

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL INDUSTRIAL



**FORMULACIÓN DE MODELOS DE PRONÓSTICOS PARA EL CONTROL DE
CALIDAD DE AGUA RESIDUAL DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES**

Omar Eliecer Oyarzo Santana

INFORME DE PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

Profesor guía: Dr. Héctor Valdés M.

Profesor informante: Mc.C. Giuliani Coluccio P.

Concepción, octubre de 2015

RESUMEN

En este proyecto se estudiaron las variables o indicadores más significativos que influyen en la remoción de contaminantes del agua residual del proceso de una planta de tratamiento de aguas residuales municipales. Los resultados arrojaron que los indicadores más representativos para la descripción de la calidad del agua tratada resulta ser la demanda bioquímica de oxígeno DBO₅, la demanda química de oxígeno DQO y los sólidos suspendidos totales SST, debido al volumen de remoción de estos indicadores que se logra en el proceso global.

Posteriormente se aplicó regresión lineal múltiple a estos indicadores en función de variables con capacidad de decisión en el pretratamiento como caudal en el afluente de la planta, basura extraída en las rejillas gruesa y fina, y arenas extraídas del desarenador. El modelo de DBO₅ efluente, queda en función de la basura extraída de rejillas y arenas, que en conjunto explican un 65.50% de la variabilidad de la variable respuesta. El modelo de DQO efluente, queda en función de la basura extraída de rejillas y arenas, que en conjunto explican un 62.06% de la variabilidad de la variable respuesta. El modelo de SST efluente, queda en función del caudal en el afluente, la basura extraída de rejillas y arenas, que en conjunto explican un 60.24% de la variabilidad de la variable respuesta.

A continuación se modelaron en función de las variables con capacidad de decisión del tratamiento biológico secundario como lo son el oxígeno disuelto en la zona aeróbica, la sedimentación del licor de mezcla en 30 minutos, el volumen de lodos recirculado y el volumen de lodos purgados. El modelo de DBO₅ efluente, queda en función del oxígeno disuelto y volumen recirculado, que en conjunto explican un 64.58% de la variabilidad de la variable respuesta. El modelo de DQO efluente, queda en función del oxígeno disuelto y volumen recirculado, que en conjunto explican un 63.81% de la variabilidad de la variable respuesta. El modelo de SST efluente, queda en función del oxígeno disuelto y volumen purgado, que en conjunto explican un 54.59% de la variabilidad de la variable respuesta.

Finalmente se aplica regresión lineal y cuadrática a estos indicadores en función ahora de variables con y sin capacidad de decisión del tratamiento global. El modelo de DBO₅ efluente, queda en función de la basura extraída de rejillas y arenas, que en conjunto explican un 74.09% de la variabilidad de la variable respuesta. El modelo de DQO efluente, queda en función de la basura extraída de rejillas y arenas, que en conjunto explican un 79.46% de la variabilidad de la variable respuesta. El modelo de SST efluente, queda en función del caudal en el afluente, la basura extraída de rejillas y arenas, que en conjunto explican un 60.51% de la variabilidad de la variable respuesta.

ABSTRACT

In this project the variables or indicators more significant were studied that they influence the removal of pollutants of the residual water of the process of a plant of treatment of municipal waste water. The results threw that the most representative indicators for the description of the quality of the treated water it turn out to be the biochemical demand of oxygen DBO5, the chemical demand of oxygen DQO and the suspended solid ones total SST, due to the volume of removal of these indicators that is achieved in the global process.

Later there was applied linear multiple regression to these indicators depending on variables by capacity of decision in the pretratamiento as flow in the tributary of the plant, garbage extracted in the gratings thick and thin, and sands extracted from the desarenador. The model of DBO5 effluent, stays depending on the garbage extracted from gratings and sands, which as a whole explain 65.50 % of the variability of the variable response. The model of effluent DQO, stays depending on the garbage extracted from gratings and sands, which as a whole explain 62.06 % of the variability of the variable response. The model of effluent SST, stays depending on the flow in the tributary, the garbage extracted from gratings and sands, which as a whole explain 60.24 % of the variability of the variable response.

Later they modelled themselves depending on the variables with capacity of decision of the biological secondary treatment like it they are the oxygen disuelto in the aerobic zone, the sedimentation of the liquor of mixture in 30 minutes, the volume of muds re-circulated and the volume of purged muds. The model of DBO5 effluent, stays depending on the oxygen disuelto and re-circulated volume, which as a whole they explain 64.58 % of the variability of the variable response. The model of effluent DQO, stays depending on the oxygen disuelto and re-circulated volume, which as a whole they explain 63.81 % of the variability of the variable response. The model of effluent SST, stays depending on the oxygen disuelto and purged volume, which as a whole they explain 54.59 % of the variability of the variable response.

Finally there is applied linear and quadratic regression to these indicators in function now of variables with and without capacity of decision of the global treatment. The model of DBO5 effluent, stays depending on the garbage extracted from gratings and sands, which as a whole explain 74.09 % of the variability of the variable response. The model of effluent DQO, stays depending on the garbage extracted from gratings and sands, which as a whole explain 79.46 % of the variability of the variable response. The model of effluent SST, stays depending on the flow in the tributary, the garbage extracted from gratings and sands, which as a whole explain 60.51 % of the variability of the variable response.

ÍNDICE

1.- INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general	3
1.2 Objetivos específicos	3
2.- MARCO TEÓRICO	4
2.1 Indicadores de contaminación	4
2.1.1 Demanda bioquímica de oxígeno en 5 días (DBO₅)	4
2.1.2 Demanda química de oxígeno (DQO)	4
2.1.3 Sólidos suspendidos totales (SST)	5
2.1.4 Nutrientes (PT y NT)	5
2.1.5 Ácidos y grasas (A y G)	5
2.2 Procesos de tratamiento de aguas residuales	6
2.2.1 Pre-tratamiento	6
2.2.2 Tratamiento principal	7
2.2.2.1 Zanja de oxidación y clarificador secundario	7
2.2.2.2 Espesado y filtro de banda	9
2.2.3 Tratamiento avanzado	10
2.3 Muestreo compuesto	12
2.3.1 Procedimiento normalizado de medición de DQO	13
2.3.2 Procedimiento normalizado de medición de SST	14
2.4 Modelo de regresión múltiple	14
2.4.1 Requisitos y limitaciones	16
2.4.1.1 Linealidad	16
2.4.1.2 Normalidad y equidistribución de los residuos	16
2.4.1.3 Número de variables independientes	16
2.4.1.4 Colinealidad	17
2.4.1.5 Observaciones anómalas	17
3.- DELIMITACION DEL PROBLEMA	17
3.1 Tiempo límite de predicción y control	17
3.2 Datos de modelos globales	17
3.3 Datos de modelos de subprocesos	18

4.- METODOLOGÍA.....	18
4.1 Balance de masa	18
4.2 Ajuste de modelo de regresión múltiple	19
4.3 Validación estadística de los modelos obtenidos	20
4.3.1 Multicolinealidad	21
4.3.2 Análisis residual	22
4.3.3 Análisis de R^2 ajustado	22
4.3.4 Significancia del modelo a través de pruebas de hipótesis	22
4.3.5 Significancia de las pendientes del modelo a través de pruebas de hipótesis	23
4.3.6 Supuesto de varianza constante para existencia del modelo	23
4.3.7 Supuesto de normalidad de los residuos para existencia del modelo	23
4.3.8 Supuesto de independencia para existencia del modelo	24
5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
5.1 Descripción de la planta y asignación de nombres a puntos de muestreo	25
5.2 Muestreo compuesto	27
5.3 Monitoreo en el afluente de la planta	28
5.4 Monitoreo de indicadores en distintas etapas del proceso	30
5.4.1 Monitoreo de DQO.....	30
5.4.2 Monitoreo de SST.....	31
5.4.3 Monitoreo de DBO_5.....	32
5.5 Balance de masa y eficiencia	32
5.5.1 Balance de materia de PRETRATAMIENTO	32
5.5.2 Balance de materia de tratamiento BIOLÓGICO-SECUNDARIO	34
5.5.3 Balance de materia de tratamiento de lodos.....	36
5.6 Ajuste de modelos particulares en el PRETRATAMIENTO	37
5.6.1 Multicolinealidad	38
5.6.2 Ajuste de modelo DBO_5	40
5.6.2.1 Análisis de los residuos del modelo ajustado.....	41
5.6.2.2 Análisis de la regresión	41
5.6.2.3 Significancia del modelo.....	42
5.6.2.4 Significancia individual de los coeficientes del modelo	43
5.6.2.5 Supuesto de varianza constante para existencia del modelo	44

5.6.2.6	Supuesto de normalidad de los residuos para existencia del modelo.....	45
5.6.2.7	Supuesto de independencia para existencia del modelo.....	45
5.6.3	Ajuste de modelo DQO	46
5.6.3.1	Análisis de los residuos del modelo ajustado.....	47
5.6.3.2	Análisis de la regresión	47
5.6.3.3	Significancia del modelo.....	48
5.6.3.4	Significancia individual de los coeficientes del modelo.	49
5.6.3.5	Supuesto de varianza constante para existencia del modelo.....	50
5.6.3.6	Supuesto de normalidad de los residuos para existencia del modelo.....	51
5.6.3.7	Supuesto de independencia para existencia del modelo.....	51
5.6.4	Ajuste de modelo SST	52
5.6.4.1	Análisis de los residuos del modelo ajustado.....	53
5.6.4.2	Análisis de la regresión	53
5.6.4.3	Significancia del modelo.....	54
5.6.4.4	Significancia individual de los coeficientes del modelo	54
5.6.4.5	Supuesto de varianza constante para existencia del modelo	56
5.6.4.6	Supuesto de normalidad de los residuos para existencia del modelo.....	57
5.6.4.7	Supuesto de independencia para la existencia del modelo.....	57
5.7	Ajuste de modelos particulares en tratamiento BIOLÓGICO-SECUNDARIO	58
5.7.1	Multilinealidad	59
5.7.2	Ajuste de modelo DBO₅	60
5.7.2.1	Análisis de los residuos del modelo ajustado.....	62
5.7.2.2	Análisis de la regresión	62
5.7.2.3	Significancia del modelo.....	63
5.7.2.4	Significancia individual de los coeficientes del modelo	63
5.7.2.5	Supuesto de varianza constante para existencia del modelo	65
5.7.2.6	Supuesto de normalidad de los residuos para existencia del modelo.....	66
5.7.2.7	Supuesto de independencia para existencia del modelo.....	66
5.7.3	Ajuste de modelo DQO	67
5.7.3.1	Análisis de los residuos del modelo ajustado.....	69
5.7.3.2	Análisis de la regresión	69
5.7.3.3	Significancia del modelo.....	70

5.7.3.4	Significancia individual de los coeficientes del modelo	70
5.7.3.5	Supuesto de varianza constante para existencia del modelo	72
5.7.3.6	Supuesto de normalidad de los residuos para existencia del modelo.....	73
5.7.3.7	Supuesto de independencia para existencia del modelo.....	73
5.7.4	Ajuste de modelo SST	75
5.7.4.1	Análisis de los residuos del modelo ajustado.....	76
5.7.4.2	Análisis de la regresión	76
5.7.4.3	Significancia del modelo.....	77
5.7.4.4	Significancia individual de los coeficientes del modelo	78
5.7.4.5	Supuesto de varianza constante para existencia del modelo	79
5.7.4.6	Supuesto de normalidad de los residuos para existencia del modelo.....	80
5.7.4.7	Supuesto de independencia para existencia del modelo.....	81
5.8	Ajuste de modelos globales.....	82
5.8.1	Multicolinealidad	82
5.8.2	Ajuste de modelo global DBO₅.....	85
5.8.2.1	Análisis de los residuos del modelo DBO ₅ ajustado	86
5.8.2.2	Análisis de la regresión DBO ₅	87
5.8.2.3	Significancia del modelo.....	87
5.8.2.4	Significancia individual de los coeficientes del modelo	88
5.8.2.5	Supuesto de varianza constante para existencia del modelo	89
5.8.2.6	Supuesto de normalidad de los residuos para existencia del modelo.....	90
5.8.2.7	Supuesto de independencia para existencia del modelo.....	90
5.8.3	Ajuste de modelo global DQO.....	91
5.8.3.1	Análisis de los residuos del modelo DQO ajustado	92
5.8.3.2	Análisis de la regresión DQO	93
5.8.3.3	Significancia del modelo.....	94
5.8.3.4	Significancia individual de los coeficientes del modelo	94
5.8.3.5	Supuestos de varianza constante para existencia del modelo	96
5.8.3.6	Supuesto de normalidad de los residuos para existencia del modelo.....	97
5.8.3.7	Supuesto de independencia para existencia del modelo.....	97
5.8.4	Ajuste de modelo global SST.....	98
5.8.4.1	Análisis de los residuos del modelo ajustado.....	99

5.8.4.2	Análisis de la regresión SST	100
5.8.4.3	Significancia del modelo.....	101
5.8.4.4	Significancia individual de los coeficientes del modelo	101
5.8.4.5	Supuesto de varianza constante para existencia del modelo	103
5.8.4.6	Supuesto de normalidad de los residuos para existencia del modelo.....	103
5.8.4.7	Supuesto de independencia para existencia del modelo.....	104
5.9	Procedimiento de control de calidad de agua	105
6.-	CONCLUSIONES	106
	REFERENCIAS.....	110
ANEXO I.	Conjuntos de datos para modelamiento y balance de materia.	111
ANEXO II.	Conjunto de datos proceso de tratamiento de lodos.	121
ANEXO III.	Procedimiento de ajuste de modelo DBO ₅ PRETRATAMIENTO.....	123
ANEXO IV.	Valores residuales modelo DBO ₅ PRETRATAMIENTO.	127
ANEXO V.	Procedimiento de ajuste de modelo DQO PRETRATAMIENTO.....	128
ANEXO VI.	Valores residuales modelo DQO PRETRATAMIENTO.	132
ANEXO VII.	Valores residuales modelo SST PRETRATAMIENTO.....	133
ANEXO VIII.	Procedimiento de ajuste de modelo DBO ₅ tratamiento (BIO-SEC).....	134
ANEXO IX.	Valores residuales modelo DBO ₅ tratamiento (BIO-SEC).....	138
ANEXO X.	Procedimiento de ajuste de modelo DQO tratamiento (BIO-SEC).....	139
ANEXO XI.	Valores residuales modelo DQO tratamiento (BIO-SEC)	143
ANEXO XII.	Procedimiento de ajuste de modelo SST tratamiento (BIO-SEC).....	144
ANEXO XIII.	Valores residuales modelo SST tratamiento (BIO-SEC).....	148
ANEXO XIV.	Procedimiento de ajuste de modelo DBO ₅ GLOBAL.....	149
ANEXO XV.	Valores residuales modelo DBO ₅ GLOBAL.....	164
ANEXO XVI.	Procedimiento de ajuste de modelo DQO GLOBAL.....	167
ANEXO XVII.	Valores residuales modelo DQO GLOBAL.	172
ANEXO XVIII.	Procedimiento de ajuste de modelo SST GLOBAL.....	175
ANEXO XIX.	Valores residuales modelo SST GLOBAL.	184

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. ANOVA.....	22
TABLA 2. Resultados de muestreo compuesto DQO y SST.....	27
TABLA 3. Datos para la estimación de N_T , P_T y A y G_T promedios.....	29
TABLA 4. Cargas de indicadores en puntos de PRETRATAMIENTO.....	32
TABLA 5. Caracterización de arenas y residuos en las rejillas.....	32
TABLA 6. Balance másico y eficiencia del pretratamiento de la PTAS.....	33
TABLA 7. Cargas de indicadores en puntos de tratamiento BIOLÓGICO-SECUNDARIO.....	34
TABLA 8. Caudal de fluidos que intervienen en el tratamiento.....	34
TABLA 9. Balance másico y eficiencia en el tratamiento BIOLÓGICO-SECUNDARIO.....	35
TABLA 10. Caudales del tratamiento de lodos.....	36
TABLA 11. Matriz de varianzas y covarianzas de variables de PRETRATAMIENTO.....	37
TABLA 12. Matriz inv. de varianzas y covarianzas de variables de PRETRATAMIENTO.....	38
TABLA 13. Factores de inflación de varianzas de variables de PRETRATAMIENTO.....	39
TABLA 14. Símbolos de las variables predictoras DBO_5 (PRETRATAMIENTO).....	39
TABLA 15. Coeficientes del ajuste de modelo final DBO_5 (PRETRATAMIENTO).....	40
TABLA 16. Estadísticas de la regresión DBO_5 (PRETRATAMIENTO).....	41
TABLA 17. ANOVA modelo DBO_5 (PRETRATAMIENTO).....	41
TABLA 18. Estadísticos de pruebas individuales modelo DBO_5 (PRETRATAMIENTO).....	42
TABLA 19. Test Breusch-Pagan modelo DBO_5 (PRETRATAMIENTO).....	43
TABLA 20. Test de Kolmogorov-Smirnov modelo DBO_5 (PRETRATAMIENTO).....	44
TABLA 21. Test Durbin-Watson modelo DBO_5 (PRETRATAMIENTO).....	45
TABLA 22. Símbolos de las variables predictoras DQO (PRETRATAMIENTO).....	45
TABLA 23. Coeficientes del ajuste de modelo final DQO (PRETRATAMIENTO).....	46
TABLA 24. Estadísticas de la regresión DQO (PRETRATAMIENTO).....	47
TABLA 25. ANOVA modelo DQO (PRETRATAMIENTO).....	47
TABLA 26. Estadísticos de pruebas individuales modelo DQO (PRETRATAMIENTO).....	48
TABLA 27. Test Breusch-Pagan modelo DQO (PRETRATAMIENTO).....	49
TABLA 28. Test de Kolmogorov-Smirnov modelo DQO (PRETRATAMIENTO).....	50
TABLA 29. Resultados de test Durbin-Watson modelo DQO (PRETRATAMIENTO).....	51
TABLA 30. Coeficientes del ajuste de modelo final SST (PRETRATAMIENTO).....	51

TABLA 31. Estadísticas de la regresión SST (PRETRATAMIENTO)	52
TABLA 32. ANOVA modelo SST (PRETRATAMIENTO)	53
TABLA 33. Estadísticos de pruebas individuales modelo SST (PRETRATAMIENTO).....	54
TABLA 34. Test Breusch-Pagan modelo SST (PRETRATAMIENTO).....	55
TABLA 35. Test de Kolmogorov-Smirnov modelo SST (PRETRATAMIENTO).....	56
TABLA 36. Test Durbin-Watson modelo SST (PRETRATAMIENTO).....	57
TABLA 37. Matriz de varianzas y covarianzas de variables tratamiento (BIO-SEC)	58
TABLA 38. Matriz inv. de varianzas y covarianzas de variables tratamiento (BIO-SEC)	58
TABLA 39. Factores de inflación de varianza de variables tratamiento (BIO-SEC)	59
TABLA 40. Símbolos de las variables predictoras DBO ₅ (BIO-SEC)	60
TABLA 41. Coeficientes del ajuste de modelo final DBO ₅ (BIO-SEC)	60
TABLA 42. Estadísticas de la regresión DBO ₅ (BIO-SEC)	61
TABLA 43. ANOVA modelo DBO ₅ (BIO-SEC)	62
TABLA 44. Estadísticos de pruebas individuales modelo DBO ₅ (BIO-SEC).....	63
TABLA 45. Test Breusch-Pagan modelo DBO ₅ (BIO-SEC)	64
TABLA 46. Test de Kolmogorov-Smirnov modelo DBO ₅ (BIO-SEC)	65
TABLA 47. Test Durbin-Watson modelo DBO ₅ (BIO-SEC).....	66
TABLA 48. Símbolos de las variables predictoras DQO (BIO-SEC)	67
TABLA 49. Coeficientes del ajuste de modelo final DQO (BIO-SEC)	67
TABLA 50. Estadísticas de la regresión DQO (BIO-SEC)	68
TABLA 51. ANOVA modelo DQO (BIO-SEC)	69
TABLA 52. Estadísticos de pruebas individuales modelo DQO (BIO-SEC).....	70
TABLA 53. Test Breusch-Pagan modelo DQO (BIO-SEC)	71
TABLA 54. Test de Kolmogorov-Smirnov modelo DQO (BIO-SEC)	72
TABLA 55. Test Durbin-Watson modelo DQO (BIO-SEC).....	73
TABLA 56. Símbolos de las variables predictoras SST (BIO-SEC).....	74
TABLA 57. Coeficientes del ajuste de modelo final SST (BIO-SEC)	75
TABLA 58. Estadísticas de la regresión SST (BIO-SEC).....	75
TABLA 59. ANOVA modelo SST (BIO-SEC).....	76
TABLA 60. Estadísticos de pruebas individuales modelo SST (BIO-SEC).....	77
TABLA 61. Test Breusch-Pagan modelo SST (BIO-SEC)	78
TABLA 62. Test de Kolmogorov-Smirnov modelo SST (BIO-SEC)	79

TABLA 63. Test Durbin-Watson modelo SST (BIO-SEC).....	80
TABLA 64. Matriz de varianzas y covarianzas de variables tratamiento GLOBAL.....	81
TABLA 65. Matriz inversa de varianzas y covarianzas de variables tratamiento GLOBAL.....	82
TABLA 66. Factores de inflación de varianza de variables tratamiento GLOBAL.....	83
TABLA 67. Símbolos de las variables predictoras DBO ₅ (GLOBAL).....	84
TABLA 68. Coeficientes del ajuste de modelo final DBO ₅ (GLOBAL).....	84
TABLA 69. Estadísticas de la regresión DBO ₅ (GLOBAL).....	85
TABLA 70. ANOVA modelo DBO ₅ (GLOBAL).....	86
TABLA 71. Estadísticos de pruebas individuales modelo DBO ₅ (GLOBAL).....	87
TABLA 72. Resultados de test Breusch-Pagan modelo DBO ₅ (GLOBAL).....	88
TABLA 73. Resultados de test de Kolmogorov-Smirnov modelo DBO ₅ (GLOBAL).....	89
TABLA 74. Símbolos de las variables predictoras DQO (GLOBAL).....	90
TABLA 75. Coeficientes del ajuste de modelo final DQO (GLOBAL).....	91
TABLA 76. Estadísticas de la regresión DQO (GLOBAL).....	92
TABLA 77. ANOVA modelo DQO (GLOBAL).....	92
TABLA 78. Estadísticos de prueba independientes modelo DQO (GLOBAL).....	93
TABLA 79. Resultados de test Breusch-Pagan modelo DQO (GLOBAL).....	95
TABLA 80. Resultados de test de Kolmogorov-Smirnov modelo DQO (GLOBAL).....	95
TABLA 81. Símbolos de las variables predictoras SST (GLOBAL).....	97
TABLA 82. Coeficientes del ajuste de modelo final SST (GLOBAL).....	98
TABLA 83. Estadísticas de la regresión SST (GLOBAL).....	99
TABLA 84. ANOVA modelo SST (GLOBAL).....	99
TABLA 85. Estadísticos de prueba independientes modelo SST (GLOBAL).....	100
TABLA 86. Resultados de test Breusch-Pagan modelo SST (GLOBAL).....	102
TABLA 87. Resultados de test de Kolmogorov-Smirnov modelo SST (GLOBAL).....	102
TABLA 88. Modelos de predicción de los indicadores.....	104

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Zanja de oxidación y clarificador.....	8
FIGURA 2. Tratamiento de lodos.....	9
FIGURA 3. Filtro de banda	10
FIGURA 4. Muestreador automático.....	12
FIGURA 5. Implementos para muestreo de DQO	13
FIGURA 6. Implementos para muestreo de SST.....	14
FIGURA 7. Diagrama de flujo de la planta de tratamiento de aguas residuales.....	25
FIGURA 8. Caracterización afluente vs normativa	28
FIGURA 9. Variación de la DQO a través de distintas etapas del proceso	30
FIGURA 10. Variación de los SST a través de distintas etapas del proceso	31
FIGURA 11. Variación de LA DBO ₅ a través de distintas etapas del proceso.....	31
FIGURA 12. Diagrama de flujo del PRETRATAMIENTO.....	32
FIGURA 13. Diagrama de tratamiento BIOLÓGICO-SECUNDARIO	34
FIGURA 14. Diagrama de tratamiento de lodos.....	36
FIGURA 15. Análisis de los residuos del modelo DBO ₅ (PRETRATAMIENTO).....	40
FIGURA 16. Análisis de los residuos del modelo DQO (PRETRATAMIENTO).....	46
FIGURA 17. Gráfico de los residuos del modelo SST (PRETRATAMIENTO)	52
FIGURA 18. Análisis de independencia de los residuos SST (PRETRATAMIENTO)	57
FIGURA 19. Análisis de los residuos del modelo DBO ₅ (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).....	61
FIGURA 20. Análisis de independencia de los residuos DBO ₅ (BIO-SEC)	66
FIGURA 21. Análisis de los residuos del modelo DQO (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).....	68
FIGURA 22. Análisis de independencia de los residuos DQO (BIO-SEC)	73
FIGURA 23. Análisis de los residuos del modelo SST (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).....	75
FIGURA 24. Análisis de independencia de los residuos SST (BIO-SEC)	80
FIGURA 25. Análisis de los residuos del modelo DBO ₅ (GLOBAL).....	85
FIGURA 26. Análisis de independencia de los residuos DBO ₅ (GLOBAL).....	89
FIGURA 27. Análisis de los residuos del modelo DQO (GLOBAL).....	91
FIGURA 28. Análisis de independencia de los residuos DQO (GLOBAL).....	96
FIGURA 29. Análisis de los residuos del modelo SST (GLOBAL)	98
FIGURA 30. Análisis de independencia de los residuos SST (GLOBAL)	103

1.- INTRODUCCIÓN

El aumento del conocimiento en años recientes respecto a los efectos acumulativos de la contaminación, ha llevado a una mayor preocupación general y a una legislación cada vez más estricta en lo que concierne a la descarga de residuos industriales, líquidos y gaseosos al medio ambiente.

Hay que pagar por el tratamiento residual, y parece presentar, a corto plazo, un costo adicional importuno e improductivo que hace pensar que el tratamiento de aguas residuales es, literalmente, dinero que se tira por el desagüe. Ciertamente, la industria química es fundamental para la economía de cualquier país industrializado y cualquier costo adicional se refleja en el costo de virtualmente, todo producto manufacturado. Finalmente, el consumidor es quien paga. Además, la industria química es altamente competitiva, nacional e internacionalmente, y los costos adicionales impuestos por la legislación o la opinión pública pueden afectar realmente la viabilidad de una planta industrial. Los productos residuales tienen que ser descargados, y disponer de los residuos acuosos, significa por lo general descargarlos en algún tipo de corriente de agua, como un río, canal, estuario o mar. Cuando las aguas residuales descargadas no han sido del todo tratadas, o sino en forma insuficiente, el resultado será la contaminación de la corriente de agua. La prevención de la contaminación en las corrientes de agua obviamente tiene un valor tanto estético como moral, pero también sólidas razones económicas, ya que el agua es materia prima esencial de numerosos procesos como por ejemplo la acuicultura y por consiguiente un vital recurso natural.

En Chile una de las principales normas para el vertimiento de aguas residuales en la NCh 1333 que habla de los parámetros de vertimiento necesarios para el consumo humano, consumo animal, y agricultura. Del cual los dos últimos son los principales para el estudio que se presenta, ya que el efluente de la planta de tratamiento de aguas servidas (PTAS) es depositado en un canal austral de aguas saladas. Para el consumo animal esta norma dicta o destaca uno de los parámetros más importantes, los coliformes fecales, que debe contener el efluente que es 1000 NMP/100 mg que según el estado es conforme para el consumo

animal. Además para regadío el parámetro de importancia para la producción es PH que debe encontrarse en el rango de 6 a 9 como máximo. (*Kiely, 1999*).

El oxígeno libre disuelto es el reactivo esencial para los procesos aeróbicos, y cuando los organismos aeróbicos utilizan los nutrientes orgánicos, consumen al mismo tiempo el oxígeno disuelto. Si no se repone el oxígeno disuelto, el crecimiento aeróbico se detiene cuando se agota el oxígeno, y sólo pueden continuar los procesos anaeróbicos, lentos y malolientes. La disponibilidad del oxígeno libre disuelto en el agua es, por tanto, el factor clave que limita la capacidad de auto purificación de una corriente de agua. La principal restricción que se presenta a la disponibilidad del oxígeno disuelto es su baja solubilidad en el agua. El agua saturada con el aire disuelto contiene solo 10ppm de oxígeno (la solubilidad exacta depende de las condiciones que prevalezcan). Si los nutrientes disueltos entran al agua a una tasa tal que el oxígeno disuelto se gaste más rápidamente de lo que se puede reponer, el agua se desoxigena y ningún aeróbico obligado, desde los microorganismos hasta los peces, podrá sobrevivir en el agua. Al cesar los rápidos procesos de purificación, los contaminantes orgánicos se acumularán en el agua; los procesos anaeróbicos producirán sustancias malolientes de los contaminantes y la corriente de agua quedará completamente contaminada. (*Winkler, 1999*).

En este proyecto se busca formular modelos de pronósticos, con el fin de poder predecir la calidad del agua tratada de la PTAS de Puerto Natales, XII región, para lograr un mayor control del proceso y tomar decisiones con antelación al ajuste de parámetros e indicadores controlables de la empresa, y así, evitar el vertimiento de un producto de mala calidad al litoral de la zona que pueda causar un daño al medio ambiente.

En primer lugar se realiza un balance de materia de la PTAS para identificar los indicadores de contaminación más significativos a nivel de remoción para el cumplimiento con la normativa vigente. Una vez identificados, se modelan estos indicadores a nivel global, en función de parámetros o indicadores con y sin capacidad de decisión de todo el proceso (se busca predecir con la mayor cantidad de información posible, incluso se utilizan niveles de parámetros e indicadores obtenidos por muestras puntuales). En segunda instancia se modelan estos indicadores sólo en función de parámetros o indicadores con capacidad de decisión de cada subproceso.

1.1 Objetivo general

- Formular modelos de pronósticos para predecir la remoción de indicadores de contaminación de la PTAS municipal.

1.2 Objetivos específicos

- Efectuar balance de materia de la PTAS municipal.
- Ajustar modelos de pronósticos de los indicadores más significativos en materia de remoción, a nivel de subprocesos y global.
- Analizar y validar estadísticamente los modelos formulados.

2.- MARCO TEÓRICO

2.1 Indicadores de contaminación

El agua residual es tratada en tanques de sedimentación, donde se separan los sólidos que decantan, a continuación el líquido parcialmente tratado se procesa en una planta de tratamiento biológico, donde los microorganismos degradan la materia orgánica en biomasa (fango) y agua más gases.

Los parámetros claves de medición de la contaminación del agua en el efluente (caudal de salida de la planta de tratamiento) son DBO₅ y SST, los cuales deben ser del orden de 25 y 35 mg/l respectivamente. Otro parámetro de importancia es la demanda química de oxígeno DQO.

2.1.1 Demanda bioquímica de oxígeno en 5 días (DBO₅)

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es una prueba que estima el oxígeno que se consume en la descomposición biológica actual, de una muestra residual, y es una simulación de laboratorio del proceso microbiano de auto purificación. En una muestra de los residuos se disuelve una mezcla convenientemente con una población mixta de microorganismos. Se mide la concentración de oxígeno disuelto, se incuba la mezcla a una temperatura ya determinada y, después de un tiempo antes estipulado se mide nuevamente la concentración de oxígeno disuelto. Así se puede observar que el cambio en la cantidad de oxígeno disuelto será el oxígeno utilizado durante este tiempo por los microorganismos al metabolizar nutrientes de dicha cantidad de muestra de agua residual. De esta forma se puede interpolar y calcular la cantidad de oxígeno necesario requerido para el tratamiento similar a un volumen normal de residuos. (*Winkler, 1999*).

