidos en la solución al 10% de agua residual		Masa de la muestra (g):	200.4
No. Mesh	Masa del tamiz vacío (g)	Masa del tamiz lleno (g)	Cantidad de sólidos/ tamiz (g)	Porcentaje de separación
20	382.0	382.0	0.0	0.00%
45	330.6	330.6	0.0	0.00%
60	329.2	329.2	0.0	0.00%
80	337.5	507.6	170.1	84.88%
100	323.1	340.6	17.5	8.73%
Fondo	462.5	475.2	12.7	6.34%
		Total	200.3	99.95%
		Perdida	0.05	

B. Cálculo de muestra

Cálculo 1 Determinación de los Sólidos Suspendidos Totales (SST)

$$SST \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{0.6475 - 0.6408}{25 \text{ mL}} * 10^6 = 267 \text{ ppm}$$

*Se empleó el mismo cálculo para la determinación de todos los Sólidos Suspendidos Totales (SST) durante los ensayos.

Cálculo 2 Determinación de los Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)

$$SSV \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{0.6475 \text{ g} - 0.6415 \text{ g}}{25 \text{ mL}} * 10^6 = 240 \text{ ppm}$$

*Se empleó el mismo cálculo para la determinación de todos los Sólidos Suspendidos Volátiles (SST) durante las pruebas.

Cálculo 3 Determinación de los Sólidos Totales (ST)

$$ST \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{34.2797 \text{ g} - 34.2609 \text{ g}}{25 \text{ mL}} * 10^6 = 752 \text{ ppm}$$

*Se empleó el mismo cálculo para la determinación de todos los Sólidos Totales (ST) durante la experimentación.

Cálculo 4 Determinación de los Sólidos Disueltos Totales (SDT)

$$SDT \left(\frac{mg}{L} \right) = 752 \text{ ppm} - 267 \text{ ppm} = 485 \text{ ppm}$$

*Se empleó el mismo cálculo para la determinación de todos los Sólidos Disueltos Totales (SDT) durante los ensayos.

Cálculo 5 Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

$$DBO_5 \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{3.8 \text{ ppm} - 2.57 \text{ ppm}}{0.01} = 123 \text{ ppm}$$

*Se empleó el mismo cálculo para la determinación de todas las Demandas Bioquímicas de Oxígeno (DBO) durante la experimentación.

C. Datos calculados

Enseguida se detallan los datos calculados para las condiciones de entrada del afluente y salida del efluente de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Cuadro 16 Datos calculados para la determinación de condiciones de entrada del afluente con un flujo volumétrico de alimentación de 0.5 m³/día y salida del efluente de la planta de tratamiento aeróbico

CAUDAL DE ALIMENTACIÓN	0.5 m ³ / día																	
No. PRUEBA	1						2						3					
CARACTERIZACIÓN	AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS)				AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS)				AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS)			
PARÁMETRO	0	Incert.	5	19	24	Incert.	0	Incert.	5	19	24	Incert.	0	Incert.	5	19	24	Incert.
pH	7.10	± 0.01	7.42	8.24	8.54	± 0.01	7.10	± 0.01	7.42	8.24	8.56	± 0.01	7.12	± 0.01	7.77	8.00	8.59	± 0.01
Conductividad eléctrica (µS)	687.00	± 17.99	683.82	672.10	668.00	± 17.99	687.00	± 17.99	685.40	677.54	676.00	± 17.99	690.00	± 17.99	683.66	681.35	675.58	± 17.99
SDT (ppm)	485.00	± 0.07	466.74	420.28	404.00	± 0.04	485.00	± 0.07	468.29	423.11	409.00	± 0.04	492.33	± 0.07	457.25	444.49	412.59	± 0.04
TURBIDEZ (NTU)	76.17	± 0.15	72.79	63.98	60.40	± 0.02	76.17	± 0.15	73.69	66.37	63.60	± 0.02	76.33	± 0.09	71.30	69.47	64.90	± 0.02
DQO (mg/L COD)	223.67	± 16	216.52	197.91	190.00	± 16	223.67	± 16	217.06	200.15	191.00	± 16	222.00	± 16	205.72	199.80	185.00	± 16
DBO (mg/L BOD)	123.02	± 16	119.09	108.85	104.50	± 16	123.02	± 16	119.38	110.08	105.05	± 16	122.10	± 16	113.26	110.04	102.00	± 16
OD (ppm)	3.83	± 0.10	4.37	5.76	6.40	± 0.10	3.83	± 0.10	4.26	5.81	6.30	± 0.10	3.83	± 0.10	4.92	5.31	6.30	± 0.10
SST (ppm)	267.00	± 0.06	244.78	187.46	164.00	± 0.04	267.00	± 0.06	235.04	186.96	179.00	± 0.04	226.33	± 0.06	191.27	178.52	146.64	± 0.04
Temperatura (°C)	22.83	± 0.10	22.50	20.00	20.40	± 0.10	22.83	± 0.10	22.60	20.20	20.60	± 0.10	24.00	± 0.10	23.40	23.00	22.90	± 0.10
Refracción (% Brix)	2.57	± 0.10	1.43	0.54	0.20	± 0.10	2.57	± 0.10	2.04	0.61	0.20	± 0.10	2.37	± 0.10	1.37	1.01	0.10	± 0.10

Cuadro 17 Datos calculados para la determinación de condiciones de entrada del afluente con un flujo volumétrico de alimentación de 1.0 m³/día y salida del efluente de la planta de tratamiento aeróbico

CAUDAL DE ALIMENTACIÓN	1.0 m ³ / día																	
No. PRUEBA	1						2						3					
CARACTERIZACIÓN	AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS)				AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS)				AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS)			
PARÁMETRO	0	Incert.	5	19	24	Incert.	0	Incert.	5	19	24	Incert.	0	Incert.	5	19	24	Incert.
pH	7.14	± 0.01	7.64	8.20	8.83	± 0.01	7.16	± 0.01	7.84	8.74	9.24	± 0.01	7.14	± 0.01	7.78	8.74	8.96	± 0.01
Conductividad eléctrica (µS)	705.67	± 17.99	679.54	650.80	618.58	± 17.99	704.67	± 17.99	667.49	619.04	592.00	± 17.99	706.00	± 17.99	665.05	603.04	589.00	± 17.99
SDT (ppm)	533.00	± 0.09	485.95	434.18	376.15	± 0.09	499.00	± 0.08	463.03	416.16	390.00	± 0.05	500.33	± 0.10	456.12	389.16	374.00	± 0.13
TURBIDEZ (NTU)	78.33	± 0.09	74.01	69.26	63.93	± 0.02	76.33	± 0.33	71.80	65.90	62.60	± 0.02	78.00	± 0.09	73.05	65.57	63.87	± 0.02
DQO (mg/L COD)	220.67	± 16	206.92	191.81	174.86	± 16	222.00	± 16	206.64	186.62	175.45	± 16	220.00	± 16	202.15	175.12	169.00	± 16
DBO (mg/L BOD)	121.37	± 16	113.81	105.49	96.17	± 16	122.10	± 16	113.65	102.64	96.50	± 16	121.00	± 16	111.18	96.32	92.95	± 16
OD (ppm)	3.83	± 0.10	4.63	5.51	6.50	± 0.10	3.80	± 0.10	4.76	6.00	6.70	± 0.10	3.87	± 0.10	4.82	6.27	6.60	± 0.10
SST (ppm)	248.00	± 0.09	213.87	176.33	134.24	± 0.09	249.00	± 0.07	213.69	167.68	142.00	± 0.05	247.67	± 0.09	209.51	151.73	138.65	± 0.13
Temperatura (°C)	24.00	± 0.10	23.70	23.10	23.00	± 0.10	23.00	± 0.10	22.80	22.50	22.00	± 0.10	23.00	± 0.10	22.50	22.00	22.00	± 0.10
Refracción (% Brix)	2.07	± 0.10	1.48	0.83	0.10	± 0.10	2.13	± 0.10	1.46	0.59	0.10	± 0.10	2.03	± 0.10	1.36	0.33	0.10	± 0.10

Cuadro 18 Datos calculados para la determinación de condiciones de entrada del afluente con un flujo volumétrico de alimentación de 1.5 m³/día y salida del efluente de la planta de tratamiento aeróbico

CAUDAL DE ALIMENTACIÓN	1.5 m ³ / día																	
No. PRUEBA	1						2						3					
CARACTERIZACIÓN	AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS)				AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS)				AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS)			
PARÁMETRO	0	Incert.	5	19	24	Incert.	0	Incert.	5	19	24	Incert.	0	Incert.	5	19	24	Incert.
pH	6.60	± 0.01	7.01	8.22	8.63	± 0.01	6.58	± 0.01	6.98	8.18	8.58	± 0.01	6.51	± 0.01	6.92	8.16	8.57	± 0.01
Conductividad eléctrica (µS)	715.00	± 17.99	652.23	463.90	401.12	± 17.99	714.67	± 17.99	652.50	468.73	406.86	± 17.99	715.33	± 17.99	654.19	470.76	409.62	± 17.99
SDT (ppm)	502.00	± 0.06	458.25	326.98	283.23	± 0.04	501.60	± 0.07	459.60	335.48	293.69	± 0.06	502.33	± 0.07	459.85	332.39	289.90	± 0.07
TURBIDEZ (NTU)	78.33	± 0.12	73.88	60.55	56.10	± 0.02	78.47	± 0.09	74.15	61.39	57.10	± 0.02	78.69	± 0.09	74.27	61.00	56.58	± 0.02
DQO (mg/L COD)	223.67	± 16	205.74	151.97	134.05	± 16	224.00	± 16	206.05	153.00	135.14	± 16	223.33	± 16	205.91	153.65	136.23	± 16
DBO (mg/L BOD)	123.02	± 16	113.16	83.59	73.73	± 16	123.20	± 16	113.33	84.15	74.33	± 16	122.83	± 16	113.25	84.51	74.93	± 16
OD (ppm)	3.63	± 0.10	4.23	6.01	6.60	± 0.10	3.67	± 0.10	4.32	6.25	6.90	± 0.10	3.67	± 0.10	4.29	6.17	6.80	± 0.10
SST (ppm)	284.54	± 0.05	242.43	116.09	73.98	± 0.04	284.01	± 0.06	241.44	115.65	73.30	± 0.06	283.67	± 0.06	241.93	116.73	75.00	± 0.07
Temperatura (°C)	25.40	± 0.10	24.80	23.30	22.70	± 0.1	23.43	± 0.10	22.70	21.50	21.00	± 0.1	22.57	± 0.10	22.00	21.00	20.50	± 0.10
Refracción (% Brix)	2.27	± 0.10	1.81	0.45	0.00	± 0.1	2.20	± 0.10	1.78	0.52	0.10	± 0.10	2.17	± 0.10	1.73	0.43	0.00	± 0.10

Seguidamente se muestra el rendimiento de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Cuadro 19 Datos calculados del rendimiento de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales a un flujo volumétrico de alimentación de 0.5 m³/día

CAUDAL DE ALIMENTACIÓN	0.5 m ³ / día														
No. PRUEBA	1					2					3				
CARACTERIZACIÓN	AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS) / (% Remoción)			AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS) / (% Remoción)			AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS) / (% Remoción)		
PARÁMETRO	0	Incert.	5	19	24	0	Incert.	5	19	24	0	Incert.	5	19	24
pH	7.10	± 0.01	-	-	-	7.10	± 0.01	-	-	-	7.12	± 0.01	-	-	-
Conductividad eléctrica (µS)	687.00	± 17.99	0.46%	2.17%	2.77%	687.00	± 17.99	0.23%	1.38%	1.60%	690.00	± 17.99	0.92%	1.25%	2.09%
SDT (ppm)	485.00	± 0.07	3.76%	13.34%	16.70%	485.00	± 0.07	3.45%	12.76%	15.67%	492.33	± 0.07	7.13%	9.72%	16.20%
TURBIDEZ (NTU)	76.17	± 0.15	4.43%	16.00%	20.70%	76.17	± 0.15	3.25%	12.86%	16.50%	76.33	± 0.09	6.59%	8.99%	14.98%
DQO (mg/L COD)	223.67	± 16	3.20%	11.52%	15.05%	223.67	± 16	2.95%	10.51%	14.61%	222.00	± 16	7.33%	10.00%	16.67%
DBO (mg/L BOD)	123.02	± 16	3.20%	11.52%	15.05%	123.02	± 16	2.95%	10.51%	14.61%	122.10	± 16	7.24%	9.88%	16.46%
OD (ppm)	3.83	± 0.10	-	-	-	3.83	± 0.10	-	-	-	3.83	± 0.10	-	-	-
SST (ppm)	267.00	± 0.06	8.32%	29.79%	38.58%	267.00	± 0.06	11.97%	29.98%	32.96%	226.33	± 0.06	15.49%	21.13%	35.21%
Temperatura (°C)	22.83	± 0.10	-	-	-	22.83	± 0.10	-	-	-	24.00	± 0.10	-	-	-
Refracción (% Brix)	2.57	± 0.10	44.29%	78.96%	92.21%	2.57	± 0.10	20.52%	76.23%	92.21%	2.37	± 0.10	42.14%	57.46%	95.77%

Cuadro 20 Datos calculados del rendimiento de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales a un flujo volumétrico de alimentación de 1.0 m³/día

CAUDAL DE ALIMENTACIÓN	1.0 m ³ / día														
No. PRUEBA	1					2					3				
CARACTERIZACIÓN	AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS) / (% Remoción)			AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS) / (% Remoción)			AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS) / (% Remoción)		
PARÁMETRO	0	Incert.	5	19	24	0	Incert.	5	19	24	0	Incert.	5	19	24
pH	7.14	± 0.01	-	-	-	7.16	± 0.01	-	-	-	7.14	± 0.01	-	-	-
Conductividad eléctrica (μS)	705.67	± 17.99	3.70%	7.77%	12.34%	704.67	± 17.99	5.28%	12.15%	15.99%	706.00	± 17.99	5.80%	14.58%	16.57%
SDT (ppm)	533.00	± 0.09	8.83%	18.54%	29.43%	499.00	± 0.08	7.21%	16.60%	21.84%	500.33	± 0.10	8.84%	22.22%	25.25%
TURBIDEZ (NTU)	78.33	± 0.09	5.52%	11.58%	18.38%	76.33	± 0.33	5.94%	13.67%	17.99%	78.00	± 0.09	6.34%	15.94%	18.12%
DQO (mg/L COD)	220.67	± 16	6.23%	13.08%	20.76%	222.00	± 16	6.92%	15.94%	20.97%	220.00	± 16	8.11%	20.40%	23.18%
DBO (mg/L BOD)	121.37	± 16	6.23%	13.08%	20.76%	122.10	± 16	6.92%	15.94%	20.97%	121.00	± 16	8.11%	20.40%	23.18%
OD (ppm)	3.83	± 0.10	-	-	-	3.80	± 0.10	-	-	-	3.87	± 0.10	-	-	-
SST (ppm)	248.00	± 0.09	13.76%	28.90%	45.87%	249.00	± 0.07	14.18%	32.66%	42.97%	247.67	± 0.09	15.41%	38.74%	44.02%
Temperatura (°C)	24.00	± 0.10	-	-	-	23.00	± 0.10	-	-	-	23.00	± 0.10	-	-	-
Refracción (% Brix)	2.07	± 0.10	28.55%	59.95%	95.16%	2.13	± 0.10	31.45%	72.44%	95.31%	2.03	± 0.10	33.28%	83.67%	95.08%

Cuadro 21 Datos calculados del rendimiento de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales a un flujo volumétrico de alimentación de 1.5 m³/día

CAUDAL DE ALIMENTACIÓN	1.5 m ³ / día														
No. PRUEBA	1					2					3				
CARACTERIZACIÓN	AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS) / (% Remoción)			AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS) / (% Remoción)			AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS) / (% Remoción)		
PARÁMETRO	0	Incert.	5	19	24	0	Incert.	5	19	24	0	Incert.	5	19	24
pH	6.60	± 0.01	-	-	-	6.58	± 0.01	-	-	-	6.51	± 0.01	-	-	-
Conductividad eléctrica (μS)	715.00	± 17.99	8.78%	35.12%	43.90%	714.67	± 17.99	8.70%	34.41%	43.07%	715.33	± 17.99	8.55%	34.19%	42.74%
SDT (ppm)	502.00	± 0.06	8.72%	34.86%	43.58%	501.60	± 0.07	8.37%	33.12%	41.45%	502.33	± 0.07	8.46%	33.83%	42.29%
TURBIDEZ (NTU)	78.33	± 0.12	5.68%	22.70%	28.38%	78.47	± 0.09	5.50%	21.76%	27.23%	78.69	± 0.09	5.62%	22.48%	28.10%
DQO (mg/L COD)	223.67	± 16	8.01%	32.05%	40.07%	224.00	± 16	8.01%	31.70%	39.67%	223.33	± 16	7.80%	31.20%	39.00%
DBO (mg/L BOD)	123.02	± 16	8.01%	32.05%	40.07%	123.20	± 16	8.01%	31.70%	39.67%	122.83	± 16	7.80%	31.20%	39.00%
OD (ppm)	3.63	± 0.10	-	-	-	3.67	± 0.10	-	-	-	3.67	± 0.10	-	-	-
SST (ppm)	284.54	± 0.05	14.80%	59.20%	74.00%	284.01	± 0.06	14.99%	59.28%	74.19%	283.67	± 0.06	14.71%	58.85%	73.56%
Temperatura (°C)	25.40	± 0.10	-	-	-	23.43	± 0.10	-	-	-	22.57	± 0.10	-	-	-
Refracción (% Brix)	2.27	± 0.10	20.00%	80.00%	100.00%	2.20	± 0.10	19.28%	76.27%	95.45%	2.17	± 0.10	20.00%	80.00%	100.00%

Cuadro 22 Determinación de condiciones de entrada del afluente con un flujo volumétrico de alimentación de 0.5 m³/día y salida del efluente de la planta de tratamiento aeróbico

CAUDAL DE ALIMENTACIÓN	0.5 m ³ / día															
No. PRUEBA	1				2				3				PROMEDIO			
CARACTERIZACIÓN	AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS)		AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS)		AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS)		AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS)	
PARÁMETRO	0	Incert.	24	Incert.	0	Incert.	24	Incert.	0	Incert.	24	Incert.	0	Incert.	24	Incert.
pH	7.10	± 0.01	8.54	± 0.01	7.10	± 0.01	8.56	± 0.01	7.12	± 0.01	8.59	± 0.01	7.11	± 0.01	8.56	± 0.01
Conductividad eléctrica (μS)	687.00	± 17.99	668.00	± 17.99	687.00	± 17.99	676.00	± 17.99	690.00	± 17.99	675.58	± 17.99	688.00	± 17.99	673.19	± 17.99
SDT (ppm)	485.00	± 0.07	404.00	± 0.04	485.00	± 0.07	409.00	± 0.04	492.33	± 0.07	412.59	± 0.04	487.44	± 0.07	408.53	± 0.04
TURBIDEZ (NTU)	76.17	± 0.15	60.40	± 0.02	76.17	± 0.15	63.60	± 0.02	76.33	± 0.09	64.90	± 0.02	76.22	± 0.15	62.97	± 0.02
DQO (mg/L COD)	223.67	± 16	190.00	± 16	223.67	± 16	191.00	± 16	222.00	± 16	185.00	± 16	223.11	± 16	188.67	± 16
DBO (mg/L BOD)	123.02	± 16	104.50	± 16	123.02	± 16	105.05	± 16	122.10	± 16	102.00	± 16	122.71	± 16	103.85	± 16
OD (ppm)	3.83	± 0.10	6.40	± 0.10	3.83	± 0.10	6.30	± 0.10	3.83	± 0.10	6.30	± 0.10	3.83	± 0.10	6.33	± 0.10
SST (ppm)	267.00	± 0.06	164.00	± 0.04	267.00	± 0.06	179.00	± 0.04	226.33	± 0.06	146.64	± 0.04	253.44	± 0.06	163.21	± 0.04
Temperatura (°C)	22.83	± 0.10	20.40	± 0.10	22.83	± 0.10	20.60	± 0.10	24.00	± 0.10	22.90	± 0.10	23.22	± 0.10	21.30	± 0.10
Refracción (% Brix)	2.57	± 0.10	0.20	± 0.10	2.57	± 0.10	0.20	± 0.10	2.37	± 0.10	0.10	± 0.10	2.50	± 0.10	0.17	± 0.10

Cuadro 23 Determinación de condiciones de entrada del afluente con un flujo volumétrico de alimentación de 1.0 m³/día y salida del efluente de la planta de tratamiento aeróbico

CAUDAL DE ALIMENTACIÓN	1.0 m ³ / día															
No. PRUEBA	1				2				3				PROMEDIO			
CARACTERIZACIÓN	AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS)		AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS)		AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS)		AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS)	
PARÁMETRO	0	Incert.	24	Incert.	0	Incert.	24	Incert.	0	Incert.	24	Incert.	0	Incert.	24	Incert.
pH	7.14	± 0.01	8.83	± 0.01	7.16	± 0.01	9.24	± 0.01	7.14	± 0.01	8.96	± 0.01	7.15	± 0.01	9.01	± 0.01
Conductividad eléctrica (µS)	705.67	± 17.99	618.58	± 17.99	704.67	± 17.99	592.00	± 17.99	706.00	± 17.99	589.00	± 17.99	705.44	± 17.99	599.86	± 17.99
SDT (ppm)	533.00	± 0.09	376.15	± 0.09	499.00	± 0.08	390.00	± 0.05	500.33	± 0.10	374.00	± 0.13	510.78	± 0.10	380.05	± 0.13
TURBIDEZ (NTU)	78.33	± 0.09	63.93	± 0.02	76.33	± 0.33	62.60	± 0.02	78.00	± 0.09	63.87	± 0.02	77.55	± 0.33	63.47	± 0.02
DQO (mg/L COD)	220.67	± 16	174.86	± 16	222.00	± 16	175.45	± 16	220.00	± 16	169.00	± 16	220.89	± 16	173.10	± 16
DBO (mg/L BOD)	121.37	± 16	96.17	± 16	122.10	± 16	96.50	± 16	121.00	± 16	92.95	± 16	121.49	± 16	95.21	± 16
OD (ppm)	3.83	± 0.10	6.50	± 0.10	3.80	± 0.10	6.70	± 0.10	3.87	± 0.10	6.60	± 0.10	3.83	± 0.10	6.60	± 0.10
SST (ppm)	248.00	± 0.09	134.24	± 0.09	249.00	± 0.07	142.00	± 0.05	247.67	± 0.09	138.65	± 0.13	248.22	± 0.09	138.30	± 0.13
Temperatura (°C)	24.00	± 0.10	23.00	± 0.10	23.00	± 0.10	22.00	± 0.10	23.00	± 0.10	22.00	± 0.10	23.33	± 0.10	22.33	± 0.10
Refracción (% Brix)	2.07	± 0.10	0.10	± 0.10	2.13	± 0.10	0.10	± 0.10	2.03	± 0.10	0.10	± 0.10	2.08	± 0.10	0.10	± 0.10

Cuadro 24 Determinación de condiciones de entrada del afluente con un flujo volumétrico de alimentación de 1.5 m³/día y salida del efluente de la planta de tratamiento aeróbico

CAUDAL DE ALIMENTACIÓN	1.5 m ³ / día															
No. PRUEBA	1				2				3				PROMEDIO			
CARACTERIZACIÓN	AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS)		AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS)		AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS)		AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS)	
PARÁMETRO	0	Incert.	24	Incert.	0	Incert.	24	Incert.	0	Incert.	24	Incert.	0	Incert.	24	Incert.
pH	6.60	± 0.01	8.63	± 0.01	6.58	± 0.01	8.58	± 0.01	6.51	± 0.01	8.57	± 0.01	6.56	± 0.01	8.59	± 0.01
Conductividad eléctrica (µS)	715.00	± 17.99	401.12	± 17.99	714.67	± 17.99	406.86	± 17.99	715.33	± 17.99	409.62	± 17.99	715.00	± 17.99	405.87	± 17.99
SDT (ppm)	502.00	± 0.06	283.23	± 0.04	501.60	± 0.07	293.69	± 0.06	502.33	± 0.07	289.90	± 0.07	501.98	± 0.07	288.94	± 0.07
TURBIDEZ (NTU)	78.33	± 0.12	56.10	± 0.02	78.47	± 0.09	57.10	± 0.02	78.69	± 0.09	56.58	± 0.02	78.49	± 0.12	56.59	± 0.02
DQO (mg/L COD)	223.67	± 16	134.05	± 16	224.00	± 16	135.14	± 16	223.33	± 16	136.23	± 16	223.67	± 16	135.14	± 16
DBO (mg/L BOD)	123.02	± 16	73.73	± 16	123.20	± 16	74.33	± 16	122.83	± 16	74.93	± 16	123.02	± 16	74.33	± 16
OD (ppm)	3.63	± 0.10	6.60	± 0.10	3.67	± 0.10	6.90	± 0.10	3.67	± 0.10	6.80	± 0.10	3.66	± 0.10	6.77	± 0.10
SST (ppm)	284.54	± 0.05	73.98	± 0.04	284.01	± 0.06	73.30	± 0.06	283.67	± 0.06	75.00	± 0.07	284.07	± 0.06	74.09	± 0.07
Temperatura (°C)	25.40	± 0.10	22.70	± 0.10	23.43	± 0.10	21.00	± 0.10	22.57	± 0.10	20.50	± 0.10	23.80	± 0.10	21.40	± 0.10
Refracción (% Brix)	2.27	± 0.10	0.00	± 0.10	2.20	± 0.10	0.10	± 0.10	2.17	± 0.10	0.00	± 0.10	2.21	± 0.10	0.03	± 0.10

Cuadro 25 Reducción de parámetros físicos y químicos del agua tratada en la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales a un flujo volumétrico de alimentación de 0.5 m³/día

120

CAUDAL DE ALIMENTACIÓN	0.5 m ³ / día											
No. PRUEBA	1			2			3			PROMEDIO		
CARACTERIZACIÓN	AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS) / (% Remoción)	AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS) / (% Remoción)	AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS) / (% Remoción)	AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS) / (% Remoción)
PARÁMETRO	0	Incert.	24	0	Incert.	24	0	Incert.	24	0	Incert.	24
pH	7.10	± 0.01	-	7.10	± 0.01	-	7.12	± 0.01	-	7.11	± 0.01	-
Conductividad eléctrica (µS)	687.00	± 17.99	2.77%	687.00	± 17.99	1.60%	690.00	± 17.99	2.09%	688.00	± 17.99	2.15%
SDT (ppm)	485.00	± 0.07	16.70%	485.00	± 0.07	15.67%	492.33	± 0.07	16.20%	487.44	± 0.07	16.19%
TURBIDEZ (NTU)	76.17	± 0.15	20.70%	76.17	± 0.15	16.50%	76.33	± 0.09	14.98%	76.22	± 0.15	17.39%
DQO (mg/L COD)	223.67	± 16	15.05%	223.67	± 16	14.61%	222.00	± 16	16.67%	223.11	± 16	15.44%
DBO (mg/L BOD)	123.02	± 16	15.05%	123.02	± 16	14.61%	122.10	± 16	16.46%	122.71	± 16	15.37%
OD (ppm)	3.83	± 0.10	-	3.83	± 0.10	-	3.83	± 0.10	-	3.83	± 0.10	-
SST (ppm)	267.00	± 0.06	38.58%	267.00	± 0.06	32.96%	226.33	± 0.06	35.21%	253.44	± 0.06	35.58%
Temperatura (°C)	22.83	± 0.10	-	22.83	± 0.10	-	24.00	± 0.10	-	23.22	± 0.10	-
Refracción (% Brix)	2.57	± 0.10	92.21%	2.57	± 0.10	92.21%	2.37	± 0.10	95.77%	2.50	± 0.10	93.40%

Cuadro 26 Reducción de parámetros físicos y químicos del agua tratada en la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales a un flujo volumétrico de alimentación de 1.0 m³/día

CAUDAL DE ALIMENTACIÓN	1.0 m ³ / día											
No. PRUEBA	1			2			3			PROMEDIO		
CARACTERIZACIÓN	AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS) / (% Remoción)	AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS) / (% Remoción)	AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS) / (% Remoción)	AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS) / (% Remoción)
PARÁMETRO	0	Incert.	24	0	Incert.	24	0	Incert.	24	0	Incert.	24
pH	7.14	± 0.01	-	7.16	± 0.01	-	7.14	± 0.01	-	7.15	± 0.01	-
Conductividad eléctrica (µS)	705.67	± 17.99	12.34%	704.67	± 17.99	15.99%	706.00	± 17.99	16.57%	705.44	± 17.99	14.97%
SDT (ppm)	533.00	± 0.09	29.43%	499.00	± 0.08	21.84%	500.33	± 0.10	25.25%	510.78	± 0.10	25.51%
TURBIDEZ (NTU)	78.33	± 0.09	18.38%	76.33	± 0.33	17.99%	78.00	± 0.09	18.12%	77.55	± 0.33	18.16%
DQO (mg/L COD)	220.67	± 16	20.76%	222.00	± 16	20.97%	220.00	± 16	23.18%	220.89	± 16	21.64%
DBO (mg/L BOD)	121.37	± 16	20.76%	122.10	± 16	20.97%	121.00	± 16	23.18%	121.49	± 16	21.64%
OD (ppm)	3.83	± 0.10	-	3.80	± 0.10	-	3.87	± 0.10	-	3.83	± 0.10	-
SST (ppm)	248.00	± 0.09	45.87%	249.00	± 0.07	42.97%	247.67	± 0.09	44.02%	248.22	± 0.09	44.29%
Temperatura (°C)	24.00	± 0.10	-	23.00	± 0.10	-	23.00	± 0.10	-	23.33	± 0.10	-
Refracción (% Brix)	2.07	± 0.10	95.16%	2.13	± 0.10	95.31%	2.03	± 0.10	95.08%	2.08	± 0.10	95.19%

Cuadro 27 Reducción de parámetros físicos y químicos del agua tratada en la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales a un flujo volumétrico de alimentación de 1.5 m³/día

CAUDAL DE ALIMENTACIÓN	1.5 m ³ / día											
No. PRUEBA	1			2			3			PROMEDIO		
CARACTERIZACIÓN	AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS) / (% Remoción)	AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS) / (% Remoción)	AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS) / (% Remoción)	AGUA RESIDUAL (HORAS)		AGUA TRATADA (HORAS) / (% Remoción)
PARÁMETRO	0	Incert.	24	0	Incert.	24	0	Incert.	24	0	Incert.	24
pH	6.60	± 0.01	-	6.58	± 0.01	-	6.51	± 0.01	-	6.56	± 0.01	-
Conductividad eléctrica (µS)	715.00	± 17.99	43.90%	714.67	± 17.99	43.07%	715.33	± 17.99	42.74%	715.00	± 17.99	43.24%
SDT (ppm)	502.00	± 0.06	43.58%	501.60	± 0.07	41.45%	502.33	± 0.07	42.29%	501.98	± 0.07	42.44%
TURBIDEZ (NTU)	78.33	± 0.12	28.38%	78.47	± 0.09	27.23%	78.69	± 0.09	28.10%	78.49	± 0.12	27.90%
DQO (mg/L COD)	223.67	± 16	40.07%	224.00	± 16	39.67%	223.33	± 16	39.00%	223.67	± 16	39.58%
DBO (mg/L BOD)	123.02	± 16	40.07%	123.20	± 16	39.67%	122.83	± 16	39.00%	123.02	± 16	39.58%
OD (ppm)	3.63	± 0.10	-	3.67	± 0.10	-	3.67	± 0.10	-	3.66	± 0.10	-
SST (ppm)	284.54	± 0.05	74.00%	284.01	± 0.06	74.19%	283.67	± 0.06	73.56%	284.07	± 0.06	73.92%
Temperatura (°C)	25.40	± 0.10	-	23.43	± 0.10	-	22.57	± 0.10	-	23.80	± 0.10	-
Refracción (% Brix)	2.27	± 0.10	100.00%	2.20	± 0.10	95.45%	2.17	± 0.10	100.00%	2.21	± 0.10	98.48%

D. Análisis de error

Cálculo 6 Determinación Sólidos Suspendidos Totales (SST)

$$S_y = \sqrt{(0.0001 \text{ g})^2 + (0.0001 \text{ g})^2} = 0.0001 \text{ g}$$

*Se realizó el mismo cálculo para el resto de incertidumbres en donde se realizan cálculos de suma y resta.