2.1.2 Demanda química de oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno DQO es el consumo de oxígeno, mg/L, en la oxidación total por vía húmeda de la materia carbonífera, presente en la muestra problema. Las condiciones de la oxidación se deben a la acción combinada de un oxidante fuerte, dicromato, en medio sulfúrico y a temperatura elevada, durante un tiempo suficiente para completar la oxidación. (*Winkler, 1999*).

El análisis de la DQO usa la oxidación química, para efectuar la misma reacción que provocaban los microorganismos con la materia orgánica, pero ahora de manera enérgica, el carbono es oxidado a anhídrido carbónico, permaneciendo el nitrógeno amino amoniacal en su mismo grado de oxidación, el nitrógeno correspondiente a los nitritos se oxida a nitratos. La reacción se lleva a cabo con las acciones combinadas de temperatura elevada, ácido sulfúrico carbonizador de la materia orgánica, conjuntamente con el poder oxidante del dicromato potásico. Desde hace unos años, se viene utilizando este análisis a escala semimicro, tomando muestras de 2 a 3 mL de agua problema, realizándose la reacción en tubos de ensayo provistos de tapón roscado, de modo que la digestión se pueda realizar bajo presión a 150 °C durante dos horas. Este método ha sido aprobado por la agencia de protección ambiental Americana. (Rodríguez, 2005).

2.1.3 Sólidos suspendidos totales (SST)

Los SST o sólidos totales en suspensión son una medida del material en suspensión no sedimentable, principalmente de contenido orgánico. Sin embargo, también pueden formar parte de los SST, los coloides de minerales arcillosos. Este indicador es esencial para detectar la potencial contaminación del agua residual, incluso su reducción de porcentaje de concentración es tomada como una medida de eficiencia de las plantas de tratamiento de aguas residuales. (Rodríguez, 2005).

2.1.4 Nutrientes (PT y NT)

Otros parámetros importantes a considerar son los niveles de fósforo total y nitrógeno total. Si las aguas residuales son vertidas a aguas sensibles como canales, ríos, o masas de agua natural que no sean específicamente mar abierto, podrían provocar eutroficación intermitente. Lo cual es provocado por la sobrepoblación de nutrientes que puede causar severos daños al medio ambiente en cuestión.

Se estima que los niveles estándares para el fósforo se encuentra entre 1 a 2 ppm o mg/l en cambio los de nitrógeno entre 10 a 15 ppm o mg/l, a la salida de la planta. (Kiely, 1999).

2.1.5 Ácidos y grasas (A y G)

Las grasas y aceites son compuestos orgánicos que entorpecen cualquier tipo de tratamiento físico o químico, por lo que deben eliminarse en los primeros pasos del tratamiento de un

agua residual. Su efecto en los sistemas de tratamiento de aguas residuales o en las aguas naturales se debe a que interfieren con el intercambio de gases entre el agua y la atmósfera. No permiten el libre paso del oxígeno hacia el agua, ni la salida del CO₂ del agua hacia la atmósfera. En casos extremos pueden llegar a producir la acidificación del agua junto con bajos niveles del oxígeno disuelto, además de interferir con la penetración de la luz solar. (Kiely, 1999).

2.2 Procesos de tratamiento de aguas residuales

El objetivo fundamental de un tratamiento de aguas residuales es proteger la calidad de las aguas receptoras de esta agua, lo cual se logra con plantas depuradoras exclusivamente diseñadas para: reducir la DBO₅, SST, DQO, P y N, y ácidos y grasas.

Las aguas residuales son originalmente orgánicas en su composición. Esto significa que los principales tratamientos están dirigidos a la eliminación de la composición orgánica. En una planta de tratamiento. El agua residual se dirige a lo largo de una serie de procesos físicos, químicos y biológicos, e los que cada uno de ellos están en función de reducir los contaminantes en cuestión. Estas funciones son típicamente:

- Pre-tratamiento: Físico y/o químico
- Tratamiento principal: Biológico y físico
- Tratamiento avanzado: Físico y/o químico y/o biológico

2.2.1 Pre-tratamiento

Es el proceso que prepara el agua residual bruta para los demás tratamientos. Principalmente consiste en separar la materia flotante, arena y manchas de aceite que podría influir en el no funcionamiento correcto de los demás procesos. Por ejemplo la arena podría dañar las máquinas de aireación o reactores en el proceso biológico y demás equipos mecánicos. Además para los procesos principales de tratamientos biológicos se estima que los niveles ideales de DBO₅ y SST se encuentren en el rango de 100 a 400 mg/l y puede darse el caso en que las aguas residuales urbanas tengan aportes de industrias en donde el pH del afluente de entrada al fango de lodos activos sea muy ácido o muy alcalino en donde se deba agregar cal o ácido sulfúrico para una desagregación biológica óptima.

Para realizar estas tareas en esta etapa se cuenta con rejillas de desbaste que consisten en una reja gruesa para la separación de sólidos flotantes de gran tamaño como botellas, trapos, plásticos, etc. También existen rejillas de gruesos con aberturas mayores a 6 mm que separan sólidos de gran tamaño, rejillas de finos con aberturas en un rango de 1,5 a 6 mm que a veces se usan como sustitutos de la decantación primaria, por ejemplo cuando se emplean fangos activos, entre otras rejillas de menor dimensión.

Además existen los desarenadores de flujo helicoidal, que separan la arena existente en el agua residual hacia un área apartada del canal de flujo para que esta sea extraída a través de tornillos para su traslado a vertederos. (*Márquez & Guevara, 2004*).

2.2.2 Tratamiento principal

2.2.2.1 Zanja de oxidación y clarificador secundario

El objetivo principal del tratamiento principal es la reducción de la DBO₅ que no se beneficia en el pre-tratamiento, tanto como los SST. Este proceso debe ser capaz de biodegradar la materia orgánica en productos no contaminantes, como por ejemplo agua, dióxido de carbono y biomasa (o fangos). El efluente debe estar bien estabilizado o bien oxigenado de tal manera que no se convierta en una fuente de alimento para las bacterias aerobias del medio receptor.

La biodegradación es el mecanismo dominante para la eliminación de compuestos orgánicos en aguas residuales urbanas y la mayoría de las industriales. Hoy en día se utiliza mayoritariamente sistemas de fangos activados que consisten en una cuba de aireación (reactor biológico) y el decantador secundario o separador de líquido sólido. El aireador básicamente retiene el afluente de agua residual durante un cierto periodo de tiempo convenientemente mezclado y aireado, antes de conducir el efluente al clarificador o decantador secundario, cuyos productos finales serán un efluente líquido clarificado, preparado para ser vertido y fango activado líquido. Una fracción del fango aproximadamente el 20% a 30% se recircula a la cuba de aireación y se denomina fango activado de retorno (RAS). Este lodo contiene una densidad elevada de biomasa bacteriana viva y al recircular parte de ella, se mantiene una población activa de bacterias en la cuba de aireación. El 80% a 70% de biomasa restante se decanta como fango y se extrae para un posterior tratamiento de deshidratación. (*Kiely, 1999*).

Una zanja de oxidación también puede ser operada para lograr desnitrificación parcial. Una de las modificaciones de diseño más comunes para mejorar la remoción de nitrógeno se conoce como el proceso modificado de Ludzack-Ettinger (MLE). En este proceso, según se ilustra en la Figura 1, un tanque anóxico se añade aguas arriba de la zanja en conjunto con licor mezclado de recirculación procedente de la zona aeróbica para obtener altos niveles de desnitrificación. En el tanque aeróbico, las bacterias autotróficas (nitrificadoras) convierten el nitrógeno amoniacal a nitrógeno en forma de nitritos y luego a nitratos. En la zona anóxica, las bacterias heterotróficas convierten el nitrógeno en forma de nitratos a nitrógeno gaseoso, que es liberado a la atmósfera. Parte del licor mezclado del tanque aeróbico es recirculado a la zona anóxica para suministrar un licor mezclado con un alto contenido de nitratos. (*Parsons Engineering Science Inc, 1999*)

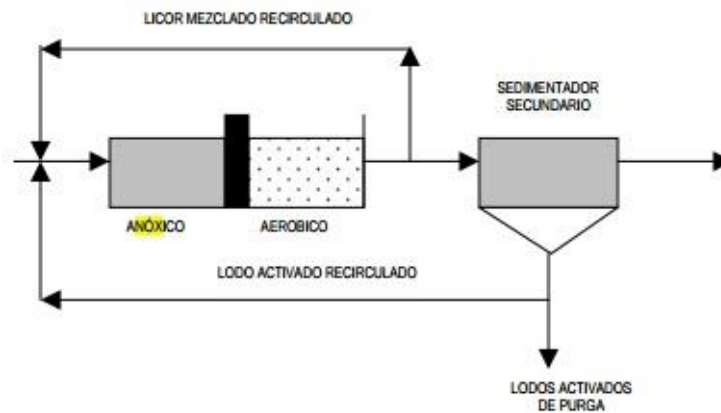


FIGURA 1. Zanja de oxidación y clarificador.

Varios fabricantes han desarrollado modificaciones al diseño de las zanjas de oxidación para la remoción de nutrientes en condiciones de reciclado o en fases entre los estados anóxico y aeróbico. Mientras que los mecanismos de operación difieren de un fabricante a otro, en general el proceso consiste de dos tanques separados de aireación, el primero anóxico y el segundo aeróbico. Agua residual y lodo activado recirculado son introducidos al primer reactor, el cual opera en condiciones anóxicas. El licor mezclado fluye luego al segundo tanque que opera en condiciones aeróbicas. Los procesos se invierten posteriormente y el segundo reactor comienza a operar en condiciones anóxicas. (*Parsons Engineering Science Inc, 1999*).

2.2.2.2 Espesado y filtro de banda

Los lodos activados en exceso o lodo físico-químico y los provenientes del fondo de los sedimentadores secundarios de la primera y segunda etapa del tratamiento, conocidos como lodos biológicos, son deshidratados en el equipo filtro prensa. Este equipo es capaz de deshidratar lodos con una concentración que oscila entre 0.1 y 7 % en peso para dar como resultado una pasta concentrada de 20 % en peso. El funcionamiento de la unidad filtro prensa se lleva a cabo como sigue: la tubería de succión de lodos conduce los lodos desde el depósito temporal hasta el cuerpo de la bomba, una vez que el lodo pasa a la tubería de descarga de la bomba, se pone en contacto en forma inmediata con un polímero de alto peso molecular. El lodo recorre la tubería en contacto con el polímero, hasta llegar al tanque de mezcla instalado en la línea de alimentación al filtro prensa. Posteriormente se realiza la descarga en la zona de pre-secado. (ver FIGURA 2).

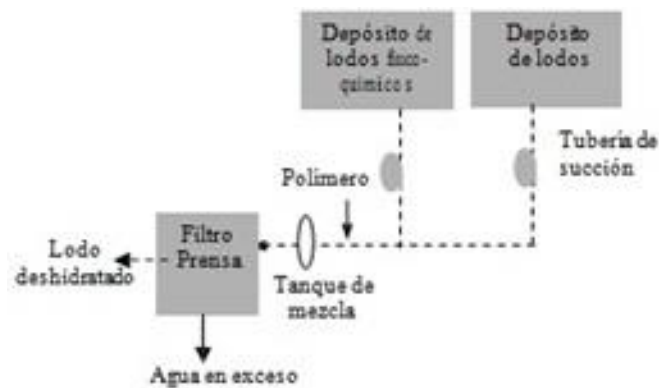


FIGURA 2. Tratamiento de lodos.

El filtro prensa de bandas, es un equipo de deshidratación de lodos, donde los lodos de alimentación caen en la zona de pre-secado y se elimina parte del agua por gravedad.

El lodo es transportado sobre la banda hasta la zona de alta presión, donde son deshidratados mediante la aplicación mecánica de presión. Esta presión se ejerce entre dos bandas porosas opuestas en movimiento sobre rodillos estacionarios. El destino final de lodos prensados debe ser una tolva de recepción que mediante un mecanismo de tornillo los transporta hasta un camión para su traslado a un vertedero. (Márquez & Guevara, 2004).

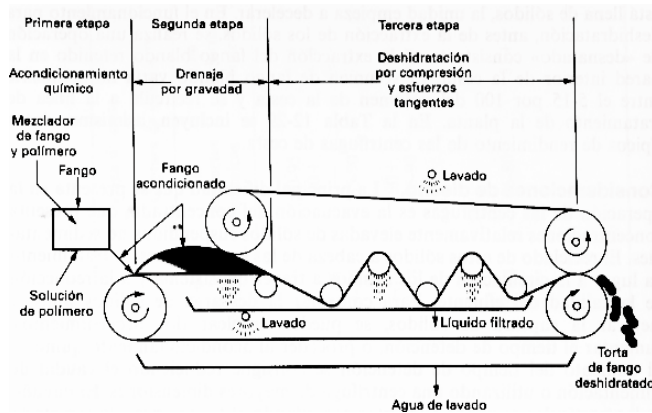


FIGURA 3. Filtro de banda.

Sin embargo, en la actualidad se han realizado estudios que reportan que los lodos que presentan un grave problema, pueden ser reutilizados sin riesgos para la salud y al ambiente, demostrando que incrementan del 10 al 85% el rendimiento de los cultivos en relación con fertilizantes comunes. Así, estos desechos podrían ser aprovechados después de ser sometidos a diversos procesos de estabilización, generando biosólidos que podrían aplicarse como fertilizante dependiendo de las características del suelo. El problema es la alta concentración bacteriana que presentan ya que estos los vuelve residuos peligrosos creando la necesidad de mandarlos a confinamientos o incinerarlos, en vez de aprovecharse para mejorar una fracción de suelos que presentan problemas de salinidad y alcalinidad, es decir, altos contenidos de sales y sodios. (García, 2006).

Un claro ejemplo de aprovechamiento de lodos es el que se lleva a cabo en la planta de tratamiento de aguas servidas municipales de Puerto Natales, capital de la provincia de Última Esperanza, Región de Magallanes y Antártica Chilena. En donde la autoridad sanitaria permite la utilización de lodos tratados para fertilización en predios, a las afueras de la ciudad, tras estabilización y cumplimiento de normas como que el material llegue a obtener una humedad inferior al 70% y estabilización de PH con la adición de cal, entre otros.

2.2.3 Tratamiento avanzado

El flujo de líquido clarificado que resulta del clarificador secundario, antes de ser vertido a alguna masa receptora de aguas tratadas, se interna en un último proceso de mejora conocido como método de desinfección por medio de luz ultravioleta (UV). El cual se

considera de gran ayuda, ya que se ha convertido en parte fundamental de los novedosos métodos de tratamiento de agua. Su función integral se basa en prevenir, proteger y desinfectar, garantizando la calidad de este vital líquido, controlando la propagación de microorganismos patógenos (virus y bacterias) y por efecto evitando la dispersión de enfermedades. (Díaz & Serrano, 2002).

Ahora bien, está comprobado que el exceso de cloro es tóxico en su forma basal y en asociación con algunos compuestos orgánicos contenidos en el agua se generan formas oncogénicas como los trihalometanos o las cloraminas, etc. Esto unido al alto costo que representan los tratamientos en decloración, amplían el escenario a la tecnología ultravioleta y a la oportunidad de competir favorablemente. La regulación de la mayoría de los países contempla al cloro residual en el tratamiento de aguas residuales como una práctica efectiva de prevención de re contaminación biológica que eventualmente podrían causar un episodio desfavorable en el medio ambiente y fauna. El uso de la luz ultravioleta de tipo germicida se ha incrementado en los últimos años en virtud de los beneficios que ofrece sobre los procesos químicos de desinfección, ya que no altera ninguna de las propiedades físicas del agua, sin tanta necesidad de agregar compuestos tóxicos. Además es efectiva en muy poco tiempo, y reduce el riesgo por el manejo y almacenamiento de sustancias nocivas para la salud y medio ambiente. (Díaz & Serrano, 2002).

La luz ultravioleta, conocida generalmente como UV, es emitida en tres diferentes bandas; UV-A, UV-B y UV-C. La radiación con mayor efecto germicida se encuentra entre las bandas UV-C y UV-B, correspondiendo a una longitud de onda de 260 nanómetros. De modo que la longitud de onda de 254 nm generada por emisores monocromáticos (presión baja) proporcionan la máxima efectividad germicida, inactivando los cinco principales grupos de microorganismos; virus, bacterias, hongos, algas y protozoos. Es decir, cuando estos organismos se exponen a la radiación UV, ésta penetra en la pared celular llegando hasta el núcleo donde se encuentra la información genética, destruyendo la cadena de ADN y por lo tanto impide su reproducción.

El tratamiento de este tipo en la planta de aguas servidas se hace efectivo al incluir en un canal tubos de cuarzo con todo su largo perpendicular al flujo de agua residual, los cuales contienen vapor de mercurio (emisor). Cuando se induce corriente eléctrica en los polos, se

genera un arco voltaico que ioniza a los átomos de este metal (Hg), en donde los electrones incrementan su energía hasta que son convertidos en fotones de luz UV.

Uno de los parámetros más importantes que mide la eficiencia de desinfección es la transmitancia. El éxito de la desinfección radica en la eficiencia de la penetración, es decir, entre mayor sea la transmitancia, la penetración de la luz UV será más alta.

Finalmente dentro de las ventajas y beneficios de realizar un tratamiento de desinfección UV se encuentran: no se requieren químicos combustibles ni tóxicos, no existe riesgo de sobredosis, es ambientalmente amigable, bajo consumo de energía, mínima depreciación, bajo costo de inversión y funcionamiento, inactivación de patógenos en fracción de segundos, no daña las instalaciones hidráulicas, de fácil aplicación, fácilmente adaptable al caudal y condiciones variables del agua, se perfila como la tecnología con mayor aplicación en el futuro. (*Díaz & Serrano, 2002*).

Posterior a todos estos procesos antes mencionados se puede obtener un flujo de agua residual tratada amigable con el medio ambiente por lo cual puede ser vertida a aguas receptoras naturales.

2.3 Muestreo compuesto

Para realizar los muestreos se utiliza un muestreador portátil automático Sigma similar al que aparece en la FIGURA 4.



FIGURA 4. Muestreador automático.

El cual contiene 24 botellas en su interior, que al instalarlo en un punto fijo bombea un volumen deseado de muestra cada una hora. Su brazo regulador permite que cada muestra se almacene en cada botella. Esta máquina muestreador debe ser configurado al inicio de cada muestreo indicándole parámetros como, volumen de muestra por botella, largo de la manguera, hora de inicio, entre otros.

Una vez obtenidas las 24 muestras se procede a preparar la muestra compuesta, que es una mezcla de todas las muestras puntuales, para ello se obtienen los caudales de todos los horarios en que se bombeo liquido residual, para conocer el volumen que será necesario de cada envase. Esto quiere decir que a mayor caudal se obtendrá mayor volumen de líquido del recipiente para la mezcla final. Una vez hecha la mezcla se procede a realizar los análisis de DQO y SST respectivamente, los cuales se efectúan de la siguiente manera:

2.3.1 Procedimiento normalizado de medición de DQO

Se cuenta con unos tubos de vidrio que contienen 3 ml de líquido reactivo a los cuales se debe agregar 2 ml de la muestra compuesta. Además debe haber otro tubo de vidrio con este mismo líquido al cual se le debe agregar 2 ml de agua destilada para la posterior comparación. Una vez agregada la muestra y el agua destilada estos tubos se deben ingresar a un calentador a 150°C por un tiempo de 2 horas, o también conocido como procedimiento de prospección que posibilita la oxidación total de la materia orgánica para medir la necesidad de oxígeno. Finalmente estos tubos se dejan enfriar a temperatura ambiente y se ingresan al medidor de DQO, primero el que contiene agua destilada para tener una referencia y luego se mide el que contiene líquido residual.



FIGURA 5. Implementos para muestreo de DQO

2.3.2 Procedimiento normalizado de medición de SST

En primer lugar calentar un filtro circular de algodón, luego pesarlo y tomar nota de ello, posteriormente debe filtrarse por él, 50 ml de muestra compuesta a través de un sistema de botella con compresor, e ingresarlo al horno a 105°C por una hora, finalmente se pesa el filtro con los residuos finales y se realiza la diferencia de pesos sobre el volumen para obtener la concentración.

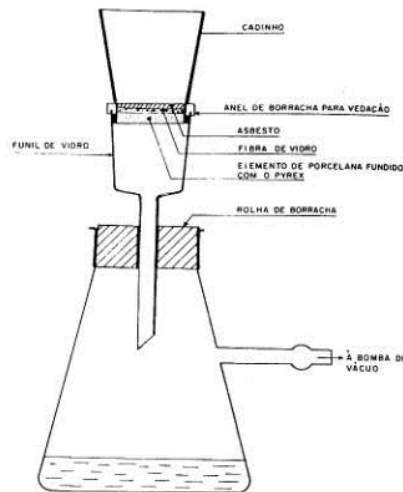


FIGURA 6. Implementos para muestreo de SST

2.4 Modelo de regresión múltiple

Un modelo es una representación formal de un sistema real, con el que se pretende aumentar su comprensión, hacer predicciones y ayudar a su control. Los modelos pueden ser físicos (descritos por variables medibles), análogos (diagramas de flujo) y simbólicos (matemáticos, lingüísticos, esquemáticos). Los modelos matemáticos o cuantitativos son descritos por un conjunto de símbolos y relaciones lógico-matemáticas.

Para la construcción de un buen modelo es necesario contar con leyes (por ejemplo físicas), que describan el comportamiento del sistema. También es importante la experiencia, intuición, imaginación, la simplicidad y la habilidad para seleccionar el subconjunto más pequeño de variables. El primer paso es establecer el problema de forma clara y lógica delimitando sus fronteras, luego viene la recopilación y depuración de datos y diseño del experimento, las pruebas contrastes; verificación del modelo y validación de las hipótesis. (De la Horra, 2007).

El análisis de regresión consiste en emplear métodos que permitan determinar la mejor relación funcional entre dos o más variables concomitantes (o relacionadas).

Se dispone de los siguientes elementos para el estudio estadístico: Una variable respuesta (o dependiente), Y , que será una variable numérica (o cuantitativa): es la variable que se quiere analizar. Formalmente, será una variable aleatoria de tipo continuo. Varias posibles variables explicativas (o independientes), X_1, \dots, X_k , que serán variables numéricas (o cuantitativas). Finalmente, se necesitan datos. Se supone que se dispone de n conjuntos de datos:

$$(y_i, x_{1i}, \dots, x_{ki}) \text{ para } i = 1, \dots, n$$

Por supuesto, sigue siendo absolutamente necesario que los datos vayan unidos en el sentido de que $(y_i, x_{1i}, \dots, x_{ki})$ representan los valores de Y, X_1, \dots, X_k en el i -ésimo individuo o unidad muestral. El modelo de regresión lineal múltiple es de la siguiente forma:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \dots + \beta_j x_{ji} + \dots + \beta_k x_{ki} + u_i \text{ para } i = 1, \dots, n$$

Significado de los parámetros:

β_0 = Valor medio de la variable respuesta cuando $X_1 = \dots = X_k = 0$. Muy a menudo, el parámetro β_0 no tiene una interpretación intuitiva de interés.

β_j = Mide la variación media que experimenta la variable respuesta cuando X_j aumenta una unidad ($j = 1, \dots, k$). La interpretación intuitiva de β_j ($j = 1, \dots, k$) siempre es muy interesante.

u_i = Término de error = Efecto adicional debido a otras variables que no se incluyen en el modelo por no ser consideradas relevantes. (*De la Horra, 2007*).

Para poder obtener y utilizar herramientas estadísticas que permitan tomar decisiones objetivas y razonadas, se necesita que el modelo se ajuste a determinadas hipótesis.

2.4.1 Requisitos y limitaciones

Existen ciertos requerimientos necesarios para poder utilizar la técnica de regresión múltiple. Dentro de ellas se encuentran: linealidad, normalidad y equidistribución de los residuos, número de variables independientes, colinealidad y observaciones anómalas.

2.4.1.1 Linealidad

Se supone que la variable respuesta depende linealmente de las variables explicativas. Si la respuesta no aparenta ser lineal, se deben introducir en el modelo componentes no lineales (como incluir transformaciones no lineales de las variables independientes en el modelo). Otro tipo de respuesta no lineal es la interacción. Para ello se debe introducir en el modelo términos de interacción, que equivale a incluir nuevas variables explicativas que en realidad son el producto de dos o más de las independientes. (López & Montiel, 2004).

2.4.1.2 Normalidad y equidistribución de los residuos

Se llaman residuos las diferencias entre los valores calculados por el modelo y los que realmente son observados en la variable dependiente. Para tener un buen modelo de regresión no es suficiente con que los residuos sean pequeños. La validez del modelo requiere que los mismos se distribuyan de modo normal y con la misma dispersión para cada combinación de valores de las variables independientes.

Por supuesto, esta condición en la práctica es inverificable, puesto que para cada combinación de variables independientes tienen normalmente ninguna o una respuesta. Lo que se suele hacer es examinar una serie de gráficos de residuos que hagan sospechar. Por ejemplo si se aprecia que aparecen tendencias hay una serie de heurísticas que nos ayudan a decidir si aceptar o no el modelo de regresión. (López & Montiel, 2004).

2.4.1.3 Número de variables independientes

Se puede estar tentado en incluir en el modelo cualquier cosa que se tenga en una base de datos, con la esperanza de que cuanto más variables se incluyan, mejor resulte el modelo. Si no se aborda esta tentación, se corre el riesgo de cometer error de tipo I. Otra razón es que si se ajustan pocas observaciones usando muchas variables, probablemente se consiga una aproximación artificial y además muy sensible a los valores observados. La inclusión de una nueva observación puede cambiar completamente el valor de los coeficientes del

modelo. Esto se traduce en que las variables del modelo serán consideradas no significativas.

2.4.1.4 Colinealidad

Si dos variables independientes están estrechamente relacionadas (por ejemplo consumo de refrescos y temperatura ambiente) y ambas son incluidas en el modelo, posiblemente ninguna de las dos sea considerada significativa, aunque, si se hubiese incluido solo una de ellas si lo sería. Para analizar esto se acude al factor de inflación de varianza VIF que indica por regla si existe o no, colinealidad.

2.4.1.5 Observaciones anómalas

Está directamente relacionado con los residuos. Sin embargo, merece destacarlo aparte. Se debe poner especial énfasis en identificarlas (y descartarlas si procede), pues tienen gran influencia en el resultado. A veces son solo errores en la entrada de datos, pero de gran consecuencia en el análisis. Hay técnicas de regresión robustas que permiten minimizar su efecto. (*López & Montiel, 2004*).

3.- DELIMITACION DEL PROBLEMA

3.1 Tiempo límite de predicción y control

Se debe tener presente que los modelos podrán predecir con un tiempo máximo de acción. Es decir, al pronosticar el valor de un indicador, se deberá tomar decisiones de control en un tiempo no superior a 17 horas. Este es el tiempo promedio estimado de la duración del agua residual desde que ingresa a la planta, hasta que el fluido tratado es vertido al canal como producto.

3.2 Datos de modelos globales

Para modelar a nivel de planta se utilizarán 208 observaciones de indicadores con y sin capacidad de decisión. Corresponden a datos de la planilla diaria de la planta, cuyas características son las siguientes:

Caudal medio afluente [L/S], Basura de rejas [sacos/día], Arena [sacos/día], Volumen recirculado [m³/día], Volumen purgado [m³/día], son indicadores obtenidos por sistema automatizado de la planta, y son promedio de un monitoreo continuo diario.

pH afluente [promedio diario], DQO afluente [mg/L], SST afluente [mg/L], DBO₅ afluente [mg/L], OD zanja de oxidación [mg/L], pH zanja de oxidación [promedio diario], Temperatura zanja de oxidación [°C], IVL [ml/g], DQO efluente [mg/L], SST efluente [mg/L], DBO₅ efluente [mg/L], son indicadores obtenidos por operadores de la planta promediando de una a cuatro muestras puntuales diarias.

El objetivo principal de los modelos globales es identificar cuál de los indicadores de contaminación es el más crítico, para posteriormente tomar decisiones con los modelos de subprocesos.

3.3 Datos de modelos de subprocesos

Para modelar a nivel de subproceso se utilizarán 41 observaciones de indicadores con capacidad de decisión. Corresponden a promedios diarios tomados una vez por semana y analizados por laboratorio externo. Además se dispone de indicadores obtenidos por sistema automatizado de la planta.

Sus nombres y características son las siguientes:

Caudal medio afluente [L/S], Basura de rejillas [sacos/día], Arena [sacos/día], Volumen recirculado [m³/día], Volumen purgado [m³/día], OD zanja de oxidación [mg/L], S. Sedimentación 30' [mL/L], DQO efluente [mg/L], SST efluente [mg/L], DBO₅ efluente [mg/L]. Los primeros siete indicadores son obtenidos por sistema automatizado de la planta, y son promedio de un monitoreo continuo diario. Los últimos tres indicadores son obtenidos por muestreo compuesto de 24 horas realizado por laboratorio externo a la empresa.

El objetivo principal de los modelos particulares es tomar decisiones de control de los niveles de los indicadores de contaminación.

4.- METODOLOGÍA

4.1 Balance de masa

Para realizar el análisis de cualquier proceso de tratamiento de aguas residuales, es conveniente realizar un balance de materia. Para ello es recomendable transformar las concentraciones de los indicadores de calidad de agua residual (sustrato), como DBO, DQO

o SST, en carga másica diaria (kg/día), Además de determinar los porcentajes de remoción de sustrato.

La carga másica diaria C_s de sustrato se calcula como sigue:

$$C_s \left(\frac{kg}{día} \right) = \frac{S \left(\frac{mg}{l} \right) * Q \left(\frac{l}{s} \right) * 86.400}{1.000.000}$$

Donde C_s es la carga diaria de sustrato en un punto determinado del proceso, S (mg/l) equivale a la concentración del sustrato y Q (l/s) el caudal medio de agua residual en un punto del proceso.

El porcentaje de remoción se calcula:

$$E = \left(\frac{S_0 - S}{S_0} \right) * 100\%$$

Donde E es el porcentaje de remoción de sustrato en el proceso o subproceso, S_0 sustrato en la entrada del subproceso o proceso, S el sustrato en la salida del proceso o subproceso.

El procedimiento de balance se realizará con el seguimiento de mediciones internas de los indicadores tomados entre enero y septiembre de 2014 en forma semanal y diaria, además de las muestras compuestas de 24 horas tomadas una vez por semana, analizadas en laboratorio. Para el análisis másico al interior del proceso se necesita muestrear los niveles de indicadores en el punto exacto entre el pretratamiento y la zanja de oxidación, se obtendrá un total de 20 muestras compuestas de 24 horas de los sustratos tomadas el último mes para obtener un estimado promedio de carga diaria.

4.2 Ajuste de modelo de regresión múltiple

El análisis de regresión consiste en emplear métodos que permitan determinar la mejor relación funcional entre dos o más variables concomitantes (o relacionadas). El análisis de correlación estudia el grado de asociación de dos o más variables.

Una relación funcional matemáticamente hablando, está dada por:

$$Y = f(X_1, \dots, X_n; \theta_1, \dots, \theta_m)$$

Donde:

- Y: Variable respuesta (o dependiente).
- X_i : La i -ésima variable independiente ($i=1,\dots,n$).
- θ_j : El j -ésimo parámetro en la función ($j=1,\dots,m$).
- f: La función.

Para elegir una relación funcional particular como la representativa de la población bajo investigación, usualmente se procede:

- Una consideración analítica del fenómeno que se estudia, y
- Un examen de diagramas de dispersión.

Una vez decidido el tipo de función matemática que mejor se ajusta (o representa el concepto de la relación exacta que existe entre las variables) se presenta el problema de elegir una expresión particular de esta familia de funciones; es decir, se ha postulado una cierta función como término del verdadero estado en la población y ahora es necesario estimar los parámetros de esta función (ajuste de curvas).

Como los valores de los parámetros no se pueden determinar sin errores por que los valores observados de la variable dependiente no concuerdan con los valores esperados, entonces la ecuación general replanteada, estadísticamente, sería:

$$Y = f(X_1, \dots, X_n; \theta_1, \dots, \theta_m) + \varepsilon$$

Donde ε representa el error cometido en el intento de observar la característica en estudio, en la cual muchos factores contribuyen al valor que asume ε .

Para ajustar un modelo de regresión lineal múltiple se utilizan diversos software como por ejemplo: R, SAS, EXCEL, entre otros, en los cuales se enlazan tablas de datos históricos con rangos de entrada (variable de respuesta) y rangos de salida (variables independientes) para así obtener un modelo inicial para su posterior análisis y validación.

4.3 Validación estadística de los modelos obtenidos

Un modelo de regresión múltiple necesita los siguientes supuestos para su existencia:

- $E(\varepsilon) = 0$

- $\sigma^2(\varepsilon) = \sigma^2 \rightarrow$ homocedasticidad
- $\sigma^2(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0 \rightarrow$ Errores no correlacionados para todo $i \neq j$
- las variables independientes X_n , deben ser no correlacionadas.

Por lo se debe realizar una serie de análisis para la validación de este. Los pasos a verificar, son los siguientes:

4.3.1 Multicolinealidad

Cuando existe correlación entre variables independientes se dice que estas son multicolineales. En un estudio de un modelo la multicolinealidad puede afectar el cálculo de las pendientes del modelo. Es decir, se puede esperar pendientes positivas. Sin embargo, algunos valores resultantes pueden ser negativas, o algunas hipótesis que deberían ser rechazadas resultan no significativas.

Para estudiar si la multicolinealidad afecta severamente un modelo se calcula el Factor de Inflación de Varianza para cada variable independiente (VIF_j) como sigue:

$$VIF_j = \frac{1}{1 - R_j^2}$$

Donde R_j es el coeficiente de determinación al realizar la regresión de la variable X_j como variable dependiente sobre las restantes variables independientes.

Las medidas se VIF se interpretan para diferentes valores de la siguiente forma:

Si $VIF_j = 1$ entonces no existe multicolinealidad.

Si $VIF_j \neq 1$ entonces no existe multicolinealidad severa.

En ambos casos el modelo puede ser formulado y se puede pasar a la siguiente etapa de análisis.

Si $VIF_j > 10$ entonces se recomienda bajar el modelo en una variable independiente, y probar todos los modelos posibles, es decir, reajustar el modelo. VIF_j solo se analiza en modelos lineales.

4.3.2 Análisis residual

Cuando el gráfico de los residuos obtenido de los programas nombrados anteriormente tienen cierta tendencia, significa que el modelo ajustado no es correcto. Más bien los puntos deben ser aleatorios. Si esto ocurre, los datos de entrada de la variable independiente con tendencia deben ser modificados a la tendencia similar y reajustar el modelo de regresión, que en este caso ya no será lineal.

4.3.3 Análisis de R^2 ajustado

Es la relación entre cuadrados medios, explica la variabilidad de la variable respuesta obtenida por las variables independientes en conjunto. Mientras su valor absoluto sea más cercano a 1, entonces mayor será la variabilidad explicada de la variable respuesta por las variables independientes.

4.3.4 Significancia del modelo a través de pruebas de hipótesis

Para estudiar la significancia del modelo se contrasta:

$$H_0: \theta_1 = \theta_2 = \dots, \theta_m = 0$$

$$H_1: \text{algún } \theta_i \neq 0$$

El estadístico de prueba para esta hipótesis es la prueba F de la tabla ANOVA.

TABLA 1. ANOVA.

Fuente de variación	Grado de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	p-valúe
Regresión	p-1	SCR	CMR= SCR/P-1	Fc =CMR/CME	P(F>Fc)
Error	n-p	SCE	CME= SCE/N-P		
Total	n-1	SCT			

H_0 será rechazada si $p\text{-valúe} < \alpha$ para algún nivel de significancia dado.

4.3.5 Significancia de las pendientes del modelo a través de pruebas de hipótesis

Si la hipótesis H_0 es rechazada, debemos investigar cual o cuales de las pendientes es distinta de cero, para ello vamos a realizar los contrastes individuales:

$$H_0: \theta_1=0 \dots H_0: \theta_2=0 \dots H_0: \theta_m=0$$

$$H_1: \theta_1 \neq 0 \dots H_0: \theta_2 \neq 0 \dots H_0: \theta_i \neq 0$$

El estadístico de prueba es:

$$t = \frac{\theta_{i'} - \theta_i}{s(\theta_{i'})} \sim t_{(n-p)}$$

H_0 será rechazada si $p\text{-valúe} = 2 * P(t > |t_c|) < \alpha$ para algún nivel de significancia dado.

Si H_0 no es rechazada, es indicativo que la variable asociada a la pendiente respectiva no contribuye a explicar la variabilidad de la variable respuesta y por lo tanto se recomienda que sea sacada del modelo.

4.3.6 Supuesto de varianza constante para existencia del modelo

Test de Breusch-Pagan ®

$$H_0: \sigma^2 = \text{cte}$$

$$H_1: \sigma^2 = f(x)$$

H_0 se rechaza para un $p\text{-valúe} < \alpha$ para un nivel de significancia dado. De lo contrario no existe heterocedasticidad, es decir, el modelo predice por igual precisión para diferentes niveles de la variable independiente.

4.3.7 Supuesto de normalidad de los residuos para existencia del modelo

Test de Kolmogorov-Smirnov

$$H_0: \epsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$$

$$H_1: \epsilon_i \not\sim N(0, \sigma^2)$$

H_0 se rechaza para un p-valúe $< \alpha$ para un nivel de significancia dado. De lo contrario los residuales se distribuyen normales.

4.3.8 Supuesto de independencia para existencia del modelo

Test de Durbin-Watson

Permite evaluar si existe autocorrelación en una Regresión lineal, sea simple o múltiple. Con ello se pretende ver si los valores presentan algún tipo de dependencia en cuanto al orden de obtención.

El contraste de hipótesis es el siguiente:

$$H_0: \rho = 0$$

$$H_1: \rho \neq 0$$

$$d = \frac{\sum_2^n (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_1^n (e_t)^2}$$

e_t = residuo a tiempo t.

$d < d_L$, rechazamos H_0 .

$d > d_U$, no rechazamos H_0 .

$D_L \leq d \leq d_U$, test no decisivo.

Finalmente después del análisis de todos estos pasos se puede validar cada modelo necesario para el control del proceso.

5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Descripción de la planta y asignación de nombres a puntos de muestreo

En la figura 7 se pueden observar los diferentes procesos de tratamientos por los que pasa el agua residual, además de la dirección de su flujo, cuyas características son las siguientes.

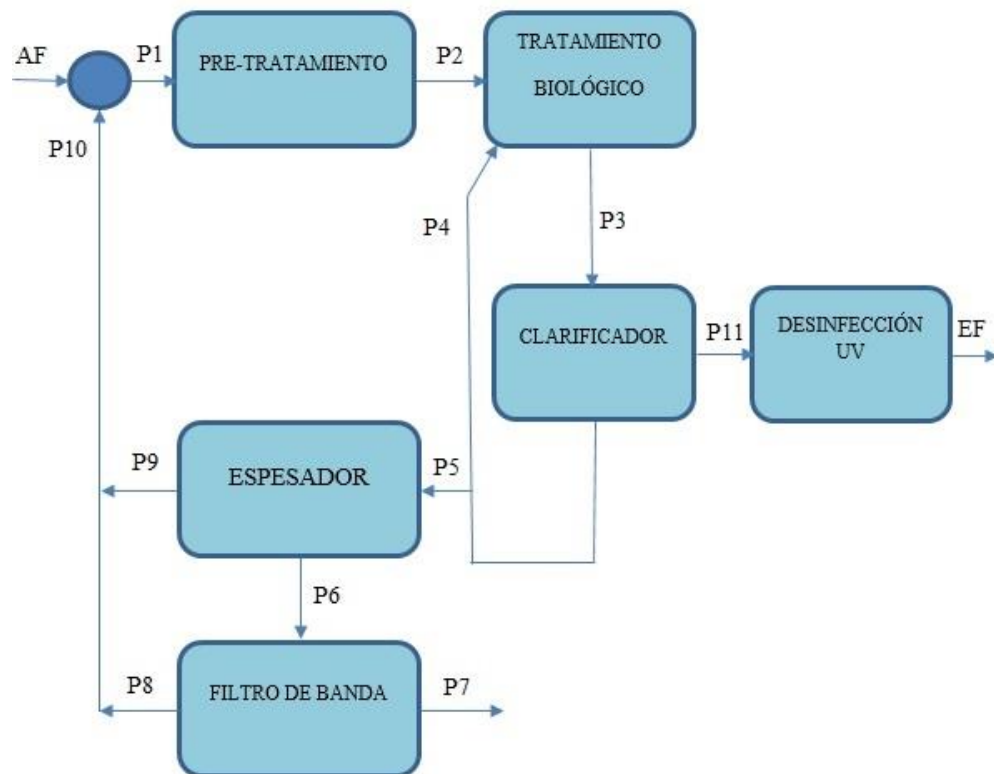


FIGURA 7. Diagrama de flujo de la planta de tratamiento de aguas residuales.

AF: Agua residual bruta que ingresa a la PTAS.

- P1: Mezcla de fluido P10 y afluente a la planta de tratamiento.
- P2: Punto posterior a reja fina y anterior a zanja de oxidación.
- P3: Entrada de licor mezclado al clarificador.
- P4: Recirculación de lodos.
- P5: Purga de lodos.
- P6: Lodo espesado, enviado a la etapa de deshidratación.
- P7: Lodo deshidratado que se envía al predio.
- P8: Líquido de agua residual removida de filtro de banda.
- P9: Líquido de agua residual removida de espesador.
- P10: Mezcla de líquidos residuales provenientes de P8 y P9.
- P11: Agua clarificada pasa a desinfección ultra violeta.
- EF: Agua clarificada y tratada que es vertida al canal.

El punto P1 se considerará como ingreso del fluido ya que en él influyen las características del afluente de la planta, además del fluido de reingreso.

En el pretratamiento se remueven los sólidos, arenas y desperdicios estancados en las rejillas gruesa y fina.

El tratamiento biológico se analiza en conjunto con el clarificador secundario, debido a su alta relación para la remoción en conjunto. Los sólidos se remueven purgando al espesador el lodo que decanta en el sedimentador secundario. Mientras que el líquido clarificado pasa a la etapa de desinfección UV, para posteriormente ser vertido al canal de la ciudad. Además del flujo natural en esta etapa, se deben considerar los siguientes fluidos externos:

- Un caudal de 88,9 m³/día de agua potable a la parte anóxica del proceso biológico, que tiene como fin remover biomasa flotante.

- Un caudal promedio de 2,2 m³/día vertido en el punto P3, que es utilizado como coagulante para reforzar el proceso de sedimentación.
- Un caudal de 22,4 m³/día de agua potable que ingresa al clarificador para la remoción de grasas flotantes que resultan del proceso.

El último subproceso que se debe considerar es el tratamiento de lodos que incluye al espesador, del cual se extrae líquido residual que es recirculado al ingreso de la planta (P10) y el filtro de banda en el cual se deshidrata el lodo para su posterior vertimiento en predios del lugar.

5.2 Muestreo compuesto

Debido a que no se tienen datos para caracterizar el fluido en el punto P2, se procede a realizar un muestreo compuesto según el procedimiento antes descrito. Los indicadores que se analizan son DQO y SST, para obtener un promedio en ese punto de la planta de tratamiento. Además en el balance también se incluye el valor de DBO₅ en dicho punto. Sin embargo, este análisis no se realiza en la planta de tratamiento por su demora (cinco días). La planta entrega un estimado promedio durante el periodo de medición de los dos indicadores anteriores.

A continuación se puede observar en la TABLA 2, los resultados del muestreo compuesto de 20 observaciones, de duración de 24 horas cada una. El promedio de la demanda química de oxígeno (DQO) en el punto P2 de la planta es de 436,7 mg/L por día. El promedio de los sólidos suspendidos totales (SST) en el punto P2 de la planta es 283 mg/L por día. Además el promedio estimado de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) es de 229 mg/L.

TABLA 2. Resultados de muestreo compuesto DQO y SST.

Nº muestra	Fecha	DQO (mg/L)	SST (mg/l)
1	25 a 26 de agosto	472	180
2	28 a 29 de agosto	400	310
3	29 a 30 de agosto	428	520
4	1 a 2 de septiembre	588	310
5	4 a 5 de septiembre	356	320
6	5 a 6 de septiembre	584	290
7	7 a 8 de septiembre	446	240

8	8 a 9 de septiembre	422	440
9	10 a 11 de septiembre	532	380
10	11 a 12 de septiembre	554	330
11	13 a 14 de septiembre	492	390
12	14 a 15 de septiembre	192	230
13	17 a 18 de septiembre	660	250
14	18 a 19 de septiembre	260	110
15	19 a 20 de septiembre	482	180
16	20 a 21 de septiembre	358	290
17	21 a 22 de septiembre	250	190
18	22 a 23 de septiembre	488	320
19	24 a 25 de septiembre	400	200
20	25 a 26 de septiembre	370	180

5.3 Monitoreo en el afluente de la planta

Los resultados del monitoreo de los niveles de sustrato en el afluente son comparados en la FIGURA 8 con la normativa exigida por la autoridad sanitaria, que corresponde a los niveles que no debe superar cada indicador de contaminación de aguas residuales al ser vertidas al mar.

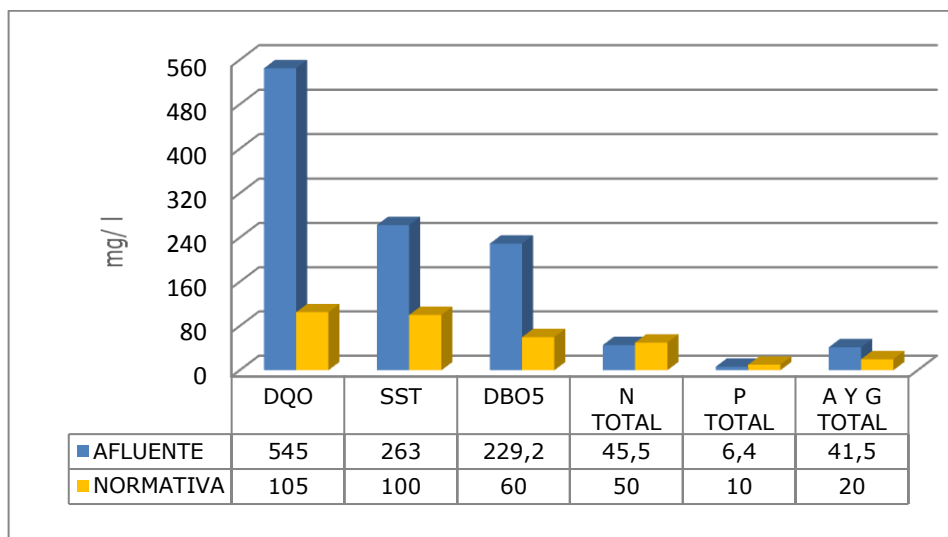


FIGURA 8. Caracterización afluente vs normativa.

Se puede observar que los indicadores más significativos a remover son los sustratos de DQO, DBO₅ y SST, los cuales se consideran en este estudio. Sin embargo, a pesar de que los parámetros de Nitrógeno total y Fosforo total no exceden la normativa impuesta por la

autoridad sanitaria no dejan de ser menos importantes. Más aún los Ácidos y Grasas totales si exceden la norma aunque en menor proporción.

Para analizar que sucede con el comportamiento de la DQO, DBO₅ y SST, se evaluarán los subprocesos del sistema de tratamiento y los parámetros y variables que intervienen en ellos.

La TABLA 3, muestra los datos utilizados para estimar el promedio de Nitrógeno total, Fósforo total y Ácidos y Grasas totales. Los datos de los demás promedios utilizados en la FIGURA 8, como DQO, SST y DBO₅ se encuentran en el ANEXO I.

TABLA 3. Datos para la estimación de N_T, P_T y A y G_T promedios.

DÍA	N Total [mg/l]	P. Total	A y G Tot.
09-ene	43,3	6,5	5,0
22-ene	39,9	6,9	42,0
05-feb	45,8	8,1	51,0
20-feb	55,4	8,2	66,0
25-feb	46,5	6,5	23,0
11-mar	24,3	4,2	35,0
20-mar	60,7	8,2	44,0
28-mar	57,4	6,4	39,0
03-abr	66,4	7,0	89,0
10-abr	-	7,3	-
17-abr	-	-	49,0

08-may	41,3	5,4	39,0
22-may	-	-	6,2
27-may	54,8	6,97	61,0
05-jun	52,6	5,4	67,0
11-jun	-	6,0	-
18-jun	54,2	6,2	72
10-jul	40,3	8,26	26
06-ago	25,3	4,5	7,0
20-ago	20,0	3,1	26,0

5.4 Monitoreo de indicadores en distintas etapas del proceso

5.4.1 Monitoreo de DQO

En la FIGURA 9 se puede observar la variación de la demanda química de oxígeno (DQO) y en cada etapa del tratamiento. Se aprecia una disminución progresiva de la DQO. El valor obtenido al ingreso de la planta de tratamiento (579,5 mg/l) se reduce a 436,7 (mg/l) en el pretratamiento (punto P2) y continua reduciéndose a la salida de la planta. El agua residual pre-tratada pasa por el proceso biológico y decantación secundaria, los cuales se consideran como un solo subproceso debido a su alta relación. En el efluente final se obtiene un valor de 78 (mg/L), valor que se encuentra por debajo de la normativa sanitaria vigente.

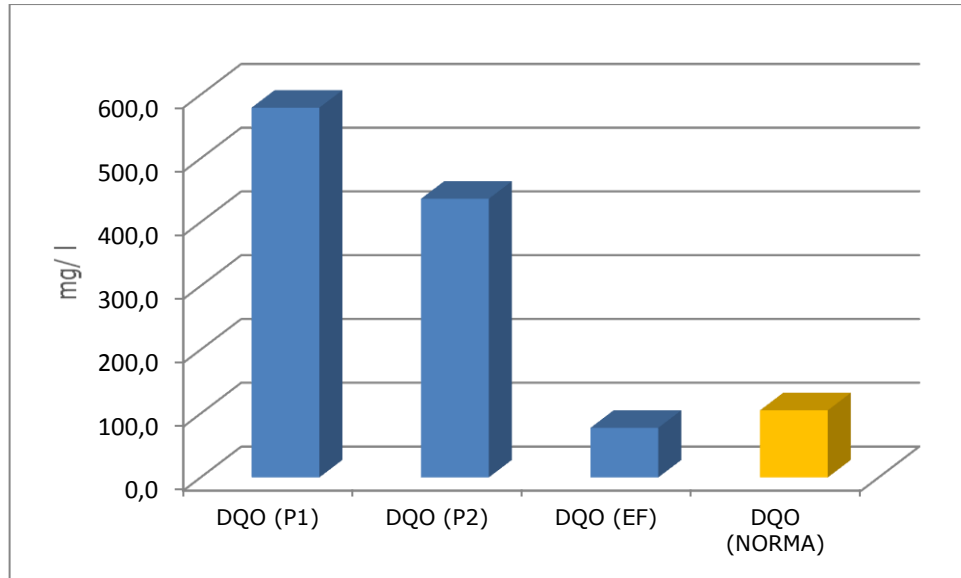


FIGURA 9. Variación de la DQO a través de distintas etapas del proceso.

5.4.2 Monitoreo de SST

En la FIGURA 10, se observa la variación en la concentración de SST en forma progresiva. Sin embargo, se puede ver una baja remoción en la primera etapa del proceso, (de 317,3 a 283 mg/L). Finalmente, la mayor remoción de SST se puede observar en el último subproceso, en el cual disminuye de 283 (mg/L) a la salida del pretratamiento, a 21 (mg/L) después del tratamiento biológico y la decantación secundaria. El efluente operacional cumple a cabalidad con la normativa de SST.

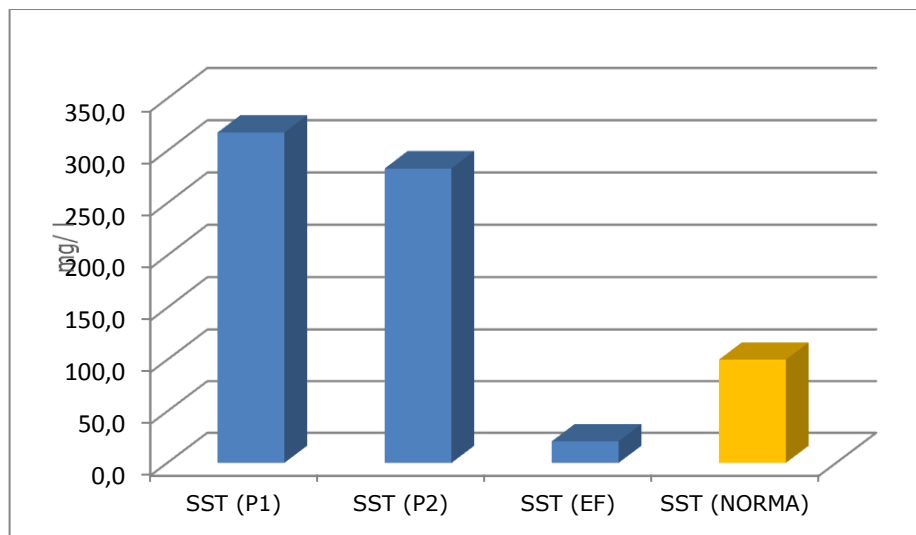


FIGURA 10. Variación de los SST a través de distintas etapas del proceso.

5.4.3 Monitoreo de DBO₅

En la FIGURA 11, se observa el comportamiento de la DBO₅ en el sistema de tratamiento de aguas residuales. Al igual que los sólidos suspendidos totales se puede apreciar una mínima reducción del sustrato en la primera etapa del proceso (pretratamiento), de 252,1 mg/L en el afluente del proceso, a 229 mg/L al finalizar el pre-proceso. Posterior a ello se observa la mayor disminución hasta llegar a una concentración de sólo 17 mg/L en el efluente. Valor que se encuentra por debajo al exigido por la normativa ambiental.

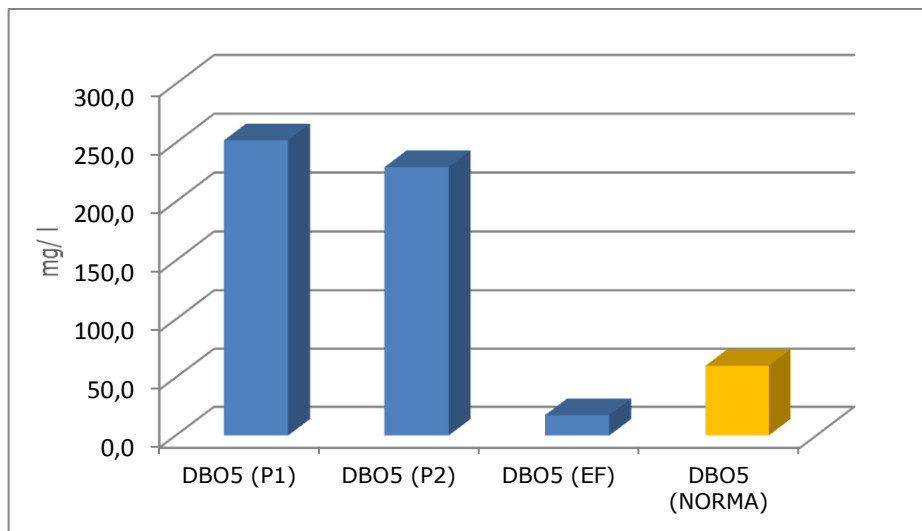


FIGURA 11. Variación de LA DBO₅ a través de distintas etapas del proceso.

5.5 Balance de masa y eficiencia

5.5.1 Balance de materia de PRETRATAMIENTO

En la FIGURA 12, se observa el diagrama de la interacción de los indicadores mostrados en las Tablas 4 y 5. Además del sentido de los flujos.



FIGURA 12. Diagrama de flujo del PRETRATAMIENTO.

En la TABLA 4, se puede observar la caracterización de los fluidos AF, P10, P1 y P2 a nivel de carga diaria promedio.

TABLA 4, Cargas de indicadores en puntos de PRETRATAMIENTO.

	U.M.	AFLUENTE	P10	P1	P2
Caudal	L/S	65,855	1,641	67,497	67,492
	m ³ /día	5689,896	141,816	5831,712	5831,336
Carga DQO	Kg/día	3100,270	279,377	3379,647	2546,544
Carga SST	Kg/día	1494,646	355,957	1850,603	1650,268
Carga DBO5	Kg/día	1304,212	166,208	1470,420	1337,543

En la TABLA 5, se observa la caracterización de los residuos que son extraídos diariamente de las rejillas gruesa y fina, además, del desarenador.

TABLA 5. Caracterización de arenas y residuos en las rejillas.

	U.M.	ARENA	REJAS
Sacos	Unidad	9,471	3,053
Caudal	m ³ /día	0,284	0,092
Carga	Kg/día	183,267	59,073

Los resultados de la TABLA 6, muestran que el caudal que ingresa al pretratamiento es 5831,712 m³/día, que incluye el caudal del afluente de la planta, más el reingreso de concentrado. El caudal se reduce a 5831,336 m³/día, a la salida del pretratamiento. Ésta disminución se debe a la extracción de desechos acumulados tanto en la rejilla gruesa y fina. Además, se elimina la arena en el desarenador del subproceso, que en conjunto suman un

caudal de 0,376 m³/día. En este caudal de salida se tiene una carga de 833,102 kg/día como DQO, 132,877 kg/día como DBO₅ y 200,335 kg/día como SST, valores que representan la diferencia entre carga másica diaria de entrada y salida del pretratamiento. Las eficiencias es esta unidad para DQO, DBO₅ y SST son: 24,7%, 9% y 10,8% respectivamente para los distintos indicadores.

TABLA 6. Balance másico y eficiencia del pretratamiento de la PTAS.

PUNTO DE MUESTREO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
AFLUENTE (ENTRADA DE AGUA CRUDA, MÁS REINGRESO DE CONCENTRADO)	CAUDAL	m ³ /día	5831,712
	CARGA DQO	kg/día	3379,647
	CARGA DBO ₅	kg/día	1470,420
	CARGA SST	kg/día	1850,603
P2 (TÉRMINO DE PRETRATAMIENTO)	CAUDAL	m ³ /día	5.831,336
	CARGA DQO	kg/día	2.546,544
	CARGA DBO ₅	kg/día	1.337,543
	CARGA SST	kg/día	1.650,268
PURGA DE ARENAS Y DESECHOS DE LAS REJAS	CAUDAL	m ³ /día	0,376
	CARGA DQO	kg/día	833,102
	CARGA DBO ₅	kg/día	132,877
	CARGA SST	kg/día	200,335
EFICIENCIA	CARGA DQO	%	24,7
	CARGA DBO ₅	%	9,0
	CARGA SST	%	10,8

5.5.2 Balance de materia de tratamiento BIOLÓGICO-SECUNDARIO

En la FIGURA 13, se observa el diagrama de la interacción de los indicadores y caudales mostrados en las Tablas 7 y 8. Además del sentido de los flujos.

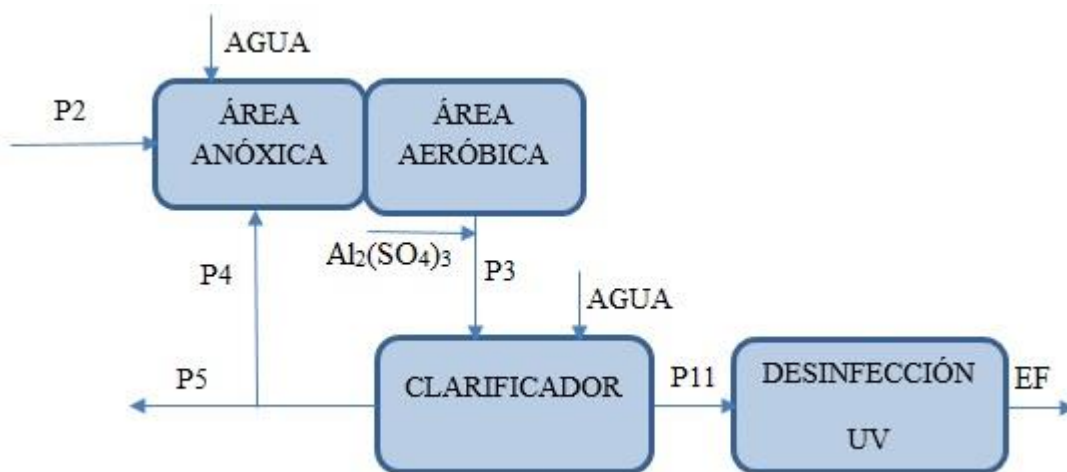


FIGURA 13. Diagrama de tratamiento BIOLÓGICO-SECUNDARIO.

En la TABLA 7, se puede observar la caracterización de los fluidos P2 y EF a nivel de carga diaria promedio.

TABLA 7. Cargas de indicadores en puntos de tratamiento BIOLÓGICO-SECUNDARIO.

	U.M.	P2	EFLUENTE
Caudal	L/S	67,492	67,072
	m ³ /día	5.831,336	5.794,978
Carga DQO	kg/día	2.546,544	449,573
Carga SST	kg/día	1.650,268	121,422
Carga DBO ₅	kg/día	1.337,543	101,403

En la TABLA 8, se observa el caudal de los fluidos externos que ingresan al tratamiento y la purga de lodos.

TABLA 8. Caudal de fluidos que intervienen en el tratamiento.

	U.M.	Anóxica (AGUA)	Clarificador (AGUA)	P3 (sulfato de aluminio)	Purga
CAUDAL	L/S	1,029	0,260	0,025	1,735
	m ³ /día	88,9	22,4	2,2	149,9

Los resultados de la TABLA 9, muestran que el caudal de ingreso al tratamiento biológico es de 5944,843 m³/día. Este flujo incluye el caudal de agua de zona anóxica y clarificador, además del concentrado de sulfato de aluminio. Esto se reduce a 5794,978 m³/día en el

efluente final de la planta. Esta disminución se debe principalmente a la purga de lodos desviada al espesador para su posterior deshidratación en el filtro de banda, consiste de un caudal promedio de 149,865 m³/día. En éste caudal de purga se tiene una carga de 2096,972 kg/día como DQO, 1236,140 kg/día como DBO₅ y 1528,846 kg/día como SST, valores que representan la diferencia entre carga másica diaria de entrada al proceso biológico y salida del proceso global. Las eficiencias en esta unidad son superiores a 82,3% para DQO, DBO₅ y SST, alcanzando una mayor eficiencia en la remoción de SST con un valor de 93,4%.

TABLA 9. Balance másico y eficiencia en el tratamiento BIOLÓGICO-SECUNDARIO.

PUNTO DE MUESTREO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
P2 (ENTRADA DE AGUA PRETRATADA)	CAUDAL	m ³ /día	5944,843
	CARGA DQO	kg/día	2546,544
	CARGA DBO ₅	kg/día	1337,543
	CARGA SST	kg/día	1650,268
EFLUENTE DE LA PTAS	CAUDAL	m ³ /día	5794,978
	CARGA DQO	kg/día	449,573
	CARGA DBO ₅	kg/día	101,403
	CARGA SST	kg/día	121,422
PURGA DE LODOS	CAUDAL	m ³ /día	149,865
	CARGA DQO	kg/día	2096,972
	CARGA DBO ₅	kg/día	1236,140
	CARGA SST	kg/día	1528,846
EFICIENCIA	CARGA DQO	%	82,3
	CARGA DBO ₅	%	92,4
	CARGA SST	%	92,6

5.5.3 Balance de materia de tratamiento de lodos

En la FIGURA 14, se muestra el diagrama de los subprocesos del tratamiento de lodos y sus flujos correspondientes.