Cálculo 7 Determinación Sólidos Suspendidos Totales (SST)

$$\frac{S_y}{y} = \sqrt{\left(\frac{0.0001 \text{ g}}{0.0067 \text{ g}}\right)^2 + \left(\frac{0.5 \text{ mL}}{25 \text{ mL}}\right)^2} = 0.03 \text{ ppm}$$

*Se realizó el mismo cálculo para el resto de incertidumbres en donde se realizan cálculos de multiplicación o división; incluyendo el resto de promedios necesarios.

E. Análisis estadístico de datos

Cuadro 28 Coeficiente de correlación lineal tiempo de operación y parámetros utilizados para efectuar la caracterización del agua residual y el agua tratada con un flujo volumétrico de alimentación de 0.5 m³/día

CAUDAL DE ALIMENTACIÓN	0.5 m ³ /día			r media
No. PRUEBA	1	2	3	
PARÁMETRO	r			
pH	0.9999	0.9998	0.9309	0.9768
Conductividad eléctrica	-0.9993	-0.9957	-0.9329	-0.9760
Sólidos Disueltos Totales	-0.9999	-0.9957	-0.9329	-0.9760
TURBIDEZ	-0.9998	-0.9999	-0.9322	-0.9773
Demanda Química de Oxígeno	-0.9996	-0.9975	-0.9322	-0.9764
Demanda Bioquímica de Oxígeno	-0.9996	-0.9975	-0.9322	-0.9765
Oxígeno Disuelto	0.9991	0.9994	0.9314	0.9767
Sólidos Suspendidos Totales	-0.9998	-0.9856	-0.9322	-0.9725
Temperatura (°C)	-0.9531	-0.9485	-0.9322	-0.9478
Refracción (% Brix)	-0.9623	-0.9994	-0.9317	-0.9645

Cuadro 29 Coeficiente de correlación lineal tiempo de operación y parámetros utilizados para efectuar la caracterización del agua residual y el agua tratada con un flujo volumétrico de alimentación de 1.0 m³/día

CAUDAL DE ALIMENTACIÓN	1.0 m ³ /día			r media
No. PRUEBA	1	2	3	
PARÁMETRO	r			
pH	0.9771	0.9912	0.9890	0.9858
Conductividad eléctrica	-0.9771	-0.9909	-0.9890	-0.9857
Sólidos Disueltos Totales	-0.9771	-0.9909	-0.9890	-0.9857
TURBIDEZ	-0.9771	-0.9909	-0.9890	-0.9856
Demanda Química de Oxígeno	-0.9771	-0.9909	-0.9890	-0.9857
Demanda Bioquímica de Oxígeno	-0.9771	-0.9909	-0.9890	-0.9857
Oxígeno Disuelto	0.9769	0.9906	0.9892	0.9856
Sólidos Suspendidos Totales	-0.9771	-0.9909	-0.9890	-0.9857
Temperatura (°C)	-0.9927	-0.9527	-0.9890	-0.9656
Refracción (% Brix)	-0.9770	-0.9906	-0.9892	-0.9856

Cuadro 30 Coeficiente de correlación lineal tiempo de operación y parámetros utilizados para efectuar la caracterización del agua residual y el agua tratada con un flujo volumétrico de alimentación de 1.5 m³/día

CAUDAL DE ALIMENTACIÓN	1.5 m ³ /día			
No. PRUEBA	1	2	3	r media
PARÁMETRO	r			
pH	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
Conductividad eléctrica	-0.9999	-0.9999	-0.9999	-0.9999
Sólidos Disueltos Totales	-0.9999	-0.9999	-0.9999	-0.9999
TURBIDEZ	-0.9999	-0.9999	-0.9999	-0.9999
Demanda Química de Oxígeno	-0.9999	-0.9999	-0.9999	-0.9999
Demanda Bioquímica de Oxígeno	-0.9999	-0.9999	-0.9999	-0.9999
Oxígeno Disuelto	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
Sólidos Suspendidos Totales	-0.9999	-0.9999	-0.9999	-0.9999
Temperatura (°C)	-0.9998	-0.9957	-0.9999	-0.9974
Refracción (% Brix)	-0.9999	-0.9999	-0.9999	-0.9999

Cuadro 31 Coeficiente de correlación lineal oxígeno suministrado y parámetros utilizados para efectuar la caracterización del agua residual y el agua tratada

OXIGENO SUMINISTRADO	2.0 ppm, 2.5 ppm y 3.0 ppm			r media
No. PRUEBA	1	2	3	
PARÁMETRO	r			
pH	0.8882	0.8953	0.8957	0.8931
Conductividad eléctrica	0.9187	0.9131	0.9110	0.9143
Sólidos Disueltos Totales	0.9055	0.9000	0.8953	0.9003
TURBIDEZ	0.8883	0.8833	0.8872	0.8863
Demanda Química de Oxígeno	0.9031	0.9018	0.8934	0.8995
Demanda Bioquímica de Oxígeno	0.9031	0.9018	0.8935	0.8995
Oxígeno Disuelto	0.8534	0.8455	0.8572	0.8520
Sólidos Suspendidos Totales	0.8518	0.8556	0.8334	0.8469
Temperatura (°C)	0.8635	0.8822	0.8967	0.8808
Refracción (% Brix)	0.6490	0.6548	0.6327	0.6455

Cuadro 32 Coeficiente de correlación lineal flujo volumétrico de alimentación y parámetros utilizados para efectuar la caracterización del agua residual y el agua tratada

CAUDAL DE ALIMENTACIÓN	0.5 m ³ /día, 1.0 m ³ /día y 1.5 m ³ /día			r media
No. PRUEBA	1	2	3	
PARÁMETRO	r			
pH	0.6763	0.6844	0.6835	0.6814
Conductividad eléctrica	0.6967	0.6899	0.6876	0.6914
Sólidos Disueltos Totales	0.6906	0.6833	0.6768	0.6836
TURBIDEZ	0.6785	0.6705	0.6740	0.6743
Demanda Química de Oxígeno	0.6833	0.6816	0.6747	0.6798
Demanda Bioquímica de Oxígeno	0.6833	0.6816	0.6747	0.6798
Oxígeno Disuelto	0.6490	0.6470	0.6556	0.6506
Sólidos Suspendidos Totales	0.6394	0.6419	0.6339	0.6384
Temperatura (°C)	0.6628	0.6740	0.6789	0.6717
Refracción (% Brix)	0.4903	0.4846	0.4681	0.4810

La correlación lineal entre el tiempo de operación para las pruebas desarrolladas con los caudales de alimentación de 0.5, 1.0 y 1.5 m³/día reflejan una fuerte correlación (positiva para pH y oxígeno disuelto; negativa para conductividad eléctrica, Sólidos Disueltos Totales [SDT], turbidez, Demanda Química de Oxígeno [DQO], Demanda Bioquímica de Oxígeno [DBO], Sólidos Suspendidos Totales [SST], temperatura y refracción) con los parámetros utilizados para efectuar la caracterización del agua residual y el agua tratada.

Respecto a la correlación lineal del oxígeno suministrado al tanque de lodos activados (T02) con los parámetros: pH, conductividad eléctrica, Sólidos Disueltos Totales (SDT), turbidez, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), oxígeno disuelto, Sólidos Suspendidos Totales (SST) y temperatura muestran una fuerte correlación positiva. Únicamente, la correlación del oxígeno suministrado al tanque de lodos activados (T02) con la refracción cuenta con una moderada correlación positiva.

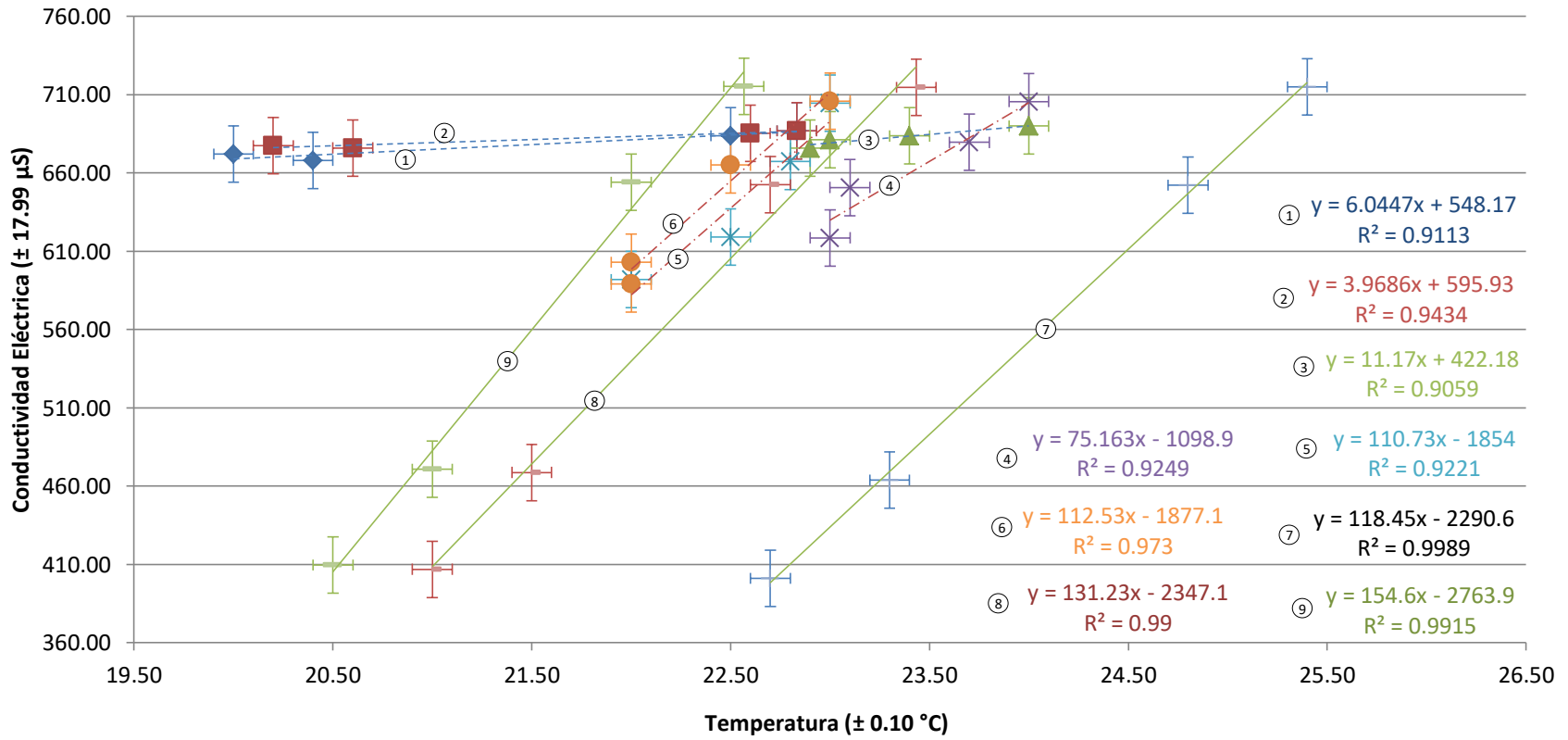
Finalmente, la correlación entre los flujos volumétricos de alimentación de 0.5, 1.0 y 1.5 m³/día y los parámetros: pH, conductividad eléctrica, Sólidos Disueltos Totales (SDT), turbidez, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), oxígeno disuelto, Sólidos Suspendidos Totales (SST) y temperatura presentan una moderada correlación positiva. A diferencia de la correlación de los caudales de alimentación antes mencionados con la refracción, que exhibe una débil correlación positiva. En conclusión, el tiempo de operación y el oxígeno suministrado al tanque de lodos activados (T02) afectan mayormente en el tratamiento de agua residual que los caudales de alimentación empleados en las pruebas.

F. Comparación de parámetros utilizados para efectuar la caracterización del agua residual y el agua tratada.

Las figuras 26 a 70 buscan establecer la relación entre cada uno de los parámetros empleados para caracterizar el agua residual y agua tratada (variable independiente) con el resto de parámetros físico y químicos (variables dependientes), por medio de la regresión lineal.

Figura 28 Comparación temperatura y conductividad eléctrica

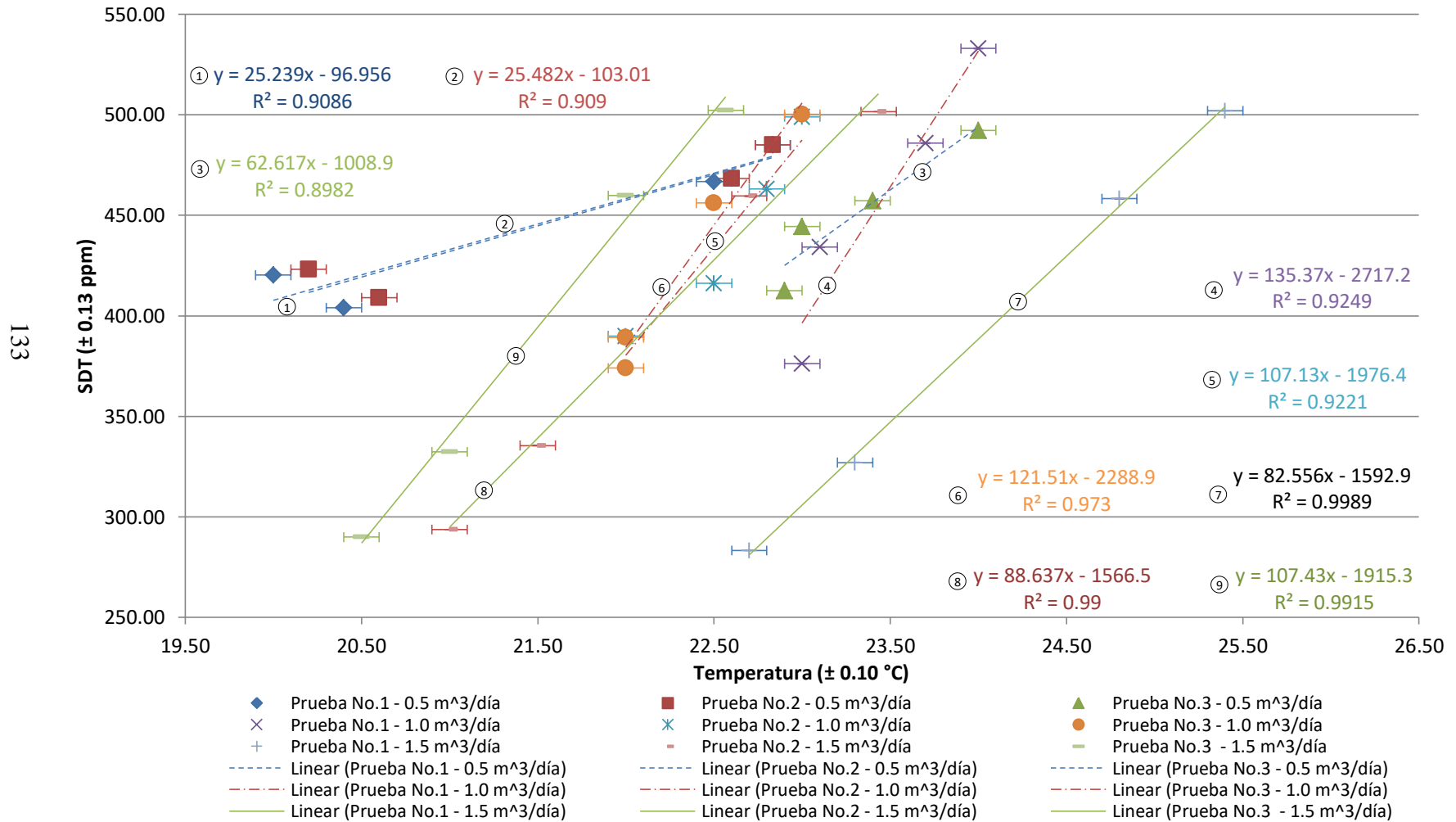
131



- | | | |
|--|--|--|
| ◆ Prueba No.1 - 0.5 m ³ /día | ■ Prueba No.2 - 0.5 m ³ /día | ▲ Prueba No.3 - 0.5 m ³ /día |
| × Prueba No.1 - 1.0 m ³ /día | × Prueba No.2 - 1.0 m ³ /día | ● Prueba No.3 - 1.0 m ³ /día |
| + Prueba No.1 - 1.5 m ³ /día | - Prueba No.2 - 1.5 m ³ /día | - Prueba No.3 - 1.5 m ³ /día |
| - - - Linear (Prueba No.1 - 0.5 m ³ /día) | - - - Linear (Prueba No.2 - 0.5 m ³ /día) | - - - Linear (Prueba No.3 - 0.5 m ³ /día) |
| - - - Linear (Prueba No.1 - 1.0 m ³ /día) | - - - Linear (Prueba No.2 - 1.0 m ³ /día) | - - - Linear (Prueba No.3 - 1.0 m ³ /día) |
| - - - Linear (Prueba No.1 - 1.5 m ³ /día) | - - - Linear (Prueba No.2 - 1.5 m ³ /día) | - - - Linear (Prueba No.3 - 1.5 m ³ /día) |

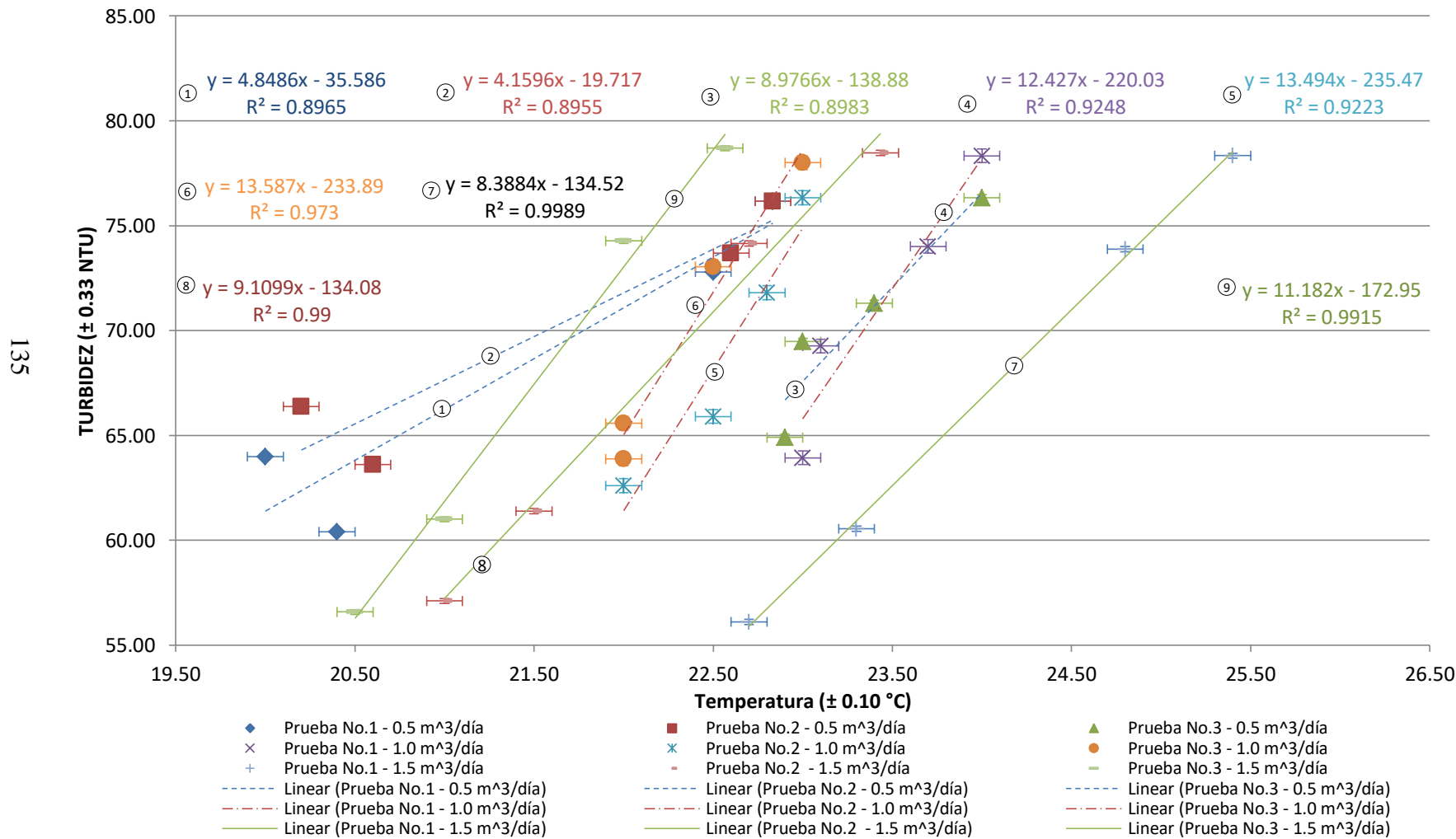
En el caso de la relación temperatura – conductividad eléctrica, el coeficiente R^2 refleja un rango de 0.9113 – 0.9989, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente y únicamente las pruebas con el flujo volumétrico $1.5 \text{ m}^3/\text{día}$ presentan un comportamiento similar.

Figura 29 Comparación temperatura y Sólidos Disueltos Totales (SDT)



En cuanto a la relación temperatura – Sólidos Disueltos Totales (SDT), el coeficiente R^2 muestra un rango de 0.8982 – 0.9989, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente; especialmente las pruebas con el caudal de alimentación $1.5 \text{ m}^3/\text{día}$ exponen la menor variación entre los coeficiente de determinación.

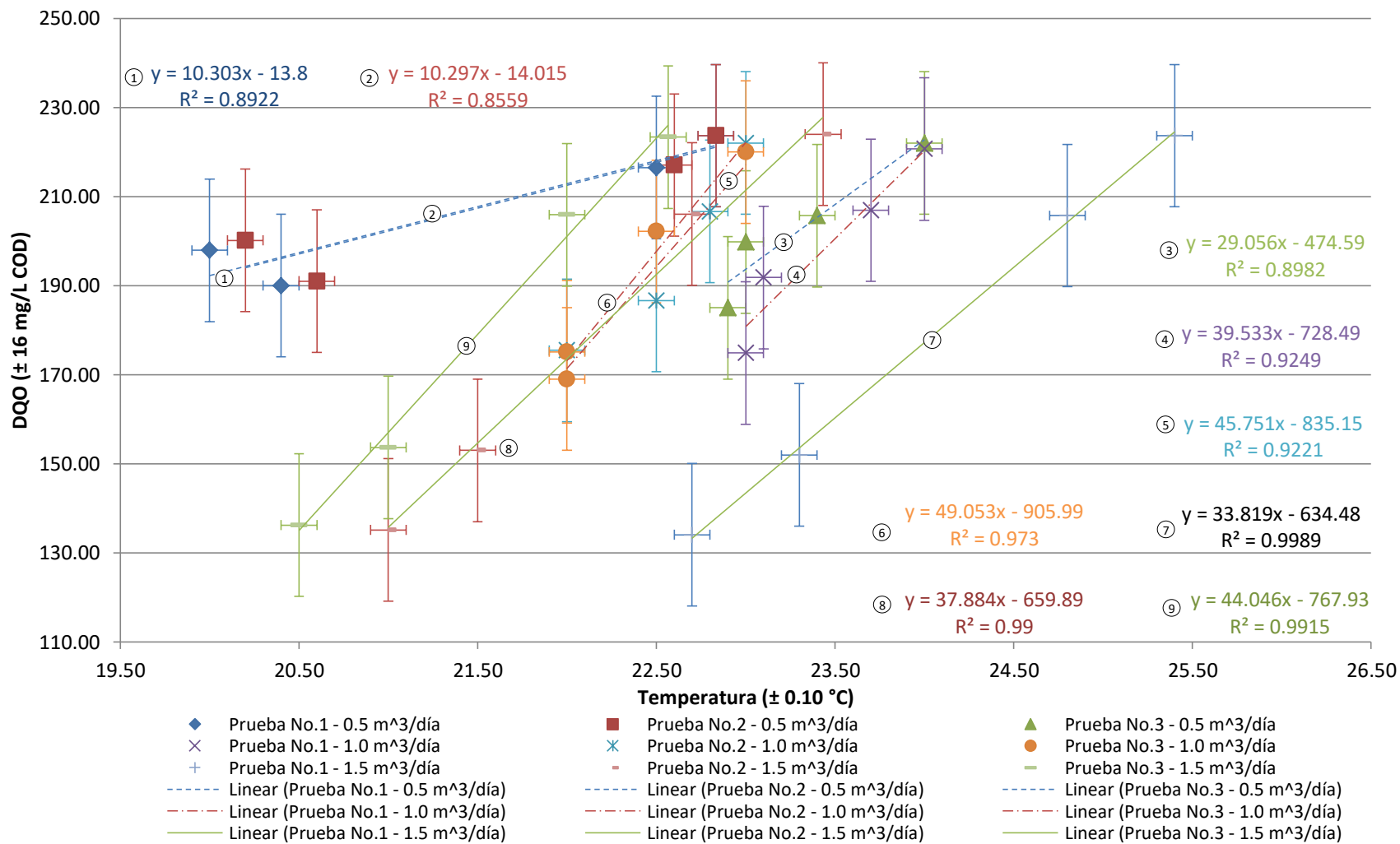
Figura 30 Comparación temperatura y turbidez



La relación temperatura – turbidez, el coeficiente R^2 exhibe un rango de 0.8955 – 0.9989, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente y únicamente las pruebas con el flujo volumétrico $1.5 \text{ m}^3/\text{día}$ presentan un comportamiento similar.

Figura 31 Comparación temperatura y Demanda Química de Oxígeno (DQO)

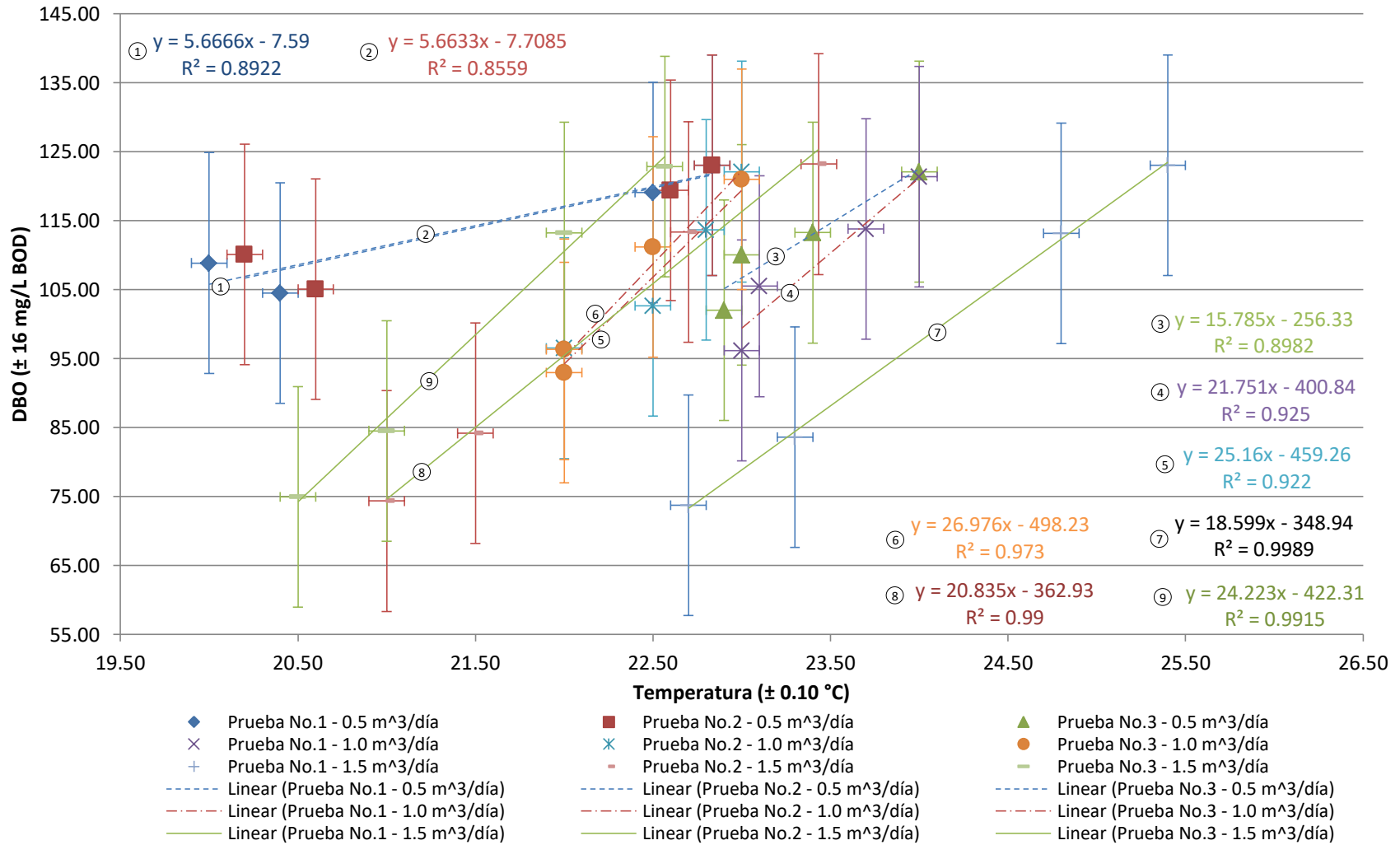
137



La relación temperatura – Demanda Química de Oxígeno (DQO), el coeficiente R^2 muestra un rango de 0.8559 – 0.9989, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente; especialmente las pruebas con el caudal de alimentación 1.5 m³/día exponen la menor variación entre los coeficiente de determinación.