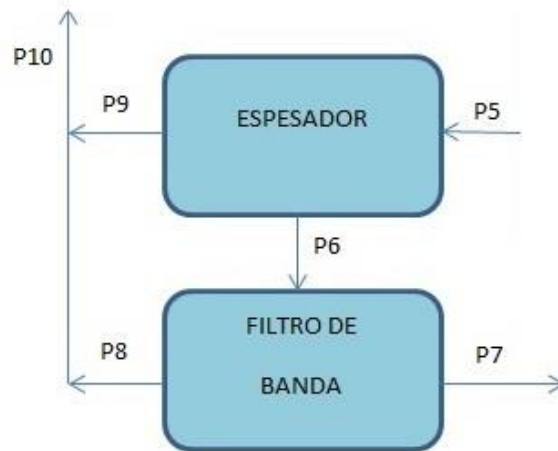


FIGURA 14. Diagrama de tratamiento de lodos.

En la TABLA 10, se pueden observar los caudales promedio diarios que intervienen en el tratamiento de lodos

TABLA 10. Caudales del tratamiento de lodos.

	U.M	PURGA P5	P7	P10
Caudal	m ³ /día	150,3	8,5	141,8

En esta etapa ingresa un volumen promedio de purga de 150,3 m³/día al espesador, en donde se extrae líquido residual concentrado por sedimentación, la cual se reingresa a la planta por la línea P10. De esta forma se envía el lodo restante al filtro de banda para su deshidratación, ayudado por polímeros que ayudan a su floculación. Una vez deshidratado el lodo y estabilizado, es enviado a predios del sector para abono de tierras. El lodo estabilizado que sale de la planta es en promedio 8,5 m³/día. El líquido extraído en este subproceso se reúne con el extraído en el espesador y es recirculado a la entrada de la planta de tratamiento. Los datos utilizados para la estimación de estos promedios de caudales, se encuentran en el ANEXO II.

5.6 Ajuste de modelos particulares en el PRETRATAMIENTO

En esta etapa del trabajo se formulan modelos de pronósticos a nivel del subproceso de Pretratamiento de la planta. Se toman la DBO₅, DQO y SST en el efluente como variables

respuestas. Los modelos serán descritos en función de sus respectivos indicadores o variables con capacidad de decisión como caudal de entrada de la planta [$\text{m}^3/\text{día}$], extracción de sacos de desechos sólidos de las rejjas, gruesa y fina [sacos/día] y extracción de arenas [sacos/día] del desarenador, con el fin de tener control en la toma de decisiones para optimizar los niveles de contaminación del agua tratada.

Se decidió medir la extracción de desechos sólidos y arenas como sacos/día, ya que esta es la forma de contabilización de los operadores. Sin embargo, se realizó un ensayo y se calculó la densidad aparente de los desechos sólidos y arenas. Como resultado promedio se obtuvo un valor de 0,645 [kg/L]. Cada saco tiene un volumen promedio de 30 litros.

Para poder ajustar modelos de pronósticos, es necesario analizar la multicolinealidad entre las variables. Es decir, el nivel de relación que existe entre ellas. Como este análisis es común para los tres modelos de la etapa de PRETRATAMIENTO, se realizará el análisis antes del procedimiento de ajuste. Para ello se debe calcular el factor de inflación de la varianza, cuyo resultado es observable al multiplicar las diagonales de forma escalar de la matriz de varianzas y covarianza con la matriz inversa de varianzas y covarianzas.

5.6.1 Multicolinealidad

La matriz de varianzas y covarianzas observada en la TABLA 11, entrega una medida de la asociación lineal que existe entre las variables. Sin embargo, no considera que las variables se encuentren en diferentes unidades de medida.

TABLA 11. Matriz de varianzas y covarianzas de variables de PRETRATAMIENTO.

		PRETRATAMIENTO		
		Caudal	Rejas	Arenas
PRETRATAMIENTO	Caudal	317,280	1,842	23,384
	Rejas	1,842	1,327	3,849
	Arenas	23,384	3,849	30,086

En general se observa que las varianzas de las variables son diversas. La mayor de ellas es la del caudal con un valor de $317,280 \text{ (L/s)}^2$ de varianza, es mayor a la de nivel de basuras en las rejjas con un valor de $1,327 \text{ (sacos/día)}^2$.

A continuación en la TABLA 12, se puede apreciar la matriz inversa de varianzas y covarianzas.

TABLA 12. Matriz inversa de varianzas y covarianzas de variables de PRETRATAMIENTO.

		PRETRATAMIENTO		
		Caudal	Rejas	Arenas
PRETRATAMIENTO	Caudal	0,003	0,005	-0,003
	Rejas	0,005	1,205	-0,158
	Arenas	-0,003	-0,158	0,056

En la TABLA 13, se ofrecen los factores de inflación de varianzas obtenidos de la multiplicación escalar de ambas matrices antes mencionadas. Se observa que todos los factores de inflación de varianza se encuentran entorno al valor 1. Como caudal en el afluente de la planta: 1.066, Basura en las rejjas; 1.599, y sacos de arena 1,683.

Al tener todos valores inferiores a 10 ($VIF < 10$) sirve como evidencia para afirmar que no existe multicolinealidad severa. No se puede afirmar que no existe multicolinealidad ya que para ello todos los VIF's tendrían que haber tomado valores iguales a uno.

A continuación se ajustará como regresión en Microsoft Excel los tres modelos de DQO, SST y DBO_5 en el efluente de la planta de tratamiento de aguas servidas, por separado, en función de las tres variables predictoras con capacidad de decisión y se procederá a la validación de ellas y modificaciones que se estime conveniente.

TABLA 13. Factores de inflación de varianza de variables de PRETRATAMIENTO.

		PRETRATAMIENTO		
		Caudal	Rejas	Arenas

PRETRATAMIENTO	Caudal	1,066	
	Rejas		1,599
	Arenas		1,683

5.6.2 Ajuste de modelo DBO₅

Aplicando regresión con la DBO₅ efluente en función de las demás variables independientes se obtiene un modelo de regresión lineal múltiple con la siguiente forma:

$$DBO_5(S_i) = \beta_0 + \beta_1 * S_1 + \beta_2 * S_2 + \beta_3 * S_3 + \varepsilon$$

Donde ε corresponde al error de predicción del modelo, β_i $i=0,1,2,3$. corresponde a los coeficientes de regresión para cada variable predictora (excepto β_0 que es el coeficiente de intersección del modelo). Además S_i $i=1,2,3$. corresponden al valor que toma cada variable predictora. Los cuales tras el ajuste de modelo se describen en la siguiente tabla.

TABLA 14. Símbolos de las variables predictoras DBO₅ (PRETRATAMIENTO).

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
	Intercepto
S ₁	Caudal [L/s] AFLUENTE
S ₂	Basura de rejas [sacos/día]
S ₃	Arenas [sacos/día]

Sin embargo, una vez ajustado el modelo se debe seguir el procedimiento de validación de siete pasos mostrado en la metodología, y si uno de ellos muestra cambio, se debe modificar el modelo y comenzar nuevamente una y otra vez con el análisis, pudiendo resultar un poco repetitivo para el lector. Es por esto que se mostrará sólo el análisis de la última iteración de cada modelo en el cuerpo de esta lectura, quedando el análisis completo y detallado en los ANEXOS. El procedimiento del ajuste y validación de DBO₅ en el pretratamiento se encuentra en el ANEXO III.

Al llegar a la segunda iteración del modelo de DBO₅ con variables predictoras del pretratamiento se debe obtener un ajuste de la siguiente forma:

$$DBO_5 (S_i) = \beta_0 + \beta_2 * S_2 + \beta_3 * S_3$$

Cuyos valores se describen en la siguiente tabla.

TABLA 15. Coeficientes del ajuste de modelo final DBO₅ (PRETRATAMIENTO).

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	COEF.
	Intercepto	β_0	28,2447
S ₂	Basura de rejas [sacos/día]	β_2	-1,8996
S ₃	Arenas [sacos/día]	β_3	-0,9187

5.6.2.1 Análisis de los residuos del modelo ajustado

Al visualizar los gráficos de los residuos de las dos variables independientes restantes S₂ y S₃) del modelo final ajustado para la DBO₅ (Pretratamiento) no se observa tendencia alguna. Así, el modelo es adecuado para los datos.

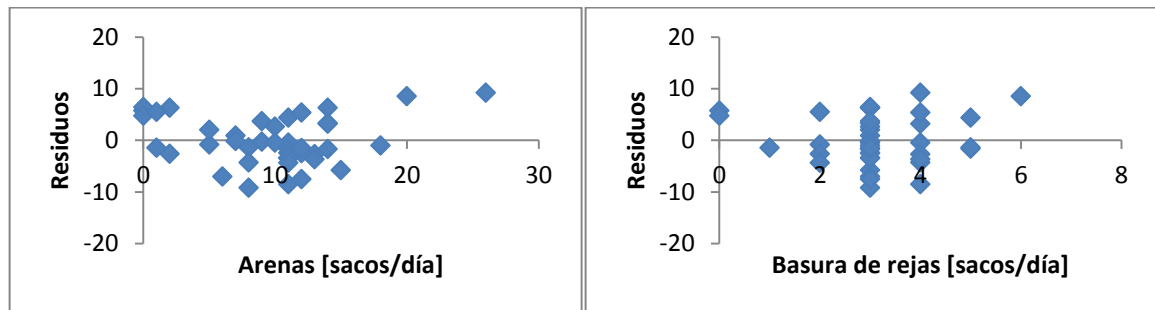


FIGURA 15. Análisis de los residuos del modelo DBO₅ (PRETRATAMIENTO).

5.6.2.2 Análisis de la regresión

De la Tabla 16 se puede ver que el coeficiente de correlación múltiple, 0.8199, indica que existe un alto grado de asociación entre la variable respuesta y la variables predictoras. Además el porcentaje de variabilidad explicada por las variables independientes es de 65.50% en el modelo, mostrando una variación insignificante con respecto al ajuste anterior.

TABLA 16. Estadísticas de la regresión DBO₅ (PRETRATAMIENTO).

Coeficiente de correlación múltiple	0,8199
Coeficiente de determinación R^2	0,6722
R^2 ajustado	0,6550
Error típico	4,7902
Observaciones	41

A partir de los datos mostrados en la Tabla 16 y residuos en el ANEXO IV se puede observar que los errores se encuentran entre [-9.1963; 9.2400], lo cual está contenido en $\pm 3 * \sqrt{CME} = \pm 3 * \text{Error típico} = \pm 14.3705$. Esto quiere decir que no existen puntos atípicos, por lo cual todos los datos son válidos para el modelo.

5.6.2.3 Significancia del modelo

Para estudiar la significancia del modelo se debe contrastar las siguientes hipótesis:

$$H_0: \beta_2 = \beta_3 = 0$$

$$H_1: \text{Algún } \beta_i \neq 0, i=2,3.$$

El estadístico de prueba para esta hipótesis es la prueba F, que se obtiene de la siguiente tabla.

TABLA 17. ANOVA modelo DBO₅ (PRETRATAMIENTO).

ANÁLISIS DE VARIANZA	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	1788,2522	894,12612	38,966764	6,25052E-10
Residuos	38	871,94288	22,945865		
Total	40	2660,1951			

De aquí se puede obtener el valor crítico de F, que corresponde al p-value=6,2505E-10 lo cual es altamente menor a un nivel de significancia $\alpha=0,05$. Esto es evidencia suficiente para rechazar nuestra hipótesis nula H_0 en favor de H_1 .

5.6.2.4 Significancia individual de los coeficientes del modelo

Ahora se debe investigar cuáles de los coeficientes asociados a cada variable del modelo son significativos, y para ello se realiza los contrastes de las hipótesis individuales.

$$H_0: \quad H_0: \beta_2=0, \quad H_0: \beta_3=0$$

$$H_1: \quad H_1: \beta_2\neq 0, \quad H_1: \beta_3\neq 0,$$

El estadístico de prueba para estas hipótesis es la prueba t, cuyos p-value se observan en la Tabla 18

TABLA 18. Estadísticos de pruebas individuales modelo DBO₅ (PRETRATAMIENTO).

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	COEF.	Error típico	Estadístico t	P-VALUE	Inferior 95%	Superior 95%
	Intercepto	β_0	28,2447	2,1636	13,0544	0,0000	23,8647	32,6248
S ₂	Basura de rejas [sacos/día]	β_2	-1,8996	0,8192	-2,3189	0,0259	-3,5578	-0,2413
S ₃	Arenas [sacos/día]	β_3	-0,9187	0,1720	-5,3410	0,0000	-1,2669	-0,5705

Se puede observar que los p-value de las hipótesis de significancia de los coeficientes de regresión de las variables S₂ y S₃ con valores de 0,0259 y 4,5E-06 respectivamente son menores al nivel de significancia de 0,05. Sus respectivos intervalos de confianza para el mismo nivel de significancia no está contenido el cero, existe evidencia suficiente para rechazar las hipótesis nulas de los cuatro coeficientes, en favor de H₁.

Se puede apreciar que basura extraída de las rejas gruesa y fina, además de la arena es capaz de explicar 65.50% de la variabilidad de la variable respuesta demanda bioquímica de oxígeno en cinco días DBO₅.

El coeficiente β_2 puede ser interpretado de la forma en que cada saco de basura de las rejas gruesa y fina extraída en el pretratamiento, influirá directamente en la disminución de 1,8996 mg/L en la concentración de la demanda bioquímica de oxígeno en cinco días en el efluente de la planta.

El coeficiente β_3 puede ser interpretado de la forma en que cada saco de arena extraído del desarenador del pretratamiento por día, influirá directamente en la disminución 0,9187

mg/L en la concentración de la demanda bioquímica de oxígeno en cinco días en el efluente de la planta.

En la operación de la planta se retiran los sacos ya sea con residuos sólidos de las rejillas o el arena del desarenador con una frecuencia de una a dos veces por turno (8 horas), por lo que se suele apreciar estancamiento de residuos que se deriva directamente de la mala gestión en el tratamiento. Es por esto que se sugiere aumentar la frecuencia de extracción de sacos.

Además el desarenador funciona por 5 minutos continuos con una frecuencia entre encendidos de 45 minutos. Para aumentar la extracción de sacos de arena se sugiere estudiar la variación de estos tiempos, ya sea aumentando los minutos de funcionamiento o disminuyendo el tiempo entre encendidos.

Por lo tanto el modelo final para la predicción de los niveles de la demanda bioquímica de oxígeno en cinco días en el efluente de la planta en función de las variables del pretratamiento, queda de la siguiente forma.

$$DBO_{5EF}(S_i) = 28,2447 - 1,8996*(\text{Basura de las rejillas}) - 0,9187*(\text{Arenas})$$

5.6.2.5 Supuesto de varianza constante para existencia del modelo

Para estudiar si existe heterocedasticidad se deben contrastar las siguientes hipótesis:

$$H_0: \sigma^2 = \text{constante}$$

$$H_1: \sigma^2 = f(x)$$

Se utilizará el test de Breusch-Pagan, del cual se obtienen los siguientes resultados en el software R commander.

TABLA 19. Resultados de test Breusch-Pagan modelo DBO₅ (PRETRATAMIENTO).

	BP	p-value
Breusch-Pagan	1,1814	0,2771

Aquí se obtiene un p-value =0.2771, por lo tanto no existe evidencia para rechazar la hipótesis nula en favor de H_1 . Así el modelo predice por igual precisión para distintos niveles de las variables independientes, y se cumple condición de homocedasticidad.

5.6.2.6 Supuesto de normalidad de los residuos para existencia del modelo

Para estudiar normalidad de los errores se realizará el contraste de:

$$H_0: \varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$$

$$H_1: \varepsilon \sim / \sim N(0, \sigma^2)$$

Para lo cual se realizará el test de kolmogorov-Smirnov, en el software IBM SPSS estadistic, del cual se obtienen los siguientes resultados:

TABLA 20. Resultados de test de Kolmogorov-Smirnov modelo DBO₅ (PRETRATAMIENTO).

Kolmogorov-Smirnov	Estadístico	G.L.	Significancia
Residuos DBO ₅	0,120	41	0,148

*: Este es un límite inferior de la significancia verdadera

Los resultados de la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov arrojan una significancia de 0.148, lo que indica que no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula en favor de H_1 . Así los datos residuales siguen una distribución normal.

5.6.2.7 Supuesto de independencia para existencia del modelo

El Test de Durbin-Watson permite evaluar si existe autocorrelación en una Regresión lineal, sea simple o múltiple. Con ello se pretende ver si los valores presentan algún tipo de dependencia en cuanto al orden de obtención.

El contraste de hipótesis es el siguiente:

$$H_0: \rho = 0$$

$$H_1: \rho \neq 0$$

Se utiliza el software IBM SPSS estadístico, del cual se obtienen los siguientes resultados:

TABLA 21. Resultados de test Durbin-Watson modelo DBO₅ (PRETRATAMIENTO).

	Estadístico d	d _L	d _U
Durbin-Watson	1,629	1,3988	1,603

Para los parámetros $n = 41$ y $k-1 = 2$. Se observa que el estadístico $d = 1,629 > d_U = 1,603$ por lo que no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula, por lo tanto, se cumple el supuesto de independencia.

5.6.3 Ajuste de modelo DQO

Aplicando regresión con la DQO del efluente de la planta en función de las demás variables independientes se obtiene un modelo de regresión lineal múltiple con la siguiente forma:

$$DQO(S_i) = \beta_0 + \beta_1 * S_1 + \beta_2 * S_2 + \beta_3 * S_3 + \varepsilon$$

Donde ε corresponde al error de predicción del modelo, β_i $i=0,1,2,3$. corresponde a los coeficientes de regresión para cada variable predictora (excepto β_0 que es el coeficiente de intersección del modelo). Además S_i $i=1,2,3$. corresponden al valor que toma cada variable predictora. Los cuales tras el ajuste de modelo se describen en la Tabla 22.

TABLA 22. Símbolos de las variables predictoras DQO (PRETRATAMIENTO).

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
	Intercepto
S ₁	Caudal [L/s] AFLUENTE
S ₂	Basura de rejas [sacos/día]
S ₃	Arenas [sacos/día]

Sin embargo, una vez ajustado el modelo se debe seguir el procedimiento de validación de siete pasos mostrado en la metodología. Si uno de ellos muestra cambio, se debe modificar el modelo y comenzar nuevamente una y otra vez con el análisis, pudiendo resultar un poco repetitivo para el lector. Es por esto que se mostrará sólo el análisis de la última iteración de

cada modelo en el cuerpo de esta lectura, quedando el análisis completo y detallado en los ANEXOS. El procedimiento del ajuste y validación de DQO en el pretratamiento se encuentra en el ANEXO V.

Al llegar a la segunda iteración del modelo de DQO con variables predictoras del pretratamiento se debe obtener un ajuste de la siguiente forma:

$$DQO (S_i) = \beta_0 + \beta_2 * S_2 + \beta_3 * S_3$$

Cuyos valores se describen en la Tabla 23.

TABLA 23. Coeficientes del ajuste de modelo final DQO (PRETRATAMIENTO).

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	COEF.
	Intercepto	β_0	79,2569
S_2	Basura de rejas [sacos/día]	β_2	-3,9180
S_3	Arenas [sacos/día]	β_3	-1,8836

5.6.3.1 Análisis de los residuos del modelo ajustado

Al visualizar los gráficos de los residuos de las dos variables independientes restantes no se observa tendencia o comportamiento, así, el modelo es adecuado para los datos.

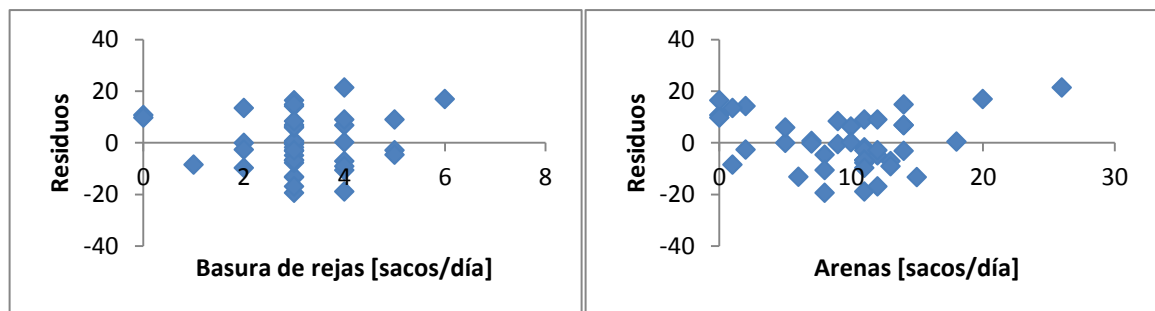


FIGURA 16. Análisis de los residuos del modelo DQO (PRETRATAMIENTO).

5.6.3.2 Análisis de la regresión

En la Tabla 24, se puede ver que el coeficiente de correlación múltiple, 0.7997, indica que existe un alto grado de asociación entre la variable respuesta y la variables predictoras. Además el porcentaje de variabilidad explicada por las variables independientes es de

62.06% en el modelo, mostrando una variación insignificante con respecto al ajuste anterior.

TABLA 24. Estadísticas de la regresión DQO (PRETRATAMIENTO).

Coeficiente de correlación múltiple	0,7997
Coeficiente de determinación R^2	0,6396
R^2 ajustado	0,6206
Error típico	10,5748
Observaciones	41

A partir de los datos de la Tabla 24 y los residuos del ANEXO VI se puede observar que los errores se encuentran entre [-19.4339; 21.3889], lo cual está contenido en $\pm 3 * \sqrt{CME} = \pm 3 * \text{Error típico} = \pm 31,7244$. Esto quiere decir que no existen puntos atípicos, por lo cual todos los datos son válidos para el modelo.

5.6.3.3 Significancia del modelo

Para estudiar la significancia del modelo se debe contrastar las siguientes hipótesis:

$$H_0: \beta_2 = \beta_3 = 0$$

$$H_1: \text{Algún } \beta_i \neq 0, i=2,3.$$

El estadístico de prueba para esta hipótesis es la prueba F, que se obtiene de la siguiente tabla.

TABLA 25. ANOVA modelo DQO (PRETRATAMIENTO).

<i>ANÁLISIS DE VARIANZA</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	7540,96666	3770,48333	33,7171298	3,7952E-09
Residuos	38	4249,42358	111,826936		
Total	40	11790,3902			

De aquí se puede obtener el valor crítico de F, que corresponde al p-value=3,7952E-09 lo cual es altamente menor a un nivel de significancia $\alpha=0,05$. Esto es evidencia suficiente para rechazar nuestra hipótesis nula H_0 en favor de H_1 .

5.6.3.4 Significancia individual de los coeficientes del modelo.

Ahora se debe investigar cuáles de los coeficientes asociados a cada variable del modelo son significativos, y para ello se realiza los contrastes de las hipótesis individuales.

$$H_0: \quad H_0: \beta_2=0, \quad H_0: \beta_3=0$$

$$H_1: \quad H_1: \beta_2 \neq 0, \quad H_1: \beta_3 \neq 0,$$

El estadístico de prueba para estas hipótesis es la prueba t, cuyos p-value se observan en la Tabla 26.

TABLA 26. Estadísticos de pruebas individuales modelo DQO (PRETRATAMIENTO).

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	COEF.	Error típico	Estadístico t	P-VALUE	Inferior 95%	Superior 95%
	Intercepto	β_0	79,2569	4,7764	16,5933	5,34E-19	69,5875	88,9262
S_2	Basura de rejas [sacos/día]	β_2	-3,9180	1,8084	-2,1666	0,0366	-7,5789	-0,2572
S_3	Arenas [sacos/día]	β_3	-1,8836	0,3797	-4,9604	1,50E-05	-2,6523	-1,1149

Aquí se puede observar que los p-value de las hipótesis de significancia de los coeficientes de regresión de las variables S_2 y S_3 con valores de 0,0366 y 1,50E-05 respectivamente son menores al nivel de significancia de 0,05. Sus respectivos intervalos de confianza para el mismo nivel de significancia no está contenido el cero. Existe evidencia suficiente para rechazar las hipótesis nulas de los cuatro coeficientes, en favor de H_1 .

Se puede apreciar que basura extraída de las rejas gruesa y fina, además de la arena es capaz de explicar 62.06% de la variabilidad de la variable respuesta demanda química de oxígeno DQO.

El coeficiente β_2 puede ser interpretado de la forma en que cada saco de basura de las rejas gruesa y fina extraída en el pretratamiento por día, influirá directamente en la disminución

de 3,9180 mg/L en la concentración de la demanda química de oxígeno en el efluente de la planta.

El coeficiente β_3 puede ser interpretado de la forma en que cada saco de arena extraído del desarenador del pretratamiento por día, influirá directamente en la disminución 1,8836 mg/L en la concentración de la demanda química de oxígeno en el efluente de la planta.

Al ser la extracción de sacos de arenas y desechos sólidos, inversamente proporcional a la concentración de la demanda química de oxígeno en el efluente, se sugiere de igual forma que en el modelo de DBO₅, el aumento en la frecuencia de extracción de sacos y el estudio de funcionamiento del desarenador.

Por lo tanto el modelo final para la predicción de los niveles de la demanda química de oxígeno en el efluente de la planta en función de las variables del pretratamiento, queda de la siguiente forma.

$$DQO_{EF}(S_i) = 79,2569 - 3,9180*(B.rejas) - 1,8836*(Arena)$$

5.6.3.5 Supuesto de varianza constante para existencia del modelo

Para estudiar si existe heterocedasticidad se deben contrastar las siguientes hipótesis:

$$H_0: \sigma^2 = \text{constante}$$

$$H_1: \sigma^2 = f(x)$$

Se utilizará el test de Breusch-Pagan, del cual se obtienen los siguientes resultados en el software R commander.

TABLA 27. Resultados de test Breusch-Pagan modelo DQO (PRETRATAMIENTO).

	BP	p-value
Breusch-Pagan	0,9256	0,336

Aquí se obtiene un p-value =0.336, por lo tanto no existe evidencia para rechazar la hipótesis nula en favor de H_1 . Así el modelo predice por igual precisión para distintos niveles de las variables independientes, y se cumple condición de homocedasticidad.

5.6.3.6 Supuesto de normalidad de los residuos para existencia del modelo

Para estudiar normalidad de los errores se realizó el contraste de hipótesis:

$$H_0: \varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$$

$$H_1: \varepsilon \sim / \sim N(0, \sigma^2)$$

Para lo cual se utilizó el test de kolmogorov-Smirnov, en el software IBM SPSS estadistic, del cual se obtienen los siguientes resultados:

TABLA 28. Resultados de test de Kolmogorov-Smirnov modelo DQO (PRETRATAMIENTO).

Kolmogorov-Smirnov	Estadístico	G.L.	Significancia
Residuos DQO	0,108	41	0,200*

*: Este es un límite inferior de la significancia verdadera

Los resultados de la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov arrojan una significancia de 0.200* (límite inferior de la significancia verdadera), lo que indica que no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula en favor de H_1 . Así los datos residuales siguen una distribución normal.

5.6.3.7 Supuesto de independencia para existencia del modelo

El Test de Durbin-Watson permite evaluar si existe autocorrelación en una Regresión lineal, sea simple o múltiple. Con ello se pretende ver si los valores presentan algún tipo de dependencia en cuanto al orden de obtención.

El contraste de hipótesis es el siguiente:

$$H_0: \rho = 0$$

$$H_1: \rho \neq 0$$

Se utiliza el software IBM SPSS estadístico, del cual se obtienen los siguientes resultados:

TABLA 29. Resultados de test Durbin-Watson modelo DQO (PRETRATAMIENTO).

	Estadístico d	d _L	d _U
Durbin-Watson	1,613	1,3988	1,603

Para los parámetros $n = 41$ y $k-1 = 2$. Se observa que el estadístico $d = 1,613 > d_U = 1,603$ por lo que no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula, por lo tanto, se cumple el supuesto de independencia.

5.6.4 Ajuste de modelo SST

Aplicando regresión a los SST del efluente de la planta en función de las demás variables independientes se obtiene un modelo de regresión lineal múltiple con la siguiente forma:

$$SST(S_i) = \beta_0 + \beta_1 * S_1 + \beta_2 * S_2 + \beta_3 * S_3 + \varepsilon$$

Donde ε corresponde al error de predicción del modelo, β_i $i=0,1,2,3$. corresponde a los coeficientes de regresión para cada variable predictora (excepto β_0 que es el coeficiente de intersección del modelo). Además S_i $i=1,2,3$. corresponden al valor que toma cada variable predictora. En la Tabla 30 se resumen los valores del modelo final ajustado de SST (PRETRATAMIENTO)

TABLA 30. Coeficientes del ajuste de modelo final SST (PRETRATAMIENTO).

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	COEF.
	Intercepto	β_0	35,4137
S_1	Caudal [L/s] AFLUENTE	β_1	0,4716
S_2	Basura de rejas [sacos/día]	β_2	-6,1222
S_3	Arenas [sacos/día]	β_3	-1,1997

5.6.4.1 Análisis de los residuos del modelo ajustado

Al visualizar los gráficos de los residuos de las tres variables independientes no se observa tendencia alguna. Así, el modelo es adecuado para los datos.

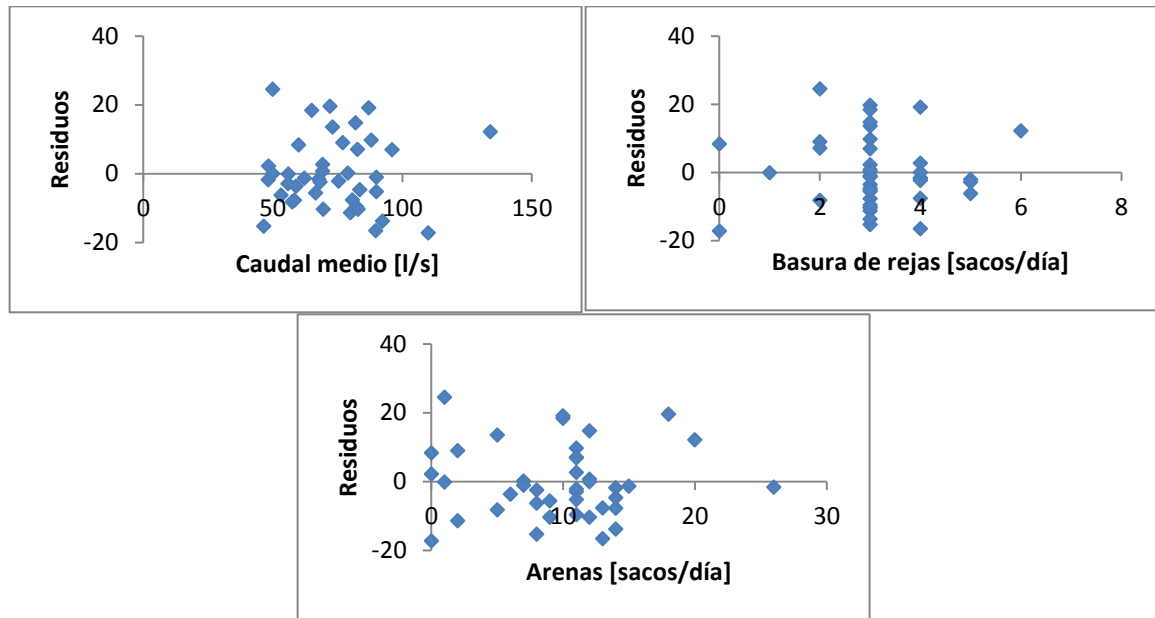


FIGURA 17. Gráfico de los residuos del modelo SST (PRETRATAMIENTO).

5.6.4.2 Análisis de la regresión

En la Tabla 31 se puede ver que el coeficiente de correlación múltiple, 0.7951, indica que existe un alto grado de asociación entre la variable respuesta y la variables predictoras. Además el porcentaje de variabilidad explicada por las variables independientes es de 60.24% en el modelo.

TABLA 31. Estadísticas de la regresión SST (PRETRATAMIENTO).