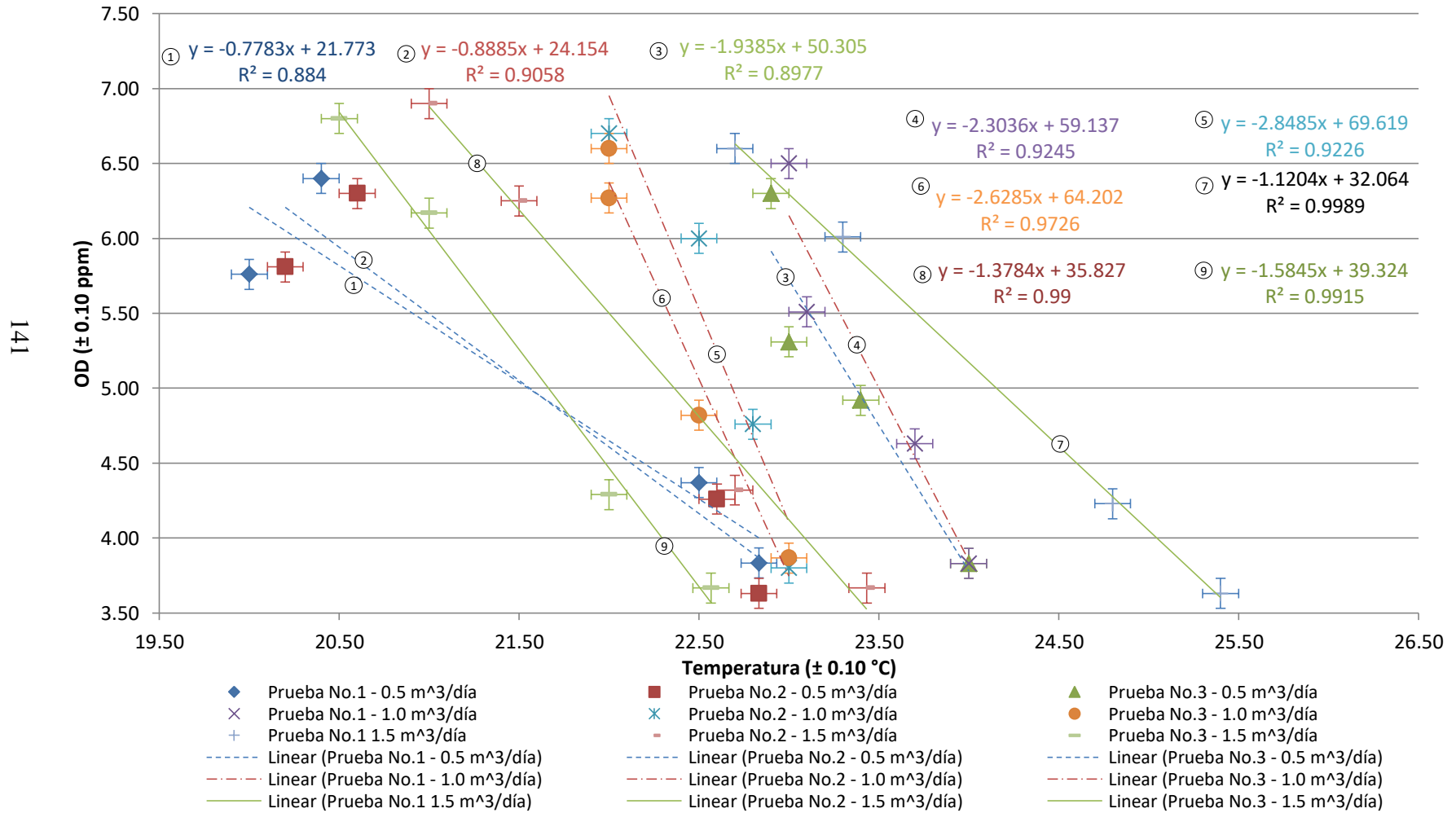
Figura 32 Comparación temperatura y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

131



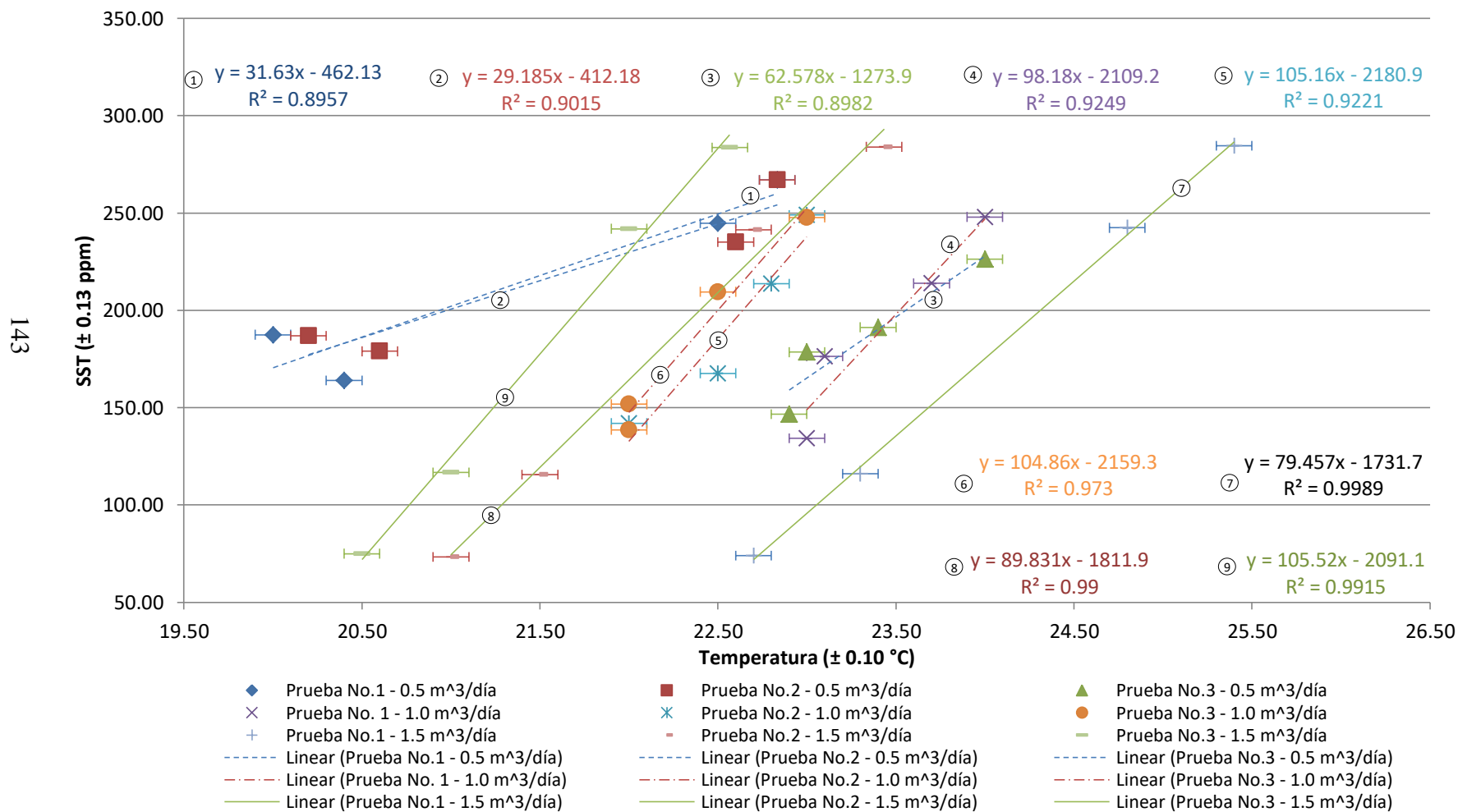
En el caso de la relación temperatura – Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), el coeficiente R^2 evidencia un rango de 0.855 – 0.9989, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente y únicamente las pruebas con el flujo volumétrico $1.5 \text{ m}^3/\text{día}$ presentan un comportamiento similar.

Figura 33 Comparación temperatura y Oxígeno Disuelto (OD)



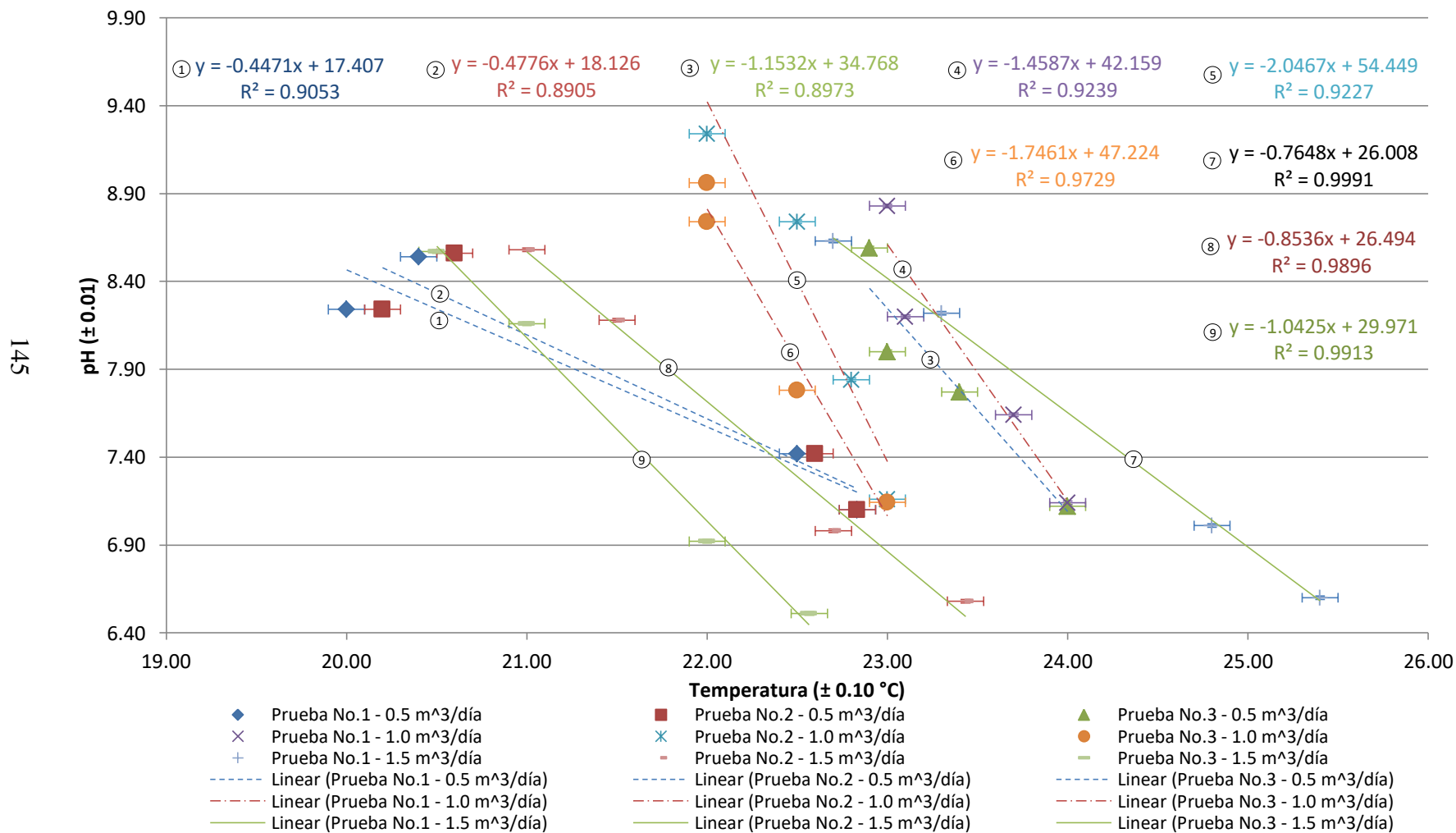
En el caso de la relación temperatura – oxígeno disuelto, el coeficiente R^2 refleja un rango de 0.884 – 0.9989, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente y la mayoría de las pruebas con los tres flujos volumétricos presentan un comportamiento similar.

Figura 34 Comparación temperatura – Sólidos Suspendidos Totales (SST)



La relación temperatura – Sólidos Suspendidos Totales (SST), el coeficiente R^2 exhibe un rango de 0.8957 – 0.9989, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente y especialmente las pruebas con el caudal de alimentación 1.5 m³/día exponen la menor variación entre los coeficiente de determinación.

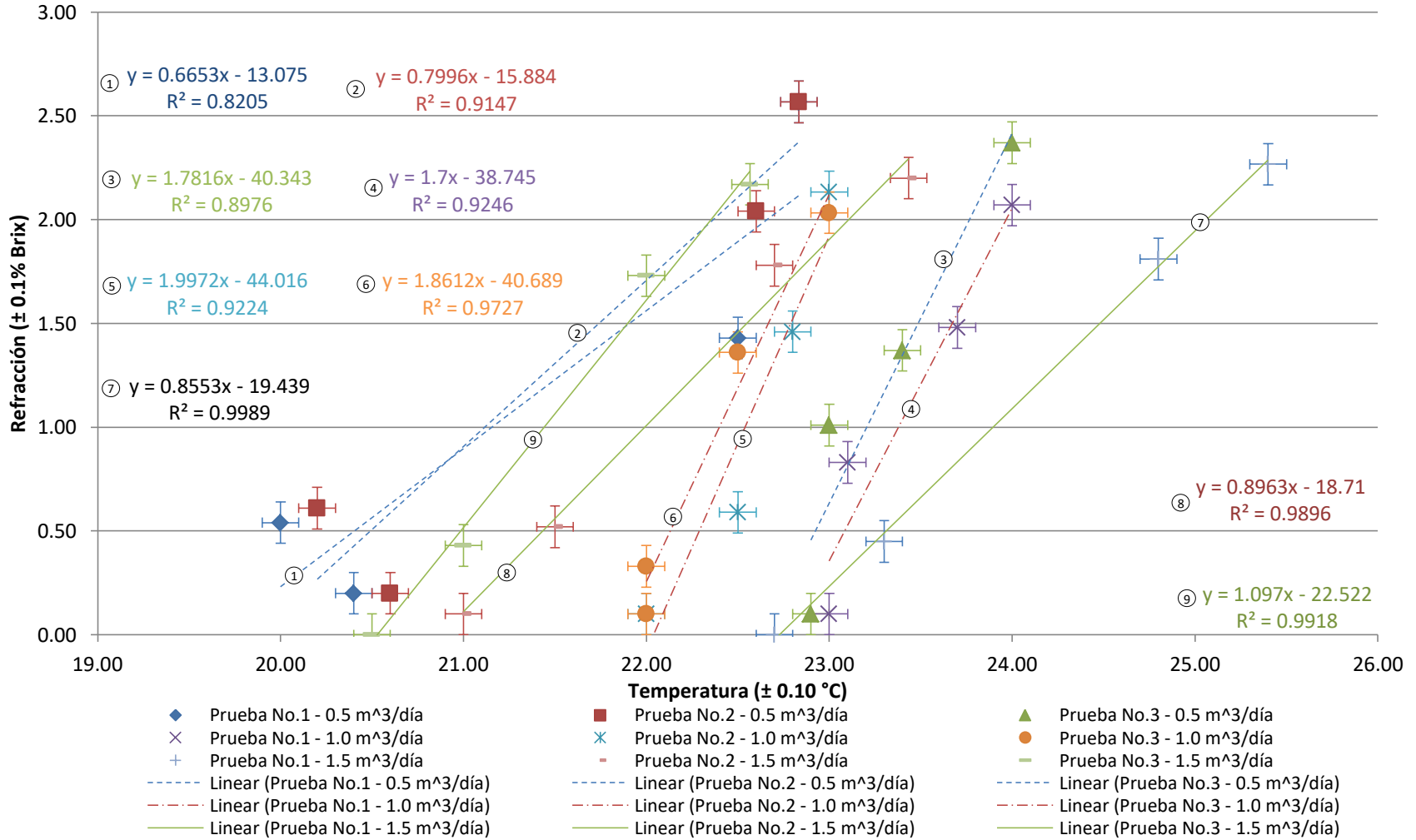
Figura 35 Comparación temperatura y pH



La relación temperatura – pH, el coeficiente R^2 muestra un rango de 0.8905 – 0.9991, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente; las pruebas con el caudal de alimentación $1.5 \text{ m}^3/\text{día}$ se encuentran más cercanos a una relación lineal exacta.

Figura 36 Comparación temperatura – refracción

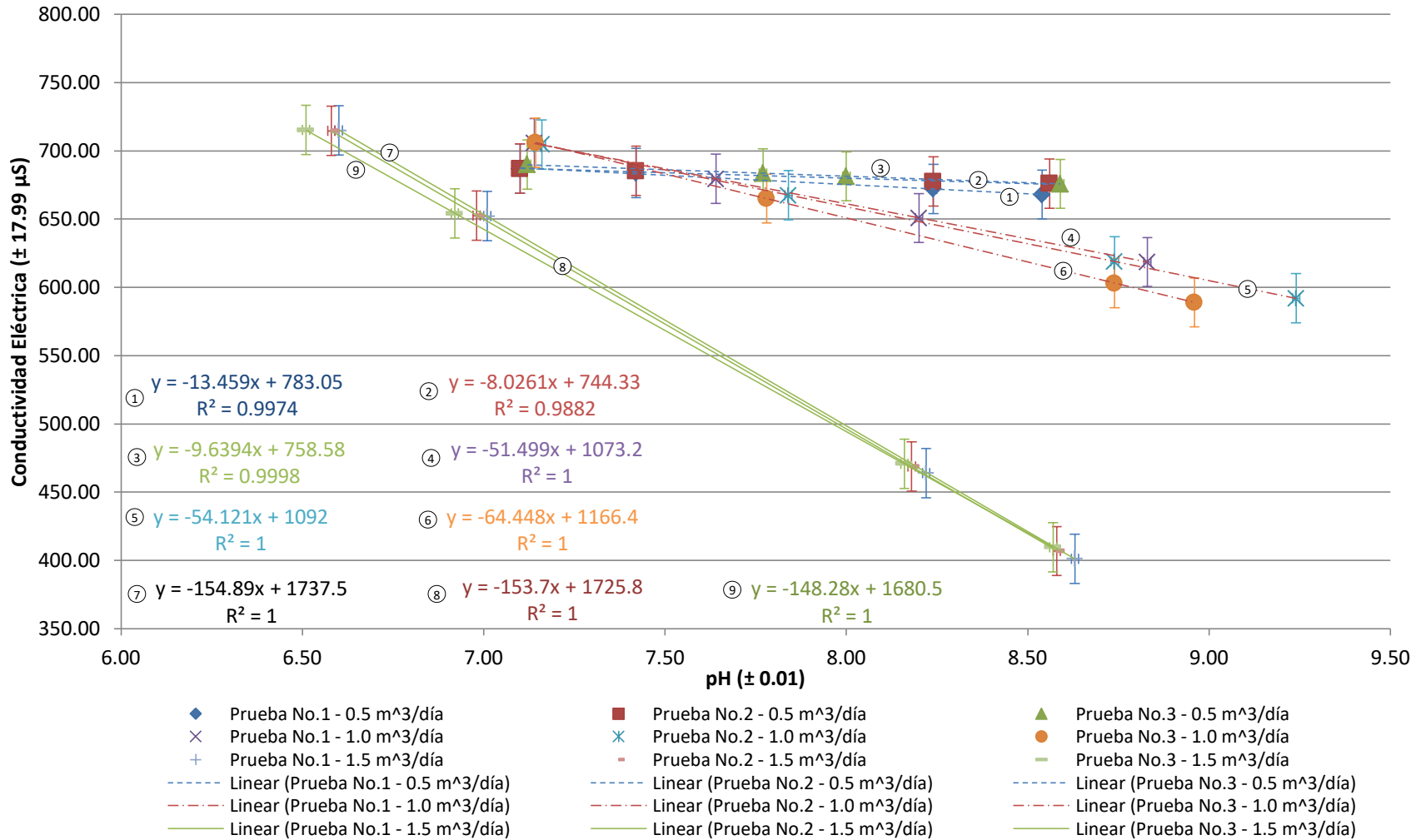
147



En el caso de la relación temperatura – refracción, el coeficiente R^2 expone un rango de 0.8205 – 0.9989, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente y la mayoría de las pruebas con los tres flujos volumétricos presentan un comportamiento similar.

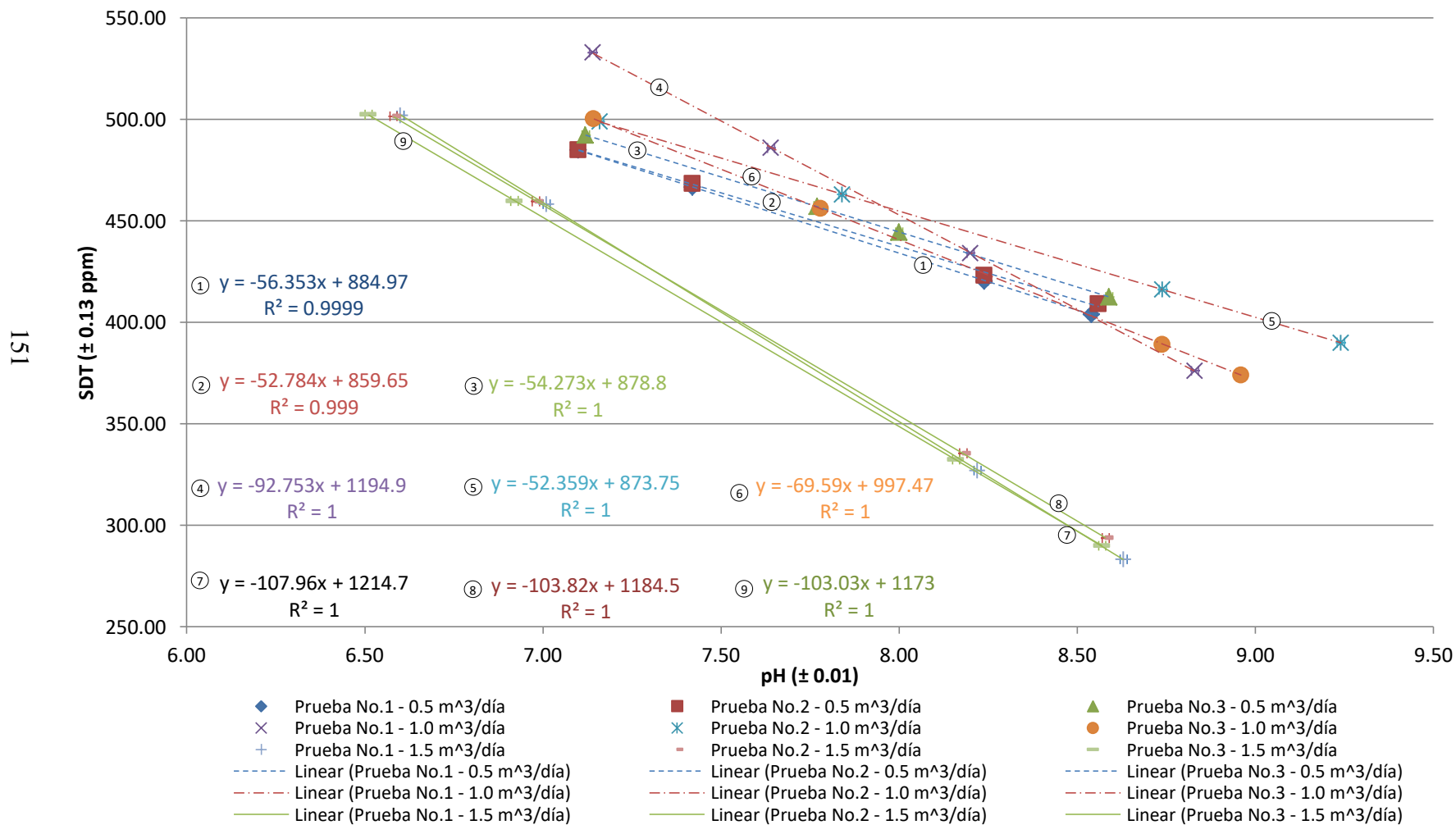
Figura 37 Comparación pH – conductividad eléctrica

149



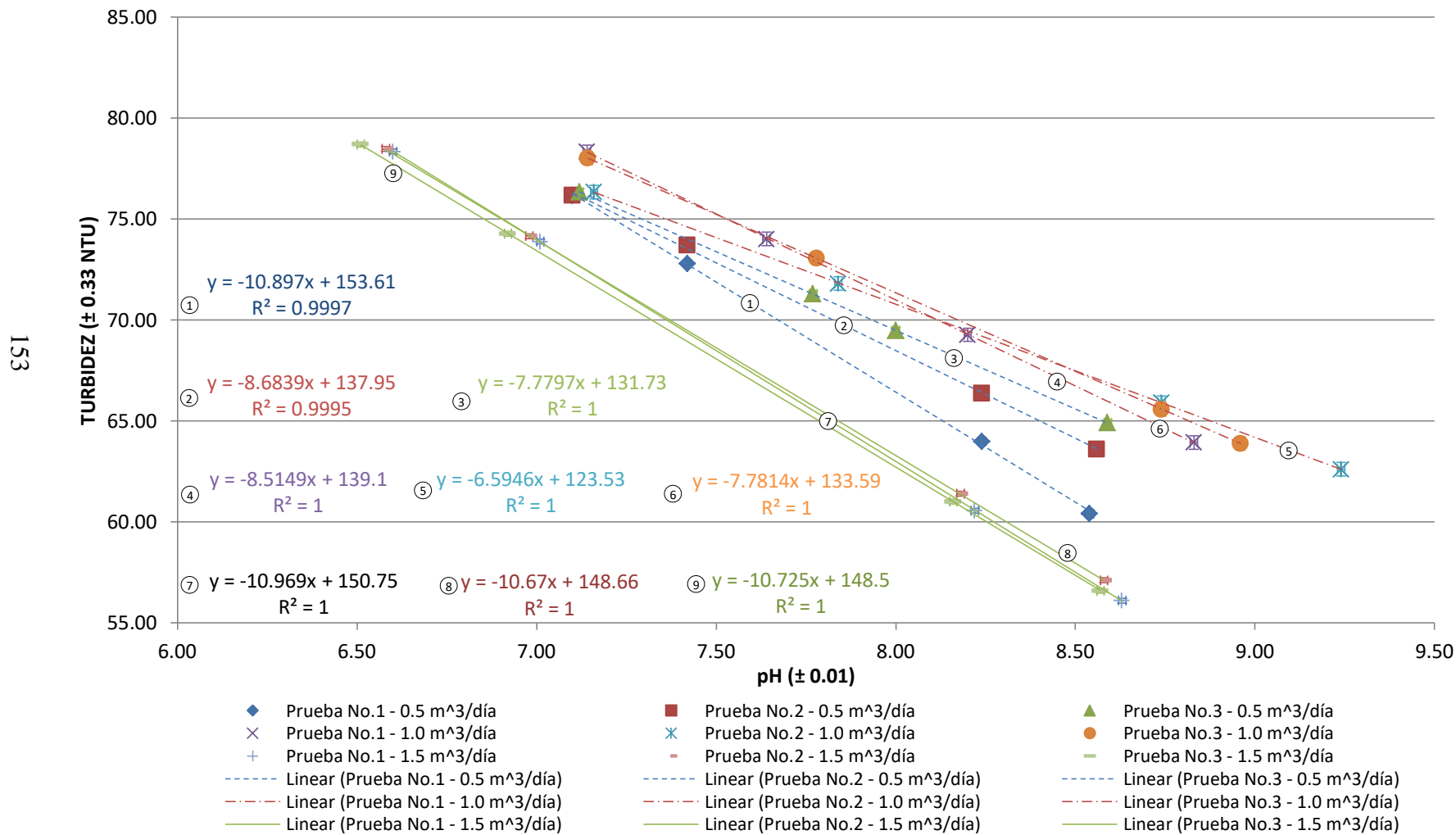
En el caso de la relación pH – conductividad eléctrica, el coeficiente R^2 refleja un rango de 0.9974 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente. Las pruebas de cada flujo volumétrico presentan un comportamiento similar entre sí.

Figura 38 Comparación pH y Sólidos Disueltos Totales (SDT)



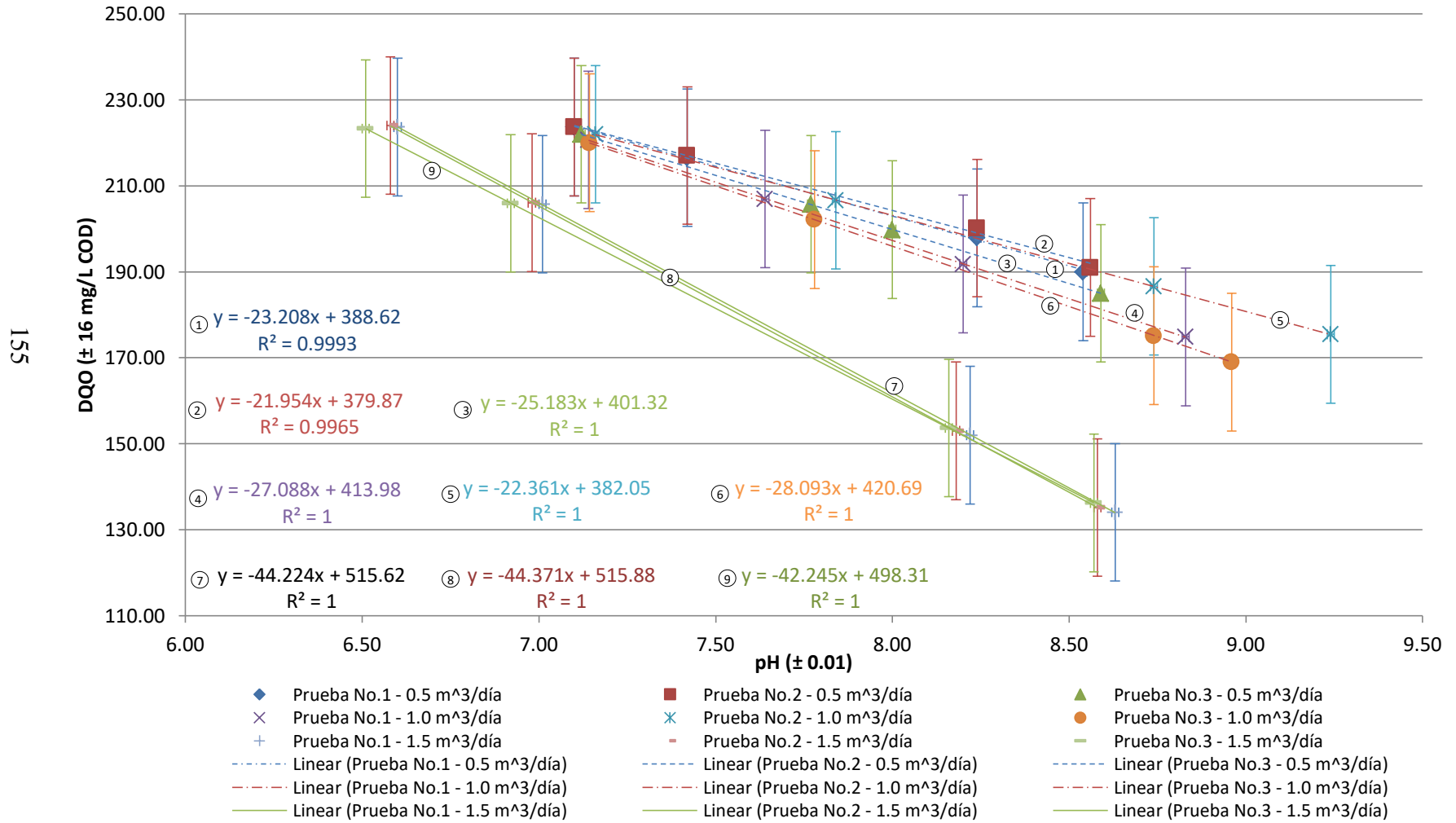
En cuanto a la relación pH – Sólidos Disueltos Totales (SDT), el coeficiente R^2 muestra un rango de 0.999 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente; especialmente las pruebas con el caudal de alimentación 0.5 y 1.5 m³/día exponen la menor variación entre sus respectivas pendientes.