Coefficiente de correlación múltiple	0,7951
Coefficiente de determinación R^2	0,6322
R^2 ajustado	0,6024
Error típico	10,8625
Observaciones	41

A partir de los datos mostrados en la Tabla 31 y los valores de los residuos registrados en el ANEXO VII se puede observar que los errores se encuentran entre [-17.2903; 24.4501], lo

cual está contenido en $\pm 3 * \sqrt{CME} = \pm 3 * \text{Error típico} = \pm 32,5876$. Esto quiere decir que no existen puntos atípicos, por lo cual todos los datos son válidos para el modelo.

5.6.4.3 Significancia del modelo

Para estudiar la significancia del modelo se debe contrastar las siguientes hipótesis:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$$

$$H_1: \text{Algún } \beta_i \neq 0, i=1,2,3.$$

El estadístico de prueba para esta hipótesis es la prueba F. Los resultados se resumen en la Tabla 32.

TABLA 32. ANOVA modelo SST (PRETRATAMIENTO).

<i>ANÁLISIS DE VARIANZA</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	3	7504,558	2501,5193	21,200235	3,673E-08
Residuos	37	4365,8109	117,99489		
Total	40	11870,369			

De la Tabla 32 se obtiene el valor crítico de F, corresponde al p-value=3,673E-08, lo que es altamente menor a un nivel de significancia $\alpha=0,05$. Esto es evidencia suficiente para rechazar nuestra hipótesis nula H_0 en favor de H_1 .

5.6.4.4 Significancia individual de los coeficientes del modelo

Ahora se debe investigar cuáles de los coeficientes asociados a cada variable del modelo son significativos, y para ello se realiza los contrastes de las hipótesis individuales.

$$H_0: \quad H_0: \beta_1=0, \quad H_0: \beta_2=0, \quad H_0: \beta_3=0$$

$$H_1: \quad H_1: \beta_1 \neq 0, \quad H_1: \beta_2 \neq 0, \quad H_1: \beta_3 \neq 0$$

El estadístico de prueba para estas hipótesis es la prueba t. (ver Tabla 33).

TABLA 33. Estadísticos de pruebas individuales modelo SST (PRETRATAMIENTO).

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	COEF.	Error típico	Estadístico <i>t</i>	P-VALUE	Inferior 95%	Superior 95%
	Intercepto	β_0	35,4137	8,3328	4,2499	0,0001	18,5299	52,2975
S ₁	Caudal [L/s] AFLUENTE	β_1	0,4716	0,0984	4,7951	2,65E-05	0,2723	0,6709
S ₂	Basura de rejillas [sacos/día]	β_2	-6,1222	1,8625	-3,2871	0,0022	-9,8960	-2,3484
S ₃	Arenas [sacos/día]	β_3	-1,1997	0,4012	-2,9903	0,0049	-2,0125	-0,3868

De los resultados mostrados en la Tabla 33 se puede observar que los p-value de las hipótesis de significancia de los coeficientes de regresión de las variables S₁, S₂ y S₃ con valores de 2,65E-05, 0,0022 y 0,0049 respectivamente son menores al nivel de significancia de 0.05. Sus respectivos intervalos de confianza para el mismo nivel de significancia no está contenido el cero. Existe evidencia suficiente para rechazar las hipótesis nulas de los cuatro coeficientes, en favor de H₁.

Se puede apreciar que el caudal del afluente de la planta, la basura extraída de las rejillas gruesa y fina, además de la arena es capaz de explicar 60.24% de la variabilidad de la variable respuesta sólidos suspendidos totales en el efluente de la planta.

El coeficiente β_1 puede ser interpretado en que por el aumento promedio diario de un litro por segundo de agua residual que ingrese a la planta, aumentará en 0.4716 mg/L la concentración de sólidos suspendidos totales en efluente de la planta.

El coeficiente β_2 indica que cada saco de basura de las rejillas gruesa y fina extraída en el pretratamiento por día, influirá directamente en la disminución de 6,1222 mg/L en la concentración de los sólidos suspendidos totales en el efluente de la planta.

El coeficiente β_3 puede ser interpretado de la forma en que cada saco de arena extraído del desarenador del pretratamiento por día, influirá directamente en la disminución 1,1997 mg/L en la concentración de los sólidos suspendidos totales en el efluente de la planta.

Al ser la extracción de sacos de arenas y desechos sólidos, inversamente proporcional a la concentración de los SST en el efluente de la planta, se sugiere de igual forma que en el modelo de DBO₅ y DQO, el aumento en la frecuencia de extracción de sacos y el estudio de funcionamiento del desarenador.

Además es recomendable regular el ingreso del caudal de agua residual a la planta. Esto a nivel operativo es posible realizar, ya que se tiene el control de caudal de entrada. Para esto se deberá estudiar cual es el caudal mínimo que no perjudique el funcionamiento óptimo de la PTAS.

Por lo tanto el modelo final para la predicción de los niveles de los sólidos suspendidos totales en el efluente de la planta en función de las variables del pretratamiento, queda de la siguiente forma.

$$SST_{EF}(S_i) = 35,4137 + 0,4716*(Caudal_{AF}) - 6,1222*(B.rejas) - 1,1997*(Arena)$$

5.6.4.5 Supuesto de varianza constante para existencia del modelo

Para estudiar si existe heterocedasticidad se deben contrastar las siguientes hipótesis:

$$H_0: \sigma^2 = \text{constante}$$

$$H_1: \sigma^2 = f(x)$$

Se utilizó el test de Breusch-Pagan, del cual se obtienen los siguientes resultados en el software R commander.

TABLA 34. Resultados de test Breusch-Pagan modelo SST (PRETRATAMIENTO).

	BP	p-value
Breusch-Pagan	1,812	0,1783

Aquí se obtiene un p-value =0.1783, por lo tanto no existe evidencia para rechazar la hipótesis nula en favor de H₁. Así el modelo predice por igual precisión para distintos niveles de las variables independientes, y se cumple condición de homocedasticidad.

5.6.4.6 Supuesto de normalidad de los residuos para existencia del modelo

Para estudiar normalidad de los errores se realizó el contraste de:

$$H_0: \varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$$

$$H_1: \varepsilon \not\sim N(0, \sigma^2)$$

Se aplicó el test de kolmogorov-Smirnov. Con el software IBM SPSS estadístico, obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla 35.

TABLA 35. Resultados de test de Kolmogorov-Smirnov modelo SST (PRETRATAMIENTO).

Kolmogorov-Smirnov	Estadístico	G.L.	Significancia
Residuos SST	0,132	41	0,071

*: Este es un límite inferior de la significancia verdadera

Los resultados de la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov arrojan una significancia de 0.071, lo que indica para un nivel de significancia de 5% que no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula en favor de H_1 . Así, el supuesto de distribución normal de los residuos se cumple.

5.6.4.7 Supuesto de independencia para la existencia del modelo

El Test de Durbin-Watson permite evaluar si existe autocorrelación en una Regresión lineal, sea simple o múltiple. Con ello se pretende ver si los valores presentan algún tipo de dependencia en cuanto al orden de obtención.

El contraste de hipótesis utilizado es el siguiente:

$$H_0: \rho = 0$$

$$H_1: \rho \neq 0$$

Se aplicó el software IBM SPSS estadístico, y se generaron los resultados mostrados en la Tabla 36.

TABLA 36. Resultados de test Durbin-Watson modelo SST (PRETRATAMIENTO).

	Estadístico d	d_L	d_U
Durbin-Watson	1,499	1,3470	1,6604

Para los parámetros $n = 41$ y $k-1 = 3$, se observa que el estadístico se encuentra entre los límites $d_L = 1,3470 < d = 1,499 < d_U = 1,6604$ por lo que el test no es decisivo. Es por ello que se procedió a realizar un análisis gráfico.

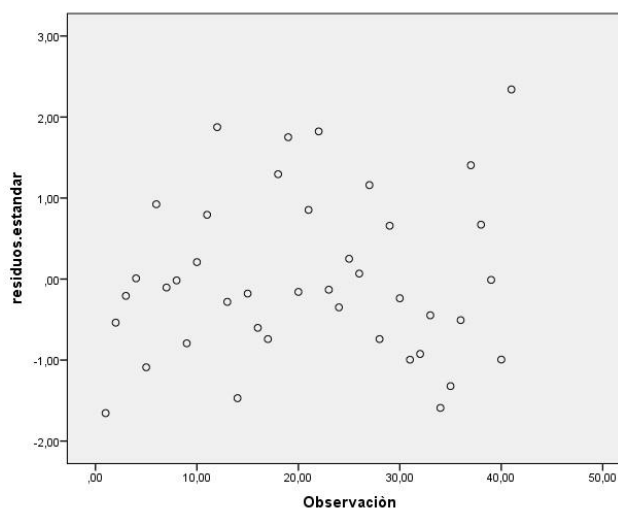


FIGURA 18. Análisis de independencia de los residuos SST (PRETRATAMIENTO).

De la FIGURA 18 se aprecia que los residuos no muestran tendencia, es decir, se distribuyen aleatoriamente, por lo tanto, se cumple el supuesto de independencia.

5.7 Ajuste de modelos particulares en tratamiento BIOLÓGICO-SECUNDARIO

En esta sección se modelan las variables respuestas de DBO_5 , DQO y SST en el efluente de la planta, en función de las variables del tratamiento biológico-secundario con capacidad de decisión como Oxígeno Disuelto en la zanja de oxidación [mg/L], Sedimentación del licor mezclado de la zanja de oxidación en 30 minutos [ml/L], Volumen recirculado [$m^3/día$] y Volumen purgado [$m^3/día$].

Al igual que en el pretratamiento, es necesario analizar multicolinealidad entre las variables, es decir, el nivel de relación que existe entre ellas. Como este análisis es común para los tres modelos que se ajustarán en el tratamiento BIOLÓGICO-SECUNDARIO, se

hará antes de comenzar el procedimiento de ajuste. Para ello se debe calcular el factor de inflación de la varianza, cuyo resultado es observable al multiplicar las diagonales de forma escalar de la matriz de varianzas y covarianza con la matriz inversa de varianzas y covarianzas.

5.7.1 Multicolinealidad

La matriz de varianzas y covarianzas observada en la TABLA 37 entrega una medida de la asociación lineal que existe entre las variables. Sin embargo, no considera que las variables se encuentren en diferentes unidades de medida.

TABLA 37. Matriz de varianzas y covarianzas de variables tratamiento BIOLÓGICO-SECUNDARIO.

		BIOLÓGICO-SECUNDARIO			
		<i>OD</i>	<i>S. SED. 30'</i>	<i>VOL.REC.</i>	<i>VOL.PUR.</i>
BIOLÓGICO-SECUNDARIO	<i>OD</i>	0,169	64,462	-237,825	-19,902
	<i>S. SED. 30'</i>	64,462	26600,476	-82839,536	-6999,839
	<i>VOL.REC.</i>	-237,825	-82839,536	2932343,709	74623,541
	<i>VOL.PUR.</i>	-19,902	-6999,839	74623,541	17362,880

En general se observa que las varianzas de las variables son diversas. La mayor de ellas es la del volumen de recirculación con un valor de 2932343,709 (m³/día)² de varianza. Este valor es mucho mayor a la varianza del nivel de oxígeno disuelto en la zanja de oxidación con un valor de 0,169 (mg/L)². En la TABLA 38, se puede apreciar la matriz inversa de varianzas y covarianzas.

TABLA 38. Matriz inversa de varianzas y covarianzas de variables tratamiento BIOLÓGICO-SECUNDARIO.

		BIOLÓGICO-SECUNDARIO			
		<i>OD</i>	<i>S. SED. 30'</i>	<i>VOL.REC.</i>	<i>VOL.PUR.</i>
BIOLÓGICO-SECUNDARIO	<i>OD</i>	8,520	-0,200	0,001	0,013
	<i>S. SED. 30'</i>	-0,200	5,14E-05	-1,28E-06	-1,66E-05
	<i>VOL.REC.</i>	9,25E-04	-1,28E-06	4,11E-07	-1,22E-06
	<i>VOL.PUR.</i>	0,013	-1,66E-05	-1,22E-06	7,11E-05

En la TABLA 39, se ofrecen los factores de inflación de varianzas obtenidos de la multiplicación escalar de ambas matrices antes mencionadas. Se observa que todos los factores de inflación de varianza se encuentran entorno al valor 1. Siendo la más alta de ellas el oxígeno disuelto en la zanja de oxidación con un VIF de 1,438, la sedimentación en 30 minutos del licor mezclado con un valor de 1,368; y el volumen de recirculación y purgados con valores de 1,205 y 1,234 respectivamente. Al tener todos valores inferiores a 10 (VIF<10) sirve como evidencia para afirmar que no existe multicolinealidad severa. No se puede afirmar que no existe multicolinealidad ya que para ello todos los VIF's tendrían que haber tomado valores iguales a uno.

TABLA 39. Factores de inflación de varianza de variables tratamiento BIOLÓGICO-SECUNDARIO.

		BIOLÓGICO-SECUNDARIO			
		<i>OD</i>	<i>S. SED. 30'</i>	<i>VOL.REC.</i>	<i>VOL.PUR.</i>
BIOLÓGICO- SECUNDARIO	<i>OD</i>	1,438			
	<i>S. SED. 30'</i>		1,368		
	<i>VOL.REC.</i>			1,205	
	<i>VOL.PUR.</i>				1,234

A continuación se ajustará como regresión en Microsoft Excel los tres modelos de DQO, SST y DBO₅ en el efluente de la planta de tratamiento de aguas servidas, por separado, en función de las cuatro variables predictoras con capacidad de decisión existentes en el tratamiento BIOLÓGICO SECUNDARIO y se procederá a la validación de ellas y modificaciones que se estime conveniente.

5.7.2 Ajuste de modelo DBO₅

Aplicando regresión con la DBO₅ del efluente de la planta, en función de las demás variables independientes se obtiene un modelo de regresión lineal múltiple con la siguiente forma:

$$DBO_5(S_i) = \beta_0 + \beta_1 * S_1 + \beta_2 * S_2 + \beta_3 * S_3 + \beta_4 * S_4 + \varepsilon$$

Donde ε corresponde al error de predicción del modelo, β_i $i=0,1,2,3,4$. corresponde a los coeficientes de regresión para cada variable predictora (excepto β_0 que es el coeficiente de

intersección del modelo). Además S_i $i=1,2,3,4$. corresponden al valor que toma cada variable predictora. Los cuales tras el ajuste de modelo se describen en la siguiente tabla.

TABLA 40. Símbolos de las variables predictoras DBO₅ (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).

<i>SÍMBOLO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>
	Intercepto
S_1	Oxígeno Disuelto [mg/L]
S_2	Sólidos Sedimentables a 30' [ml/L]
S_3	Volumen Recirculado [m ³ /día]
S_4	Volumen Purgado [m ³ /día]

Sin embargo, una vez ajustado el modelo se debe seguir el procedimiento de validación de siete pasos mostrado en la metodología. Si uno de ellos muestra cambio, se debe modificar el modelo y comenzar nuevamente una y otra vez con el análisis de regresión, pudiendo resultar un poco repetitivo para el lector. Es por esto que se mostrará sólo el análisis de la regresión de la última iteración de cada modelo en el cuerpo de esta lectura, quedando el análisis completo y detallado en los ANEXOS. El procedimiento del ajuste y validación de DBO₅ en el tratamiento BIOLÓGICO-SECUNDARIO se encuentra en el ANEXO VIII.

Al llegar a la segunda iteración del modelo de DBO₅ con variables predictoras del tratamiento BIOLÓGICO-SECUNDARIO se debe obtener un ajuste de la siguiente forma:

$$DBO_5 (S_i) = \beta_0 + \beta_1 * S_1 + \beta_3 * S_3$$

Cuyos valores se describen en la Tabla 41.

TABLA 41. Coeficientes del ajuste de modelo final DBO₅ (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).

<i>SÍMBOLO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>SÍMBOLO</i>	<i>COEF.</i>
	Intercepto	β_0	26,9907
S_1	Oxígeno Disuelto [mg/L]	β_1	-12,8086
S_3	Volumen Recirculado [m ³ /día]	β_3	0,0015

5.7.2.1 Análisis de los residuos del modelo ajustado

Al visualizar los gráficos de los residuos de las dos variables independientes restantes no se observa tendencia o comportamiento en ninguno de ellos, así, el modelo es adecuado para los datos.

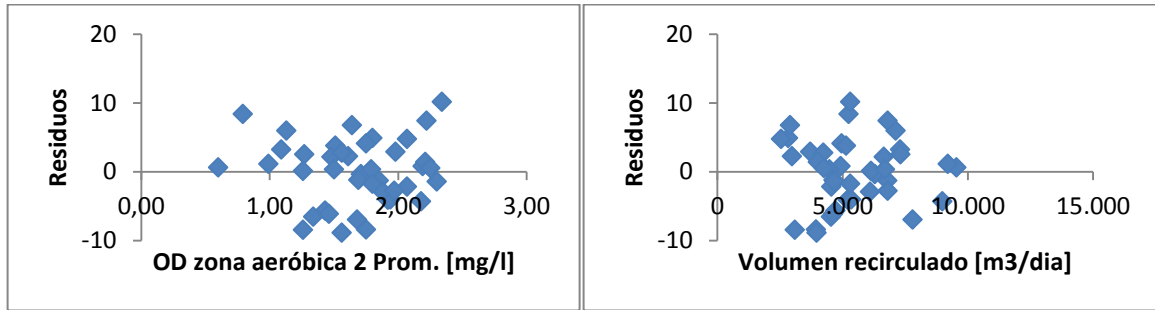


FIGURA 19. Análisis de los residuos del modelo DBO₅ (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).

5.7.2.2 Análisis de la regresión

En la Tabla 42 se puede ver que el coeficiente de correlación múltiple, 0,8146, indica que existe un alto grado de asociación entre la variable respuesta y la variables predictoras. Además el porcentaje de variabilidad explicada por las variables independientes es de 64,58% en el modelo, mostrando una variación insignificante con respecto al ajuste anterior.

TABLA 42. Estadísticas de la regresión DBO₅ (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).

Coeficiente de correlación múltiple	0,8146
Coeficiente de determinación R ²	0,6635
R ² ajustado	0,6458
Error típico	4,8533
Observaciones	41

Los resultados mostrados en la Tabla 42 y los residuos registrados en el ANEXO IX se puede observar que los errores se encuentran entre [-8.8529; 10.1649], lo cual está contenido en $\pm 3 * \sqrt{CME} = \pm 3 * \text{Error típico} = \pm 14,5599$. Esto quiere decir que no existen puntos atípicos, por lo cual todos los datos son válidos para el modelo.

5.7.2.3 Significancia del modelo

Para estudiar la significancia del modelo se debe contrastar las siguientes hipótesis:

$$H_0: \beta_1 = \beta_3 = 0$$

$$H_1: \text{Algún } \beta_i \neq 0, i=1,3.$$

El estadístico de prueba para esta hipótesis es la prueba F, que se obtiene de la siguiente tabla.

TABLA 43. ANOVA modelo DBO₅ (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).

<i>ANÁLISIS DE VARIANZA</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	1765,1236	882,56181	37,468905	1,028E-09
Residuos	38	895,0715	23,554513		
Total	40	2660,1951			

De aquí se puede obtener el valor crítico de F, que corresponde al p-value=1,028E-09 lo cual es altamente menor a un nivel de significancia $\alpha=0,05$. Esto es evidencia suficiente para rechazar nuestra hipótesis nula H_0 en favor de H_1 .

5.7.2.4 Significancia individual de los coeficientes del modelo

Ahora se debe investigar cuáles de los coeficientes asociados a cada variable del modelo son significativos, y para ello se realiza los contrastes de las hipótesis individuales.

$$H_0: \quad H_0: \beta_1=0, \quad H_0: \beta_3=0$$

$$H_1: \quad H_1: \beta_1 \neq 0, \quad H_1: \beta_3 \neq 0,$$

El estadístico de prueba para estas hipótesis es la prueba t, cuyos p-value se observan en la Tabla 44.

TABLA 44. Estadísticos de pruebas individuales modelo DBO₅ (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	COEF.	Error típico	Estadístico <i>t</i>	P-VALUE	Inferior 95%	Superior 95%
	Intercepto	β_0	26,9907	4,8501	5,5650	2,25E-06	17,1722	36,8093
S ₁	OD [mg/L]	β_1	-12,8086	1,9602	-6,5342	1,06E-07	-16,7769	-8,8403
S ₃	VOL. Recirculado[m ³ /día]	β_3	0,0015	0,0005	3,1352	0,0033	0,0005	0,0024

Aquí se puede observar que los p-value de las hipótesis de significancia de los coeficientes de regresión de las variables S₁ y S₃ con valores de 1,06E-07 y 0,0033, respectivamente, son menores al nivel de significancia de 0.05. Sus respectivos intervalos de confianza para el mismo nivel de significancia no está contenido el cero, existe evidencia suficiente para rechazar las hipótesis nulas de los cuatro coeficientes, en favor de H₁.

Se puede apreciar que el nivel de oxígeno disuelto en la zanja de oxidación en conjunto con el volumen de recirculación de lodos son capaces de explicar 64.58% de la variabilidad de la variable respuesta demanda bioquímica de oxígeno en cinco días DBO₅.

El coeficiente β_1 indica que el aumento promedio diario de 1 mg/L de oxígeno disuelto en la zanja de oxidación, influirá directamente en la disminución de 12,8086 mg/L en la concentración de la demanda bioquímica de oxígeno en cinco días en el efluente de la planta.

El coeficiente β_3 puede ser interpretado de la forma en que por cada metro cúbico de recirculación de lodos que se aumente en el tratamiento biológico secundario por día, se estima que la concentración de la demanda bioquímica de oxígeno en cinco días en el efluente de la planta aumentará en proporción de 0.0015 mg/L.

Se tiene certeza que el aumento de los niveles de oxígeno disuelto en la zanja de oxidación tiene directa relación con la frecuencia de los aireadores del proceso. Sin embargo, no se sabe con exactitud el nivel de frecuencia que este debe alcanzar para obtener un tratamiento óptimo. Por lo tanto se sugiere estudiar la relación entre la frecuencia del aireador y los

niveles de OD, además del tiempo que debe funcionar el reactor en cada frecuencia para alcanzar el máximo nivel deseado de Oxígeno Disuelto.

Además este modelo nos arroja que el aumento del volumen de recirculación influirá negativamente en los niveles de DBO₅ en el efluente. Por lo que se debe controlar principalmente los aumentos bruscos en la recirculación, porque no hay que olvidar que este lodo ingresa nuevamente al tratamiento biológico para mantener la biomasa del proceso.

Por lo tanto el modelo final para la predicción de los niveles de la demanda bioquímica de oxígeno en cinco días en el efluente de la planta en función de las variables del tratamiento biológico-secundario, queda de la siguiente forma.

$$DBO_{5EF}(S_i) = 26,9907 - 12,8086*(OD) + 0,0015*(VOL.rec.)$$

5.7.2.5 Supuesto de varianza constante para existencia del modelo

Para estudiar si existe heterocedasticidad se deben contrastar las siguientes hipótesis:

$$H_0: \sigma^2 = \text{constante}$$

$$H_1: \sigma^2 = f(x)$$

Se utilizó el test de Breusch-Pagan, a través del software R commander.

TABLA 45. Resultados de test Breusch-Pagan modelo DBO₅ (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).

	BP	p-value
Breusch-Pagan	0,0594	0,8074

El valor p-value =0.8074, mostrado en la Tabla 45 indica que para un nivel de significancia del 5%, no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula en favor de H₁. Así el

modelo predice por igual precisión para distintos niveles de las variables independientes, y se cumple condición de homocedasticidad.

5.7.2.6 Supuesto de normalidad de los residuos para existencia del modelo

Para estudiar normalidad de los errores se realizó el contraste de:

$$H_0: \varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$$

$$H_1: \varepsilon \sim \sim N(0, \sigma^2)$$

Para lo cual se aplicó el test de kolmogorov-Smirnov, utilizando el software IBM SPSS stadistic. Los resultados se resumen en la Tabla 46.

TABLA 46. Resultados de test de Kolmogorov-Smirnov modelo DBO₅ (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).

Kolmogorov-Smirnov	Estadístico	G.L.	Significancia
Residuos DBO ₅	0,069	41	0,200*

*: Este es un límite inferior de la significancia verdadera

Esta tabla de pruebas de normalidad se puede observar que la prueba de Kolmogorov-Smirnov arroja una significancia de 0.200*, lo que nos indica que no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula en favor de H₁. Así se cumple el supuesto de que los residuos siguen una distribución normal.

5.7.2.7 Supuesto de independencia para existencia del modelo

El Test de Durbin-Watson permite evaluar si existe autocorrelación en una Regresión lineal, sea simple o múltiple. Con ello se pretende ver si los valores presentan algún tipo de dependencia en cuanto al orden de obtención. El contraste de hipótesis es el siguiente:

$$H_0: \rho = 0$$

$$H_1: \rho \neq 0$$

Se utilizó el software IBM SPSS estadístico, del cual se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 47.

TABLA 47. Resultados de test Durbin-Watson modelo DBO₅ (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).

	Estadístico d	d _L	d _U
Durbin-Watson	1,454	1,3988	1,603

Para los parámetros $n = 41$ y $k-1 = 2$. Se observa que el estadístico se encuentra entre los límites $d_L = 1,3988 < d = 1,454 < d_U = 1,603$ por lo que el test no es decisivo. Es por ello que se realiza un análisis gráfico ver FIGURA 20.

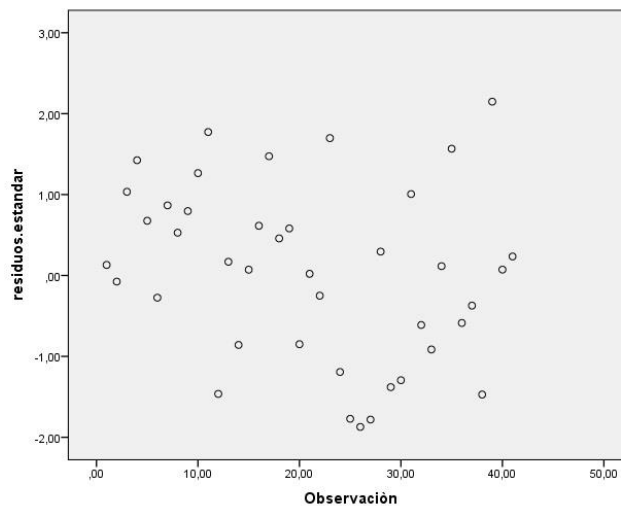


FIGURA 20. Análisis de independencia de los residuos DBO₅ (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).

De la FIGURA 20 Se puede observar que los residuos no muestran tendencia, es decir, se distribuyen aleatoriamente, por lo tanto, se cumple el supuesto de independencia.

5.7.3 Ajuste de modelo DQO

Aplicando regresión con la DQO efluente en función de las demás variables independientes se obtiene un modelo de regresión lineal múltiple con la siguiente forma:

$$DQO(S_i) = \beta_0 + \beta_1 * S_1 + \beta_2 * S_2 + \beta_3 * S_3 + \beta_4 * S_4 + \varepsilon$$

Donde ε corresponde al error de predicción del modelo, β_i $i=0,1,2,3,4$. corresponde a los coeficientes de regresión para cada variable predictora (excepto β_0 que es el coeficiente de intersección del modelo). Además S_i $i=1,2,3,4$. corresponden al valor que toma cada variable predictora. Los cuales tras el ajuste de modelo se describen en la siguiente tabla.

TABLA 48. Símbolos de las variables predictoras DQO (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).

<i>SÍMBOLO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>
	Intercepto
S_1	Oxígeno Disuelto [mg/L]
S_2	Sólidos Sedimentables a 30' [ml/L]
S_3	Volumen Recirculado [m^3 /día]
S_4	Volumen Purgado [m^3 /día]

Sin embargo, una vez ajustado el modelo se debe seguir el procedimiento de validación de siete pasos mostrado en la metodología, y si uno de ellos muestra cambio, se debe modificar el modelo y comenzar nuevamente una y otra vez con el análisis, pudiendo resultar un poco repetitivo para el lector. Es por esto que se mostrará sólo el análisis de la última iteración de cada modelo en el cuerpo de esta lectura, quedando el análisis completo y detallado en los ANEXOS. El procedimiento del ajuste y validación de DQO en el tratamiento biológico-secundario se encuentra en el ANEXO X.

Al llegar a la segunda iteración del modelo de DQO con variables predictoras del tratamiento biológico-secundario se debe obtener un ajuste de la siguiente forma:

$$DQO (S_i) = \beta_0 + \beta_1 * S_1 + \beta_3 * S_3$$

Cuyos valores se describen en la siguiente tabla.

TABLA 49. Coeficientes del ajuste de modelo final DQO (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).

<i>SÍMBOLO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>SÍMBOLO</i>	<i>COEF.</i>
----------------	--------------------	----------------	--------------

	Intercepto	β_0	76,3264
S ₁	Oxígeno Disuelto [mg/L]	β_1	-26,5674
S ₃	Volumen Recirculado [m ³ /día]	β_3	0,0032

5.7.3.1 Análisis de los residuos del modelo ajustado

Al visualizar los gráficos de los residuos de las dos variables independientes restantes no se observa tendencia o comportamiento en ninguno de ellos, así, el modelo es adecuado para los datos.

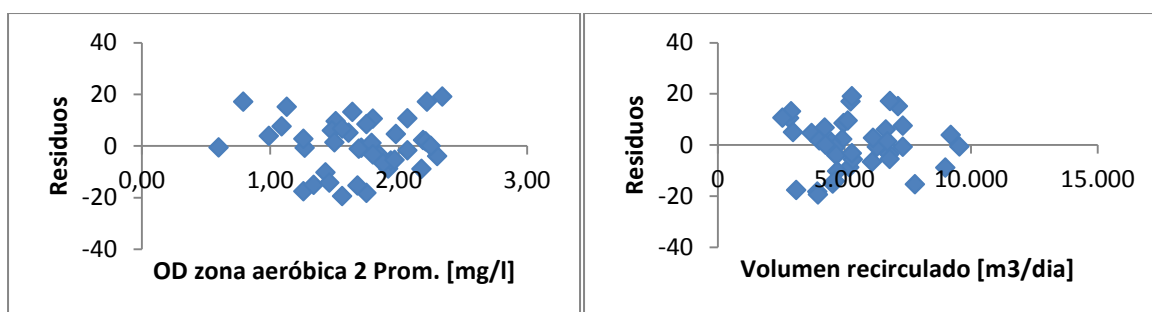


FIGURA 21. Análisis de los residuos del modelo DQO (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).

5.7.3.2 Análisis de la regresión

En la Tabla 50 se puede ver que el coeficiente de correlación múltiple, 0,8101, indica que existe un alto grado de asociación entre la variable respuesta y la variables predictoras. Además el porcentaje de variabilidad explicada por las variables independientes es de 63,81% en el modelo, mostrando una variación insignificante con respecto al ajuste anterior.

TABLA 50. Estadísticas de la regresión DQO (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).

Coeficiente de correlación múltiple	0,8101
Coeficiente de determinación R ²	0,6562
R ² ajustado	0,6381
Error típico	10,3281
Observaciones	41

En los datos de la tabla anterior y residuos del ANEXO XI se puede observar que los errores se encuentran entre [-19.4488; 19.0306], lo cual está contenido en $\pm 3 * \sqrt{CME} = \pm 3 * \text{Error típico} = \pm 30,9843$. Esto quiere decir que no existen puntos atípicos, por lo cual todos los datos son válidos para el modelo.

5.7.3.3 Significancia del modelo

Para estudiar la significancia del modelo se debe contrastar las siguientes hipótesis:

$$H_0: \beta_1 = \beta_3 = 0$$

$$H_1: \text{Algún } \beta_i \neq 0, i=1,3.$$

El estadístico de prueba para esta hipótesis es la prueba F, En la Tabla 51 se indican los resultados del análisis de varianza.

TABLA 51. ANOVA modelo DQO (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).