Figura 39 Comparación pH y turbidez



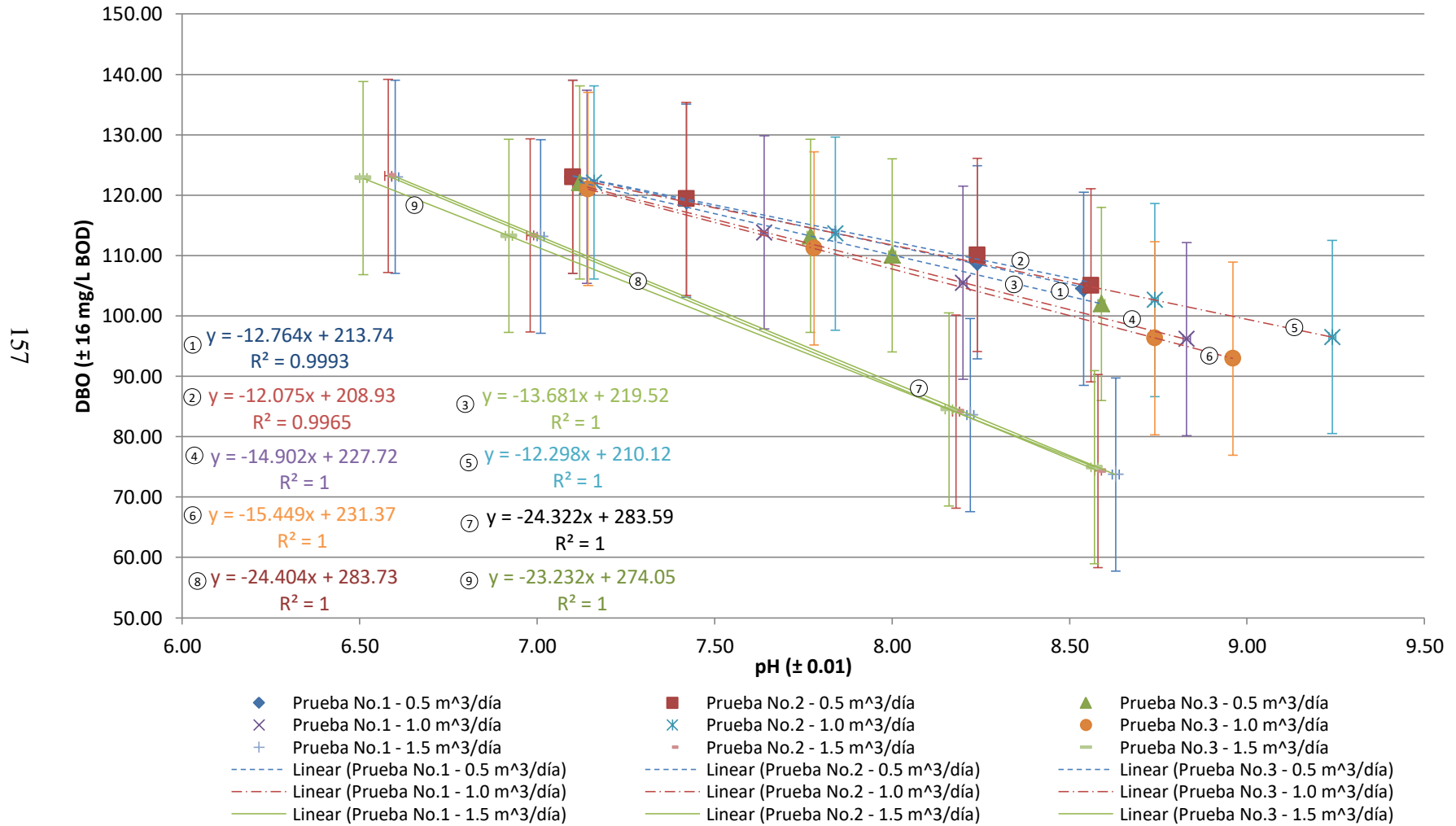
La relación pH – turbidez, el coeficiente R^2 exhibe un rango de 0.9995 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente. Las pruebas de cada flujo volumétrico presentan un comportamiento similar entre sí y únicamente las pruebas con el flujo volumétrico 1.5 m³/día presentan una pendiente semejante.

Figura 40 Comparación pH y Demanda Química de Oxígeno (DQO)



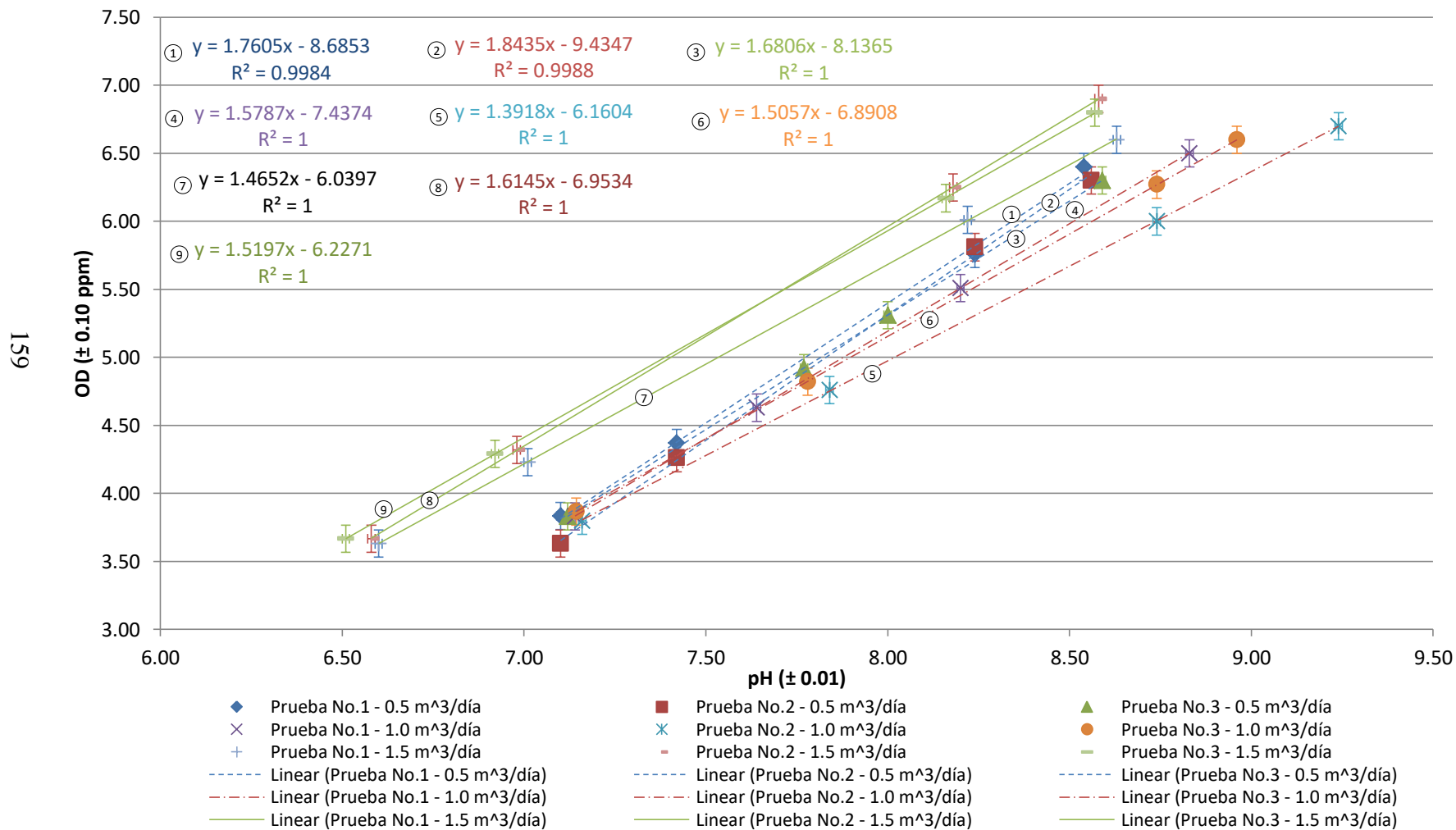
La relación pH – Demanda Química de Oxígeno (DQO), el coeficiente R^2 presenta un rango de 0.9965 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente. Las pruebas de cada flujo volumétrico presentan un comportamiento similar entre sí.

Figura 41 Comparación pH y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)



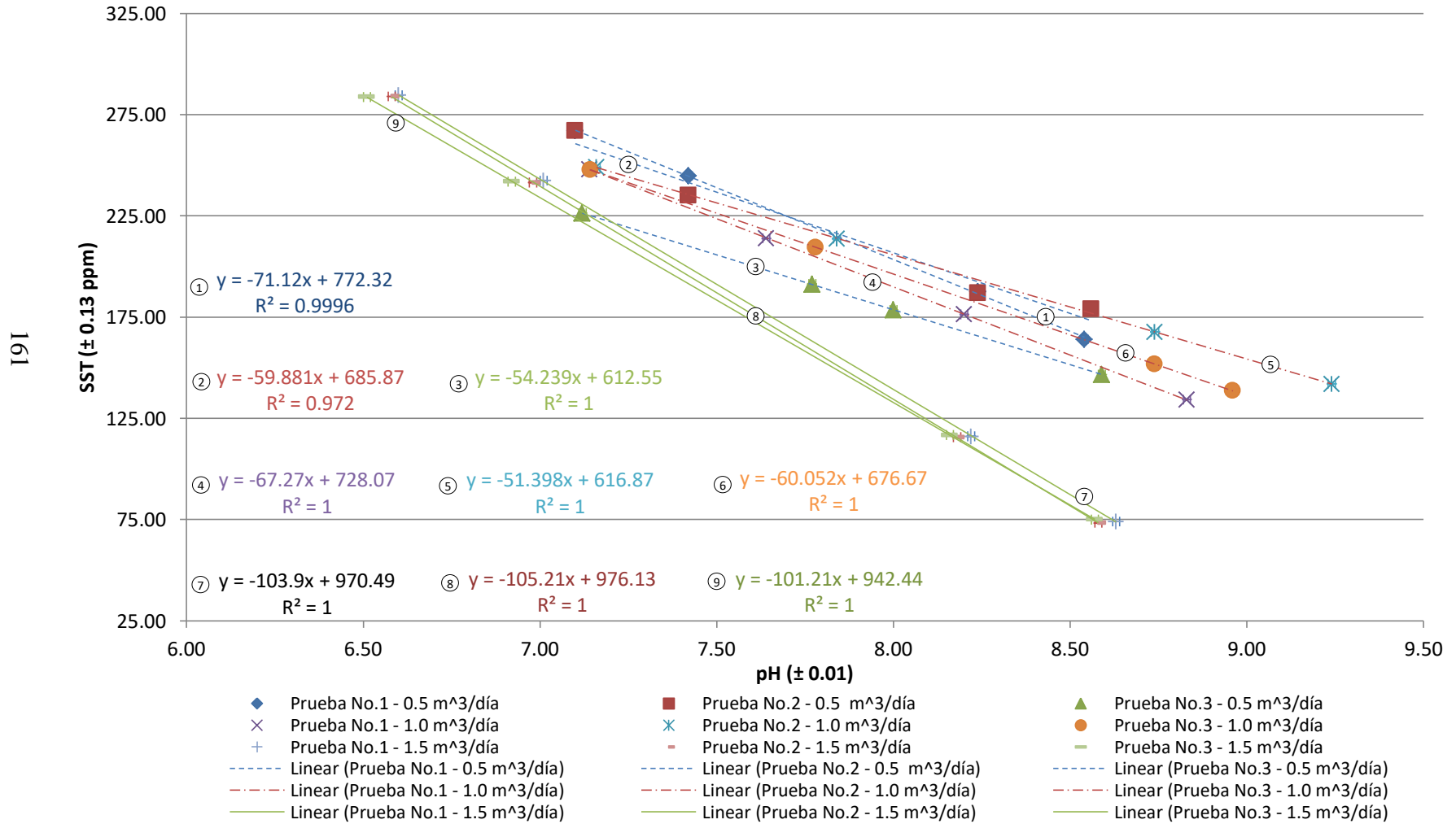
La relación pH – Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), el coeficiente R^2 muestra un rango de 0.995 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente; especialmente las pruebas con el caudal de alimentación 1.5 m³/día exponen la menor variación entre los coeficiente de determinación y la pendiente.

Figura 42 Comparación pH y Oxígeno Disuelto (OD)



En el caso de la relación pH – oxígeno disuelto, el coeficiente R^2 señala un rango de 0.9984 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente y todas las pruebas con los tres flujos volumétricos presentan un comportamiento similar.

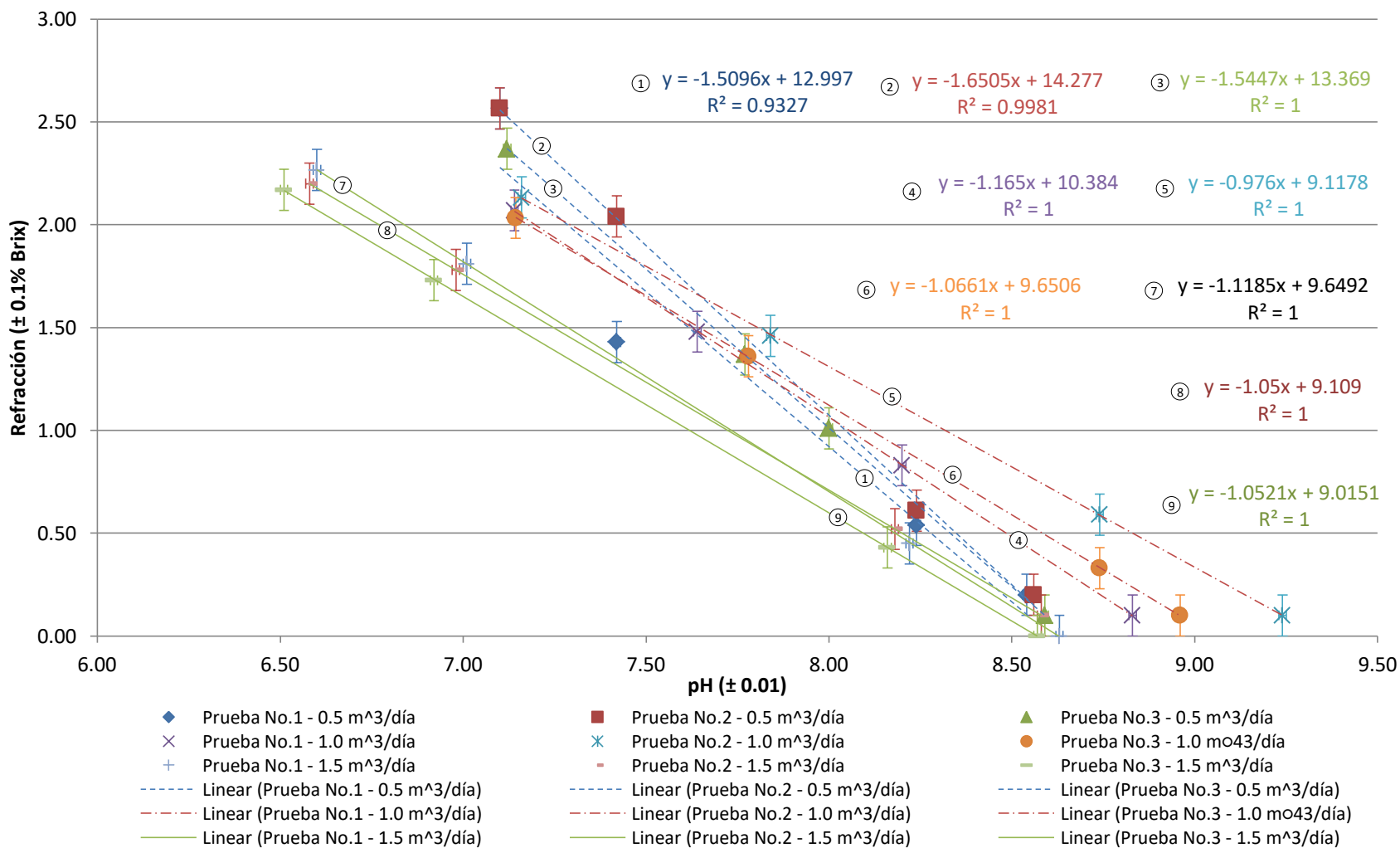
Figura 43 Comparación pH y Sólidos Suspendedos Totales (SST)



La relación pH – Sólidos Suspendidos Totales (SST), el coeficiente R^2 exhibe un rango de 0.972 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente y especialmente las pruebas con el caudal de alimentación $1.5 \text{ m}^3/\text{día}$ exponen la menor variación entre sus respectivas pendientes.

Figura 44 Comparación pH y refracción

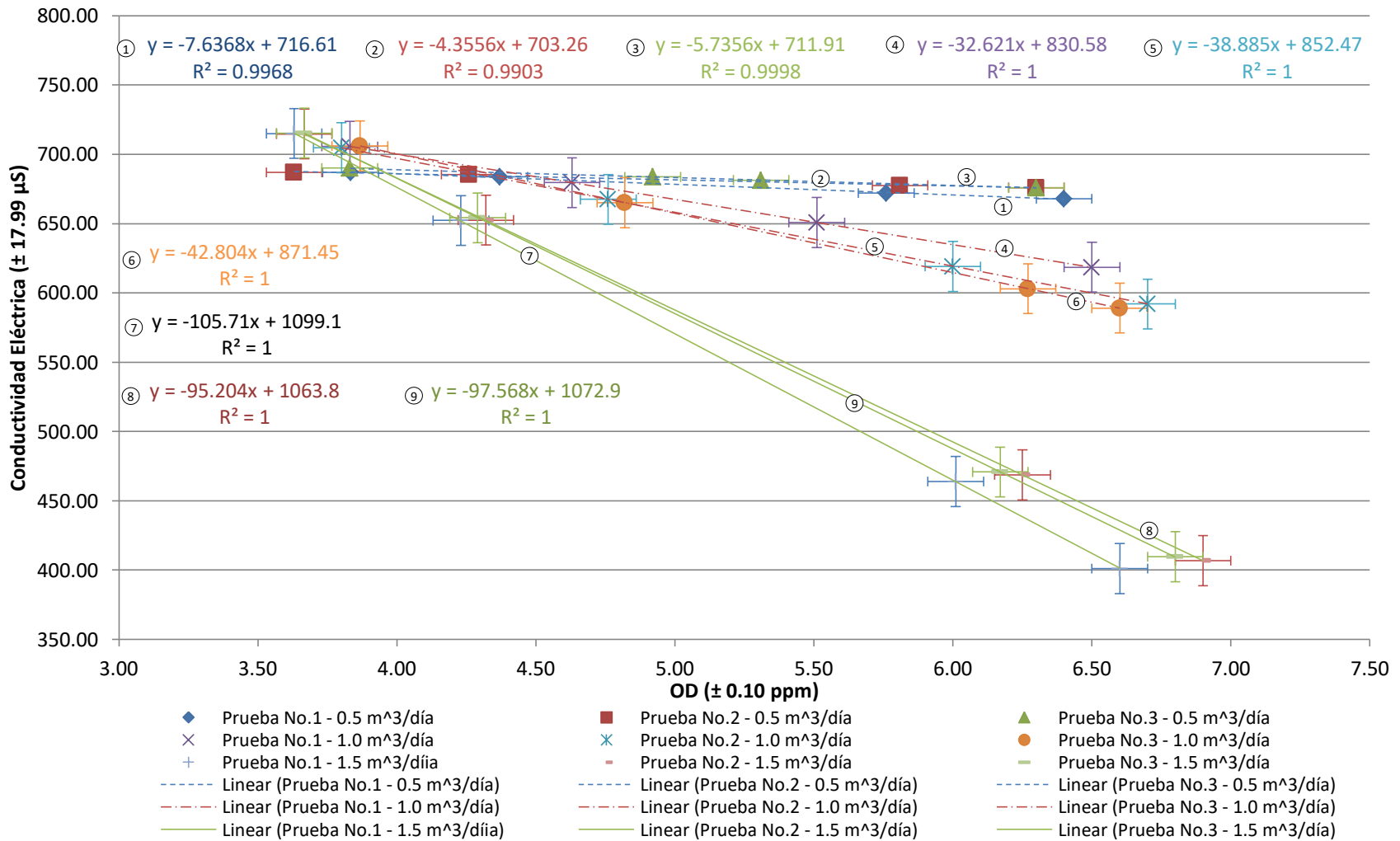
163



En el caso de la relación pH – refracción, el coeficiente R^2 refleja un rango de 0.9327 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente y la mayoría de las pruebas con los tres flujos volumétricos presentan un comportamiento similar.

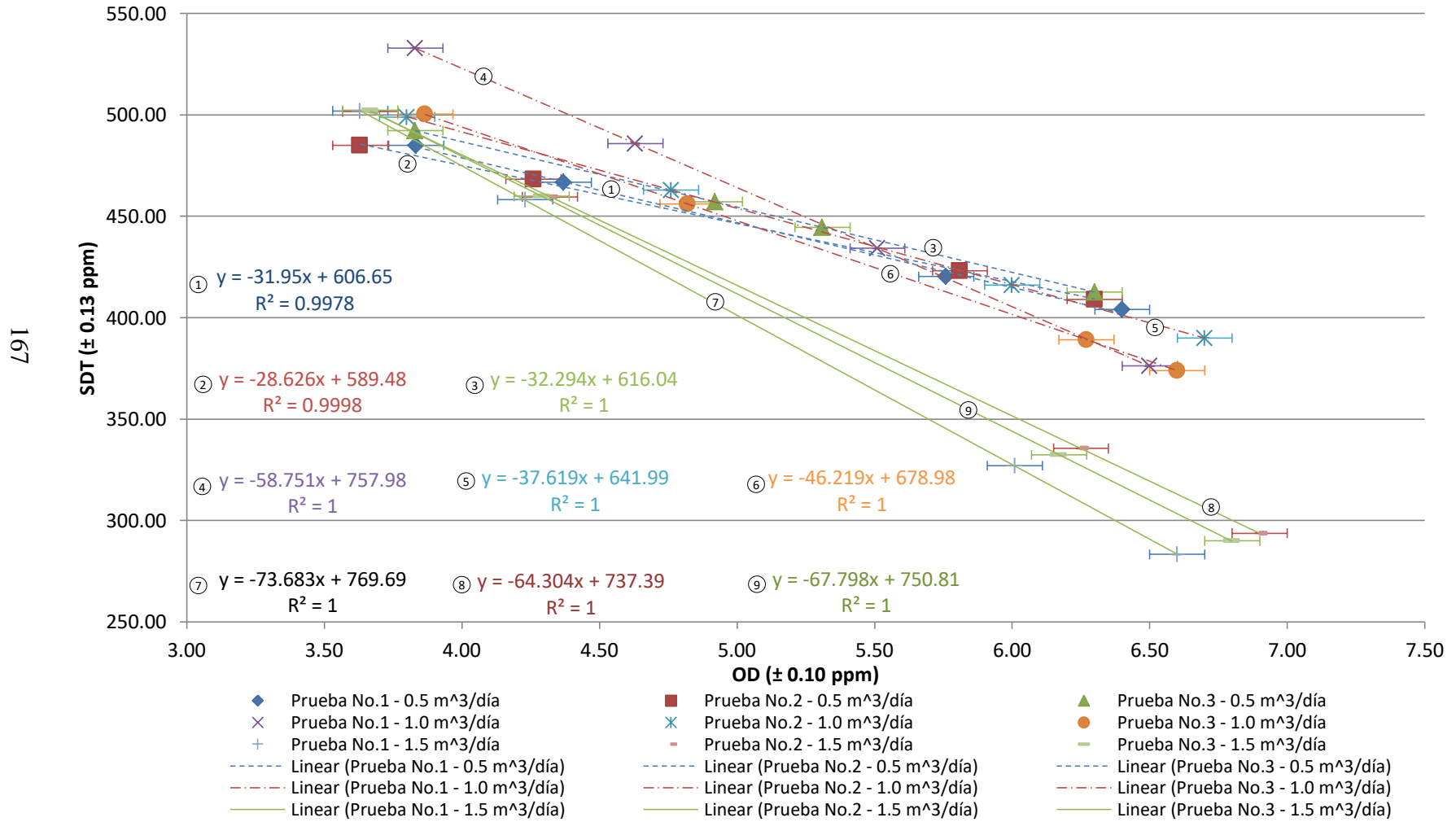
Figura 45 Comparación Oxígeno Disuelto (OD) y conductividad eléctrica

165



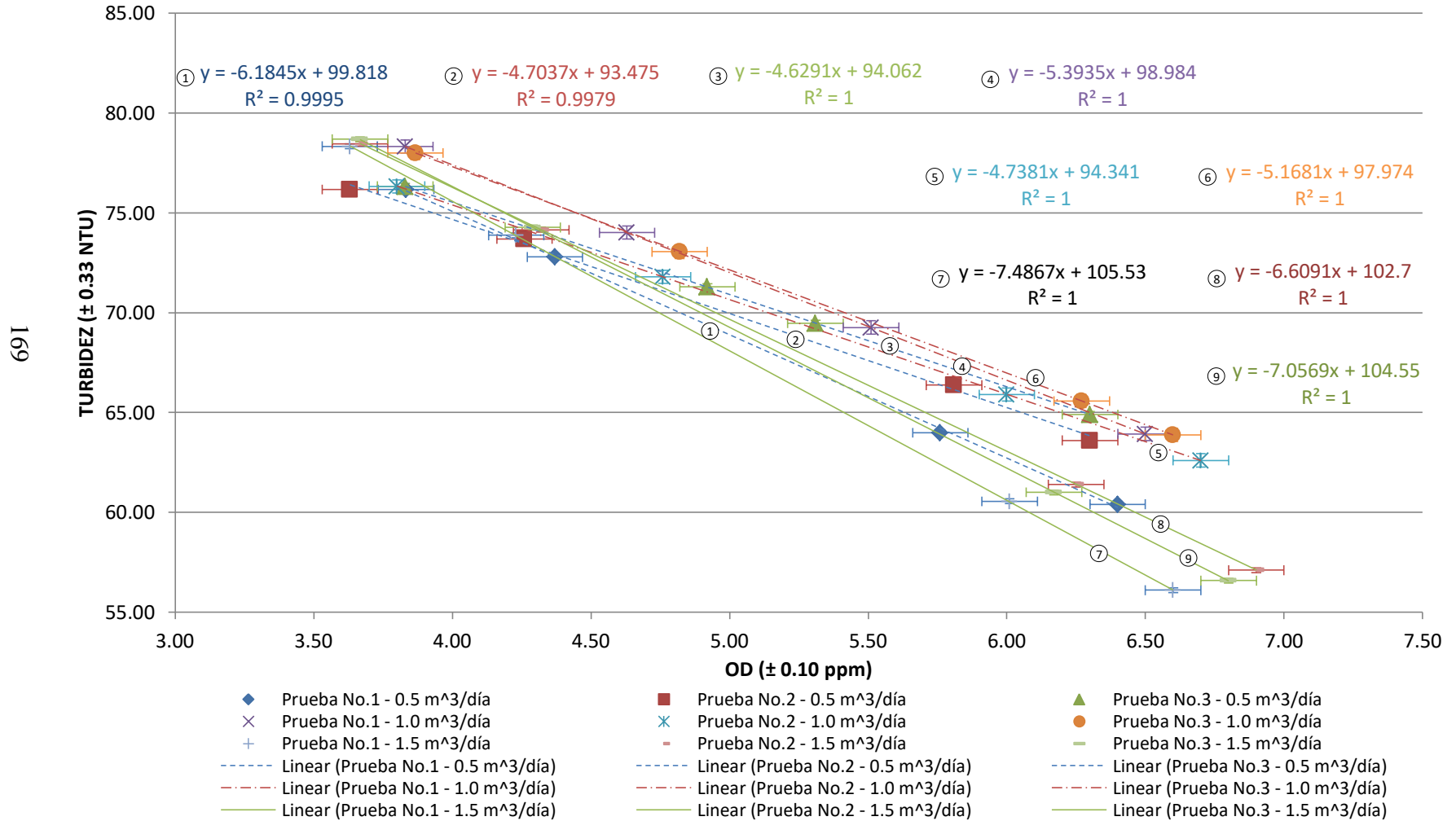
En el caso de la relación oxígeno disuelto – conductividad eléctrica, el coeficiente R^2 refleja un rango de 0.9903 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente. Las pruebas con el flujo volumétrico 1.0 y 1.5 m³/día presentan respectivamente un comportamiento similar.

Figura 46 Comparación Oxígeno Disuelto (OD) y Sólidos Disueltos Totales (SDT)



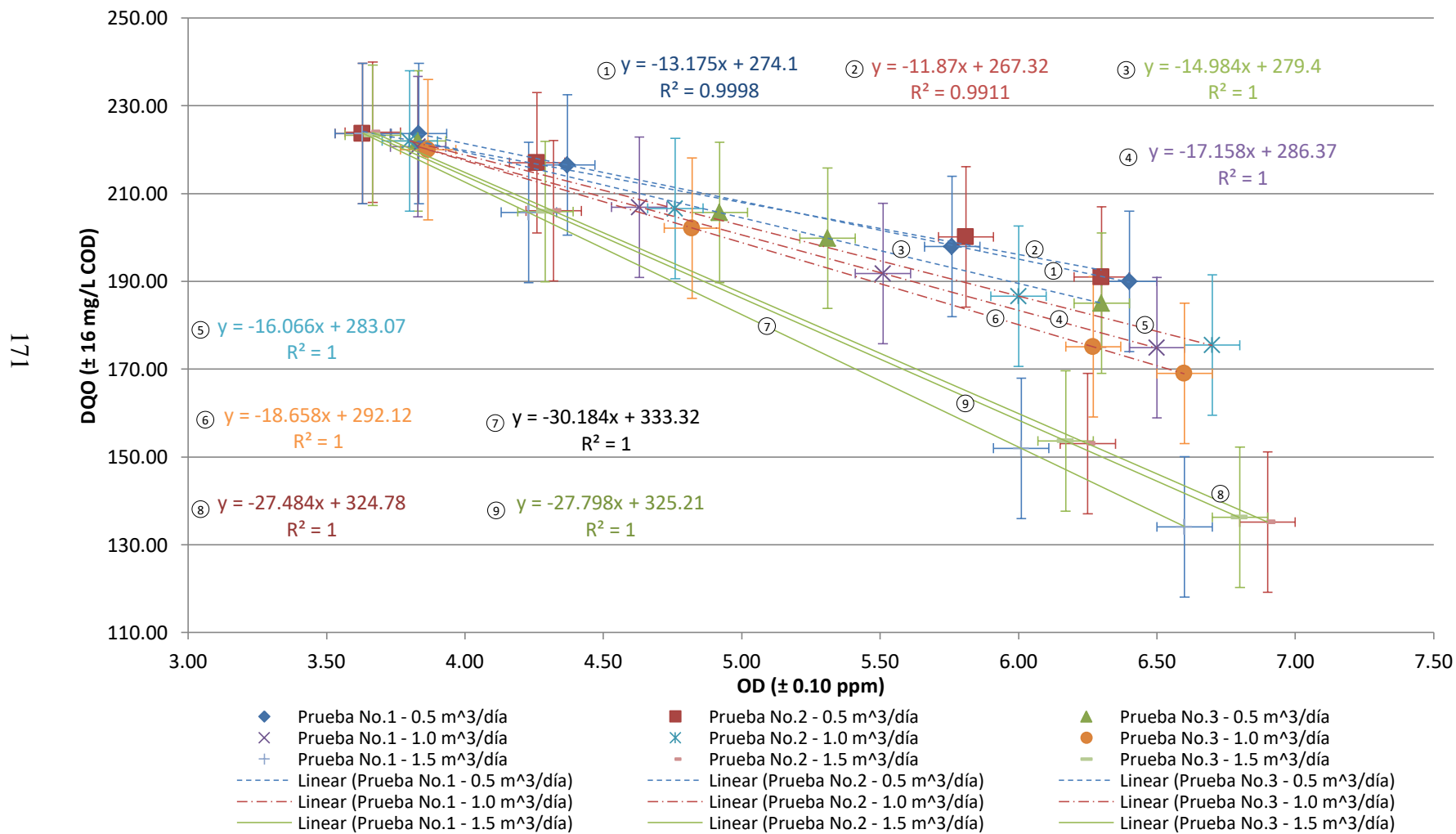
En cuanto a la relación oxígeno disuelto – Sólidos Disueltos Totales (SDT), el coeficiente R^2 muestra un rango de 0.9978 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente; especialmente las pruebas con el caudal de alimentación 0.5 y 1.5 m³/día exponen la menor variación entre las pendientes respectivamente.

Figura 47 Comparación Oxígeno Disuelto (OD) y turbidez



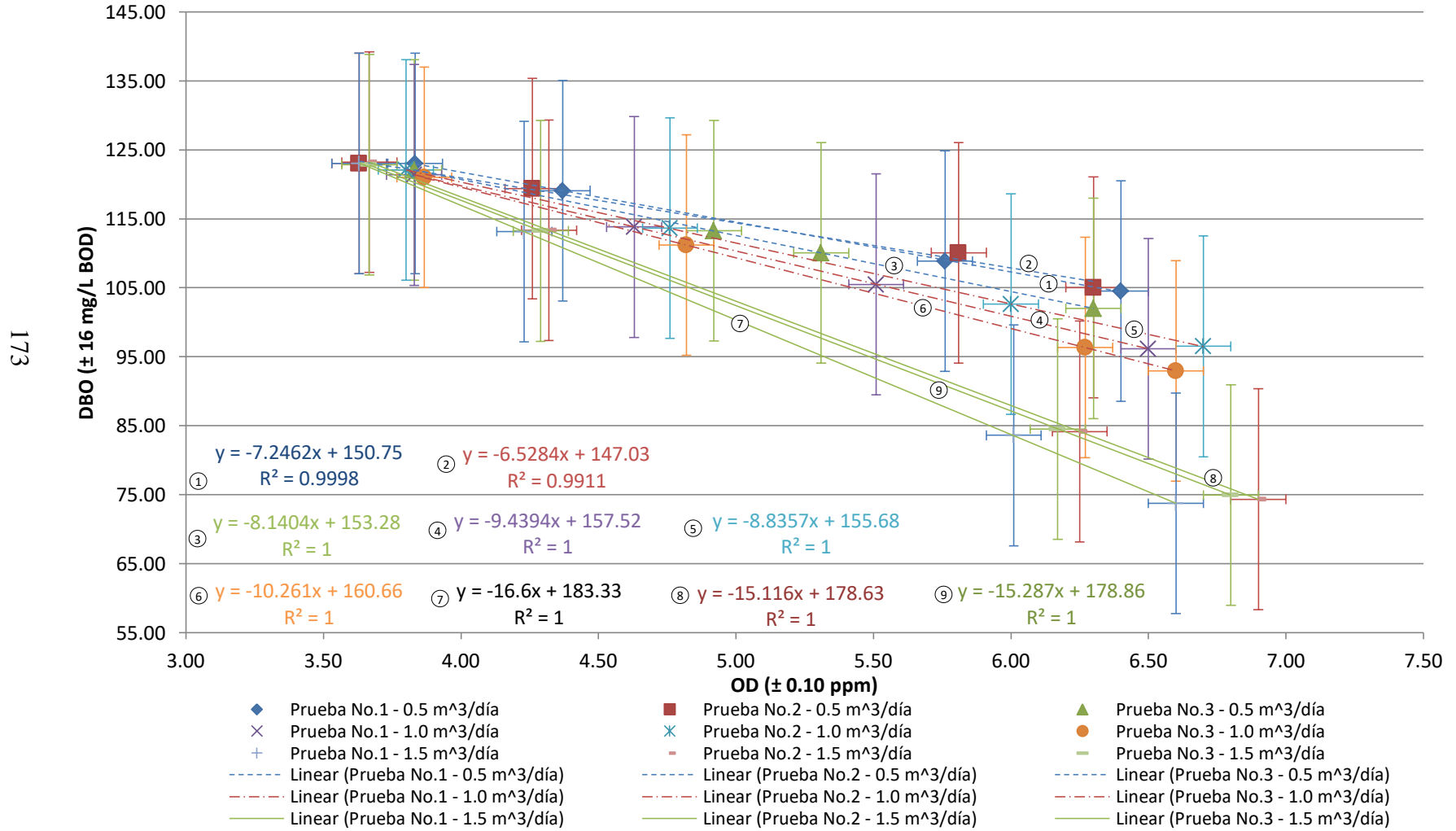
La relación oxígeno disuelto – turbidez, el coeficiente R^2 exhibe un rango de 0.9979 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente y todas las pruebas con los tres flujos volumétricos presentan un comportamiento similar.

Figura 48 Comparación Oxígeno Disuelto (OD) y Demanda Química de Oxígeno (DQO)



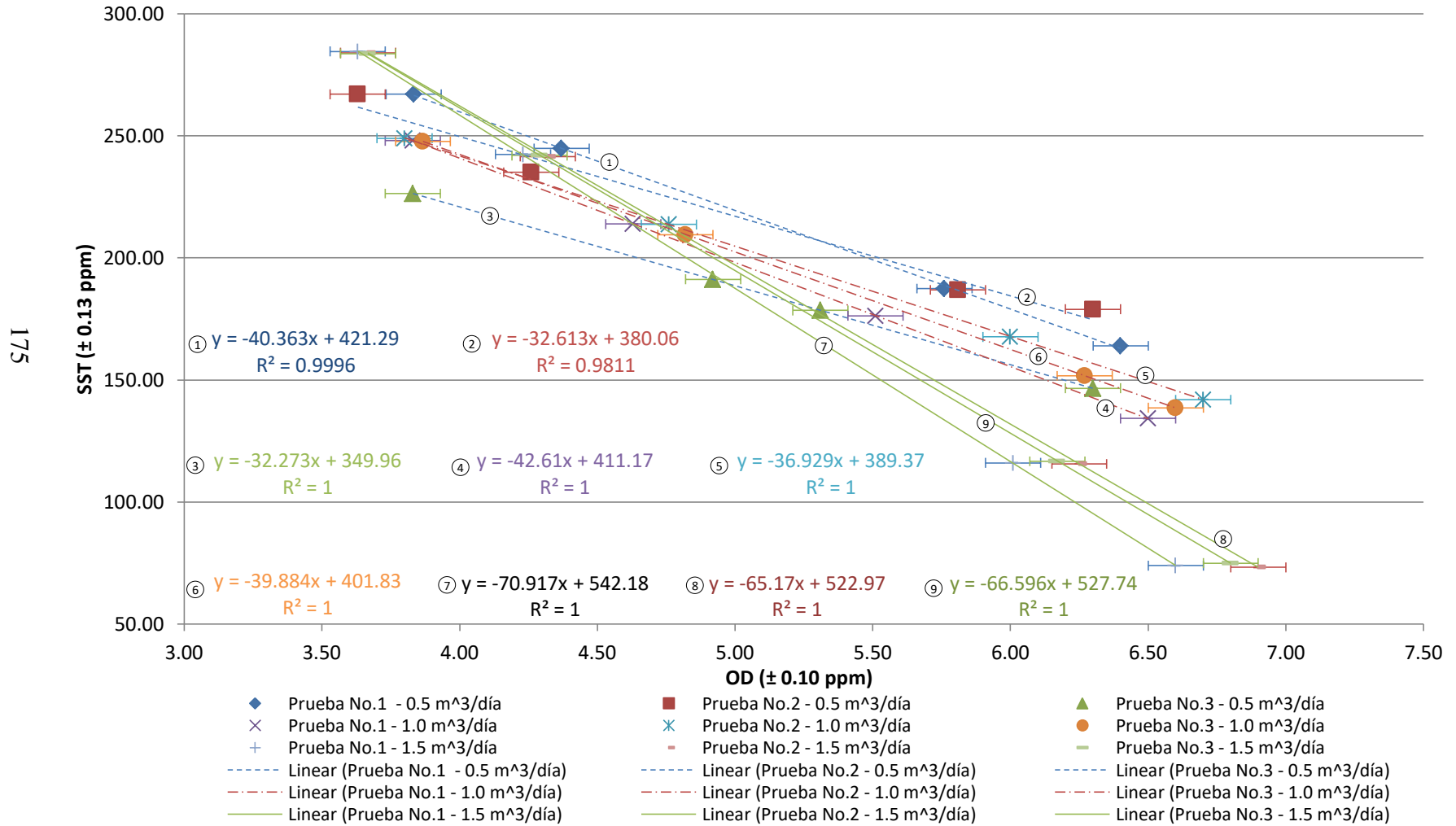
La relación oxígeno disuelto – Demanda Química de Oxígeno (DQO), el coeficiente R^2 muestra un rango de 0.9911 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente. Las pruebas de cada flujo volumétrico presentan un comportamiento similar entre sí.

Figura 49 Comparación Oxígeno Disuelto (OD) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)



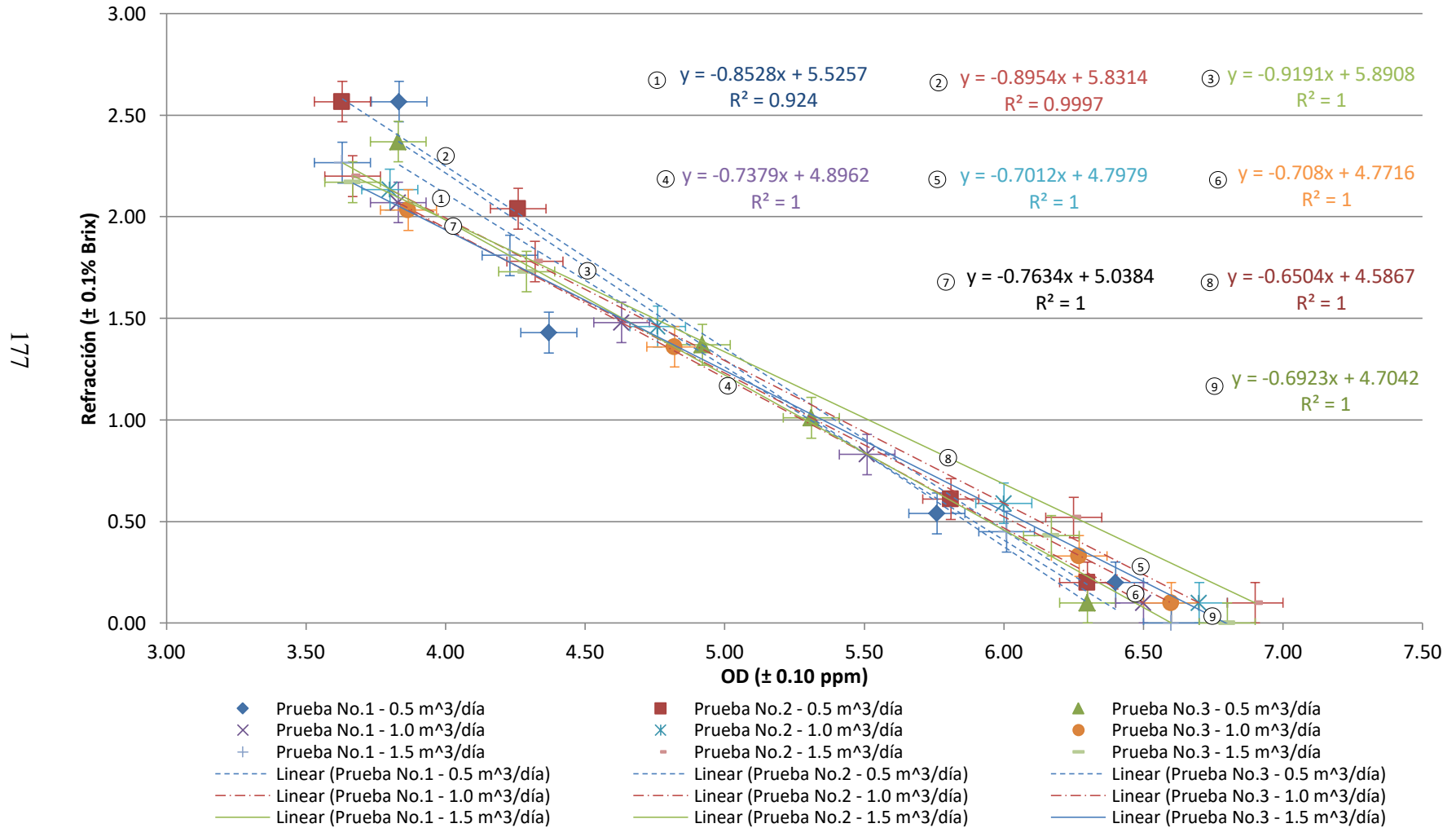
La relación oxígeno disuelto – Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), el coeficiente R^2 evidencia un rango de 0.991 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente. Las pruebas del flujo volumétrico de $1.5 \text{ m}^3/\text{día}$ presentan menor variación entre las pendientes.

Figura 50 Comparación Oxígeno Disuelto (OD) y Sólidos Suspendedos Totales (SST)



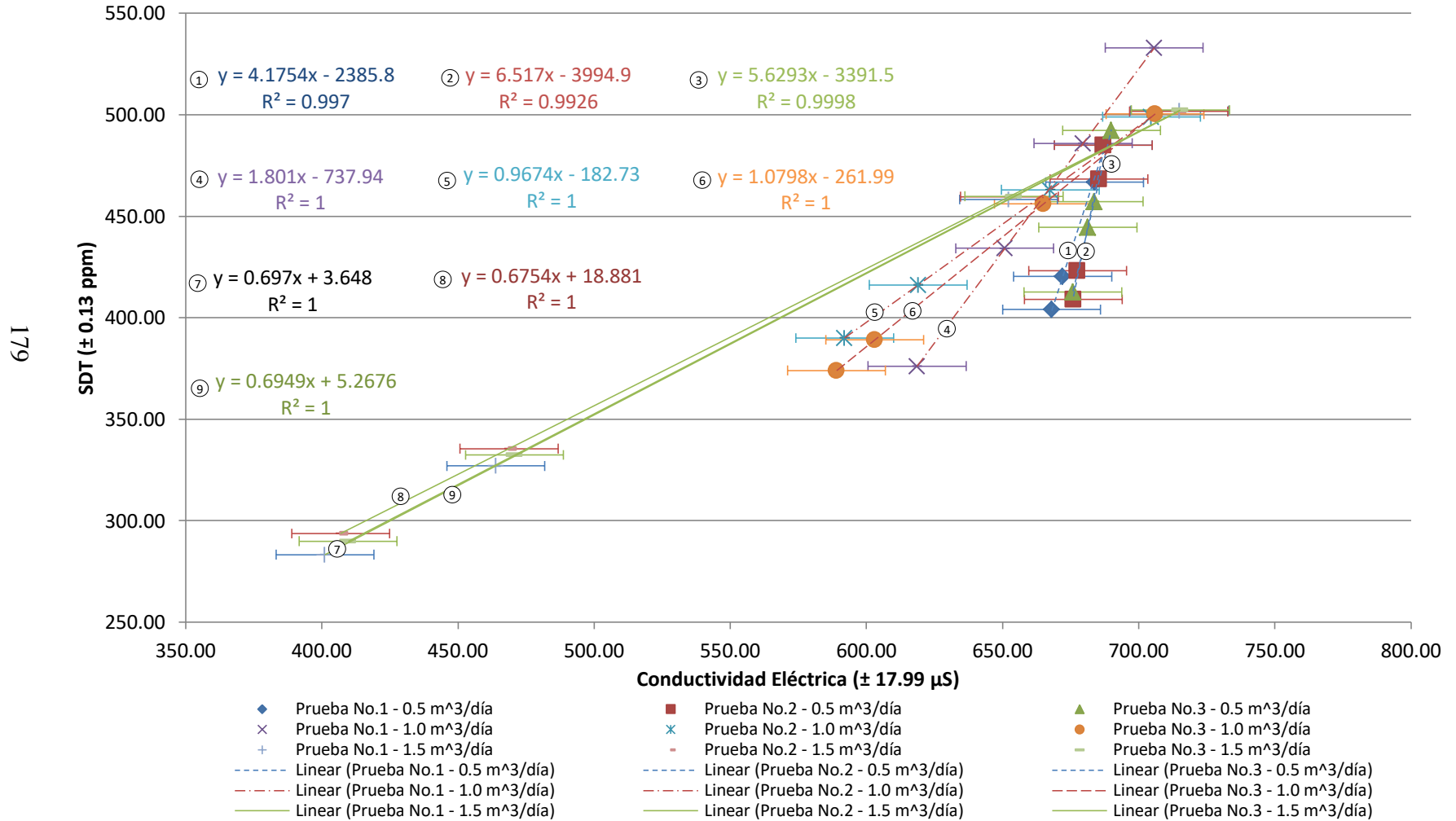
La relación oxígeno disuelto – Sólidos Suspendidos Totales (SST), el coeficiente R^2 exhibe un rango de 0.9811 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente y únicamente las pruebas con el flujo volumétrico $1.5 \text{ m}^3/\text{día}$ presentan un comportamiento similar.

Figura 51 Comparación Oxígeno Disuelto (OD) y refracción



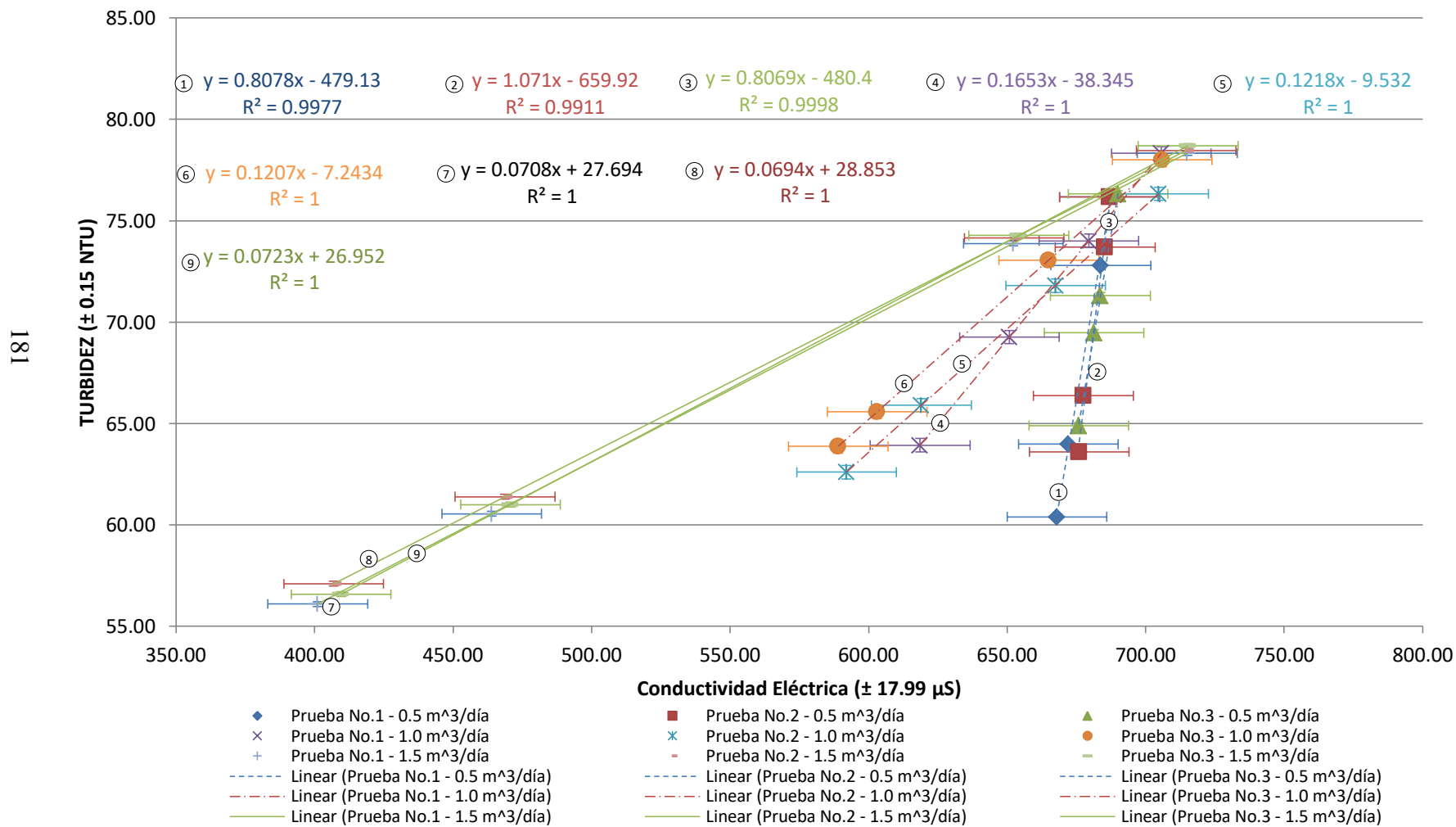
En el caso de la relación oxígeno disuelto – refracción, el coeficiente R^2 refleja un rango de 0.942 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente y la mayoría de las pruebas con los tres flujos volumétricos presentan un comportamiento similar.

Figura 52 Comparación conductividad eléctrica y Sólidos Disueltos Totales (SDT)



En cuanto a la relación conductividad eléctrica – Sólidos Disueltos Totales (SDT), el coeficiente R^2 muestra un rango de 0.9926 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente; especialmente las pruebas con el caudal de alimentación 1.5 m³/día exponen la menor variación entre sus pendientes.

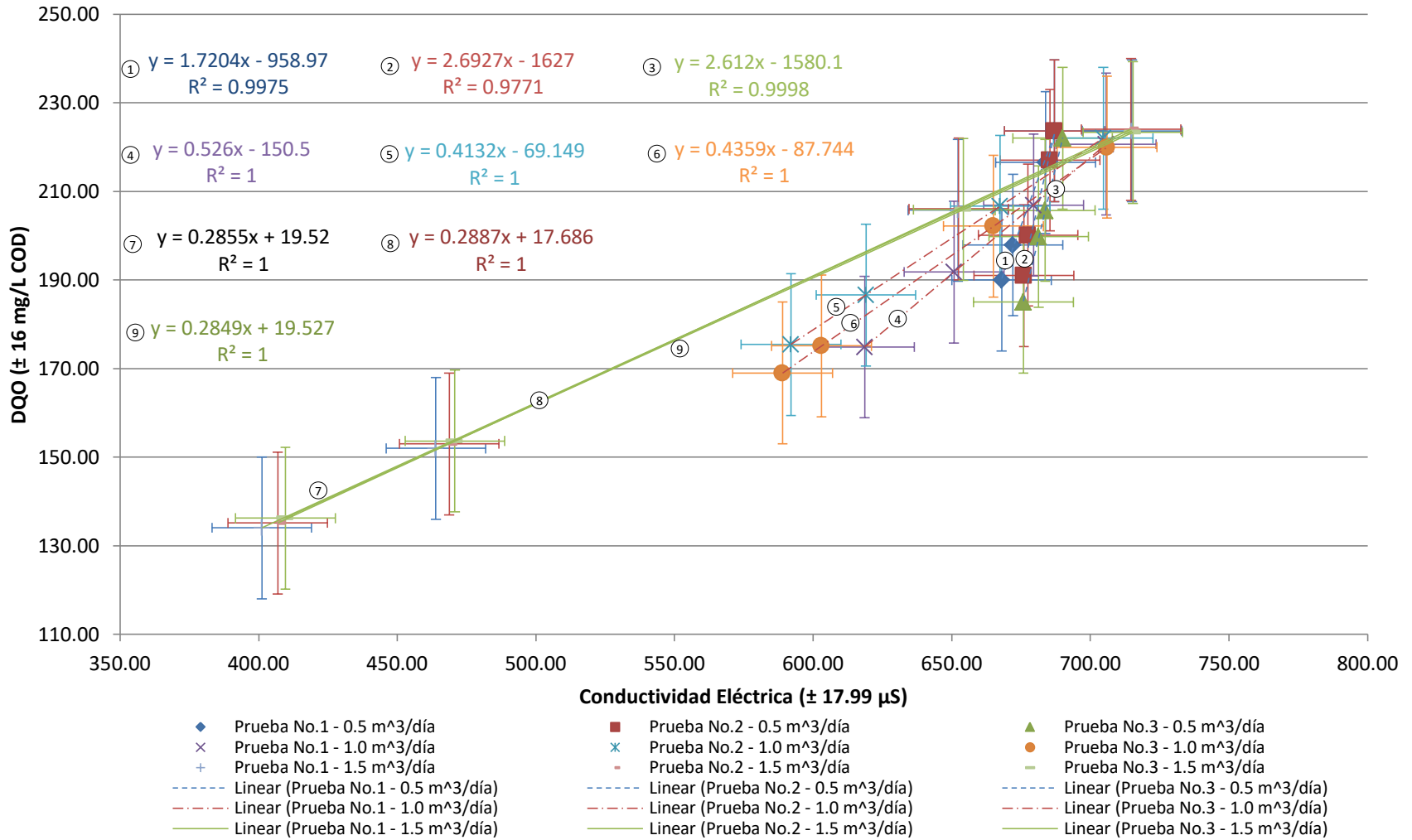
Figura 53 Comparación conductividad eléctrica y turbidez



La relación conductividad eléctrica – turbidez, el coeficiente R^2 exhibe un rango de 0.9911 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente y únicamente las pruebas con el flujo volumétrico $1.5 \text{ m}^3/\text{día}$ presentan un comportamiento similar.