<i>ANÁLISIS DE VARIANZA</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	7736,9383	3868,4691	36,265837	1,548E-09
Residuos	38	4053,452	106,66979		
Total	40	11790,39			

El valor crítico de F, que corresponde al p-value=1,548E-09 es menor a un nivel de significancia $\alpha=0,05$. Esto es evidencia suficiente para rechazar nuestra hipótesis nula H_0 en favor de H_1 .

5.7.3.4 Significancia individual de los coeficientes del modelo

Ahora se debe investigar cuáles de los coeficientes asociados a cada variable del modelo son significativos, y para ello se realiza los contrastes de las hipótesis individuales.

$$H_0: \quad H_0: \beta_1=0, \quad H_0: \beta_3=0$$

$$H_1: \quad H_1: \beta_1 \neq 0, \quad H_1: \beta_3 \neq 0,$$

El estadístico de prueba para estas hipótesis es la prueba t, cuyos p-value se observan en la siguiente tabla.

TABLA 52. Estadísticos de pruebas individuales modelo DQO (BIOLÓGICO-SECUNDARIO)

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	COEF.	Error típico	Estadístico t	P-VALUE	Inferior 95%	Superior 95%
	Intercepto	β_0	76,3264	10,3213	7,3950	7,23E-09	55,4319	97,2208
S ₁	OD [mg/L]	β_1	-26,5674	4,1715	-6,3687	1,78E-07	-35,0122	-18,1226
S ₃	VOL. Recirculado[m ³ /día]	β_3	0,0032	0,0010	3,1685	0,0030	0,0011	0,0052

De la Tabla 52 se puede observar que los p-value de las hipótesis de significancia de los coeficientes de regresión de las variables S₁ y S₃ con valores de 1,78E-07 y 3E-03 respectivamente son menores al nivel de significancia de 0,05. Sus respectivos intervalos de confianza para el mismo nivel de significancia no está contenido el cero. Existe evidencia suficiente para rechazar las hipótesis nulas de los cuatro coeficientes, en favor de H₁.

Se puede apreciar que el nivel de oxígeno disuelto en la zanja de oxidación en conjunto con el volumen de recirculación de lodos son capaces de explicar 63.81% de la variabilidad de la variable respuesta demanda química de oxígeno en el efluente.

El coeficiente β_1 indica que el aumento de 1 mg/L promedio diario de oxígeno disuelto en la zanja de oxidación, influirá directamente en la disminución de 26,5674 mg/L en la concentración de la demanda química de oxígeno en el efluente de la planta.

El coeficiente β_3 puede ser interpretado de la forma en que por cada metro cúbico de recirculación promedio diaria de lodos que se aumente en el tratamiento biológico secundario, se estima que la concentración de la demanda química de oxígeno en el efluente de la planta aumentará en proporción de 0.0032 mg/L.

Se tiene certeza que el aumento de los niveles de oxígeno disuelto en la zanja de oxidación tiene directa relación con la frecuencia de los aireadores del proceso. Sin embargo, no se sabe con exactitud el nivel de frecuencia que este debe alcanzar para obtener un tratamiento óptimo. Por lo tanto al igual que en el modelo DBO₅ de tratamiento biológico-secundario, se sugiere estudiar la relación entre la frecuencia del aireador y los niveles de Oxígeno Disuelto.

Como el aumento del volumen de recirculación influirá negativamente en los niveles de DQO en el efluente, se debe controlar principalmente los aumentos bruscos en la recirculación. No hay que olvidar que este lodo ingresa nuevamente al tratamiento biológico para mantener la biomasa del proceso. Además crea remoción de lodos al fondo del tanque clarificador, lo cual podría aportar al impacto negativo en la demanda química de oxígeno

Por lo tanto el modelo final para la predicción de los niveles de la demanda química de oxígeno en el tratamiento biológico secundario, queda de la siguiente forma.

$$DQO_{EF}(S_i) = 76,3264 - 26,5674*(OD) + 0,0032*(VOL.rec.)$$

5.7.3.5 Supuesto de varianza constante para existencia del modelo

Para estudiar si existe heterocedasticidad se deben contrastar las siguientes hipótesis:

$$H_0: \sigma^2 = \text{constante}$$

$$H_1: \sigma^2 = f(x)$$

Se aplicó el test de Breusch-Pagan, utilizando el software R commander.

TABLA 53. Resultados de test Breusch-Pagan modelo DQO (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).

	BP	p-value
Breusch-Pagan	1E-04	0,9925

Los resultados mostrados en la Tabla 53 indican un valor de p-value =0.9925, por lo tanto para un nivel de significancia de 5% no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula en favor de H_1 . Así el modelo predice por igual precisión para distintos niveles de las variables independientes, y se cumple el supuesto de homocedasticidad.

5.7.3.6 Supuesto de normalidad de los residuos para existencia del modelo

Para estudiar normalidad de los errores se realizará el contraste de:

$$H_0: \varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$$

$$H_1: \varepsilon \not\sim N(0, \sigma^2)$$

Para lo cual se realizó el test de kolmogorov-Smirnov, aplicando el software SPSS estadístico de IBM, del cual se obtienen los siguientes resultados:

TABLA 54. Resultados de test de Kolmogorov-Smirnov modelo DQO (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).

Kolmogorov-Smirnov	Estadístico	G.L.	Significancia
Residuos DQO	0,068	41	0,200*

*: Este es un límite inferior de la significancia verdadera

Los resultados de la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov arroja una significancia de 0.200*, (límite inferior de la significancia verdadera), lo que indica que no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula en favor de H_1 . Así se cumple el supuesto de que los residuos siguen una distribución normal.

5.7.3.7 Supuesto de independencia para existencia del modelo

El Test de Durbin-Watson permite evaluar si existe autocorrelación en una Regresión lineal, sea simple o múltiple. Con ello se pretende ver si los valores presentan algún tipo de dependencia en cuanto al orden de obtención. El contraste de hipótesis es el siguiente:

$$H_0: \rho = 0$$

$$H_1: \rho \neq 0$$

Se utilizó el software SPSS estadístico de IBM, del cual se obtienen los siguientes resultados:

TABLA 55. Resultados de test Durbin-Watson modelo DQO (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).

	Estadístico d	d_L	d_U
Durbin-Watson	1,415	1,3988	1,603

Para los parámetros $n = 41$ y $k-1 = 2$, se observa que el estadístico se encuentra entre los límites $d_L = 1,3988 < d = 1,415 < d_U = 1,603$ por lo que el test no es decisivo. Es por ello que se realizó un análisis gráfico (ver FIGURA 22).

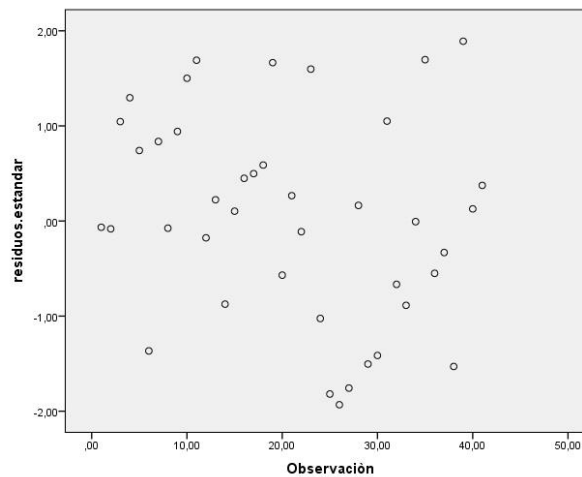


FIGURA 22. Análisis de independencia de los residuos DQO (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).

Los resultados mostrados en la FIGURA 22 no indican ninguna tendencia, se aprecia una distribución aleatoria. Por lo tanto, se cumple el supuesto de independencia.

5.7.4 Ajuste de modelo SST

Aplicando un análisis de regresión de SST en el efluente de la planta en función de las demás variables independientes del tratamiento biológico-secundario se obtiene un modelo de regresión lineal múltiple con la siguiente forma:

$$SST(S_i) = \beta_0 + \beta_1 * S_1 + \beta_2 * S_2 + \beta_3 * S_3 + \beta_4 * S_4 + \varepsilon$$

Donde ε corresponde al error de predicción del modelo, β_i $i=0,1,2,3,4$. corresponde a los coeficientes de regresión para cada variable predictora (excepto β_0 que es el coeficiente de intersección del modelo). Además S_i $i=1,2,3,4$. corresponden al valor que toma cada variable predictora. (ver Tabla 56)

TABLA 56. Símbolos de las variables predictoras SST (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).

<i>SÍMBOLO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>
	Intercepto
S_1	Oxígeno Disuelto [mg/L]
S_2	Sólidos Sedimentables a 30' [ml/L]
S_3	Volumen Recirculado [m^3 /día]
S_4	Volumen Purgado [m^3 /día]

Sin embargo, una vez ajustado el modelo se debe seguir el procedimiento de validación de siete pasos mostrado en la metodología, y si uno de ellos muestra cambio, se debe modificar el modelo y comenzar nuevamente una y otra vez con el análisis, pudiendo resultar un poco repetitivo para el lector. Es por esto que se mostrará sólo el análisis de la última iteración de cada modelo en el cuerpo de esta lectura, quedando el análisis completo y detallado en los ANEXOS. El procedimiento del ajuste y validación de SST en el tratamiento biológico-secundario se encuentra en el ANEXO XII.

Al llegar a la segunda iteración del modelo de SST con variables predictoras del tratamiento biológico-secundario se debe obtener un ajuste de la siguiente forma:

$$SST(S_i) = \beta_0 + \beta_1 * S_1 + \beta_4 * S_4$$

La simbología se define en la Tabla 57.

TABLA 57. Coeficientes del ajuste de modelo final SST (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).

<i>SÍMBOLO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>SÍMBOLO</i>	<i>COEF.</i>
	Intercepto	β_0	69,2353
S_1	Oxígeno Disuelto [mg/L]	β_1	-22,6776
S_4	Volumen Purgado [m ³ /día]	β_4	0,0455

5.7.4.1 Análisis de los residuos del modelo ajustado

Al revisar los gráficos de los residuos de las dos variables independientes restantes no se observa tendencia o comportamiento en ninguno de ellos, así, el modelo es adecuado para los datos.

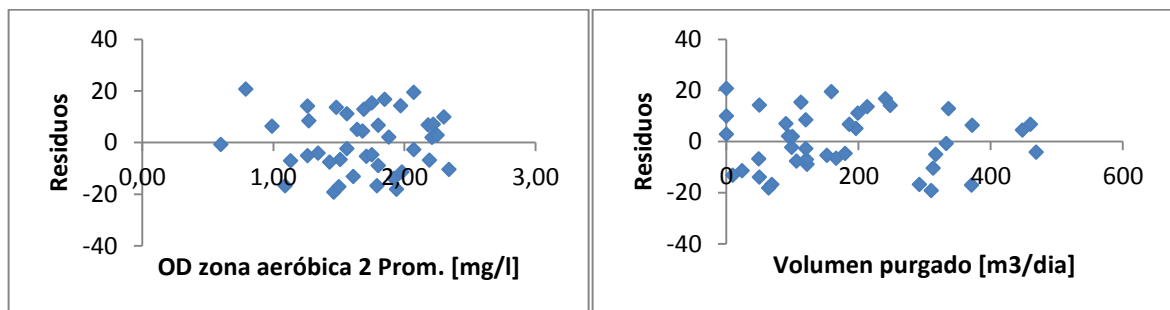


FIGURA 23. Análisis de los residuos del modelo SST (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).

5.7.4.2 Análisis de la regresión

Los resultados mostrados en la Tabla 58 indican que existe un alto grado de asociación entre la variable respuesta y la variables predictoras (coeficiente de correlación múltiple de 0.7523). El porcentaje de variabilidad explicada por las variables independientes es de 54.31% en el modelo, mostrando una variación insignificante con respecto al ajuste anterior.

TABLA 58. Estadísticas de la regresión SST (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).

Coeficiente de correlación múltiple	0,7523
Coeficiente de determinación R^2	0,5659
R^2 ajustado	0,5431
Error típico	11,6448
Observaciones	41

Los resultados mostrados en la Tabla 58 y en el ANEXO XIII indican que los errores se encuentran entre [-19.2329; 20.6800], lo cual está contenido en $\pm 3 * \sqrt{CME} = \pm 3 * \text{Error típico} = \pm 34,9345$. Esto quiere decir que no existen puntos atípicos, por lo cual todos los datos son válidos para el modelo.

5.7.4.3 Significancia del modelo

Para estudiar la significancia del modelo se debe contrastar las siguientes hipótesis:

$$H_0: \beta_1 = \beta_4 = 0$$

$$H_1: \text{Algún } \beta_i \neq 0, i=1,4.$$

El estadístico de prueba para esta hipótesis es la prueba F. Los resultados se resumen en la Tabla 59

TABLA 59. ANOVA modelo SST (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).

<i>ANÁLISIS DE VARIANZA</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	6717,4788	3358,7394	24,769031	1,301E-07
Residuos	38	5152,8902	135,60237		
Total	40	11870,369			

De la Tabla 58 se obtiene el valor crítico de F, que corresponde al p-value=1,301E-07 lo cual es menor a un nivel de significancia $\alpha=0,05$. Esto es evidencia suficiente para rechazar nuestra hipótesis nula H_0 en favor de H_1 .

5.7.4.4 Significancia individual de los coeficientes del modelo

Ahora se debe investigar cuáles de los coeficientes asociados a cada variable del modelo son significativos, y para ello se realiza los contrastes de las hipótesis individuales.

$$H_0: \quad H_0: \beta_1=0, \quad H_0: \beta_4=0$$

$$H_1: \quad H_1: \beta_1 \neq 0, \quad H_1: \beta_4 \neq 0,$$

El estadístico de prueba para estas hipótesis es la prueba t, cuyos p-value se observan en la siguiente tabla.

TABLA 60. Estadísticos de pruebas individuales modelo SST (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	COEF.	Error típico	Estadístico t	P-VALUE	Inferior 95%	Superior 95%
	Intercepto	β_0	69,2353	9,4813	7,3023	9,62E-09	50,0415	88,4291
S ₁	OD [mg/L]	β_1	-22,6776	4,7598	-4,7644	2,76E-05	-32,3133	-13,0420
S ₄	VOL. Purgado[m ³ /día]	β_4	0,0455	0,0148	3,0663	0,0040	0,0155	0,0756

De la Tabla 60 se puede observar que los p-value de las hipótesis de significancia de los coeficientes de regresión de las variables S₁ y S₄ con valores de 2,76E-05 y 4E-03, respectivamente, son menores al nivel de significancia de 0,05. En sus respectivos intervalos de confianza para el mismo nivel de significancia no está contenido el cero. Existe evidencia suficiente para rechazar las hipótesis nulas de los todos coeficientes, en favor de H₁.

Se puede apreciar que el nivel de oxígeno disuelto en la zanja de oxidación en conjunto con el volumen purgado de lodos son capaces de explicar 54,31% de la variabilidad de la variable respuesta demanda química de oxígeno en el efluente. Este porcentaje se considera moderado.

El coeficiente β_1 indica que el aumento de 1 mg/L promedio diario de oxígeno disuelto en la zanja de oxidación, influirá directamente en la disminución de 22,6776 mg/L en la concentración de sólidos suspendidos totales en el efluente de la planta.

El coeficiente β_4 indica que si se aumenta en un 1m^3 la purga extraída promedio diaria de lodos en el tratamiento biológico secundario, la concentración de los sólidos suspendidos totales en el efluente de la planta aumentará en proporción de 0,0455 mg/L.

Aquí se reafirma la importancia que tiene el nivel de oxígeno disuelto en la zanja de oxidación, pues es variable esencial en cada uno de los tres modelos ajustados en el subproceso de tratamiento biológico-secundario.

Como el aumento del volumen de extracción de purga al espesador influirá negativamente en los niveles de SST en el efluente de la planta, se debe controlar principalmente los aumentos bruscos al igual que en la recirculación.

La purga se extrae de la línea de la recirculación, se direcciona al espesador mediante la apertura de una válvula. Esto se realiza una vez que el nivel del manto de lodos que es medido directamente del clarificador secundario, es muy alto, por lo que la remoción en el fondo del subproceso puede ser muy brusca. Por esto se sugiere estudiar que ocurre cuando se extrae lodo en una forma más continua pero en menor volumen.

Finalmente el modelo para la predicción de los niveles de los sólidos suspendidos totales en el efluente de la planta en función de las variables del tratamiento biológico secundario, queda de la siguiente forma.

$$SST_{EF}(S_i) = 69,2353 - 22,6776*(OD) + 0,0455*(VOL.purg.)$$

5.7.4.5 Supuesto de varianza constante para existencia del modelo

Para estudiar si existe heterocedasticidad se deben contrastar las siguientes hipótesis:

$$H_0: \sigma^2 = \text{constante}$$

$$H_1: \sigma^2 = f(x)$$

Se utilizó el test de Breusch-Pagan, aplicando el software R commander.

TABLA 61. Resultados de test Breusch-Pagan modelo SST (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).

	BP	p-value
Breusch-Pagan	0,0244	0,8758

Aquí se obtiene un p-value =0.8758, por lo tanto con un nivel de significancia de $\alpha= 0,05$, no existe evidencia para rechazar la hipótesis nula en favor de H_1 . Así el modelo predice por igual precisión para distintos niveles de las variables independientes, y se cumple condición de homocedasticidad.

5.7.4.6 Supuesto de normalidad de los residuos para existencia del modelo

Para estudiar normalidad de los errores se realizará el contraste de:

$$H_0: \varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$$

$$H_1: \varepsilon \sim / \sim N(0, \sigma^2)$$

Para lo cual se aplicó el test de kolmogorov-Smirnov, utilizando el software SPSS estadistic de IBM.

TABLA 62. Resultados de test de Kolmogorov-Smirnov modelo SST (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).

Kolmogorov-Smirnov	Estadístico	G.L.	Significancia
Residuos SST	0,083	41	0,200*

*: Este es un límite inferior de la significancia verdadera

Los resultados de la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov arrojan una significancia de 0.200*, (límite inferior de la significancia verdadera), lo que indica que no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula en favor de H_1 . Así, se cumple con el supuesto de distribución normal de los residuos.

5.7.4.7 Supuesto de independencia para existencia del modelo

El Test de Durbin-Watson permite evaluar si existe autocorrelación en una Regresión lineal, sea simple o múltiple. Con ello se pretende ver si los valores presentan algún tipo de dependencia en cuanto al orden de obtención. El contraste de hipótesis es el siguiente:

$$H_0: \rho = 0$$

$$H_1: \rho \neq 0$$

Se utiliza el software SPSS estadístico de IBM, del cual se obtienen los siguientes resultados:

TABLA 63. Resultados de test Durbin-Watson modelo SST (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).

	Estadístico d	d_L	d_U
Durbin-Watson	1,595	1,3988	1,603

Para los parámetros $n = 41$ y $k-1 = 2$, se observa que el estadístico se encuentra entre los límites $d_L = 1,3988 < d = 1,595 < d_U = 1,603$ por lo que el test no es decisivo. Es por ello que se realiza un análisis gráfico (ver FIGURA 24).

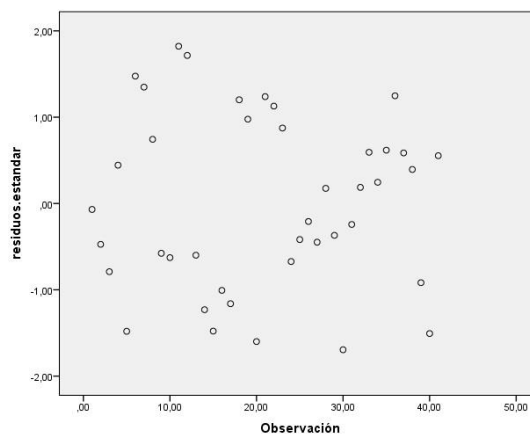


FIGURA 24. Análisis de independencia de los residuos SST (BIOLÓGICO-SECUNDARIO).

Se puede observar que los residuos no muestran tendencia, es decir, se distribuyen aleatoriamente. Se cumple el supuesto de independencia.

5.8 Ajuste de modelos globales

En primera instancia se formularon modelos a nivel global de la planta, utilizando DQO, DBO₅ y SST en el efluente como variable respuesta. Cada uno en función de trece variables e indicadores, con y sin capacidad de decisión, que se encuentran en los subprocesos de la planta de tratamiento.

Para poder ajustar modelos de pronósticos, es necesario analizar multicolinealidad entre las variables, es decir, el nivel de relación que existe entre ellas. Como este análisis es común para los tres modelos que se ajustarán, se hará antes de comenzar el procedimiento de ajuste. Para ello se calculó el factor de inflación de la varianza, cuyo resultado se obtiene al multiplicar las diagonales de forma escalar de la matriz de varianzas y covarianza con la matriz inversa de varianzas y covarianzas.

5.8.1 Multicolinealidad

La matriz de varianzas y covarianzas se presenta en la TABLA 64, la matriz entrega una medida de la asociación lineal que existe entre las variables. Sin embargo, no considera que las variables se encuentren en diferentes unidades de medida.

TABLA 64. Matriz de varianzas y covarianzas de variables tratamiento GLOBAL.

		AFLUENTE					PRIMARIO		ZONA AERÓBICA					
		<i>Caudal</i>	<i>pH</i>	<i>DQO</i>	<i>SST</i>	<i>DBO5</i>	<i>Rejas</i>	<i>Arena</i>	<i>OD</i>	<i>pH</i>	<i>T°</i>	<i>IVL</i>	<i>REC.</i>	<i>PUR.</i>
AFLUENTE	<i>Caudal</i>	280,84	-0,94	62,66	195,42	159,82	-2,43	-7,14	-0,13	-0,26	-22,88	305,07	4899,45	122,96
	<i>pH</i>	-0,94	0,07	5,92	3,17	2,65	-0,01	-0,12	0,01	0,03	0,37	-4,82	-50,33	-1,65
	<i>DQO</i>	62,66	5,92	50114,35	7362,61	-437,13	16,05	150,40	0,73	-0,20	144,1	-3683,93	18859,70	1408,08
	<i>SST</i>	195,42	3,17	7362,61	10499,40	-441,64	-5,38	-0,26	-7,52	-2,40	38,35	-1131,32	60250,62	240,37
	<i>DBO5</i>	159,82	2,65	-437,13	-441,64	2446,18	0,60	-35,86	1,41	1,35	29,14	-549,34	-12410,42	723,29
PRIMAR.	<i>Rejas</i>	-2,43	-0,01	16,05	-5,38	0,60	2,62	4,81	0,04	-0,01	0,02	3,08	-143,85	56,16
	<i>Arena</i>	-7,14	-0,12	150,40	-0,26	-35,86	4,81	34,24	0,32	-0,18	-3,21	24,88	-679,82	100,37
ZONA AERÓBICA	<i>OD</i>	-0,13	0,01	0,73	-7,52	1,41	0,04	0,32	0,15	0,01	-0,09	0,78	-101,76	2,68
	<i>pH</i>	-0,26	0,03	-0,20	-2,40	1,35	-0,01	-0,18	0,01	0,06	0,16	-0,45	-7,05	-1,32
	<i>T°</i>	-22,88	0,37	144,13	38,35	29,14	0,02	-3,21	-0,09	0,16	9,53	-112,64	-772,79	19,99
	<i>IVL</i>	305,07	-4,82	-3683,93	-1131,32	-549,34	3,08	24,88	0,78	-0,45	-112,6	2650,89	10694,43	-767,46
	<i>REC.</i>	4899,45	-50,33	18859,70	60250,62	-12410,4	-143,85	-679,8	-101,7	-7,0	-772,7	10694,43	1488984,6	-21735,4

	PUR.	122,96	-1,65	1408,08	240,37	723,29	56,16	100,37	2,68	-1,32	19,99	-767,46	-21735,48	22883,49
--	------	--------	-------	---------	--------	--------	-------	--------	------	-------	-------	---------	-----------	----------

En general se observa que las varianzas de las variables son diversas. La mayor de ellas es la de recirculación con un valor de 1.488.984,6 de varianza, es altamente mayor a la de nivel de pH en la zanja de oxidación con un valor de 0,06.

En la TABLA 65, se puede apreciar la matriz inversa de varianzas y covarianzas,

TABLA 65. Matriz inversa de varianzas y covarianzas de variables tratamiento GLOBAL.

INVERSA		AFLUENTE					PRIMARIO		ZONA AERÓBICA					
		Caudal	pH	DQO	SST	DBO5	Rejas	Arena	OD	pH	T°	IVL	REC.	PUR.
AFLUENTE	Caudal	0,006	0,025	-6,1E-05	-1,4E-04	-0,001	0,004	0,002	0,004	-0,010	0,012	-4,0E-04	-7,6E-06	-5,1E-05
	pH	0,025	27,283	0,001	-0,016	-0,014	0,054	-0,029	-1,701	-12,10	-0,546	0,011	0,001	0,004
	DQO	-6,1E-05	0,001	2,6E-05	-1,4E-05	1,4E-05	-1,9E-05	-1,4E-04	-0,001	-0,001	-1,7E-4	3,5E-05	1,1E-07	6,7E-07
	SST	-1,4E-04	-0,016	-1,4E-05	1,7E-04	2,6E-05	2,9E-04	-2,0E-4	0,004	0,013	-3,7E-4	5,8E-05	-6,8E-06	-5,9E-06
	DBO5	-0,001	-0,014	1,4E-05	2,6E-05	0,001	-0,001	4,3E-04	-2,8E-03	-0,002	-0,001	1,4E-04	3,3E-06	-5,4E-06
PRIMAR.	Rejas	0,004	0,054	-1,9E-05	2,9E-04	-0,001	0,556	-0,079	0,021	-0,003	-0,050	-0,003	-3,7E-05	-0,001
	Arena	0,002	-0,029	-1,4E-04	-2,0E-04	4,3E-04	-0,079	0,045	-0,054	0,067	0,025	2,3E-04	2,8E-05	4,2E-06
ZONA AERÓBICA	OD	0,004	-1,701	-0,001	0,004	-0,003	0,021	-0,054	7,350	-0,504	0,180	0,001	3,3E-04	-0,001
	pH	-0,010	-12,10	-0,001	0,013	-0,002	-0,003	0,067	-0,504	24,729	-0,326	-0,024	-0,001	-0,001
	T°	0,012	-0,546	-1,7E-04	-3,7E-04	-0,001	-0,050	0,025	0,180	-0,326	0,284	0,009	5,5E-05	7,2E-06
	IVL	-4,0E-04	0,011	3,5E-05	5,8E-05	1,4E-04	-0,003	2,3E-04	0,001	-0,024	0,009	0,001	-2,0E-06	2,2E-05
	REC.	-7,6E-06	0,001	1,1E-07	-6,8E-06	3,3E-06	-3,7E-05	2,8E-05	3,3E-04	-0,001	5,5E-05	-2,0E-06	1,1E-06	8,8E-07
	PUR.	-5,1E-05	0,004	6,7E-07	-5,9E-06	-5,4E-06	-0,001	4,2E-06	-0,001	-0,001	7,2E-06	2,2E-05	8,8E-07	4,9E-05

En la TABLA 66, se indican los factores de inflación de varianzas obtenidos de la multiplicación escalar de ambas matrices antes mencionadas. La gran mayoría de los factores de inflación de varianza se encuentran entorno al valor 1. Como caudal en el afluente de la planta: 1,6179, pH en el afluente; 1,7849, demanda química de oxígeno (DQO); 1,2784, sólidos suspendidos totales (SST); 1,7412, demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅); 1,3336, residuos extraídos en las rejillas del pretratamiento; 1,4555, como

arena; 1,5496, oxígeno disuelto y pH en la zanja de oxidación: 1,1216 y 1,4373 respectivamente, recirculación: 1,6558, purga: 1,1125.

Con factores un poco más elevados encontramos al índice volumétrico de lodos, con un valor de 2,4450 y el más alto corresponde a la temperatura medida en la zanja de oxidación, el que llega a un factor de valor; 2,7060.

Al tener todos valores inferiores a 10 (VIF<10) sirve como evidencia para afirmar que no existe multicolinealidad severa. No se puede afirmar que no existe multicolinealidad ya que para ello todos los VIF's tendrían que haber tomado valores iguales a uno.

Los datos registrados fueron ajustados a tres modelos (DQO, SST y DBO₅) en el efluente de la planta de tratamiento de aguas servidas, por separado, en función de las trece variables predictoras y se procedió a la validación de los modelos. Se realizaron modificaciones cuando se estimaron convenientes.

TABLA 66. Factores de inflación de varianza de variables tratamiento GLOBAL.

VIF		AFLUENTE					PRIMARIO		ZONA AERÓBICA					
		Caudal	pH	DQO	SST	DBO ₅	Rejas	Arena	OD	pH	T°	IVL	REC.	PUR.
AFLUENTE	Caudal	1,6179	-0,0235	-0,0038	-0,0273	-0,1068	-0,0087	-0,0119	-0,0005	0,0026	-0,2715	-0,1229	-0,0374	-0,0063
	pH	-0,0235	1,7849	0,0057	-0,0496	-0,0379	-0,0004	0,0034	-0,0175	-0,3566	-0,2045	-0,0553	-0,0426	-0,0059
	DQO	-0,0038	0,0057	1,2784	-0,1000	-0,0063	-0,0003	-0,0215	-0,0007	0,0002	-0,0252	-0,1297	0,0021	0,0009
	SST	-0,0273	-0,0496	-0,1000	1,7412	-0,0114	-0,0016	0,0001	-0,0275	-0,0312	-0,0143	-0,0651	-0,4119	-0,0014
	DBO ₅	-0,1068	-0,0379	-0,0063	-0,0114	1,3336	-0,0009	-0,0153	-0,0040	-0,0024	-0,0291	-0,0746	-0,0412	-0,0039
PRIMAR.	Rejas	-0,0087	-0,0004	-0,0003	-0,0016	-0,0009	1,4555	-0,3802	0,0009	0,0000	-0,0009	-0,0084	0,0053	-0,0604
	Arena	-0,0119	0,0034	-0,0215	0,0001	-0,0153	-0,3802	1,5496	-0,0172	-0,0120	-0,0818	0,0056	-0,0192	0,0004
ZONA AERÓBICA	OD	-0,0005	-0,0175	-0,0007	-0,0275	-0,0040	0,0009	-0,0172	1,1216	-0,0039	-0,0167	0,0005	-0,0335	-0,0015
	pH	0,0026	-0,3566	0,0002	-0,0312	-0,0024	0,0000	-0,0120	-0,0039	1,4373	-0,0520	0,0110	0,0056	0,0012
	T°	-0,2715	-0,2045	-0,0252	-0,0143	-0,0291	-0,0009	-0,0818	-0,0167	-0,0520	2,7060	-0,9679	-0,0423	0,0001
	IVL	-0,1229	-0,0553	-0,1297	-0,0651	-0,0746	-0,0084	0,0056	0,0005	0,0110	-0,9679	2,4450	-0,0216	-0,0166
	REC.	-0,0374	-0,0426	0,0021	-0,4119	-0,0412	0,0053	-0,0192	-0,0335	0,0056	-0,0423	-0,0216	1,6558	-0,0192
	PUR.	-0,0063	-0,0059	0,0009	-0,0014	-0,0039	-0,0604	0,0004	-0,0015	0,0012	0,0001	-0,0166	-0,0192	1,1125

5.8.2 Ajuste de modelo global DBO₅

Se aplicó un análisis de regresión de la DBO₅ en el efluente de la planta en función de las demás variables independientes utilizando un modelo de regresión lineal múltiple con la siguiente forma:

$$DBO_5(S_i) = \beta_0 + \beta_1 * S_1 + \beta_2 * S_2 + \beta_3 * S_3 + \beta_4 * S_4 + \beta_5 * S_5 + \beta_6 * S_6 + \beta_7 * S_7 + \beta_8 * S_8 + \beta_9 * S_9 + \beta_{10} * S_{10} + \beta_{11} * S_{11} + \beta_{12} * S_{12} + \beta_{13} * S_{13} + \varepsilon$$

Donde ε corresponde al error de predicción del modelo, β_i $i=0, \dots, 13$. corresponde a los coeficientes de regresión para cada variable predictora (excepto β_0 que es el coeficiente de intersección del modelo). Además S_i $i=1, \dots, 13$. corresponden al valor que toma cada variable predictora.