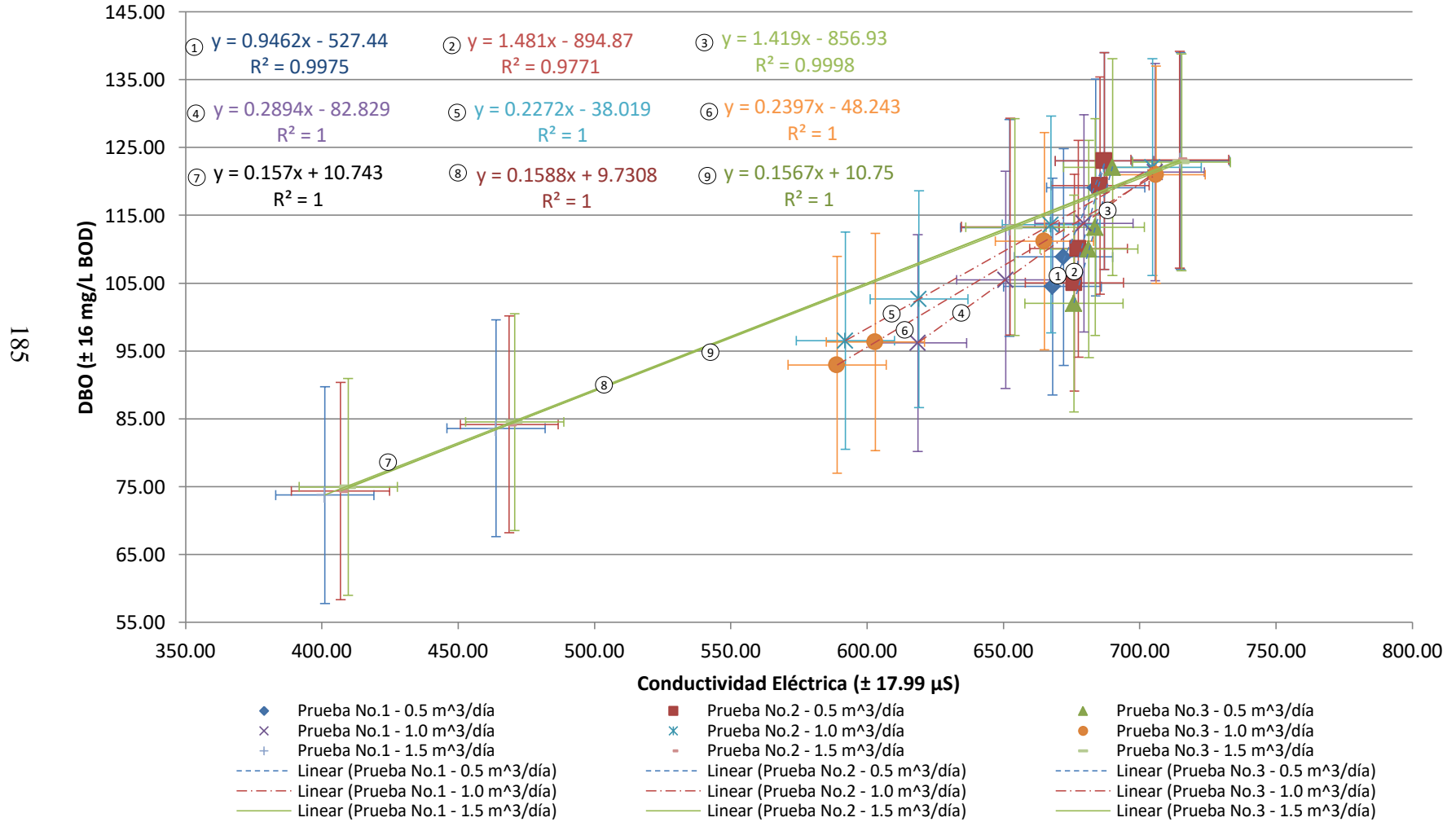
Figura 54 Comparación conductividad eléctrica y Demanda Química de Oxígeno (DQO)

183



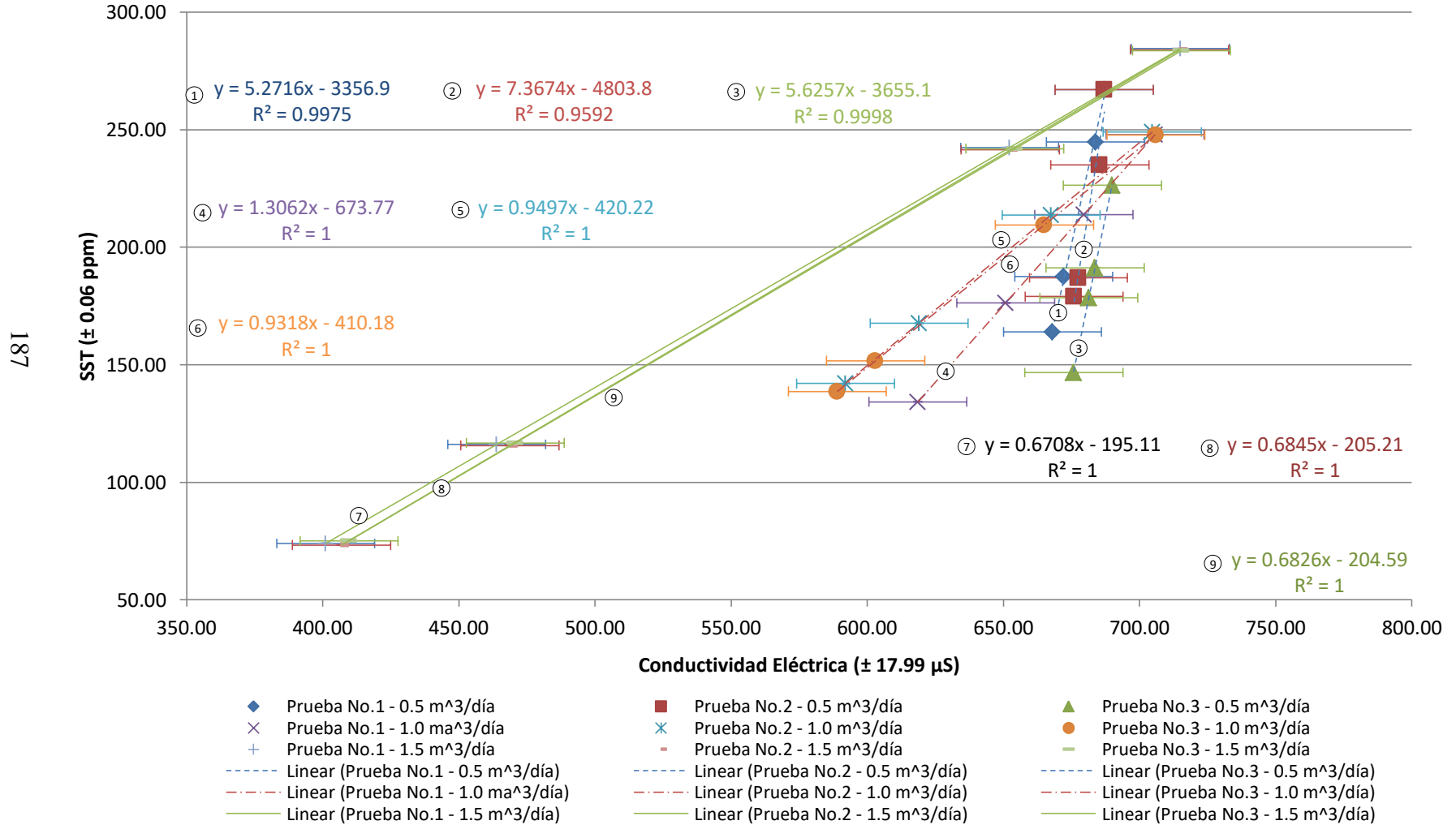
La relación conductividad eléctrica – Demanda Química de Oxígeno (DQO), el coeficiente R^2 muestra un rango de 0.9771 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente; especialmente las pruebas con el caudal de alimentación 1.5 m³/día exponen la menor variación entre sus pendientes.

Figura 55 Comparación conductividad eléctrica y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)



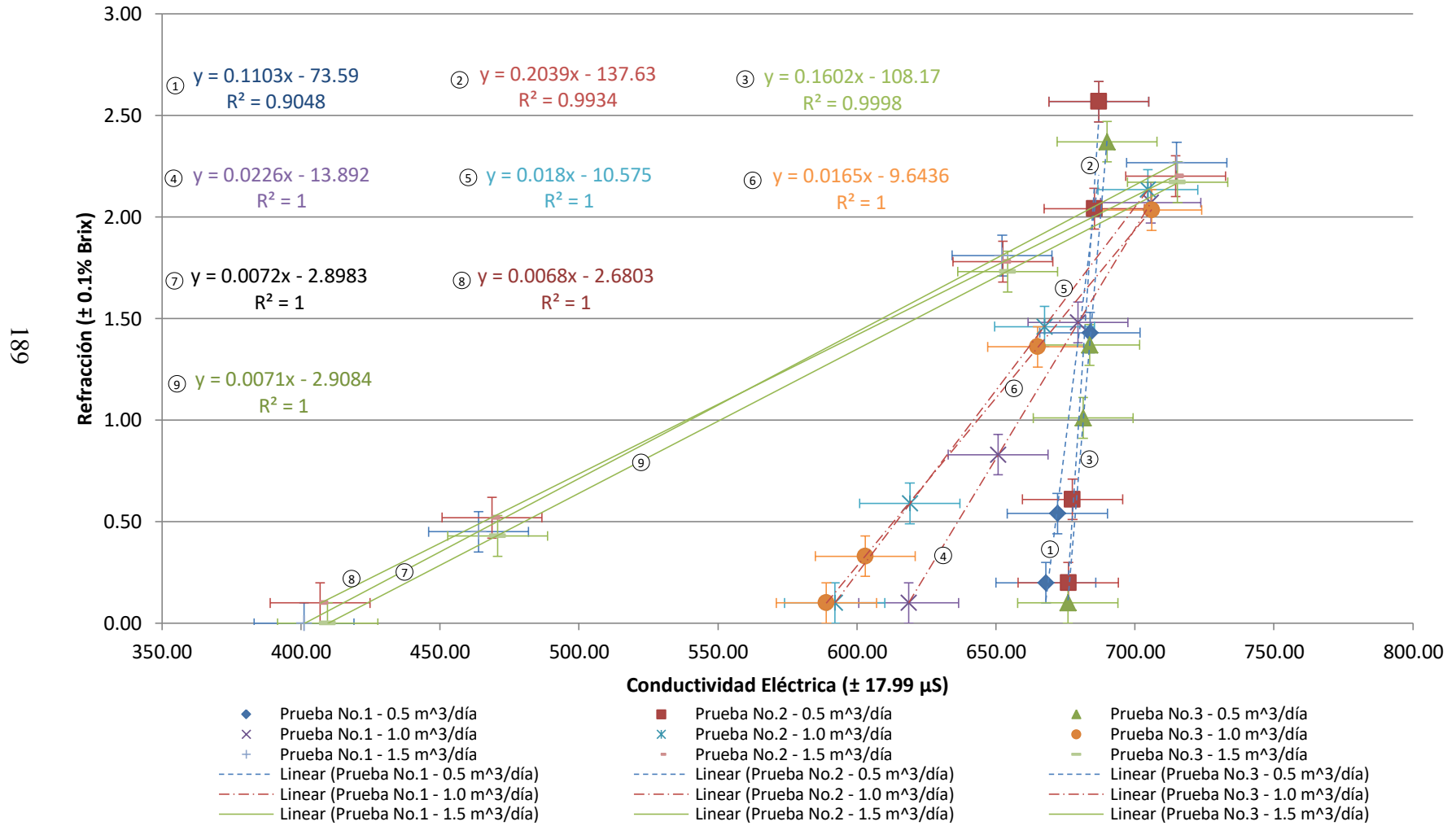
En el caso de la relación conductividad eléctrica – Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), el coeficiente R^2 evidencia un rango de 0.971 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente. Las pruebas de cada flujo volumétrico presentan un comportamiento similar entre sí.

Figura 56 Comparación conductividad eléctrica y Sólidos Suspendedos Totales (SST)



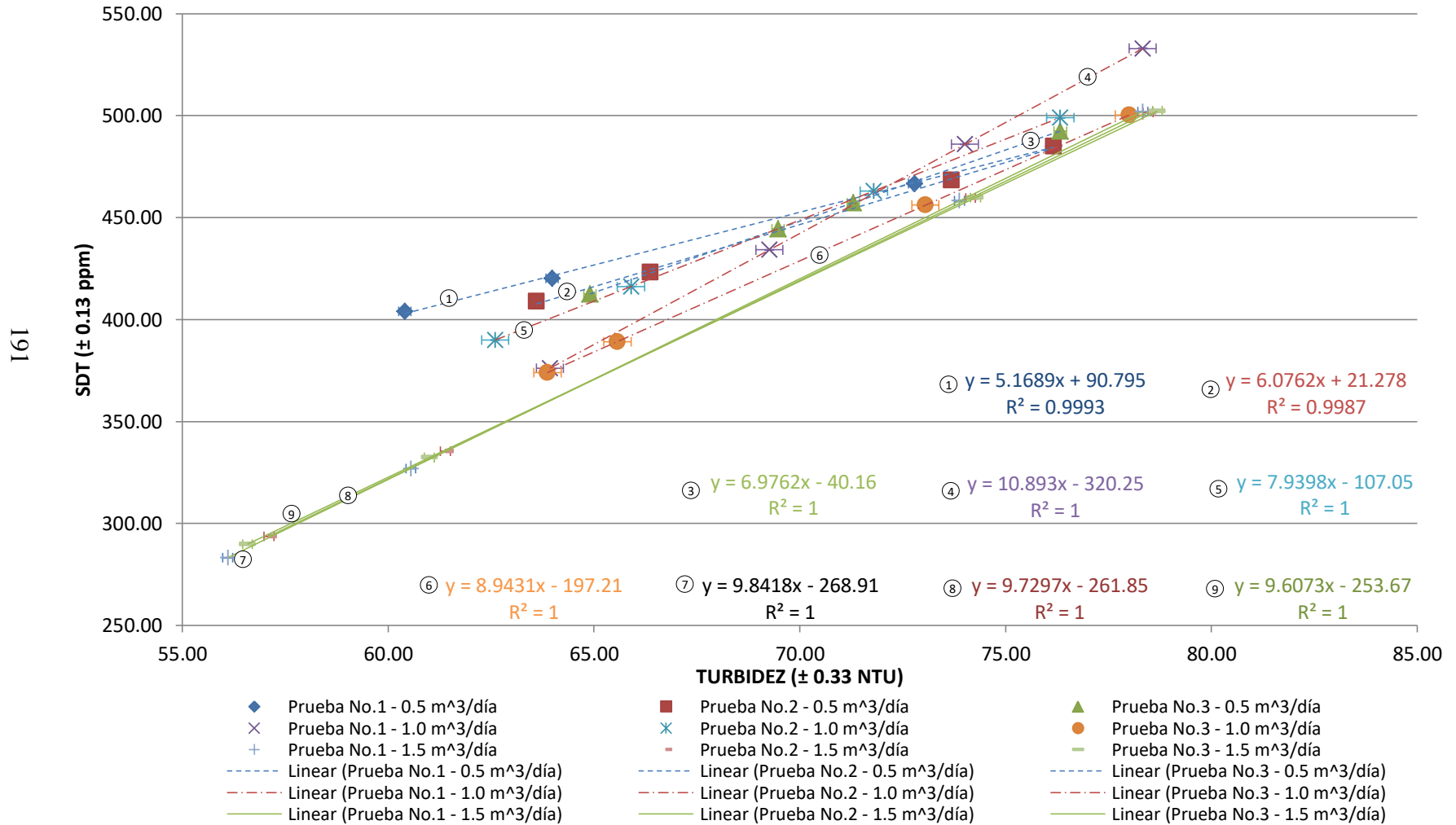
La relación conductividad eléctrica – Sólidos Suspendidos Totales (SST), el coeficiente R^2 exhibe un rango de 0.9975 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente y especialmente las pruebas con el caudal de alimentación 1.5 m³/día exponen la menor variación entre sus pendientes.

Figura 57 Comparación conductividad eléctrica y refracción



En el caso de la relación conductividad eléctrica – refracción, el coeficiente R^2 refleja un rango de 0.9043 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente y la mayoría de las pruebas con los tres flujos volumétricos presentan un comportamiento similar respectivamente.

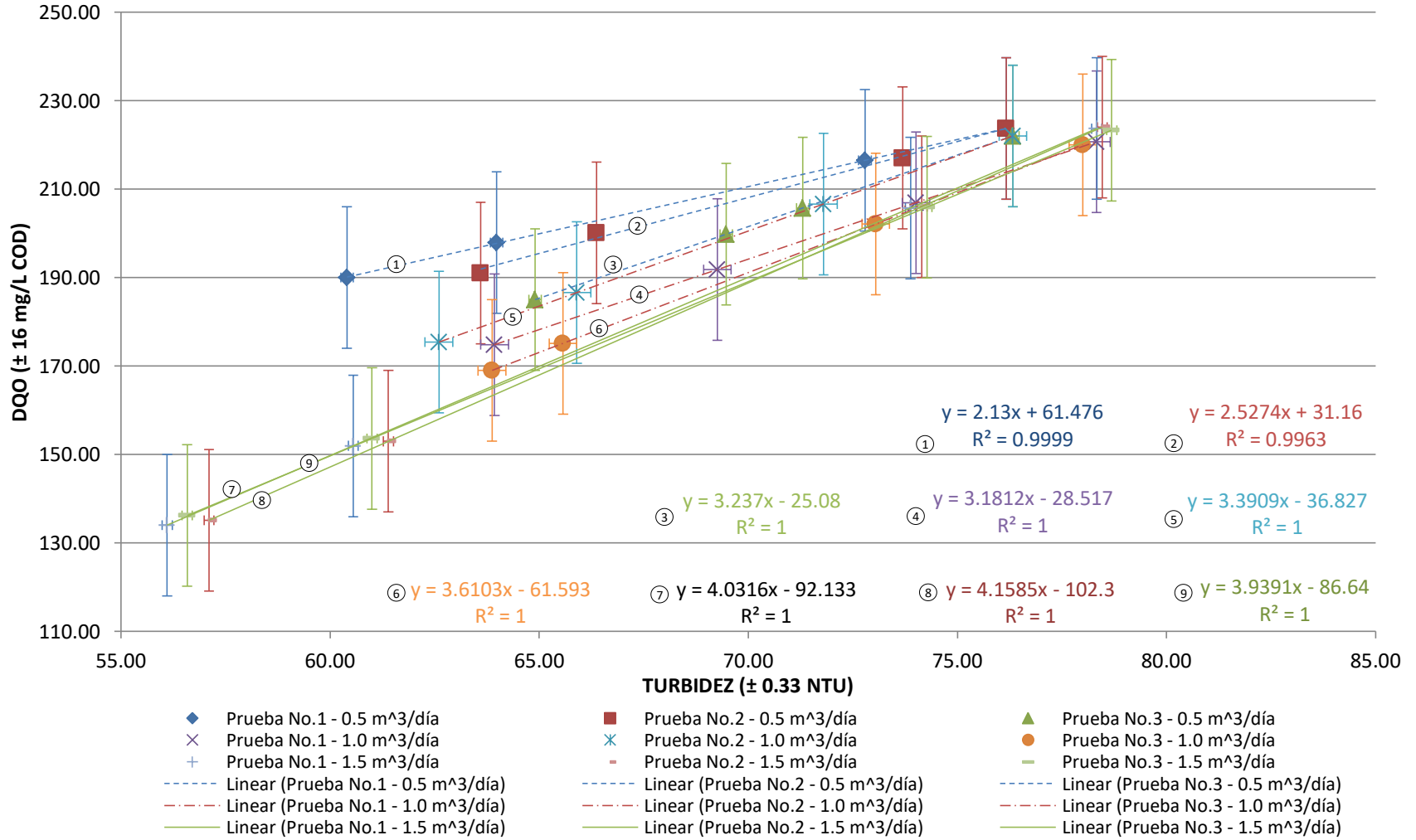
Figura 58 Comparación turbidez y Sólidos Disueltos Totales (SDT)



En cuanto a la relación turbidez – Sólidos Disueltos Totales (SDT), el coeficiente R^2 muestra un rango de 0.9993 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente; especialmente las pruebas con el caudal de alimentación $1.5 \text{ m}^3/\text{día}$ exponen la menor variación entre sus pendientes.

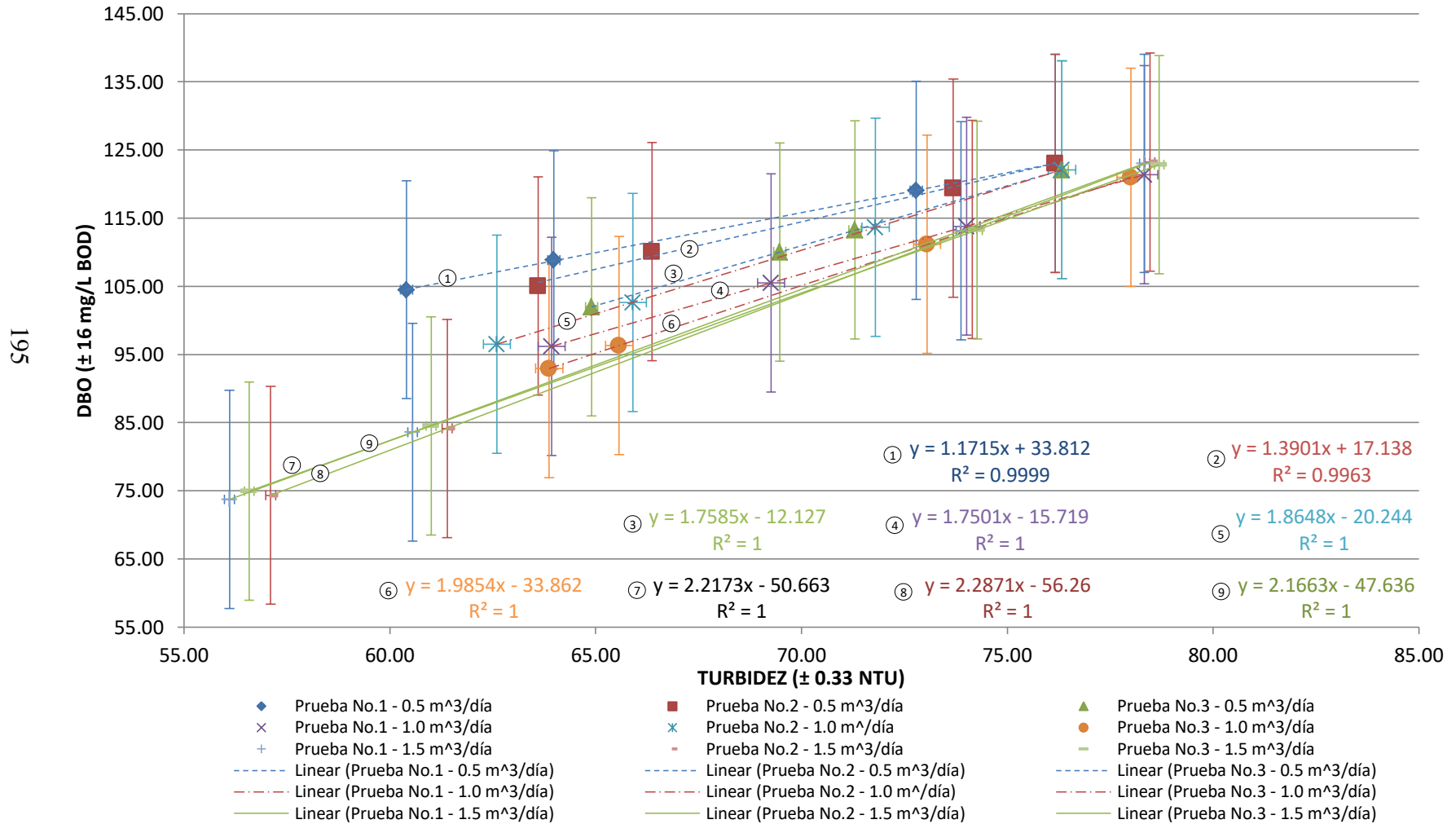
Figura 59 Comparación turbidez y Demanda Química de Oxígeno (DQO)

193



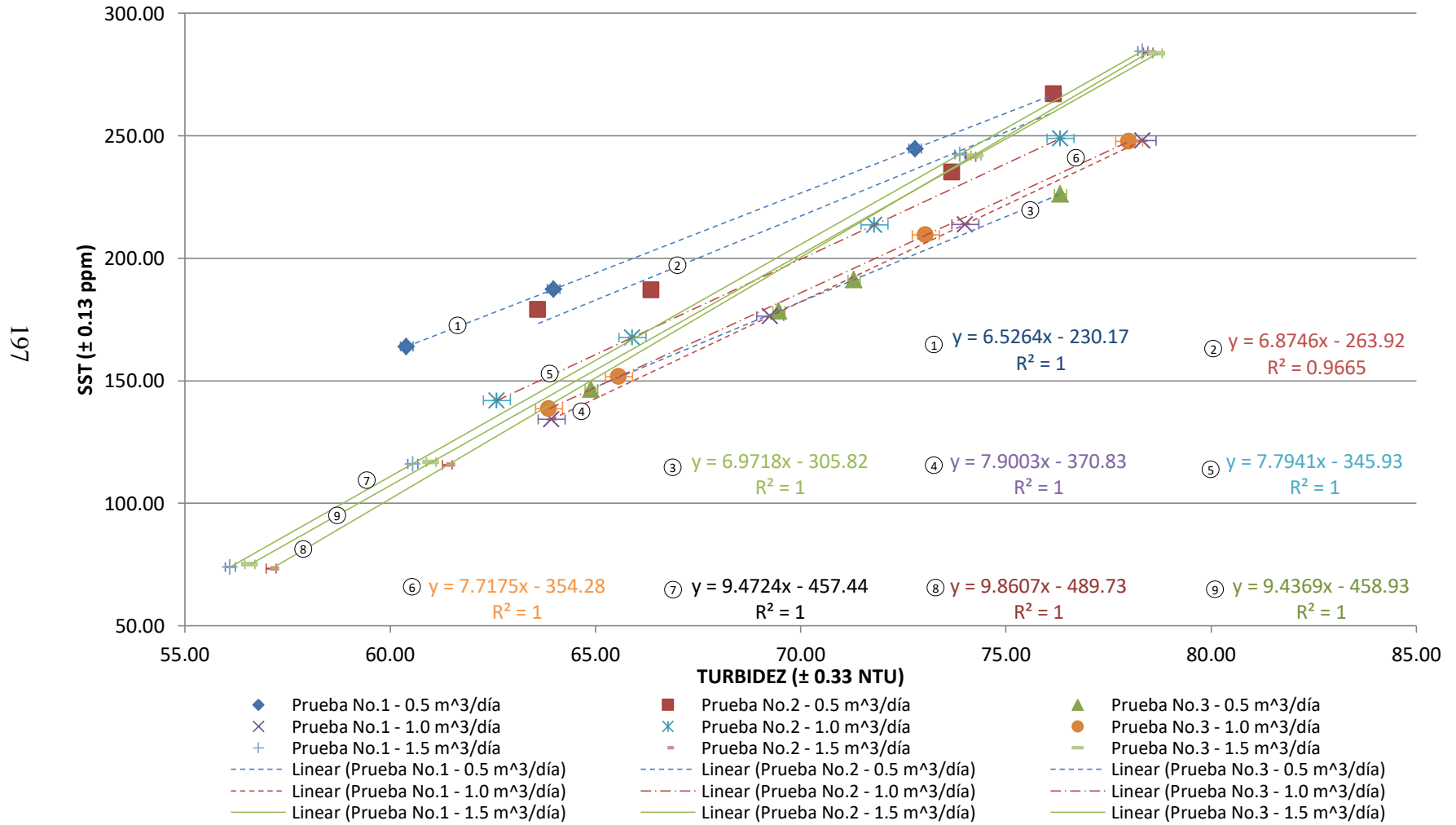
La relación turbidez – Demanda Química de Oxígeno (DQO), el coeficiente R^2 muestra un rango de 0.9963 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente. Las pruebas de cada flujo volumétrico presentan un comportamiento similar entre sí.

Figura 60 Comparación turbidez y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)



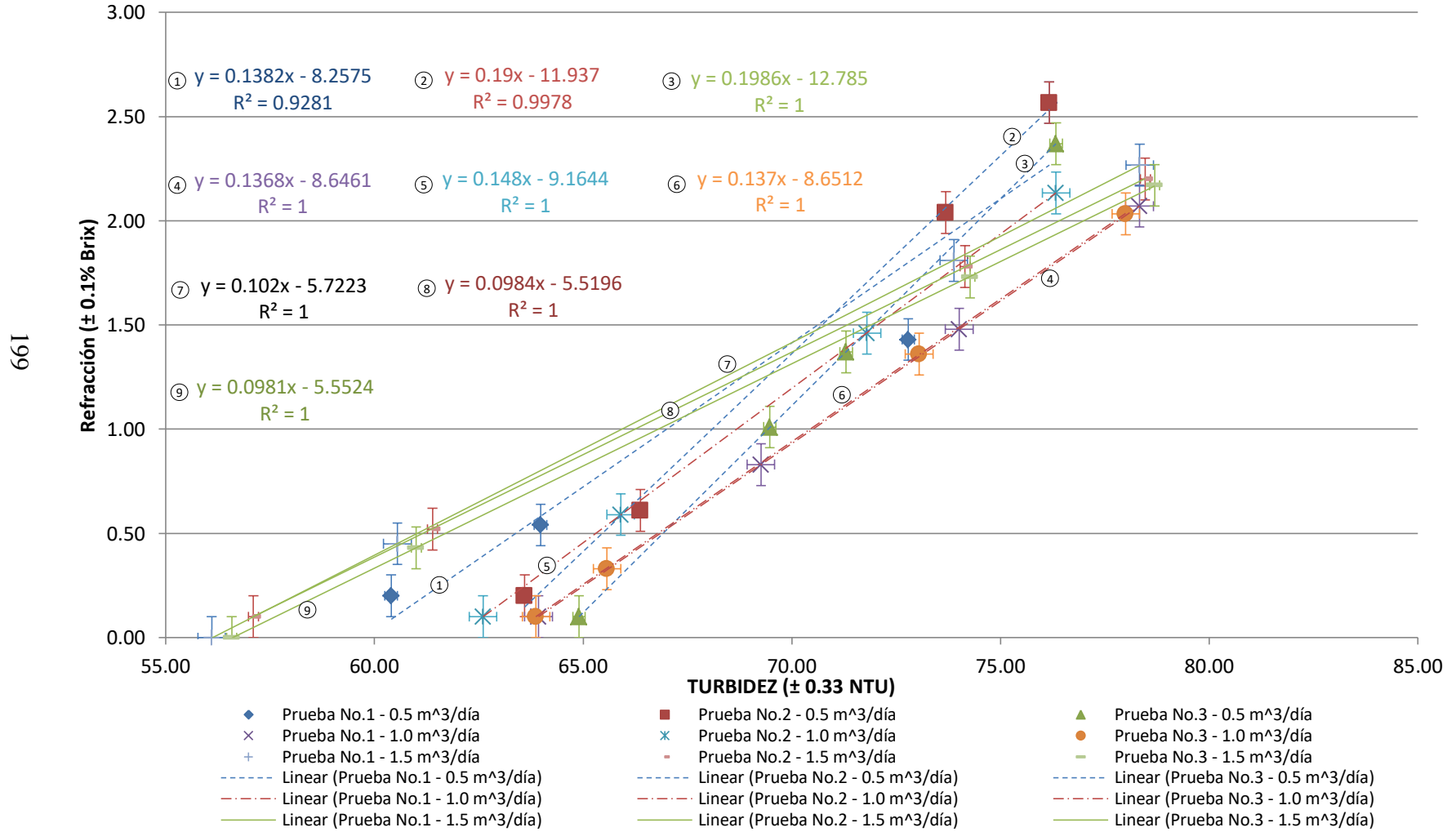
La relación turbidez – Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), el coeficiente R^2 muestra un rango de 0.996 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente. Las pruebas de cada flujo volumétrico presentan un comportamiento similar entre sí.