TABLA 67. Símbolos de las variables predictoras DBO₅ (GLOBAL).

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
	Intercepto
S ₁	Caudal [L/s] AFLUENTE
S ₂	pH AFLUENTE
S ₃	DQO [mg/L] AFLUENTE
S ₄	SST [mg/L] AFLUENTE
S ₅	DBO ₅ [mg/L] AFLUENTE
S ₆	Basura de rejillas [sacos/día]
S ₇	Arenas [sacos/día]
S ₈	Oxígeno Disuelto zona aeróbica [mg/L]
S ₉	pH zona aeróbica
S ₁₀	Temperatura zona aeróbica [°C]
S ₁₁	IVL zona aeróbica [ml/g]
S ₁₂	Volumen recirculado [m ³ /día]
S ₁₃	Volumen purgado [m ³ /día]

Para el ajuste del modelo se siguió el procedimiento de validación de siete pasos mostrado en la metodología, y si uno de ellos muestra cambio, se modificó el modelo y se continuó aplicando el análisis, pudiendo resultar un poco repetitivo para el lector. Aquí se muestra sólo el análisis de la última iteración de cada modelo, quedando el análisis completo y

detallado en los ANEXOS. El procedimiento del ajuste y validación de DBO₅ global se encuentra en el ANEXO XIV. Al llegar a la quinta iteración del modelo global de DBO₅ se debe obtener un ajuste de la siguiente forma:

$$DBO_5 (S_i) = \beta_0 + \beta_1 * S_1 + \beta_{1A} * (S_1)^2 + \beta_3 * S_3 + \beta_5 * S_5$$

Cuyos valores se describen en la Tabla 68.

TABLA 68. Coeficientes del ajuste de modelo final DBO₅ (GLOBAL).

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	Coefficientes
	Intercepto	β_0	42,3391
S_1	Caudal [L/s] AFLUENTE	β_1	-1,6239
$S_{(1A)}=(S_1)^2$	[Caudal [L/s] AFLUENTE] ²	$\beta_{(1A)}$	0,0163
S_3	DQO [mg/L] AFLUENTE	β_3	-0,0062
S_5	DBO5 [mg/L] AFLUENTE	β_5	0,0406

5.8.2.1 Análisis de los residuos del modelo DBO₅ ajustado

Al revisar los gráficos de los residuos de las cuatro variables independientes restantes no se observa tendencia o comportamiento en ninguno de ellos, así, el modelo es adecuado para los datos.

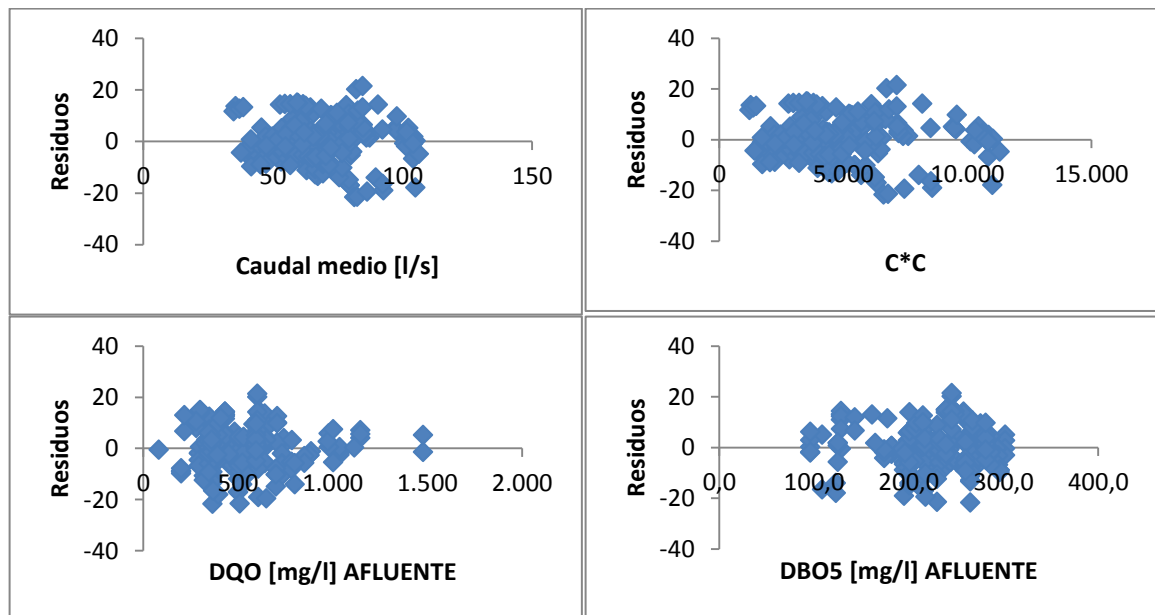


FIGURA 25. Análisis de los residuos del modelo DBO₅ (GLOBAL).

5.8.2.2 Análisis de la regresión DBO₅

En la Tabla 69, se puede ver que el coeficiente de correlación múltiple, 0,8636, indica que existe un alto grado de asociación entre la variable respuesta y la variables predictoras. Además el porcentaje de variabilidad explicada por las variables independientes es de 74,09% en el modelo, mostrando una variación insignificante con respecto al ajuste anterior.

TABLA 69. Estadísticas de la regresión DBO₅ (GLOBAL).

Coefficiente de correlación múltiple	0,8636
Coefficiente de determinación R ²	0,7459
R ² ajustado	0,7409
Error típico	8,1359
Observaciones	208

En los datos de la Tabla 69 y residuos del ANEXO XV se puede observar que los errores se encuentran entre [-21.6413; 21.4218], lo cual está contenido en $\pm 3 * \sqrt{CME} = \pm 3 * \text{Error típico} = \pm 24,4078$. Esto quiere decir que no existen puntos atípicos, por lo cual todos los datos son válidos para el modelo.

5.8.2.3 Significancia del modelo

Para estudiar la significancia del modelo se debe contrastar las siguientes hipótesis:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_5 = 0$$

$$H_1: \text{Algún } \beta_i \neq 0, i=1, (1A), 3, 5.$$

El estadístico de prueba para esta hipótesis es la prueba F, Los resultados se resumen en la Tabla 70.

TABLA 70. ANOVA modelo DBO₅ (GLOBAL).

<i>ANÁLISIS DE VARIANZA</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	4	39436,1744	9859,04361	148,942866	3,161E-59
Residuos	203	13437,2723	66,1934597		
Total	207	52873,4468			

De la Tabla 70 se tiene el valor crítico de F, que corresponde al p-value=3,161E-59 lo cual es altamente menor a un nivel de significancia $\alpha=0,05$. Esto es evidencia suficiente para rechazar nuestra hipótesis nula H_0 en favor de H_1 .

5.8.2.4 Significancia individual de los coeficientes del modelo

Ahora se debe investigar cuáles de los coeficientes asociados a cada variable del modelo son significativos, y para ello se realiza los contrastes de las hipótesis individuales.

$$\begin{aligned}
 H_0: \beta_1=0, & \quad H_0: \beta_{1A}=0, & \quad H_0: \beta_3=0, & \quad H_0: \beta_5=0 \\
 H_1: \beta_1\neq 0, & \quad H_1: \beta_{1A}\neq 0, & \quad H_1: \beta_3\neq 0, & \quad H_1: \beta_5\neq 0,
 \end{aligned}$$

El estadístico de prueba para estas hipótesis es la prueba t, cuyos p-value se observan en la Tabla 71.

TABLA 71. Estadísticos de pruebas individuales modelo DBO₅ (GLOBAL).

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	COEF.	Error típico	Estadístico t	P-VALUE	Inferior 95%	Superior 95%
	Intercepto	β_0	42,339	9,1201	4,6424	6,18E-06	24,3569	60,3213
S_1	Caudal [L/s] AFLUENTE	β_1	-1,6239	0,2416	-6,7208	1,79E-10	-2,1003	-1,1475
$S_{(1A)}=(S_1)^2$	[Caudal [L/s] AFLUENTE] ²	$\beta_{(1A)}$	0,0163	0,0017	9,6869	1,75E-18	0,0130	0,0196
S_3	DQO [mg/L] AFLUENTE	β_3	-0,0062	0,0025	-2,4395	0,0156	-0,0111	-0,0012
S_5	DBO5 [mg/L] AFLUENTE	β_5	0,0406	0,0118	3,4314	0,0007	0,0173	0,0639

De la Tabla 71 se observan los p-value de las hipótesis de significancia de los coeficientes de regresión de las variables S_1 , S_{1A} , S_3 y S_5 toman valores de 1,79E-10, 1,75E-18, 0,0156 y 0,0007, respectivamente, siendo menores al nivel de significancia de 0,05. Sus respectivos intervalos de confianza para el mismo nivel de significancia no está contenido el cero. Existe evidencia suficiente para rechazar las hipótesis nulas de los cuatro coeficientes, en favor de H_1 .

Se puede apreciar que el caudal promedio diario, la demanda química de oxígeno DQO, y la demanda bioquímica de oxígeno DBO₅ en el afluente de la planta es capaz de explicar 74.09% de la variabilidad de la variable respuesta demanda bioquímica de oxígeno en cinco

días DBO₅ en el efluente de la planta. El coeficiente β_1 puede ser interpretado de la forma en que cada litro por segundo promedio diario de agua residual que ingrese a la planta de tratamiento de aguas servidas, contribuirá a la disminución de la demanda bioquímica de oxígeno en cinco días en el efluente de la planta en 1,6239 [mg/L]. Sin embargo esto va asociado al aumento cuadrático del caudal.

El coeficiente de regresión β_3 indica, que por el aumento adicional de 1 mg/L de concentración de demanda química de oxígeno en el afluente, influirá en la disminución de 0.0062 mg/L de DBO₅ en el efluente de la planta.

El coeficiente de regresión β_4 correspondiente a la DBO₅ en el afluente indica que el aumento de la concentración de éste indicador en 1 mg/L influirá directamente en el aumento de 0.0406 mg/L de DBO₅ en el efluente de la planta.

Por lo tanto el modelo final para la predicción de los niveles de la demanda bioquímica de oxígeno en cinco días en el efluente de la planta, queda de la siguiente forma.

$$\text{DBO}_{5\text{EF}}(S_i) = 42,3391 - 1,6239 * (\text{Caudal}_{\text{AF}}) + 0,0163 * (\text{Caudal}_{\text{AF}})^2 - 0,0062 * \text{DQO}_{\text{AF}} + 0,0406 * \text{DBO}_{5\text{AF}}$$

5.8.2.5 Supuesto de varianza constante para existencia del modelo

Para estudiar si existe heterocedasticidad se deben contrastar las siguientes hipótesis:

$$H_0: \sigma^2 = \text{constante}$$

$$H_1: \sigma^2 = f(x)$$

Se utilizó el test de Breusch-Pagan, aplicando el software R commander.

TABLA 72. Resultados de test Breusch-Pagan modelo DBO₅ (GLOBAL).

	BP	p-value
Breusch-Pagan	2,6463	0,1038

Se obtuvo un p-value =0.1038. No existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula en favor de H_1 . Así el modelo predice por igual precisión para distintos niveles de las variables independientes, y se cumple condición de homocedasticidad.

5.8.2.6 Supuesto de normalidad de los residuos para existencia del modelo

La normalidad de los errores se analizó a través del contraste de:

$$H_0: \varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$$

$$H_1: \varepsilon \sim / \sim N(0, \sigma^2)$$

Se aplicó el test de kolmogorov-Smirnov, utilizando el software SPSS estadistic de IBM.

TABLA 73. Resultados de test de Kolmogorov-Smirnov modelo DBO₅ (GLOBAL).

Kolmogorov-Smirnov	Estadístico	G.L.	Significancia
Residuos DBO ₅	0,051	208	0,200*

*: Este es un límite inferior de la significancia verdadera

En la Tabla 73 se muestran los resultados de la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov. Se obtiene una significancia de 0,200 (límite inferior de la significancia verdadera), lo que indica que no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula en favor de H_1 . Así, se cumple el supuesto de que los residuos siguen una distribución normal.

5.8.2.7 Supuesto de independencia para existencia del modelo

El Test de Durbin-Watson permitió evaluar si existe autocorrelación en una Regresión lineal. Para analizar los límites superior e inferior del test, se agruparon los registros de 100 observaciones y posteriormente se modificó a 200. Por ello, se analizó la independencia a través de los gráficos de los residuos en los modelos globales.

En la FIGURA 26 se puede observar que no existe tendencia de los residuos ni comportamiento alguno. Por lo tanto, se puede afirmar que se cumple el supuesto de independencia para el modelo global de DBO₅.

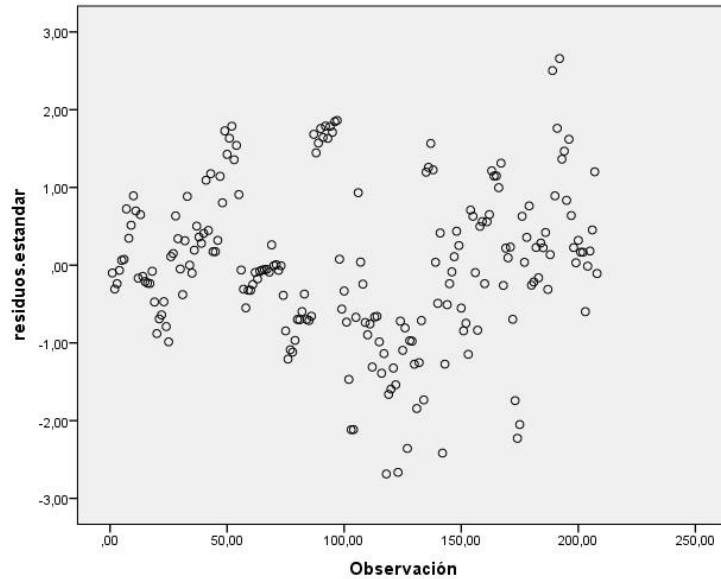


FIGURA 26. Análisis de independencia de los residuos DBO₅ (GLOBAL).

5.8.3 Ajuste de modelo global DQO

Al aplicar un análisis de regresión de la DQO efluente en función de las demás variables independientes se obtuvo un modelo de regresión lineal múltiple con la siguiente forma:

$$DQO(S_i) = \beta_0 + \beta_1 * S_1 + \beta_2 * S_2 + \beta_3 * S_3 + \beta_4 * S_4 + \beta_5 * S_5 + \beta_6 * S_6 + \beta_7 * S_7 + \beta_8 * S_8 + \beta_9 * S_9 + \beta_{10} * S_{10} + \beta_{11} * S_{11} + \beta_{12} * S_{12} + \beta_{13} * S_{13} + \varepsilon$$

Donde ε corresponde al error de predicción del modelo, β_i $i=0, \dots, 13$. corresponde a los coeficientes de regresión para cada variable predictora (excepto β_0 que es el coeficiente de intersección del modelo). Además S_i $i=1, \dots, 13$. corresponden al valor que toma cada variable predictora.

TABLA 74. Símbolos de las variables predictoras DQO (GLOBAL).

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
	Intercepto
S ₁	Caudal [L/s] AFLUENTE
S ₂	pH AFLUENTE
S ₃	DQO [mg/L] AFLUENTE
S ₄	SST [mg/L] AFLUENTE
S ₅	DBO ₅ [mg/L] AFLUENTE
S ₆	Basura de rejás [sacos/día]

S ₇	Arenas [sacos/día]
S ₈	Oxígeno Disuelto zona aeróbica [mg/L]
S ₉	pH zona aeróbica
S ₁₀	Temperatura zona aeróbica [°C]
S ₁₁	IVL zona aeróbica [ml/g]
S ₁₂	Volumen recirculado [m ³ /día]
S ₁₃	Volumen purgado [m ³ /día]

El procedimiento del ajuste y validación de DQO global se encuentra en el ANEXO XVI.

Al llegar a la segunda iteración del modelo global de DQO se debe obtener un ajuste de la siguiente forma:

$$DQO (S_i) = \beta_0 + \beta_4 * S_4 + \beta_9 * S_9 + \beta_{10} * S_{10} + \beta_{11} * S_{11} + \beta_{12} * S_{12}$$

Los resultados del ajuste se describen en la Tabla 75.

TABLA 75. Coeficientes del ajuste de modelo final DQO (GLOBAL).

<i>SÍMBOLO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>SÍMBOLO</i>	<i>COEF.</i>
	Intercepción	β_0	86,0249
S ₄	SST [mg/L] AFLUENTE	β_4	-0,2398
S ₉	pH zona aeróbica	β_9	14,8301
S ₁₀	Temperatura zona aeróbica [°C]	β_{10}	1,1619
S ₁₁	IVL zona aeróbica [ml/g]	β_{11}	-0,1232
S ₁₂	Volumen recirculado [m ³ /día]	β_{12}	-0,0095

5.8.3.1 Análisis de los residuos del modelo DQO ajustado

Al analizar los gráficos de los residuos de las cinco variables independientes no se observa tendencia o comportamiento en ninguno de ellos. Así, el modelo es adecuado para representar los datos.

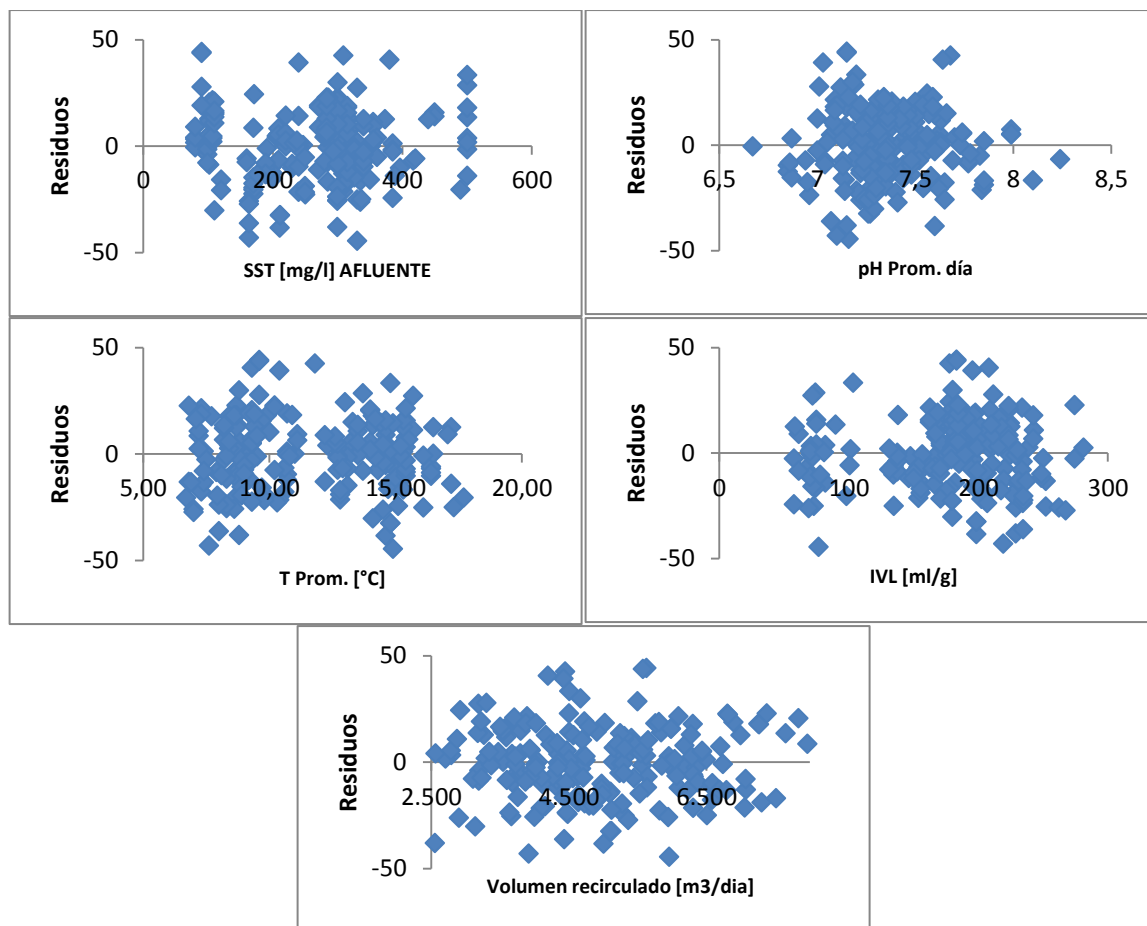


FIGURA 27. Análisis de los residuos del modelo DQO (GLOBAL).

5.8.3.2 Análisis de la regresión DQO

En la Tabla 76 se puede ver que el coeficiente de correlación múltiple, 0,8942, indica que existe un alto grado de asociación entre la variable respuesta y la variables predictoras. Además el porcentaje de variabilidad explicada por las variables independientes es de 79,46% en el modelo. Ambos estadísticos se mantuvieron con una variación insignificante con respecto al modelo ajustado anteriormente.

TABLA 76. Estadísticas de la regresión DQO (GLOBAL).

Coeficiente de correlación múltiple	0,8942
Coeficiente de determinación R^2	0,7995
R^2 ajustado	0,7946
Error típico	16,7719
Observaciones	208

Los datos mostrados en la Tabla 76 y los residuos en el ANEXO XVII indican que los errores se encuentran entre [-44.5098; 44.2153], lo cual está contenido en $\pm 3 * \sqrt{CME} = \pm 3 * \text{Error típico} = \pm 50,3157$. Esto quiere decir que no existen puntos atípicos, por lo cual todos los datos son válidos para el modelo.

5.8.3.3 Significancia del modelo

En el análisis de la significancia del modelo se contrarrestaron las siguientes hipótesis:

$$H_0: \beta_4 = \beta_9 = \beta_{10} = \beta_{11} = \beta_{12} = 0$$

$$H_1: \text{Algún } \beta_i \neq 0, i=4,9,10,11,12.$$

El estadístico de prueba para esta hipótesis es la prueba F.

TABLA 77. ANOVA modelo DQO (GLOBAL).

<i>ANÁLISIS DE VARIANZA</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	5	226598,69	45319,739	161,11	1,80789E-68
Residuos	202	56821,832	281,2962		
Total	207	283420,53			

De la Tabla 77 se obtiene el valor crítico de F, que corresponde al p-value=1,80789E-68 lo cual es altamente menor a un nivel de significancia $\alpha=0,05$. Esto es evidencia suficiente para rechazar nuestra hipótesis nula H_0 en favor de H_1 .

5.8.3.4 Significancia individual de los coeficientes del modelo

Ahora se debe investigar cuáles de los coeficientes asociados a cada variable del modelo son significativos, y para ello se realiza los contrastes de las hipótesis individuales.

$$H_0: \beta_4=0, \quad H_0: \beta_9=0, \quad H_0: \beta_{10}=0, \quad H_0: \beta_{11}=0, \quad H_0: \beta_{12}=0$$

$$H_1: \beta_4 \neq 0, \quad H_1: \beta_9 \neq 0, \quad H_1: \beta_{10} \neq 0, \quad H_1: \beta_{11} \neq 0, \quad H_1: \beta_{12} \neq 0$$

El estadístico de prueba para estas hipótesis es la prueba t.

TABLA 78. Estadísticos de prueba independientes modelo DQO (GLOBAL).

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	COEF.	Error típico	Estadístico t	P-VALUE	Inferior 95%	Superior 95%
	Intercepto	β_0	86,0249	36,7165	2,3430	0,0201	13,6282	158,4217
S ₄	SST [mg/l] AFLUENTE	β_4	-0,2398	0,0139	-17,2437	1,45E-41	-0,2673	-0,2124
S ₉	pH zona aeróbica	β_9	14,8301	5,0512	2,9360	0,0037	4,8703	24,7899
S ₁₀	T. zona aeróbica [°C]	β_{10}	1,1619	0,5594	2,0771	0,0391	0,0589	2,2648
S ₁₁	IVL zona aeróbica [ml/g]	β_{11}	-0,1232	0,0333	-3,7021	0,0003	-0,1888	-0,0576
S ₁₂	Volumen recirculado [m3/día]	β_{12}	-0,0095	0,0012	-8,1695	3,33E-14	-0,0118	-0,0072

De la Tabla 78 se puede observar que los p-value de las hipótesis de significancia de los coeficientes de regresión de las variables S₄, S₉, S₁₀, S₁₁ y S₁₂ tienen valores de 1,45E-41, 0,0037, 0,0391, 0,0003 y 3,33E-14 respectivamente, siendo menores al nivel de significancia de 0,05. En sus respectivos intervalos de confianza para el mismo nivel de significancia no está contenido el cero. Existe evidencia suficiente para rechazar las hipótesis nulas de los cinco coeficientes, en favor de H₁.

Finalmente se puede apreciar que los sólidos suspendidos totales (SST) medidos en el afluente operacional, el pH en la zona aeróbica, la temperatura promedio diaria en la zona aeróbica del tratamiento biológico, el índice volumétrico de lodos en la zona aeróbica y el volumen de lodos recirculados son capaces de explicar 79,46% de la variabilidad de la variable respuesta demanda química de oxígeno en el efluente de la planta.

El coeficiente β_4 puede ser interpretado diciendo que el aumento de 1 mg/L en la concentración de los sólidos suspendidos totales en el afluente de la planta, influirá directamente en la disminución de 0,2398 mg/L en la demanda química de oxígeno en el efluente operacional.

El coeficiente β_9 puede ser interpretado diciendo que el aumento del pH en 1 nivel en la zona aeróbica del proceso, influirá en el aumento de 14,8301 mg/L de la concentración de la demanda química de oxígeno en el efluente.

El coeficiente β_{10} puede ser interpretado diciendo que el aumento de 1°C en la temperatura de la zona aeróbica del proceso, influirá en el aumento de 1,1619 mg/L de la concentración de la demanda química de oxígeno en el efluente de la planta.

La interpretación del coeficiente β_{11} tiene relación con que al aumentar en 1 ml/g el índice volumétrico de lodos en la zona aeróbica, influirá en la disminución de 0,1232 mg/l de la concentración de la demanda química de oxígeno en el efluente de la planta.

Finalmente el coeficiente β_{12} indica que el aumento de 1 m³/día de la recirculación de lodos, influirá en la disminución de la concentración de solidos suspendidos totales en el efluente de la planta en 0.0095 mg/L.

Por lo tanto el modelo final para la predicción de los niveles de la demanda química de oxígeno en el efluente de la planta en función de variables del proceso, queda de la siguiente forma.

$$DQO_{EF}(S_i) = 86,0249 - 0,2398*SST_{AF} + 14,8301*pH_{ZA} + 1,1619*T_{ZA} - 0,1232*IVL_{ZA} - 0,0095*VOL.REC.$$

5.8.3.5 Supuestos de varianza constante para existencia del modelo

Para el estudio de la existencia o no de heterocedasticidad se contrastaron las siguientes hipótesis:

$$H_0: \sigma^2 = \text{constante}$$

$$H_1: \sigma^2 = f(x)$$

Se utilizó el test de Breusch-Pagan, aplicando el software R commander.

TABLA 79. Resultados de test Breusch-Pagan modelo DQO (GLOBAL).

	BP	p-value
Breusch-Pagan	0,0201	0,8874

De la Tabla 79 se obtiene un p-value =0.8874, por lo tanto no existe evidencia para rechazar la hipótesis nula en favor de H_1 . Así el modelo predice por igual precisión para distintos niveles de las variables independientes, y se cumple condición de homocedasticidad.

5.8.3.6 Supuesto de normalidad de los residuos para existencia del modelo

Para el estudio de la normalidad de los errores se realizó el contraste de:

$$H_0: \varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$$

$$H_1: \varepsilon \not\sim N(0, \sigma^2)$$

Se aplicó el test de kolmogorov-Smirnov, utilizando el software SPSS estadistic de IBM, del cual se obtienen los siguientes resultados:

TABLA 80. Resultados de test de Kolmogorov-Smirnov modelo DQO (GLOBAL).

Kolmogorov-Smirnov	Estadístico	G.L.	Significancia
Residuos DQO	0,044	208	0,200*

*: Este es un límite inferior de la significancia verdadera

De la Tabla 80 se puede observar que la prueba de Kolmogorov-Smirnov arroja una significancia de 0.200 (límite inferior de la significancia verdadera), lo que indica que no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula en favor de H_1 . Así, se cumple el supuesto de que los residuos siguen una distribución normal.

5.8.3.7 Supuesto de independencia para existencia del modelo

El Test de Durbin-Watson permitió evaluar si existe autocorrelación en una Regresión lineal. Sin embargo, para analizar los límites superior e inferior del test, se realizo tablas en primera instancia de 100 observaciones y posteriormente se modificó a 200. Es por esto que se analizó la independencia a través de los gráficos de los residuos en los modelos globales.

En la FIGURA 28 se puede observar que no existe tendencia de los residuos ni comportamiento alguno, por lo tanto, se puede afirmar que se cumple el supuesto de independencia para el modelo global de DQO.

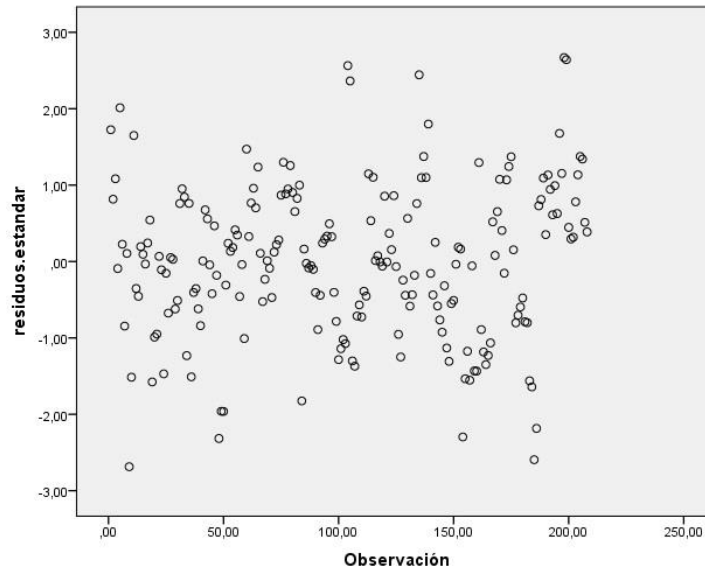


FIGURA 28. Análisis de independencia de los residuos DQO (GLOBAL).

5.8.4 Ajuste de modelo global SST

Se Aplicó un análisis de regresión con los SST en el efluente de la planta en función de las demás variables independientes obteniéndose un modelo de regresión lineal múltiple con la siguiente forma:

$$SST(S_i) = \beta_0 + \beta_1 * S_1 + \beta_2 * S_2 + \beta_3 * S_3 + \beta_4 * S_4 + \beta_5 * S_5 + \beta_6 * S_6 + \beta_7 * S_7 + \beta_8 * S_8 + \beta_9 * S_9 + \beta_{10} * S_{10} + \beta_{11} * S_{11} + \beta_{12} * S_{12} + \beta_{13} * S_{13} + \varepsilon$$

Donde ε corresponde al error de predicción del modelo, β_i $i=0, \dots, 13$. corresponde a los coeficientes de regresión para cada variable predictora (excepto β_0 que es el coeficiente de intersección del modelo). Además S_i $i=1, \dots, 13$. corresponden al valor que toma cada variable predictora.

TABLA 81. Símbolos de las variables predictoras SST (GLOBAL).