Figura 61 Comparación turbidez y Sólidos Suspendedos Totales (SST)



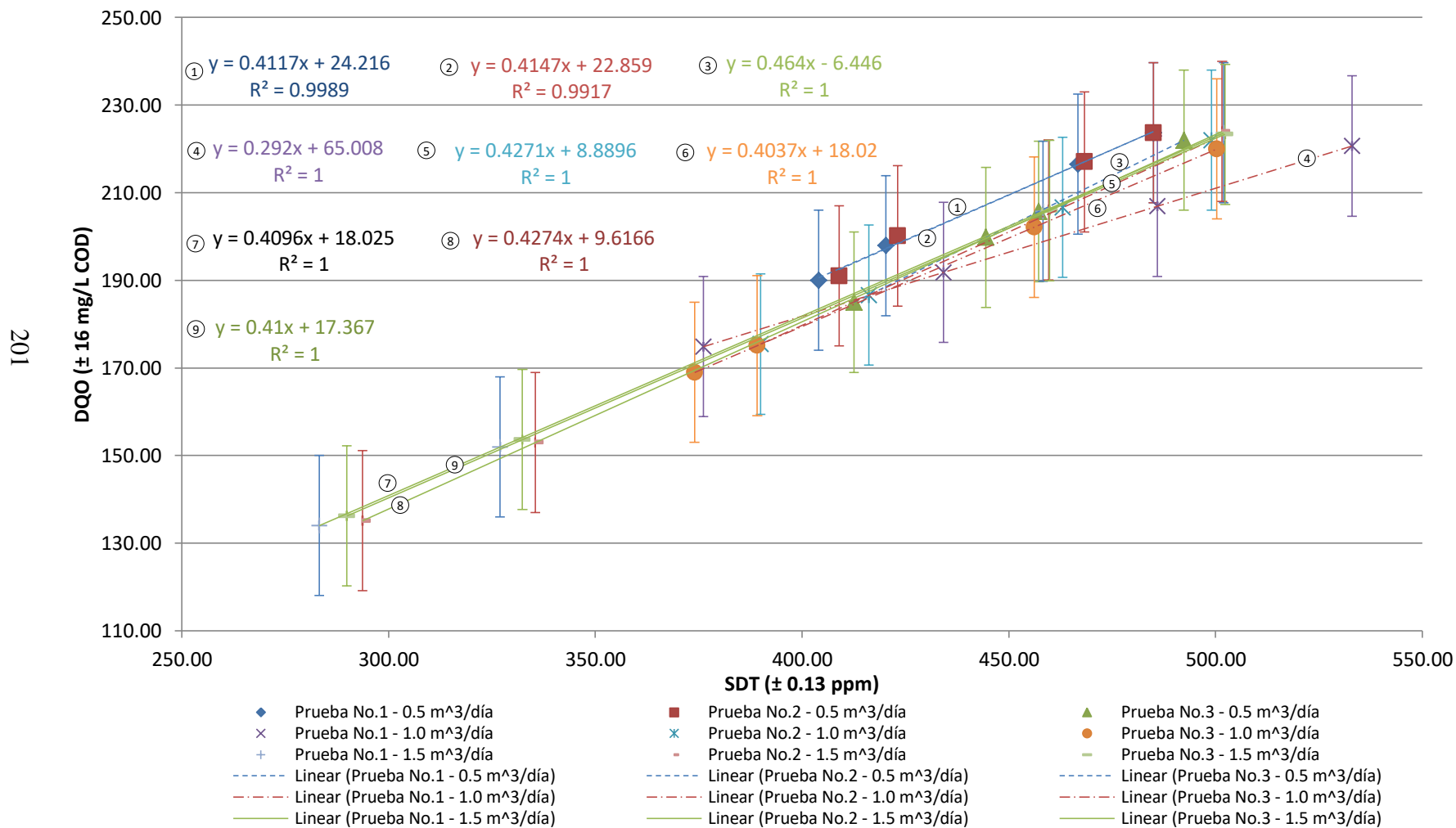
La relación turbidez – Sólidos Suspendidos Totales (SST), el coeficiente R^2 exhibe un rango de 0.9965 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente y especialmente las pruebas con el caudal de alimentación $1.5 \text{ m}^3/\text{día}$ exponen la menor variación entre sus pendientes.

Figura 62 Comparación turbidez y refracción



En el caso de la relación turbidez – refracción, el coeficiente R^2 refleja un rango de 0.9281 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente y la mayoría de las pruebas con los tres flujos volumétricos presentan un comportamiento similar.

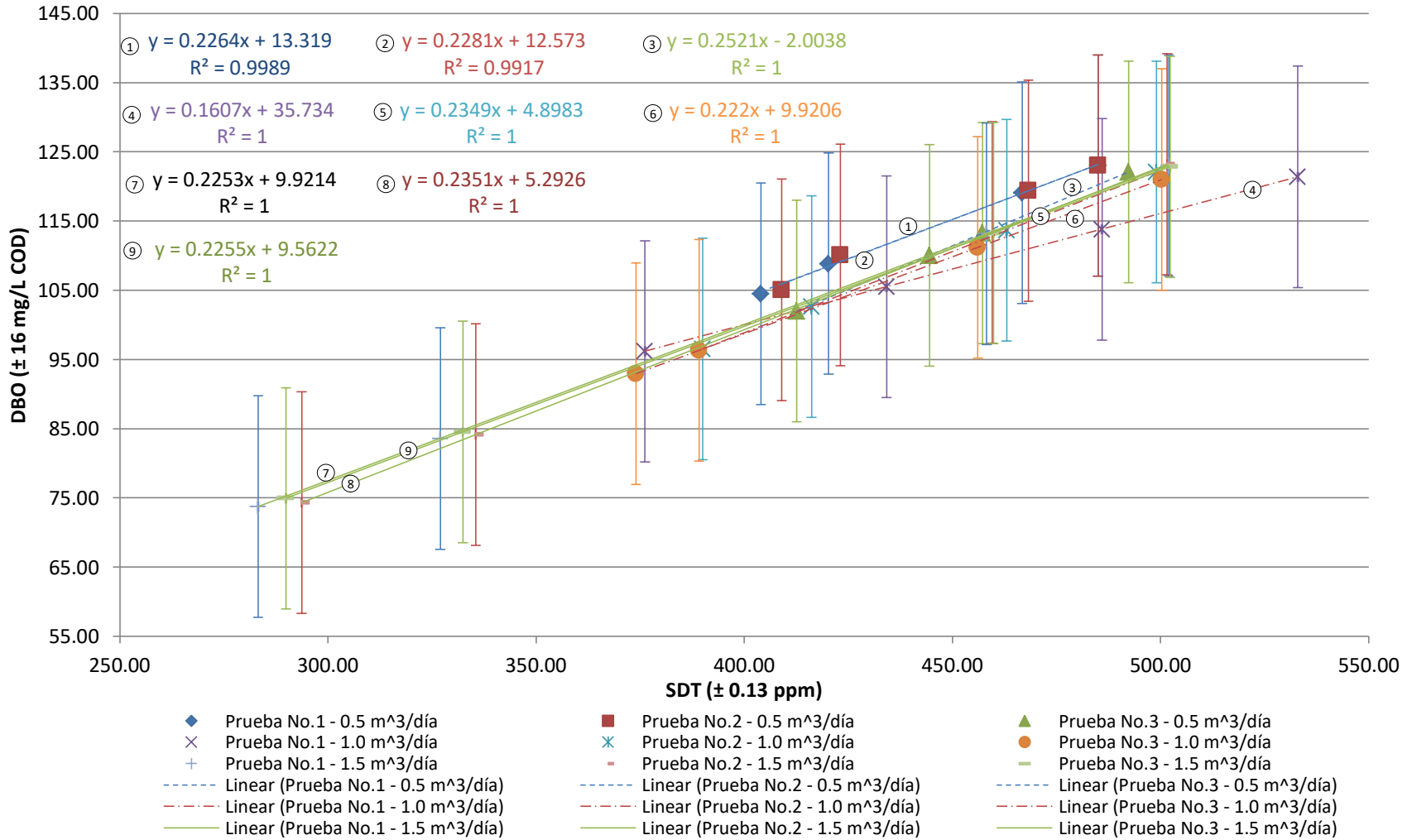
Figura 63 Comparación Sólidos Disueltos Totales (SDT) y Demanda Química de Oxígeno (DQO)



La relación Sólidos Disueltos Totales (SDT) – Demanda Química de Oxígeno (DQO), el coeficiente R^2 muestra un rango de 0.9917 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente; especialmente las pruebas con el caudal de alimentación $1.5 \text{ m}^3/\text{día}$ exponen la menor variación entre sus pendientes.

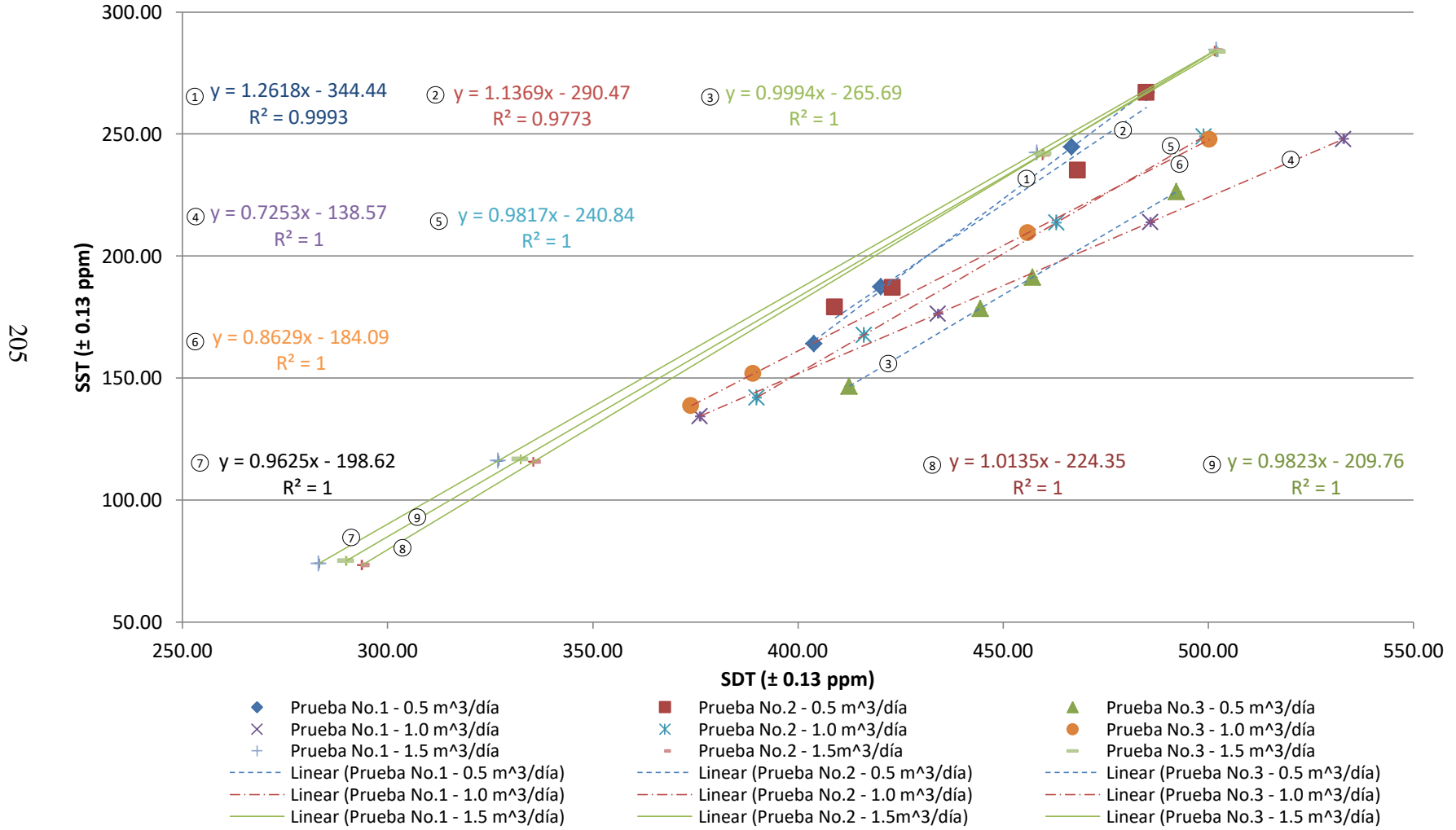
Figura 64 Comparación Sólidos Disueltos Totales (SDT) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

203



La relación Sólidos Disueltos Totales (SDT) – Demanda Bioquímica de Oxígeno (DQO), el coeficiente R^2 evidencia un rango de 0.991 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente y la mayoría de las pruebas con los tres flujos volumétricos presentan un comportamiento similar.

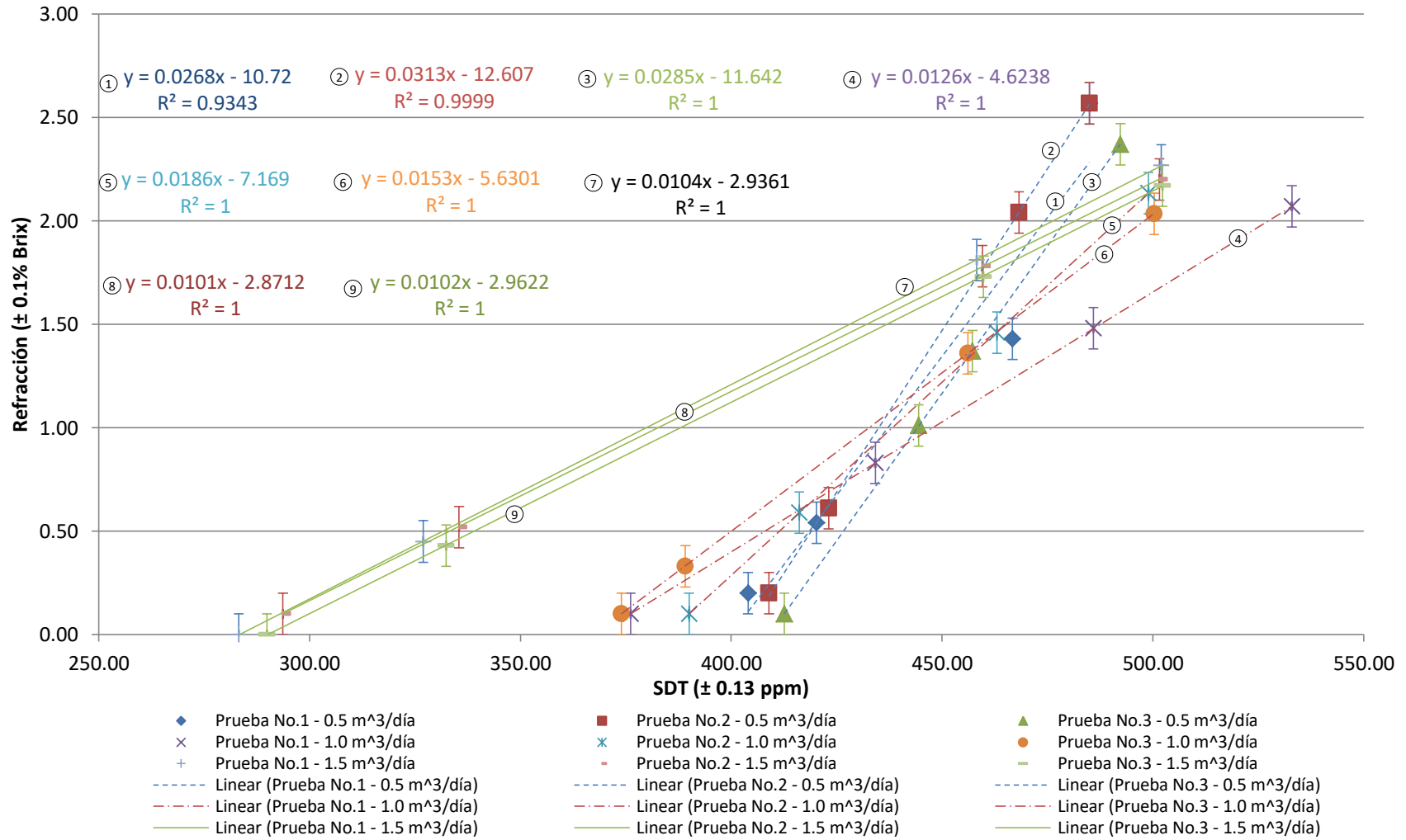
Figura 65 Comparación Sólidos Disueltos Totales (SDT) y Sólidos Suspensos Totales (SST)



La relación Sólidos Disueltos Totales (SDT) – Sólidos Suspendidos Totales (SST), el coeficiente R^2 exhibe un rango de 0.9773 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente y especialmente las pruebas con el caudal de alimentación 1.5 m³/día exponen la menor variación entre sus pendientes.

Figura 66 Comparación Sólidos Disueltos Totales (SDT) y refracción

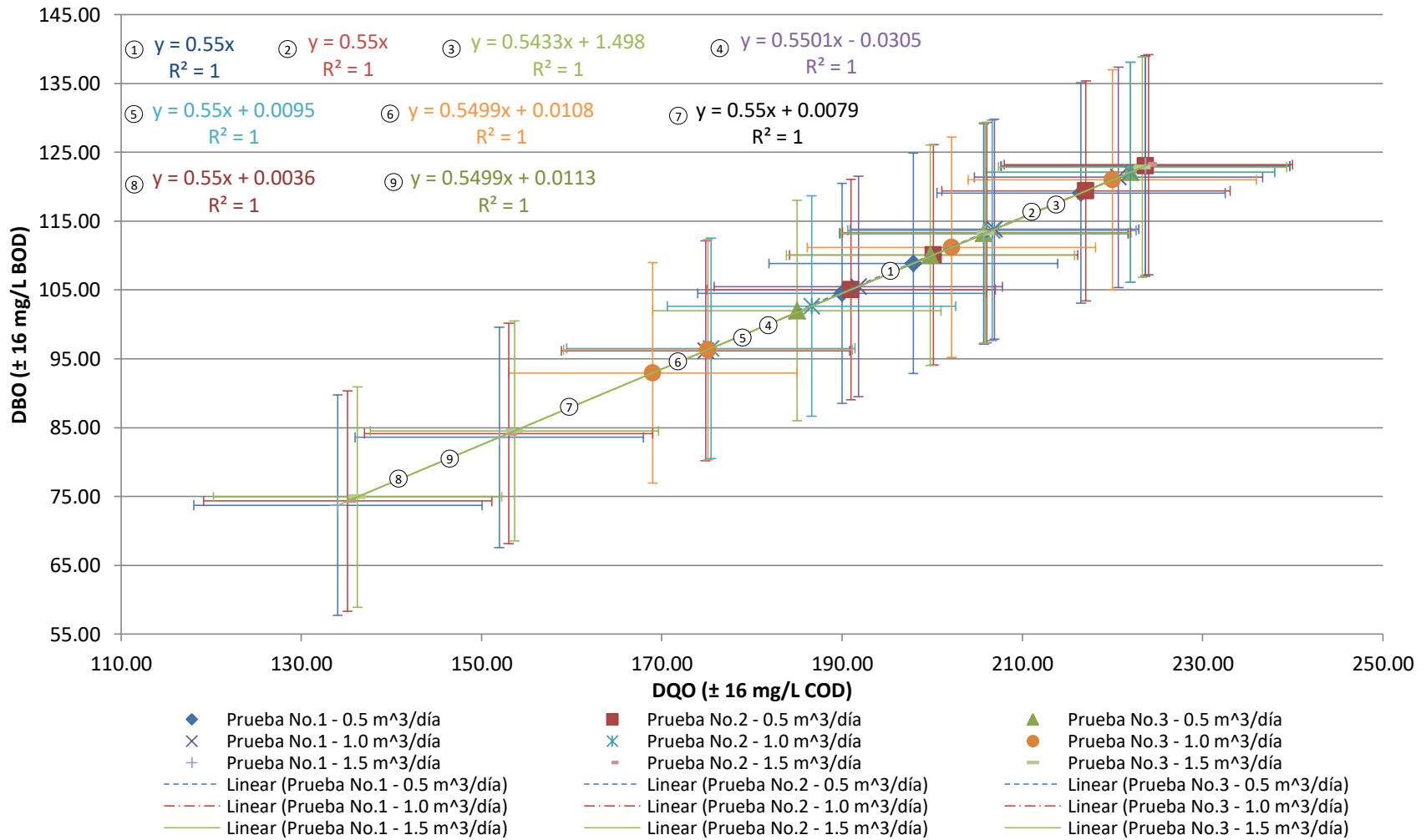
207



En el caso de la relación Sólidos Disueltos Totales (SDT) – refracción, el coeficiente R^2 refleja un rango de 0.9343 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente y las pruebas de los flujos volumétricos 0.5 y 1.5 m³/día presentan un comportamiento similar respectivamente.

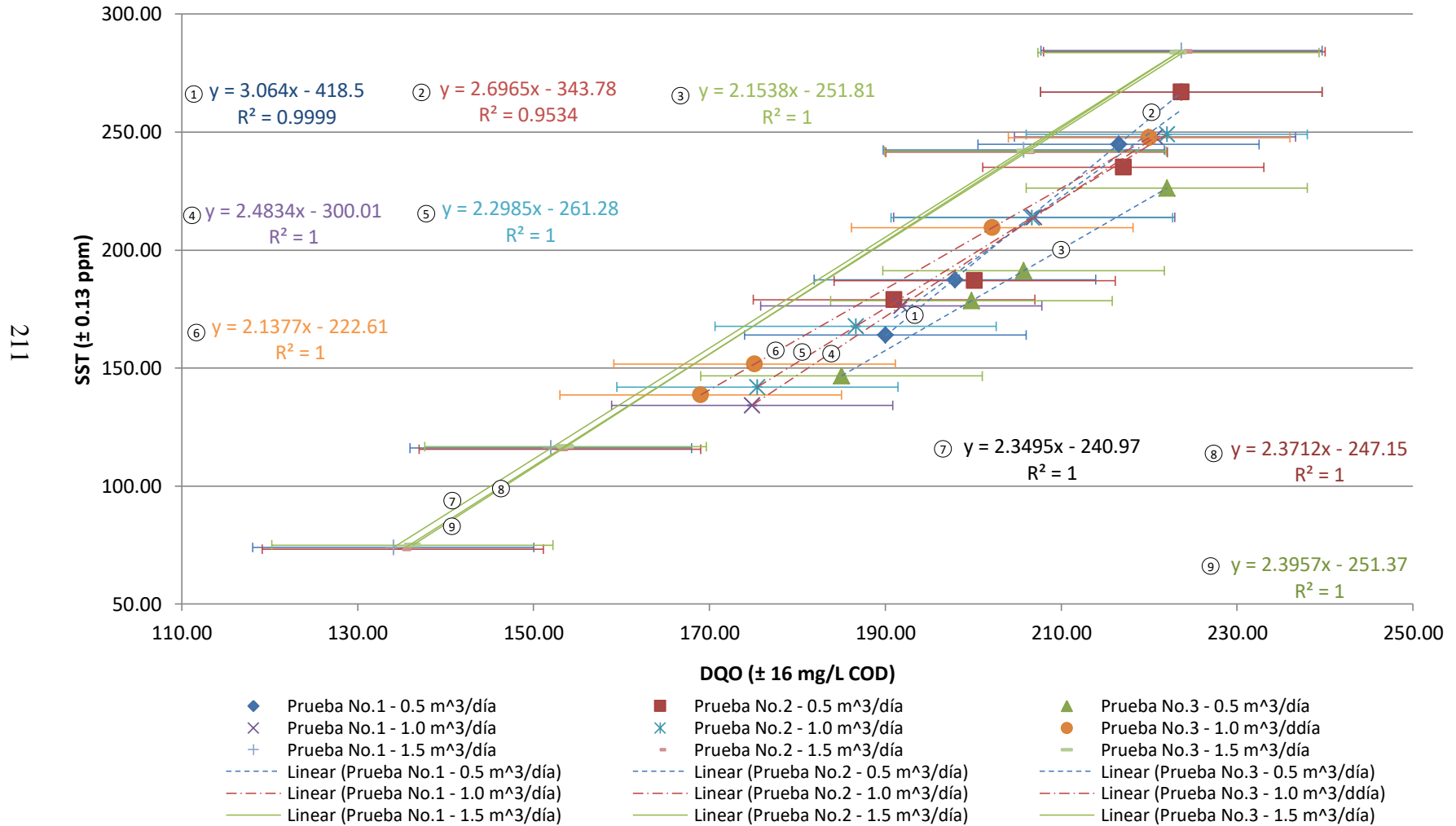
Figura 67 Comparación Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

209



En el caso de la relación Demanda Química de Oxígeno (DQO) – Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), el coeficiente R^2 evidencia un valor de 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente. Las pruebas de cada flujo volumétrico presentan un comportamiento similar entre sí.

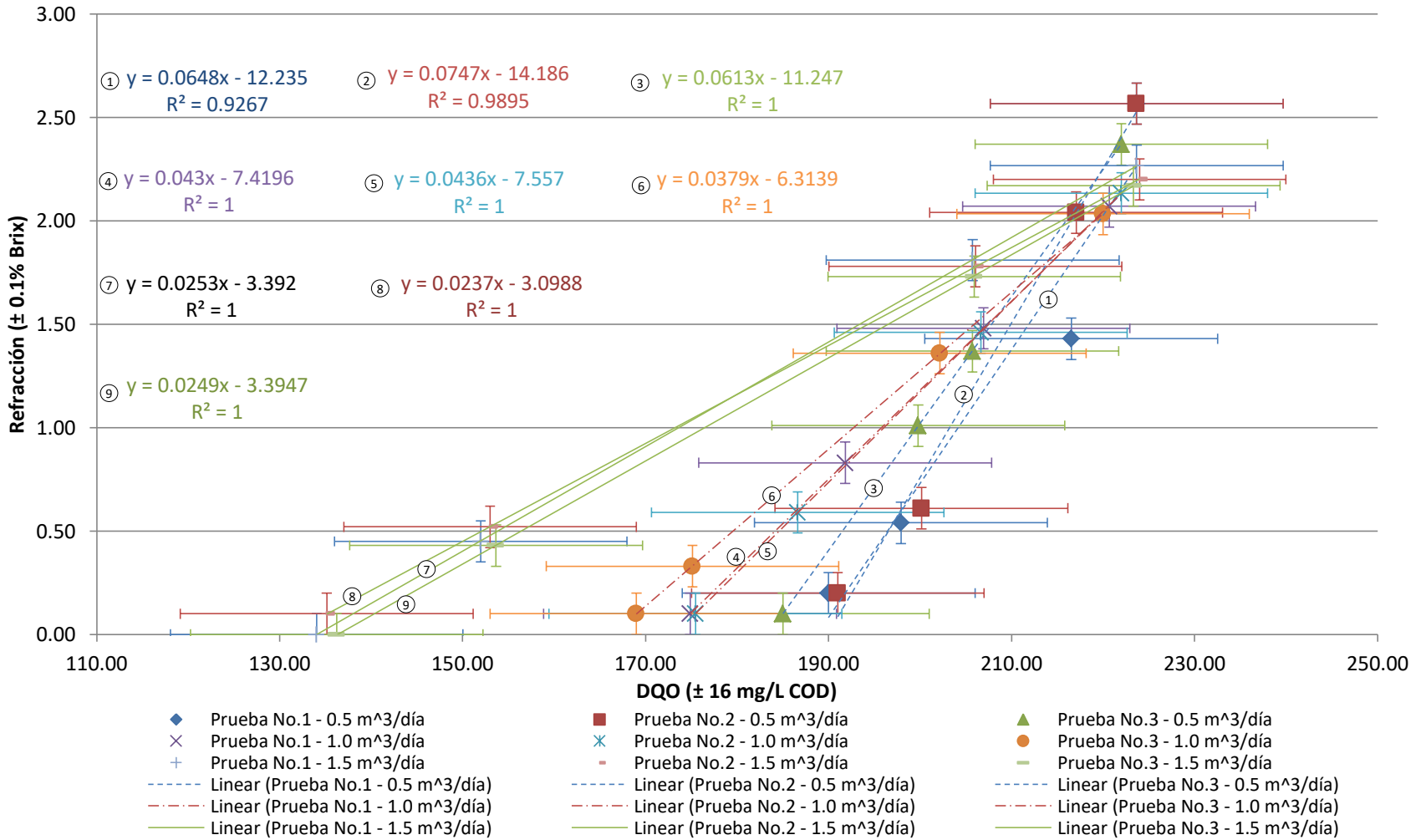
Figura 68 Comparación Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Sólidos Suspendedos Totales (SST)



La relación Demanda Química de Oxígeno (DQO) – Sólidos Suspendidos Totales (SST), el coeficiente R^2 exhibe un rango de 0.9534 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente, y especialmente las pruebas con el caudal de alimentación 1.5 m³/día exponen la menor variación entre sus pendientes.

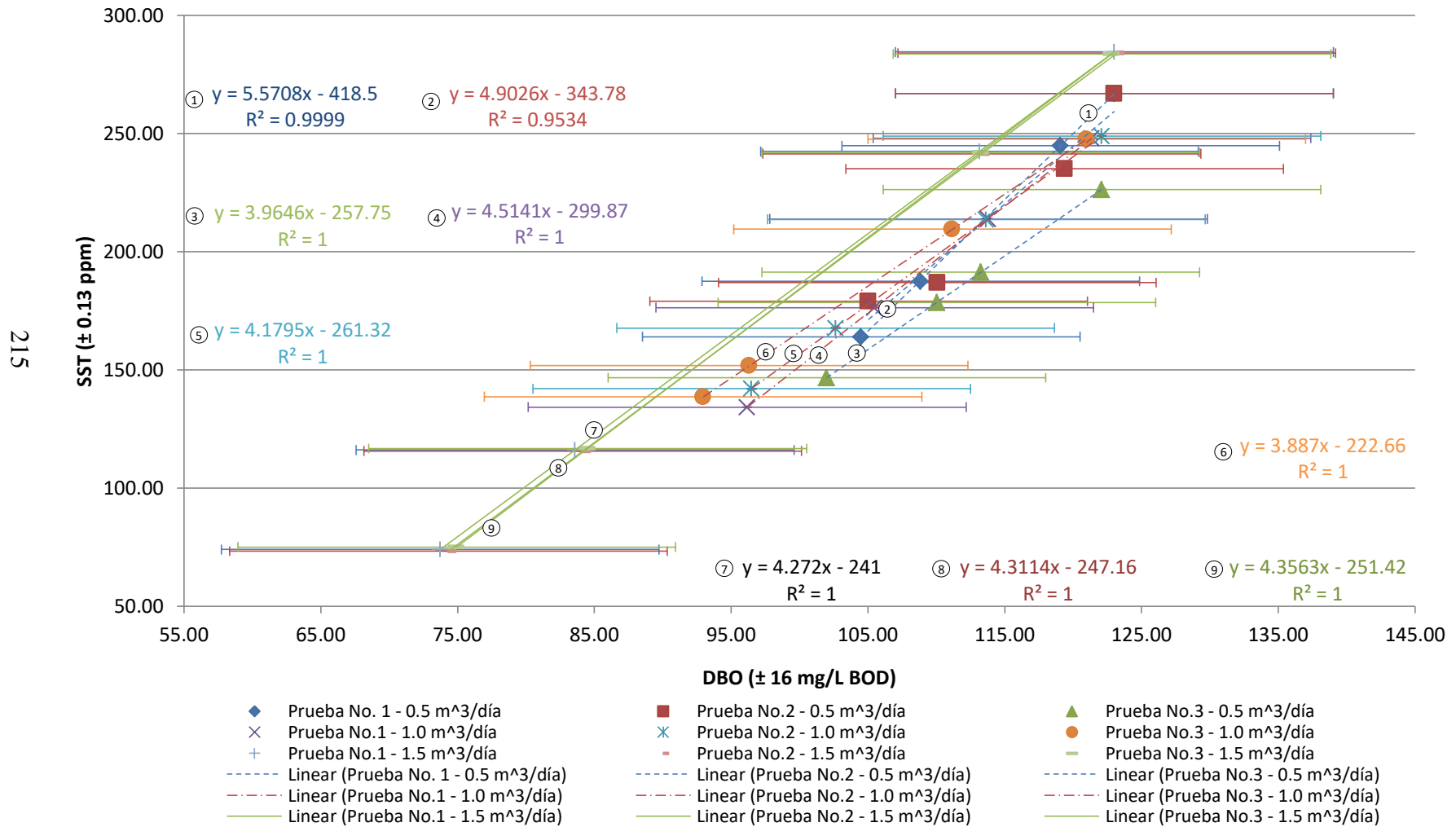
Figura 69 Comparación Demanda Química de Oxígeno (DQO) y refracción

213



En el caso de la relación Demanda Química de Oxígeno (DQO) – refracción, el coeficiente R^2 refleja un rango de 0.9267 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente. Las pruebas de cada flujo volumétrico presentan un comportamiento similar entre sí.

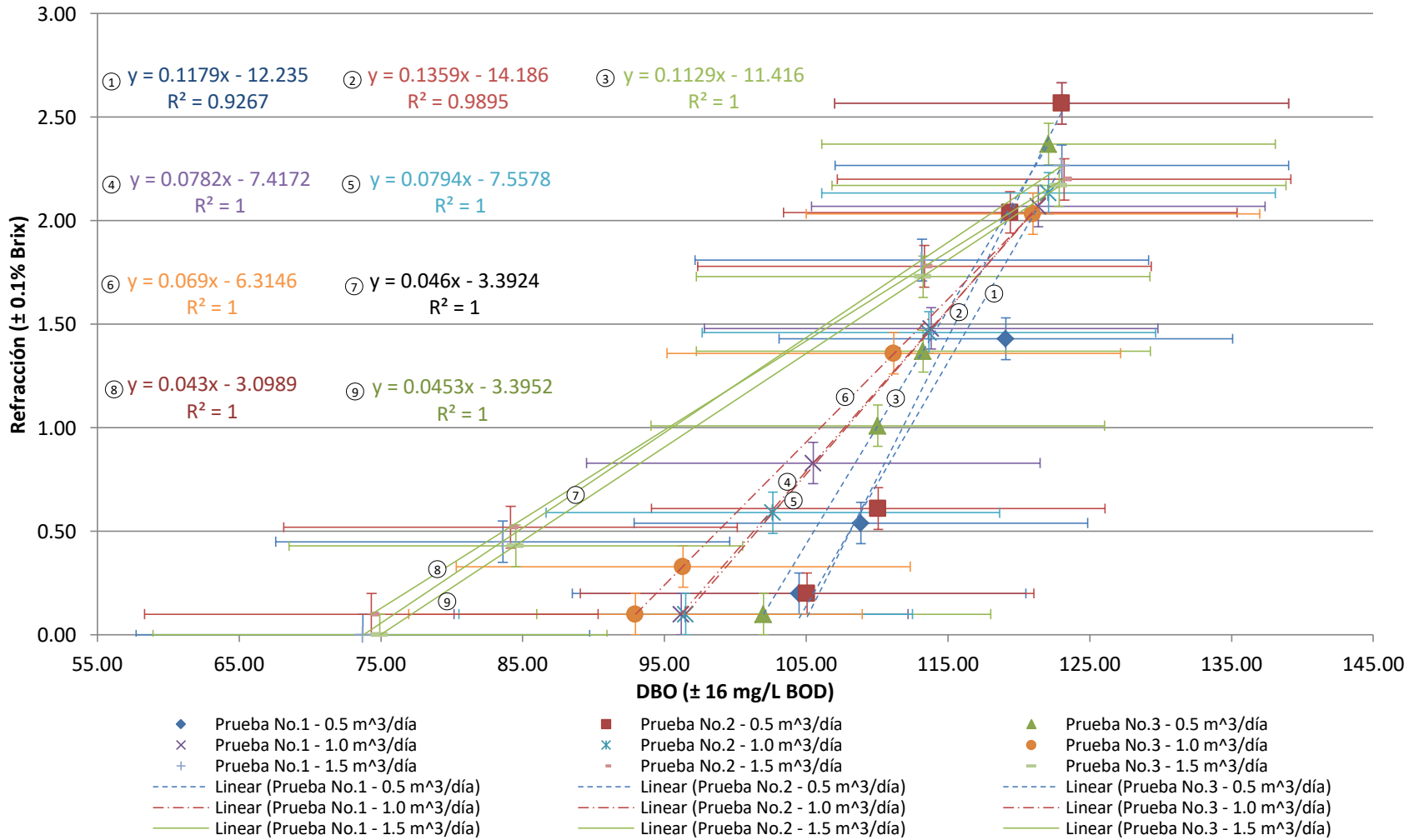
Figura 70 Comparación Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Sólidos Suspendedos Totales (SST)



La relación Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) – Sólidos Suspendidos Totales (SST), el coeficiente R^2 exhibe un rango de 0.9534 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente, y especialmente las pruebas con el caudal de alimentación $1.5 \text{ m}^3/\text{día}$ exponen la menor variación entre sus pendientes.

Figura 71 Comparación Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y refracción

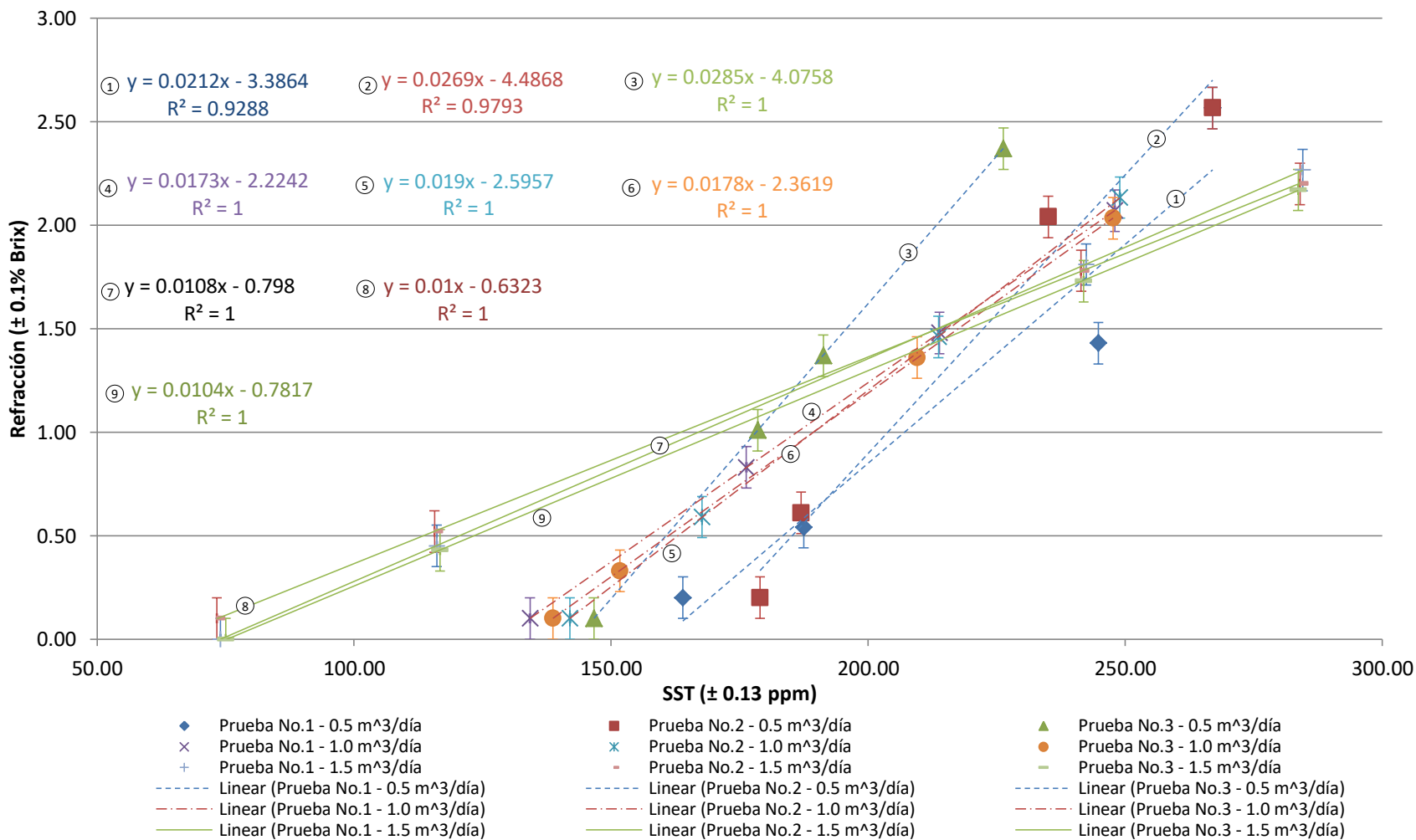
217



En el caso de la relación Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) – refracción, el coeficiente R^2 refleja un rango de 0.9267 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente y la mayoría de las pruebas con los tres flujos volumétricos presentan un comportamiento similar.

Figura 72 Comparación Sólidos Suspendedos Totales (SST) y refracción

219



En el caso de la relación Sólidos Suspendidos Totales (SST) – refracción, el coeficiente R^2 muestra un rango de 0.9288 – 1, determinando que existe una relación lineal entre variable dependiente e independiente y las pruebas de los flujos volumétricos 1.0 y 1.5 m³/día presentan un comportamiento similar respectivamente.

XV. APÉNDICE D

Hojas Técnicas de equipos de la planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales, a escala piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias.

1. Bomba de alimentación y retorno de lodos de velocidad variable.



MINI PUPPY

MODELS:
 23620-4003 12V
 23620-4103 24V

FEATURES:

Continuous rated, medium duty pumps for bilge and general purpose use.

- ISO 8846 MARINE (Ignition protection).
- ISO 8849 MARINE (Bilge pump standard).
- Small bilge debris present no problem to these brass bodied, flexible impeller pumps.
- Simple design means fewer wearing parts.
- 6 lpm (1.3 UK gpm) output @ 2m (6.6ft) head.
- Self priming to 1.5m (5 ft).

MINI PUPPY PERFORMANCE			
Approximate performance for new pump, running water at 20°C with fully charged battery			
TOTAL HEAD		MINI PUPPY	
m	ft	lpm	UK gpm
2	6.6	6	1.5
4	13	5	1.3
6	19.7	4	1.1
8	26.2	2.8	0.9

INSTALLATION INSTRUCTIONS:

Jabsco Mini Puppy can be mounted on any flat surface. Fit the pump in a dry, well ventilated position where there is full access for service. If installed in a vertical position the motor must be above the pump head. Use the rubber grommets provided to minimise vibration, do not overtighten the mounting screws.

Secure 25.4mm (1") id hose direct to the discharge ports using stainless steel hose clamps, or use 3/8" BSP / NPT pipe fittings using suitable jointing tape. Use spiral reinforced hose (with a smooth internal bore) that will not collapse under suction, or rigid or semi rigid pipework systems. The pipework must be compatible with the liquid being pumped. Pipe runs should be kept as straight and short as possible, avoiding rising and dipping over obstructions. Fit a strainer on the inlet hose to prevent larger debris from entering the pump.

WIRING INSTRUCTIONS

Make all electrical connections in dry locations, connections in humid environments should be sealed to prevent corrosion. Protect the circuit with a correctly rated fuse or circuit breaker in the red positive (+) lead as close as possible to the power source. Connect the black motor wire to the negative (-) battery terminal. Inadequate voltage at the motor terminals when the pump is running (not less than 10% below rated voltage at full load) due to partially discharged batteries or insufficient cable size may result in blowing fuses, failure to start or poor pump performance.

WARNING: If the fuse fails repeatedly do not fit a heavier fuse or bridge the fuse terminals with silver paper or metal wire. Failure to observe this instruction may result in a fire hazard due to overheating of cables.

WARNING: Do not use any Jabsco pump for petrol, petroleum products or any products with a flash point below 37°C (98°F), explosion or death may occur.

WARNING: All marine pumps discharging overboard must be installed with the overboard discharge well above both static and heeled waterlines.

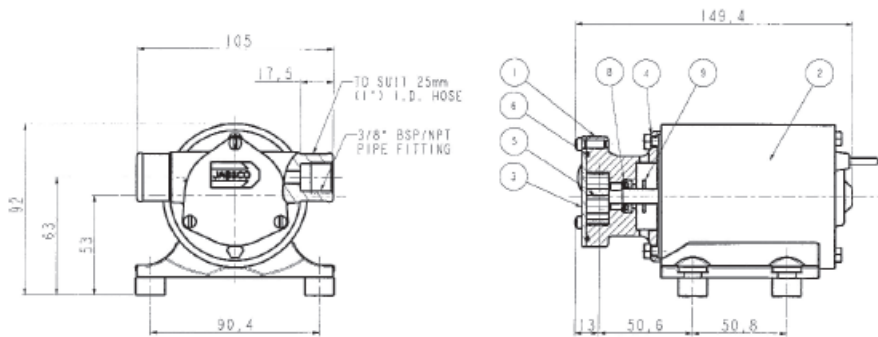


ELECTRICAL WIRING INFORMATION					
MODEL NO.	VOLTAGE	MAXIMUM AMP DRAW	MAXIMUM FUSE SIZE	MINIMUM WIRE SIZE	MAXIMUM LENGTH BETWEEN (+) & (-) BATTERY TERMINALS
23620-4003	12 volt	5 amp	7.5 amp	30 / 0.25mm (1.5mm ²)	8m (26ft) *
23620-4103	24 volt	2.5 amp	5 amp	32 / 0.2mm (1.0mm ²)	8m (26ft) *

* For longer installations, fit thicker cables

DIMENSIONAL DRAWING & PARTS LIST

All dimensions in mm



WEIGHT: Mini Puppy - 2.2kg (4.8lb)

MINI PUPPY PARTS LIST			
KEY	DESCRIPTION	QUANTITY	PART NUMBER
1	End Cover Screw *	3	SP1002-03
2	End Cover	1	29305-0100
3	Impeller*	1	1414-0003B
4	O-Ring*	1	X1990-131
5	Body	1	7824-2000
6	Seal*	1	93000-6100
7	Screw (pump to motor)	2	X3001-147F
8	Slinger	1	6342
9	Motor 12V	1	98012-2742C
	Motor 24V	1	98012-2885C
Service Kit (Contains Items Marked *)			SK374-0003

xylem
Let's Solve Water

Jabsco, 1 Kondein Road, Cape Ann Industrial Park, Gloucester, MA 01930 USA
 Tel : +1 978 281 0440 Fax : +1 978 283 2619
 Jabsco, Bingley Road, Hoddeston, Hertfordshire, EN11 0BU UK
 Tel : +44 (0)1992 450145 Fax : +44 (0)1992 467132
 Fluid Products Canada, 55 Royal Road, Guelph, Ontario N1H 1T1 CANADA,
 Tel : +1 519 821 1900 Fax : +1 519 821 5316
 NHK Jabsco Co Ltd, 3-21-10, Shin - Yokohama, Kohoku-ku, Yokohama 222 JAPAN
 Tel : +81 (0) 45 475 8906 Fax : +81 (0) 45 475 8908
 Jabsco GmbH, Oststraße 28, 22844 Norderstedt GERMANY
 Tel : +49 (0) 40 53 53 73 0 Fax : +49 (0) 40 53 53 73 11
 Jabsco Italia, s.r.l., Via Tommaso, 5, 20059 Vimercate, Milano ITALY
 Tel : +39 039 685 2323 Fax : +39 039 666 307

Warranty: All products of the company are sold and all services of the company are offered subject to the company's warranty and terms and conditions of sale, copies of which will be furnished upon request. The information provided herein is for guidance only, it does not constitute a guarantee of the performance or specification of any individual product or component.
 © 2012 Xylem, Inc. All rights reserved. JABSCO is a registered trademark of Xylem Inc. or one of its subsidiaries.

43001-0595 Rev: B


2. Compresor

GAST

Motor Mounted Rotary Vane

Oilless 1531 Series

1.5
CFM



Model 1531 Series (Ac & 12 Volt)
 20 inHg max. vacuum
 1.5 CFM open flow
 10 psi max. pressure

Product Features

- Oilless operation
- Motor mounted
- Rugged construction/low maintenance
- Essentially pulse-free service

Includes

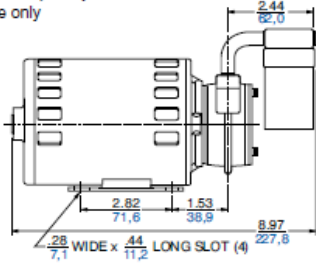
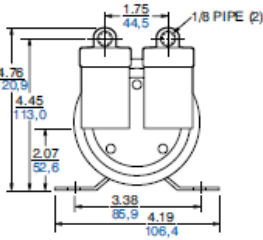
- Muffler/filter AA922H
- Thermal protector (on AC models only)

Recommended Accessories

- Vacuum relief valve Aa204
- Vacuum gauge Aa641
- Pressure relief valve Aa203
- Pressure gauge Aa644b
- Repair kit K219

Product Dimensions (inches, mm)
 Dimensions are for reference only

Model 1531 (AC Motor)

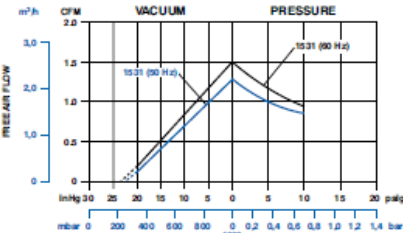



Product Specifications
 Note: All models listed can be used as either a vacuum pump or compressor.

Model Number	Motor	RPM		HP	kW	Thermal Protector	Net Weight	
		60 cycle	50 cycle				lbs	kg
1531-1078-G288X	100-110/100-115-50/60-1	3450	2850	1/10	0,07	•	8	3,6
1531-1078-G617	12 Volt DC	3450		1/8	0,09		9	4,1
1531-1078-G289X	220-240/230-50/60-1	3450	2850	1/10	0,07	•	7	3,2
1531-1078-G557X†	115-60/50-1	3450	2850	1/10	0,07	•	7	3,2

†Includes 10 ft. cord and switch.

Product Performance



www.gastmfg.com
Gast Rotary Vane Compressors and Vacuum Pumps 7

3. Caudalímetro de área variable para aire



MPB INDUSTRIES LTD

Unit 1 Branbridges Ind Est, East Peckham, Kent TN12 5HF
Tel: +44 (0)1622 872401 Fax: +44 (0)1622 871294
E-mail: mail@mpbflowmeters.com <http://www.mpbflowmeters.com>



Designers and Manufacturers of Scientific and Process Control Instrumentation

MPB SERIES 1700 VARIABLE AREA FLOWMETER

The MPB Series 1700 Variable Area Flowmeter offers an economical solution for the instantaneous reading of a wide range of flows including most process gases and liquids. The MPB Series 1700 Variable Area Flowmeter is ideally suited where highly corrosive mediums are being metered, ie sodium hypochlorite, saturated brine solutions, etc.

Suitable for in-line, or front of panel mounting. Full rear of panel mounting kit available, complete with bezel and all fittings.

SERIES 1700 FEATURES

- * ECONOMICAL COST
- * STANDARD CONNECTIONS INCLUDE STAINLESS STEEL, RIGID PVC, OR TO CUSTOMERS' SPECIFICATION
- * HIGHLY COMPATIBLE WITH A WIDE RANGE OF PROCESS GASES AND LIQUIDS
- * DIRECT READING OF INSTANTANEOUS FLOW RATE
- * WIDE VARIETY OF FLOW RANGES AVAILABLE
- * ROBUST DESIGN
- * INTEGRAL POLYCARBONATE SAFETY COVER
- * SUITABLE FOR IN-LINE MOUNTING
- * EASY IN-SITU TUBE REMOVAL
- * LONG SERVICE LIFE
- * LOW HEAD LOSS
- * EASILY READ SCALE
- * HIGH TEMPERATURE VERSION AVAILABLE
- * FULL REAR OF PANEL MOUNTING KIT AVAILABLE



1700 VARIABLE AREA FLOWMETER		
Chassis:	Anodised aluminium to BSEN12373/AA25	Plumb Bob Floats: Hard anodised aluminium, Stainless steel, RPVC, PEEK, or glass filled PTFE
End Connections:	Rigid PVC, or Stainless steel	Ball Floats: Glass, Stainless steel, Ceramic, Ruby, Tungsten
Process Connections:	1/4", 3/8" & 1/2" BSPPF	Weight: 700 grams (typical)
Cover:	Polycarbonate	Maximum Working Pressure: Gas: 20 bar g (non shock) Liquid: 20 bar g (non shock)
Seals:	Nitrile or Viton	Maximum Working Temperature: 60°C Nitrile 100°C Viton
Metering Tube:	Fully stress relieved Borosilicate glass	
Scale:	Permanently fired (black)	Accuracy: ± 5% FSD predicted ± 2% FSD calibrated scales

STANDARD RANGES

AIR @ 1013 mbar abs 20°C	WATER @ 20°C
25 – 250 cc/min	5.0 – 50 cc/min
50 – 500 cc/min	10 – 100 cc/min
0.1 – 1.0 L/min	25 – 250 cc/min
0.2 – 2.5 L/min	50 – 500 cc/min
0.5 – 5.0 L/min	0.1 – 1.0 L/min
1.0 – 10 L/min	0.2 – 2.0 L/min
1.5 – 15 L/min	0.3 – 3.0 L/min
2.5 – 25 L/min	0.5 – 5.0 L/min
5.0 – 50 L/min	0.7 – 7.5 L/min
10 – 100 L/min	1.0 – 10 L/min
15 – 150 L/min	

Customised flow ranges are available. Please consult MPB Industries to select the required flow range for the process fluid used.

Due to the constant development and improvement of products, information may be altered or withdrawn without notice.

MPBTB 004 Issue 10

4. Sonda óptica para oxígeno disuelto





OD8325

Optical dissolved oxygen probe. 4/20 mA and RS 485 output

This unique submersible probe has been designed to measure dissolved oxygen based on fluorescent technology. The measuring system consists of:

- Optical device complete of fluorescent material
- Dissolved oxygen and temperature measuring circuit
- 2-wire 4/20 mA analog output
- RS 485 digital output
- Nozzle for the autoclean by external pressure air

The measuring is provided in ppm or % of air with automatic temperature compensation. Through commands from the Personal Computer hypertextual, the serial interface allows the dissolved oxygen and temperature data transmission, the ppm or % of air scale selection, the configuration of pressure, salinity and RH compensation, the zero and sensitivity calibration. Thanks to its 4/20 mA isolated output, the probe can be directly connected to a PLC or data logger. The probe can be connected to BC7635 or BC7335, which provides the power, the measuring readout, 2 set-points, alarm relay and the holding function for an external cleaning cycle. The most common applications of this probe include: water quality monitoring, municipal and industrial water treatment and aquaculture.

Principle of operation:
 A light beam of a specific wavelength is sent to a special fluorescent layer in contact with the sample. The absorbed light energy is partially released as a light pulse with a higher wavelength. This phenomena is called fluorescence. If oxygen molecules are in contact with the sensing layer, the fluorescing is reduced (quenching). By measuring the amount of quenching it is possible to determine the oxygen concentration. The advantages of this measuring method are the absence of electrolyte and membrane, the possibility to measure the oxygen concentration in water or in air, and a good sensitivity in a low oxygen concentration.



Specifications

Scale: 0/20 ppm - 0/200 % air

Sensitivity: ± 0,3 % of the scale

Response time: 95% in < 60 seconds

Power supply: 9/36 Vdc

Analog output: 4/20 mA isolated current Loop

Load: 600 Ω max. at 24 Vdc

Digital output: RS 485

Temperature compensation: automatic

Secondary parameters: pressure, salinity, RH

Room temperature: -5/50 °C

Max. pressure: 1 Bar at 25 °C

Autoclean: by pressure air 3 bar max

Dimensions: L=165 mm total, D=60 mm

Body: PVC

Cable: 10 m (100 m max.)

Protection: IP 68

The technical specifications may be changed without notice



Typical submersible installation




Van London-pHOenix Co.
 6103 Glenmont Drive
 Houston, Texas 77081
 Local: (713) 772-6641
 Toll Free: (800) 522-7920
 Web: www.VL-PC.com
 e-mail: info@VL-PC.com

We Speak English, Spanish & Vietnamese

5. Bomba de dosificación de solución de hipoclorito

DLX MF/M

The DLX range of pumps is a proven PTFE diaphragm type Solenoid Metering Pump that distinguishes itself with having a wide range of control options. Since its launch the DLX pump range has given proven reliability and quality. It is the ideal solution for many chemical dosing applications where moderate flow rate is required with counter pressures up to 20 Bar (290 PSI).

Key Features:

Pump Body Construction of Anti-acids mica-filled reinforced polypropylene.

Excellent water resistant for tough applications. Pump protection: IP65.

Either wall (DLX) or foot mount (DLXB) installations options available.

Liquid low level option available to prevent loss of prime.

Flashing led showing pump's stroke frequency.

Manual air bleed polypropylene head for safe & easy priming with durable leak-free bleed valve assembly.

Diaphragms are of superior construction, robust PTFE machined part not bonded composite layers, for optimum flexibility and long durability.

A wide variety of chemicals can be pumped due to different liquid end materials include glass-filled polypropylene (GFPP), PVC, Polyvinylidene Fluoride (PVDF), PTFE, Plexiglas and 316SS. Valves and sealing in FPM (Viton), EPDM (Dutral), Nitril, Silicone, ceramic and alloys.

Immediate installation and start-up, included as standard accessories with all models are an injection/back pressure valve assembly and a foot valve/strainer assembly, including discharge, suction and bleeding tubing.

Safe and easy priming and valve maintenance, included as a standard accessory is a bleed valve assembly, including return tubing (available only on those models with manual air bleed head).

Control panel protection assured by an adhesive polyester film, weather-proof and resisting UV light.

Silent version available upon request.

The products are manufactured according CE regulation.

Standard power supply (fluctuations not to exceed $\pm 10\%$): 230-240 V a.c. 50-60 Hz single phase.

Optional power supply (fluctuations not to exceed $\pm 10\%$): 110 V a.c. 50-60 Hz single phase. 48V a.c., 24V a.c/d.c., 12V d.c.

Overvoltage cat. II. Environmental Conditions: IP65 protection, altitude up to 2000m, ambient temperature 5°C to 40°C, maximum relative humidity 80% for temperatures up to 31°C decreasing linearly to 50% relative humidity at 40°C. Pollution degree 2



Characteristics

The DLX-DLXB MF/M metering pumps are activated by a PTFE diaphragm mounted on a piston of an electromagnet.

When the piston of the electromagnet is energised, a pressure is produced in the pump head creating an expulsion of liquid from the discharge valve. After each pump pulse is finished a spring returns the piston back to the initial position, enabling a recall of liquid through the suction valve.

The operation is simple and the pump does not need lubrication, therefore maintenance is reduced almost to zero.

Multifunction dosing pump, with flow controlled by any of the following: Manual mode; Pulse multiplier with memory (1xn-M); Pulse multiplier (1xn); Pulse divider (1:n); dosing in ppm with a water meter, fully configurable 4(0)-20mA input; built-in 7 day timer (max. 8 start/stop cycles per day/week).

Additional features: flow alarm; level switch input (without probe); relay output; buzzer (acoustic alarm); clock; language Italian/English.

Any time the pump is in alarm the service output relay will be activated.

100% corresponds to the maximum stroke frequency, i.e. 120 strokes/min. Stroking rate gives very high rate of reproducible metering accuracy.

IMMAGINE SERIGRAFIA

PUMP CONTROLS

Menu navigation buttons

"Yellow" LED flow sensor alarm/max allowed pulse difference

"Red" LED injection pulse flashing

"green/red" LED pump fed/stand by

LCD display

Activation/Deactivation metering button

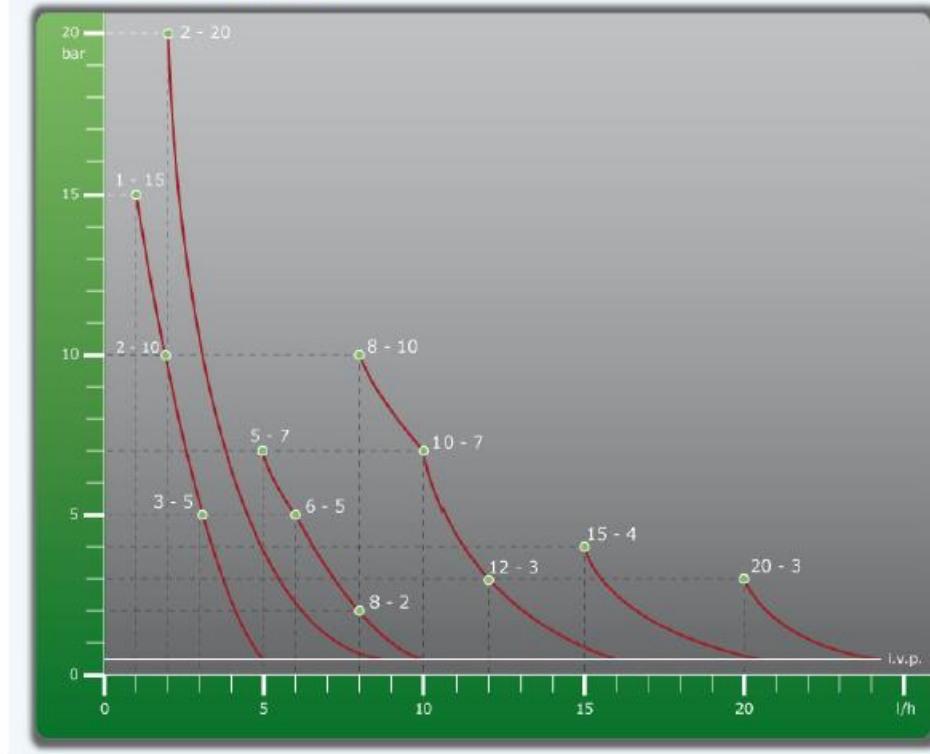
The flow rate of the pump will depend on the counter pressure in the discharge line (please check flow vs. pressure diaphragm) and on the physical properties of the chemical being dosed. As a general rule the pump flow rate will be higher if there is a lower counter pressure.

Pressure and Flow Rate Capacity

Model		1 - 15	2 - 10	2 - 20	5 - 7	5 - 12	8 - 10	15 - 4	20 - 3
Nominal Capacity	L/H	1	2	2	5	5	8	15	20
	G/H	0.26	0.53	1.53	1.32	1.32	2.12	3.96	5.26
	G/D	6.24	12.72	36.72	31.68	31.68	50.88	95.04	126.24
Max Capacity	L/H	8	10	8.5	13	17	20	20	24.5
	G/H	2.08	2.6	2.21	3.38	4.42	5.2	5.2	6.37
	G/D	49.92	62.4	53.04	81.12	106.08	124.8	124.8	152.88
Max Pressure	Bar	15	10	20	7	12	10	4	3
	PSI	217	145	290	101	174	145	58	43

How many gallon in 1 liter? The answer is approx. 0,264. Converting between gallon [US, liquid] and liter.

1 liter/hour = 0.264172052 gallon (US)/hour
1 liter/hour = 5.279261959 gallon (UK)/day



How many psi in 1 bar? The answer is approx. 14,5.
We assume you are converting between pound/square inch [absolute] and bar.

The performance of the pump depends on the viscosity of the medium and hydraulic installation conditions.
The curves refer to water at 20°C.

Liquid End