<i>SÍMBOLO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>
	Intercepto
S ₁	Caudal [L/s] AFLUENTE
S ₂	pH AFLUENTE
S ₃	DQO [mg/L] AFLUENTE
S ₄	SST [mg/L] AFLUENTE
S ₅	DBO5 [mg/L] AFLUENTE
S ₆	Basura de rejas [sacos/día]
S ₇	Arenas [sacos/día]
S ₈	Oxígeno Disuelto zona aeróbica [mg/L]
S ₉	pH zona aeróbica
S ₁₀	Temperatura zona aeróbica [°C]
S ₁₁	IVL zona aeróbica [ml/g]
S ₁₂	Volumen recirculado [m ³ /día]
S ₁₃	Volumen purgado [m ³ /día]

El procedimiento del ajuste y validación de SST global se encuentra en el ANEXO XVIII. Al llegar a la tercera iteración del modelo global de SST se obtuvo un ajuste de la siguiente forma:

$$SST (S_i) = \beta_0 + \beta_4 * S_4 + \beta_{10} * S_{10} + \beta_{10A} * (S_{10})^2 + \beta_{11} * S_{11} + \beta_{12} * S_{12}$$

Cuyos valores se describen en la Tabla 82.

TABLA 82. Coeficientes del ajuste de modelo final SST (GLOBAL).

<i>SÍMBOLO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>SÍMBOLO</i>	<i>COEF.</i>
	Intercepción	β_0	69,8396
S ₄	SST [mg/L] AFLUENTE	β_4	0,0678
S ₁₀	Temperatura zona aeróbica [°C]	β_{10}	-17,8505
S _{10A} =(S ₁₀) ²	[Temperatura zona aeróbica [°C]] ²	β_{10A}	0,8110
S ₁₁	IVL zona aeróbica [ml/g]	β_{11}	0,0783
S ₁₂	Volumen recirculado [m ³ /día]	β_{12}	0,0020

5.8.4.1 Análisis de los residuos del modelo ajustado

Al analizar los gráficos de los residuos de las cuatro variables independientes no se observa tendencia o comportamiento en ninguno de ellos, así, el modelo es adecuado para los datos.

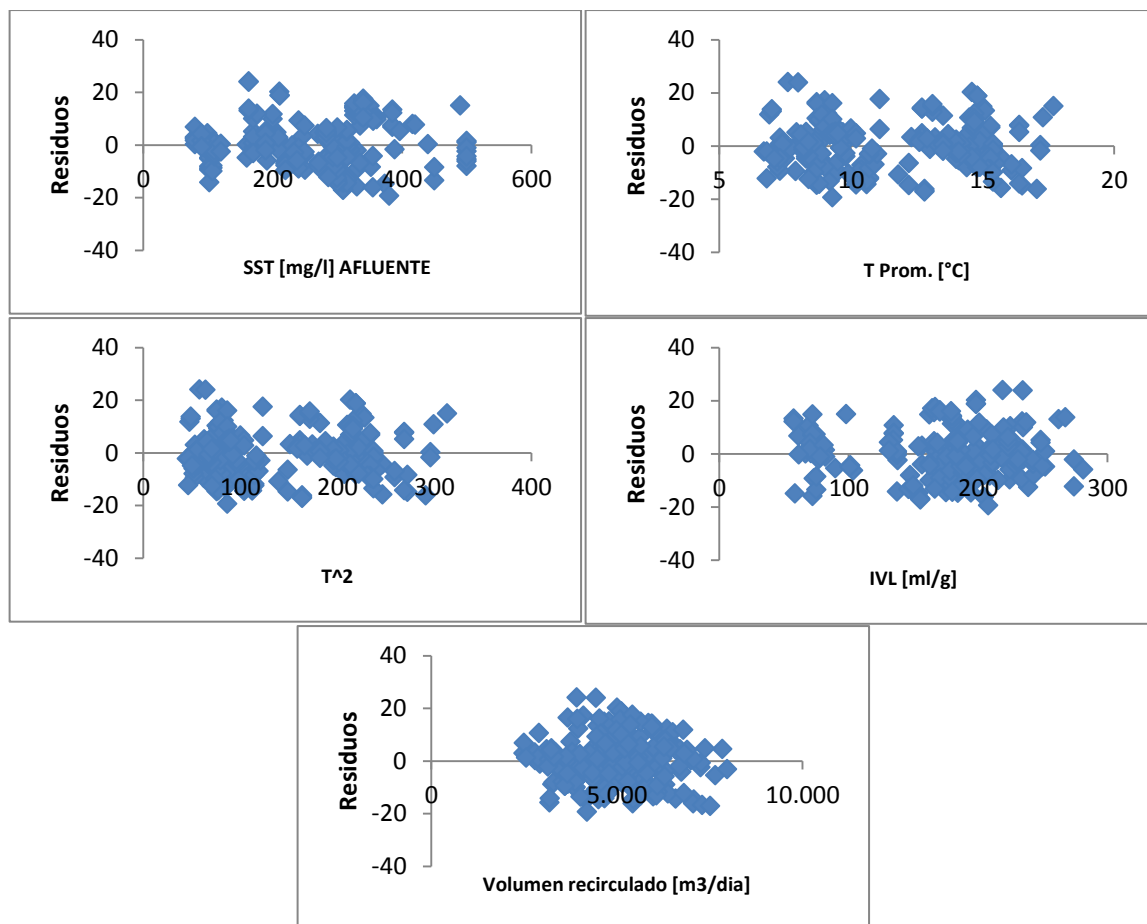


FIGURA 29. Análisis de los residuos del modelo SST (GLOBAL)

5.8.4.2 Análisis de la regresión SST

En la Tabla 83 se puede ver que el coeficiente de correlación múltiple, 0,7840, indica que existe un alto grado de asociación entre la variable respuesta y la variables predictoras. Además el porcentaje de variabilidad explicada por las variables independientes es de 60,51% en el modelo. Ambas estadísticas se mantuvieron con una variación insignificante con respecto al modelo ajustado anteriormente.

TABLA 83. Estadísticas de la regresión SST (GLOBAL).

Coeficiente de correlación múltiple	0,7840
Coeficiente de determinación R^2	0,6146
R^2 ajustado	0,6051
Error típico	8,8831
Observaciones	208

En los datos mostrados en la Tabla 83 y los residuos en el ANEXO XIX se puede observar que los errores se encuentran entre $[-19.2953; 24.0502]$, lo cual está contenido en $\pm 3 * \sqrt{CME} = \pm 3 * \text{Error típico} = 26,6494$. Esto quiere decir que no existen puntos atípicos, por lo cual todos los datos son válidos para el modelo.

5.8.4.3 Significancia del modelo

Para el estudio de la significancia del modelo se contrastaron las siguientes hipótesis:

$$H_0: \beta_4 = \beta_{10} = \beta_{10A} = \beta_{11} = \beta_{12} = 0$$

$$H_1: \text{Algún } \beta_i \neq 0, i=4,10,(10A),11,12.$$

El estadístico de prueba para esta hipótesis es la prueba F.

TABLA 84. ANOVA modelo SST (GLOBAL).

<i>ANÁLISIS DE VARIANZA</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	5	25418,5715	5083,71431	64,4240751	5,69755E-40
Residuos	202	15939,8531	78,9101636		
Total	207	41358,4246			

De la Tabla 84 se obtiene el valor crítico de F, que corresponde al $p\text{-value}=5,69755E-40$ lo cual es altamente menor a un nivel de significancia $\alpha=0,05$. Esto es evidencia suficiente para rechazar nuestra hipótesis nula H_0 en favor de H_1 .

5.8.4.4 Significancia individual de los coeficientes del modelo

Ahora se debe investigar cuáles de los coeficientes asociados a cada variable del modelo son significativos, y para ello se realiza los contrastes de las hipótesis individuales.

$$H_0: \beta_4=0, \quad H_0: \beta_{10}=0, \quad H_0: \beta_{10A}=0, \quad H_0: \beta_{11}=0, \quad H_0: \beta_{12}=0$$

$$H_1: \beta_4 \neq 0, \quad H_1: \beta_{10} \neq 0, \quad H_1: \beta_{10A} \neq 0, \quad H_1: \beta_{11} \neq 0, \quad H_1: \beta_{12} \neq 0$$

El estadístico de prueba para estas hipótesis es la prueba t, cuyos p-value se registran en la Tabla 85.

TABLA 85. Estadísticos de prueba independientes modelo SST (GLOBAL).

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	COEF.	Error típico	Estadístico <i>t</i>	P-VALUE	Inferior 95%	Superior 95%
	Intercepción	β_0	69,8396	14,3558	4,8649	2,30E-06	41,5331	98,1461
S ₄	SST [mg/L] AFLUENTE	β_4	0,0678	0,0073	9,2585	3,10E-17	0,0534	0,0822
S ₁₀	T. zona aeróbica [°C]	β_{10}	-17,8505	2,1656	-8,2428	2,11E-14	-22,1205	-13,5804
S _{10A} =(S ₁₀) ²	[T. zona aeróbica [°C]] ²	β_{10A}	0,8110	0,0898	9,0281	1,40E-16	0,6338	0,9881
S ₁₁	IVL zona aeróbica [ml/g]	β_{11}	0,0783	0,0176	4,4439	1,46E-05	0,0436	0,1130
S ₁₂	Volumen recirculado [m ³ /día]	β_{12}	0,0020	0,0006	3,2113	0,0015	0,0008	0,0032

En la Tabla 85 se puede observar que los p-value de las hipótesis de significancia de los coeficientes de regresión de las variables S₄, S₁₀, S_{10A}, S₁₁ y S₁₂ toman valores de 3,10E-17, 2,11E-14, 1,40E-16, 1,46E-05 y 0,0015 respectivamente, siendo menores al nivel de significancia de 0.05, reforzado porque en sus respectivos intervalos de confianza para el mismo nivel de significancia no está contenido el cero. Existe evidencia suficiente para rechazar las hipótesis nulas de los cinco coeficientes, en favor de H₁.

Finalmente se puede apreciar que los sólidos suspendidos totales (SST) medidos en el afluente operacional, la temperatura promedio diaria en la zona aeróbica del tratamiento biológico, la temperatura promedio diaria en la zona aeróbica del tratamiento biológico en forma cuadrática, el índice volumétrico de lodos en la zona aeróbica y el volumen de lodos recirculados son capaces de explicar 60.51% de la variabilidad de la variable respuesta sólidos suspendidos totales en el efluente de la planta.

El coeficiente β_4 puede ser interpretado diciendo que el aumento de 1 mg/L en la concentración de los sólidos suspendidos totales en el afluente de la planta, influirá directamente en el aumento de 0,0678 mg/L en los sólidos suspendidos totales en el efluente operacional.

El coeficiente β_{10} puede ser interpretado diciendo que el aumento de 1°C en la temperatura de la zona aeróbica del proceso, influirá en la disminución de 17,8505 mg/L de la concentración de sólidos suspendidos totales en el efluente. Sin embargo, esta disminución va asociada al aumento cuadrático que provoca la misma variable.

La interpretación del coeficiente β_{11} tiene relación con que al aumentar en 1 ml/g el índice volumétrico de lodos en la zona aeróbica, influirá en el aumento de 0,0176 mg/L de la concentración de sólidos suspendidos totales en el efluente de la planta.

Finalmente el coeficiente β_{12} indica que el aumento de 1 m³/día de la recirculación de lodos, influirá en el aumento de la concentración de sólidos suspendidos totales en el efluente en 0,0020 mg/L.

Por lo tanto el modelo final para la predicción de los niveles de sólidos suspendidos totales, queda de la siguiente forma.

$$SST_{EF}(S_i) = 69,8396 + 0,0678 * SST_{AF} - 17,8505 * T_{ZA} + 0,8110 * (T_{ZA})^2 + 0,0783 * IVL_{ZA} + 0,0020 * VOL.REC.$$

5.8.4.5 Supuesto de varianza constante para existencia del modelo

Para estudiar si existe heterocedasticidad se deben contrastar las siguientes hipótesis:

$$H_0: \sigma^2 = \text{constante}$$

$$H_1: \sigma^2 = f(x)$$

Se utilizó el test de Breusch-Pagan, aplicando el software R commander.

TABLA 86. Resultados de test Breusch-Pagan modelo SST (GLOBAL).

	BP	p-value
Breusch-Pagan	3,5215	0,06058

De la Tabla 86 se obtiene un p-value = 0.06058 > $\alpha = 0,05$; por lo tanto no existe evidencia para rechazar la hipótesis nula en favor de H_1 . Así el modelo predice por igual precisión para distintos niveles de las variables independientes, y se cumple condición de homocedasticidad.

5.8.4.6 Supuesto de normalidad de los residuos para existencia del modelo

Para el estudio de la normalidad de los errores se realizó el contraste de:

$$H_0: \varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$$

$$H_1: \varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$$

Para lo cual se aplicó el test de Kolmogorov-Smirnov, utilizando el software SPSS estadístico de IBM.

TABLA 87. Resultados de test de Kolmogorov-Smirnov modelo SST (GLOBAL).

Kolmogorov-Smirnov	Estadístico	G.L.	Significancia
Residuos SST	0,050	208	0,200*

*: Este es un límite inferior de la significancia verdadera

Los resultados de la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov arrojan una significancia de 0,200 (límite inferior de la significancia verdadera), lo que indica que no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula en favor de H_1 . Así los datos residuales se distribuyen normales.

5.8.4.7 Supuesto de independencia para existencia del modelo

El Test de Durbin-Watson permitió evaluar si existe autocorrelación en una Regresión lineal. Sin embargo, para analizar los límites superior e inferior del test, se realizaron tablas en primera instancia de 100 observaciones y posteriormente se modificó a 200, es por esto que se analizó la independencia a través de los gráficos de los residuos en los modelos globales.

De la FIGURA 30 se puede observar que no existe tendencia de los residuos ni comportamiento alguno, por lo tanto, se puede afirmar que se cumple el supuesto de independencia para el modelo global de SST.

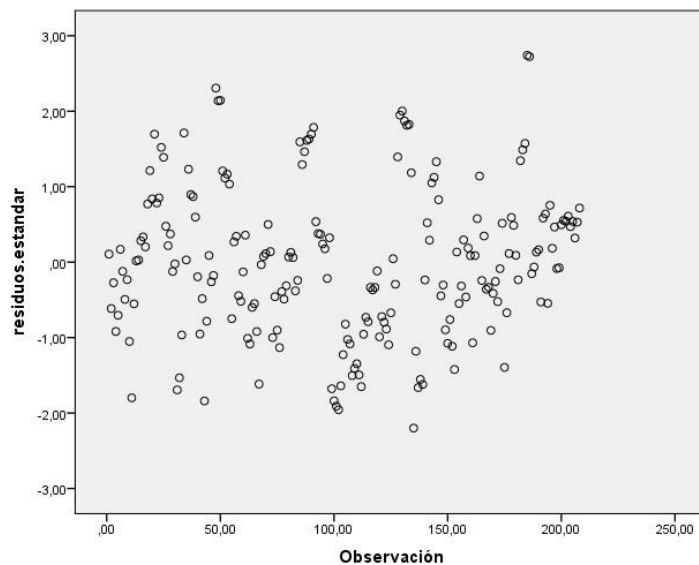


FIGURA 30. Análisis de independencia de los residuos SST (GLOBAL).

5.9 Procedimiento de control de calidad de agua

- En primera instancia se predicen los valores de la DBO₅, DQO y SST con los modelos a nivel global.
- Si alguno de estos indicadores está cercano a no cumplir la norma o simplemente no la cumple, se predice el indicador en cuestión a nivel particular de pretratamiento y tratamiento biológico secundario, al tener capacidad de decisión los modelos particulares, se pueden modificar en función de mejorar los niveles de contaminación.

TABLA 88. Modelos de predicción de los indicadores.

MODELOS GLOBALES DE IDENTIFICACIÓN DE CONTAMINACIÓN

$$DBO_{5EF}(S_i) = 42,3391 - 1,6239*(Caudal_{AF}) + 0,0163*(Caudal_{AF})^2 - 0,0062*DQO_{AF} + 0,0406*DBO_{5AF}$$

$$DQO_{EF}(S_i) = 86,0249 - 0,2398*SST_{AF} + 14,8301*PH_{ZA} + 1,1619*T_{ZA} - 0,1232*IVL_{ZA} - 0,0095*VOL.REC.$$

$$SST_{EF}(S_i) = 69,8396 + 0,0678*SST_{AF} - 17,8505*T_{ZA} + 0,8110*(T_{ZA})^2 + 0,0783*IVL_{ZA} + 0,0020*VOL.REC$$

MODELOS PARTICULARES CON CAPACIDAD DE DECISIÓN

PRETRATAMIENTO

$$DBO_{5EF}(S_i) = 28,2447 - 1,8996*(B.rejas) - 0,9187*(Arena)$$

$$DQO_{EF}(S_i) = 79,2569 - 3,9180*(B.rejas) - 1,8836*(Arena)$$

$$SST_{EF}(S_i) = 35,4137 + 0,4716*(Caudal_{AF}) - 6,1222*(B.rejas) - 1,1997*(Arena)$$

TRATAMIENTO BIOLÓGICO-SECUNDARIO

$$DBO_{5EF}(S_i) = 26,9907 - 12,8086*(OD) + 0,0015*(VOL.rec.)$$

$$DQO_{EF}(S_i) = 76,3264 - 26,5674*(OD) + 0,0032*(VOL.rec.)$$

$$SST_{EF}(S_i) = 69,2353 - 22,6776*(OD) + 0,0455*(VOL.purg.)$$

6.- CONCLUSIONES

En este Proyecto de Título se analizaron diferentes e indicadores que intervienen en los procesos la planta de tratamientos de aguas residuales municipales de Puerto Natales. Se encontró que los indicadores de contaminación más importantes a nivel de remoción son la demanda bioquímica de oxígeno en cinco días DBO_5 , la demanda química de oxígeno DQO y los sólidos suspendidos totales SST.

La eficiencia de remoción en el pretratamiento, alcanzan porcentajes de 24,7%, 9% y 10,8% para DQO, DBO_5 y SST respectivamente. Sin embargo, las eficiencias más altas de

este análisis se encuentran en el tratamiento biológico secundario, ya que, para DQO, DBO₅ y SST se logra una eficiencia de 82,3%, 92,4% y 92,6% respectivamente, lo que describe también la importancia de este subproceso a nivel global.

Con respecto al agua utilizada en el proceso biológico para la remoción de biomasa flotante, se puede afirmar que no tiene impacto significativo en la dilución del agua residual, debido a que representa solo un 2% del volumen total del fluido que ingresa al afluente de la planta. Además a la etapa recirculan los lodos del proceso. Sin embargo, estos 90 m³/día de agua potable utilizada, resultan poco práctico y costoso. Por esto se sugiere estudiar el impacto de remover esta biomasa reingresando el agua tratada desde el efluente de la planta, a través de bombas, con el fin de obtener un proceso integrado.

Se ajustaron modelos de pronósticos de regresión múltiple DQO, DBO₅ y SST en el efluente, en función de variables con capacidad de decisión en el pretratamiento y tratamiento biológico secundario, con 41 observaciones con capacidad de decisión, de carácter compuesto de 24 horas cada una.

Para la DBO₅ en el efluente de la planta en función de las variables del pretratamiento se obtuvo un modelo cuyo nivel de significancia resultó ser favorable con p-value = 6,25052E-10. Las variables que mejor describen la remoción de este indicador son la basura extraída de las rejillas gruesa y fina y la arena extraída en el mismo subproceso. Estas variables independientes explican un 65,50% de la variabilidad de DBO₅ en el efluente de la planta. Además se pudo observar un alto grado de asociación entre las variables respuesta y la variable predictora con un coeficiente de correlación múltiple de 0,8199.

Para la DQO en el efluente de la planta en función de las variables del pretratamiento se obtuvo un modelo cuyo nivel de significancia resultó ser favorable con p-value = 3,7952E-09. Las variables que mejor describen la remoción de este indicador son la basura extraída de las rejillas gruesa y fina y la arena extraída en el mismo subproceso. Estas variables independientes explican un 62,06% de la variabilidad de DQO en el efluente de la planta. Además se pudo observar un alto grado de asociación entre las variables respuesta y la variable predictora con un coeficiente de correlación múltiple de 0,7997.

Para los SST en el efluente de la planta en función de las variables del pretratamiento, se obtuvo un modelo cuyo nivel de significancia resultó ser favorable con $p\text{-value} = 3,673\text{E}-08$. Las variables que mejor describen la remoción de este indicador son el caudal de agua residual en el afluente, la basura extraída de las rejillas gruesa y fina y la arena extraída en el mismo subproceso. Estas variables independientes explican un 60,24% de la variabilidad de SST en el efluente de la planta. Además se pudo observar un alto grado de asociación entre las variables respuesta y la variable predictora con un coeficiente de correlación múltiple de 0,77951.

Para la DBO_5 en el efluente de la planta en función de las variables del tratamiento biológico secundario, se obtuvo un modelo cuyo nivel de significancia resultó ser favorable con $p\text{-value} = 1,028\text{E}-09$. Las variables que mejor describen la remoción de este indicador son el nivel de oxígeno disuelto medido en la zanja de oxidación y el volumen de lodo recirculado en el subproceso. Estas variables independientes explican un 64,58% de la variabilidad de DBO_5 en el efluente de la planta. Además se pudo observar un alto grado de asociación entre las variables respuesta y la variable predictora con un coeficiente de correlación múltiple de 0,8146.

Para la DQO en el efluente de la planta en función de las variables del tratamiento biológico secundario, obtuvo un modelo cuyo nivel de significancia resultó ser favorable con $p\text{-value} = 1,548\text{E}-09$. Las variables que mejor describen la remoción de este indicador son el nivel de oxígeno disuelto medido en la zanja de oxidación y el volumen de lodo recirculado en el subproceso. Estas variables independientes explican un 63,81% de la variabilidad de DQO en el efluente de la planta. Además se pudo observar un alto grado de asociación entre las variables respuesta y la variable predictora con un coeficiente de correlación múltiple de 0,8101.

Para los SST en el efluente de la planta en función de las variables del tratamiento biológico secundario, obtuvo un modelo cuyo nivel de significancia resultó ser favorable con $p\text{-value} = 1,301\text{E}-07$. Las variables que mejor describen la remoción de este indicador son el nivel de oxígeno disuelto medido en la zanja de oxidación y el volumen de lodo purgado en el subproceso. Estas variables independientes explican un 54,59% de la variabilidad de DQO en el efluente de la planta lo cual es bajo con respecto a los demás

modelos. Además se pudo observar un moderado grado de asociación entre las variables respuesta y la variable predictora con un coeficiente de correlación múltiple de 0,7523.

Además se ajustaron modelos de pronósticos de regresión múltiple simples y cuadráticos en variables de DQO, DBO₅ y SST en el efluente, en función de variables y parámetros a nivel global, con 208 observaciones con y sin capacidad de decisión, de carácter compuesto y puntual.

Para la DBO₅ en el efluente de la planta en función de las variables del tratamiento global, se obtuvo un modelo cuyo nivel de significancia resultó ser altamente favorable con p-value = 3,161E-59. Las variables que mejor describen la remoción de este indicador son el caudal promedio del afluente de la planta, el valor cuadrático del caudal promedio del afluente de la planta, la demanda química de oxígeno en el afluente y la demanda bioquímica en cinco días del afluente de la planta. Estas variables independientes explican un 74,09% de la variabilidad de DBO₅ en el efluente de la planta. Además se pudo observar un alto grado de asociación entre las variables respuesta y la variable predictora con un coeficiente de correlación múltiple de 0,8636.

Para la DQO en el efluente de la planta en función de las variables del tratamiento global, se obtuvo un modelo cuyo nivel de significancia resultó ser altamente favorable con p-value = 1,80789E-68. Las variables que mejor describen la remoción de este indicador son los sólidos suspendidos totales en el afluente de la planta, el pH en la zona aeróbica, la temperatura en la zona aeróbica, el índice volumétrico de lodos del licor mezclado y el volumen de lodos recirculado de la planta. Estas variables independientes explican un 79,46% de la variabilidad de DQO en el efluente de la planta. Además se pudo observar un alto grado de asociación entre las variables respuesta y la variable predictora con un coeficiente de correlación múltiple de 0,8942.

Para SST en el efluente de la planta en función de las variables del tratamiento global, se obtuvo un modelo cuyo nivel de significancia resultó ser altamente favorable con p-value = 5,69755E-40. Las variables que mejor describen la remoción de este indicador son los sólidos suspendidos totales en el afluente de la planta, la temperatura en la zona aeróbica, el valor cuadrático de la temperatura en la zona aeróbica, el índice volumétrico de lodos del

licor mezclado y el volumen de lodos recirculado de la planta. Estas variables independientes explican un 60,51% de la variabilidad de los SST en el efluente de la planta. Además se pudo observar un moderado grado de asociación entre las variables respuesta y la variable predictora con un coeficiente de correlación múltiple de 0,7840.

Los test de los supuestos de existencia del modelo como varianza constante, normalidad de los errores e independencia arrojaron resultados satisfactorios para todos los modelos antes mencionados.

Las variables predictoras con capacidad de decisión en el pretratamiento como basura de las rejas gruesa y fina, y arenas extraídas son de gran importancia para la remoción de DBO₅, DQO Y SST en el efluente ya que forman parte de los tres modelos de este subproceso.

La variable predictora con capacidad de decisión en el tratamiento biológico secundario, oxígeno disuelto (OD) en la zona aeróbica es de gran importancia para la remoción de DBO₅, DQO Y SST en el efluente ya que forma parte de los tres modelos en este subproceso.

Finalmente, Los modelos formulados generan un impacto de gran importancia, debido a que, en la actualidad la PTAS municipal no cuenta con un sistema que le permita predecir la calidad del agua tratada vertida a los canales de la zona. Así podrá llevar un control más exhaustivo de los niveles de contaminación y anticiparse a escenarios catastróficos para el medio ambiente.

REFERENCIAS

Márquez A., & Guevara E. (2004) Descripción y evaluación del funcionamiento de un sistema de tratamiento de aguas residuales. *REVISTA INGENIERÍA UC*, 11(2), 92-101.

Correa, J., Iral, R., & Rojas L. (2006). Estudio de potencia de pruebas de homogeneidad de varianza. *REVISTA COLOMBIANA DE ESTADÍSTICA*, 57-76.

Opereza, N. (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. REVISTA CAOS CONCIENCIA, 1, 51-58.

Díaz F., & Serrano L. (2002). Desinfección del agua con luz ultravioleta. REVISTA INVESTIGACION GERM-EX S.A. DE C-V, 24-28.

Winkler, M. (1999) Tratamiento biológico de aguas de desecho. Ciudad de México: Limusa Noriega.

Kiely, Gerard, (1999). Ingeniería ambiental: fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. Madrid: McGraw-Hill.

Metcalf & Eddy (1996). Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización. Ciudad de México: McGraw-Hill / Interamericana.

Henze M., Gujer W., Mino T. & Van Loosdrecht M. (2002). Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. Londres: IWA publishing.

Task Group (2002). Anaerobic Digestion model N°1, IAWQ scientific and technical report N° 13. Londres: IWA publishing.

Campos, C. (2003). Indicadores de contaminación fecal en aguas. En C. Diaz. Agua potable para comunidades rurales, reúso y tratamientos avanzados de aguas residuales domesticas (págs. 224-229). Ciudad de México: Limusa Noriega.

ANEXO I. Conjuntos de datos para modelamiento y balance de materia.

TABLA I,1. Datos de variables para modelos particulares

OBS.	Caudal medio [L/s]	Basura de rejas [sacos/día]	Arenas [sacos/día]	OD zona aeróbica. [mg/l]	S. Sed a 30' [ml/l]	Volumen recirculado [m ³ /día]	Volumen purgado [m ³ /día]	DBO ₅ [mg/L] EF	DQO [mg/L] EF	SST [mg/L] EF
1	110	0	0	0,6	220	9547	333	34	90	70

2	67	3	9	1,71	600	6287	152	14	50	32
3	75	5	11	1,8	630	2829	122	13	48	25
4	79	3	7	1,64	550	2900	196	17	55	46
5	80	3	2	1,09	340	7306	292	27	78	41
6	88	3	11	1,85	660	6783	241	12	45	55
7	90	3	7	1,75	570	4967	113	16	54	50
8	56	1	1	1,27	400	7308	120	24	65	54
9	57	2	5	1,51	540	5143	166	19	62	36
10	48	3	0	1,13	350	7121	121	29	84	42
11	60	0	0	0,79	330	5248	0	33	89	72
12	72	3	18	2,07	800	4556	159	5	34	49
13	56	5	11	2,19	750	4922	49	7	36	15
14	46	3	8	1,92	690	5198	50	6	33	14
15	48	4	14	1,79	650	4475	69	11	44	15
16	53	5	8	1,98	690	3707	24	10	40	14
17	58	3	14	1,61	600	2976	10	13	48	20
18	73	3	5	1,48	490	6645	213	20	64	59
19	65	3	10	1,56	560	4232	199	16	55	54
20	68	4	26	1,94	750	5343	64	6	36	10
21	77	2	2	1,26	420	6138	248	20	65	66
22	87	4	10	1,69	690	4637	336	11	45	59
23	62	3	15	2,3	800	4678	0	3	26	27
24	59	3	6	1,43	430	4725	106	10	43	34
25	69	4	11	1,75	510	3936	180	2	24	33
26	69	3	12	1,56	490	3963	99	4	28	36
27	134	6	20	1,26	390	3102	317	7	35	50
28	81	4	13	2,21	850	4016	100	6	32	26
29	96	3	11	1,34	490	4545	469	10	40	56
30	68	4	8	1,46	420	4635	310	9	38	31
31	69	3	12	2,07	670	2553	120	9	40	25
32	82	3	11	1,88	650	6094	94	9	39	33
33	84	3	14	2,18	750	8992	186	8	38	35
34	90	4	13	2,25	780	4262	0	5	30	21
35	92	3	14	2,22	850	6804	90	16	56	30

OBS.	Caudal medio [l/s]	Basura de rejas [sacos/día]	Arenas [sacos/día]	OD zona aeróbica 2 Prom. [mg/l]	S. Sed a 30' [ml/l]	Volumen recirculado [m ³ /día]	Volumen purgado [m ³ /día]	DBO ₅ [mg/L] EF.	DQO [mg/L] EF	SST [mg/L] EF
36	90	3	11	1,97	670	6795	50	9	40	41
37	82	3	12	1,8	650	5307	460	10	42	56
38	83	2	11	1,68	640	7792	448	10	41	56
39	50	4	12	2,34	860	5301	313	15	50	20
40	83	3	9	1,5	530	6699	371	18	59	35

41	50	2	1	0,99	290	9209	372	29	83	70
----	----	---	---	------	-----	------	-----	----	----	----

DIA	AFLUENTE					RESIDUOS PRIMARIOS		ZONA AERÓBICA						EFLUENTE		
	Caudal medio [l/s]	pH prom. día	DQO [mg/l] AFLUENTE	SST [mg/l] AFLUENTE	DBO5 [mg/l] AFLUENTE	Basura de rejillas [sacos/día]	Arenas [sacos/día]	OD zona aeróbica [mg/l]	pH Prom. día	T Prom. [°C]	IVL [ml/g]	Volumen recirculado [m3/día]	Volumen purgado [m3/día]	DQO [mg/L] EFLUENTE	SST [mg/l] EFLUENTE	DBO5 [mg/l] EFLUENTE
02-ene	58	7,9	1.036	500	202,5	4	14	1,50	7,19	13,70	74	5.497	136	56	29	4,0
03-ene	65	7,9	1.036	500	182,0	2	4	0,92	7,25	14,10	90	7.650	5	20	30	4,0
04-ene	58	8,4	1.036	500	182,0	3	21	1,42	7,1	14,10	138	7.255	115	20	36	4,0
05-ene	60	8,3	1.036	500	182,0	2	4	0,51	7,39	14,40	148	5.566	2	20	29	4,0
06-ene	56	8,2	1.036	500	182,0	5	21	0,78	7,2	14,80	103	4.505	147	68	28	4,0
07-ene	53	8,0	981	500	182,0	3	13	0,80	7,33	14,40	82	4.350	120	44	31	4,0
08-ene	60	8,2	978	500	199,0	2	12	0,76	7,37	14,70	82	5.108	277	20	32	11,3
09-ene	67	8,3	974	500	199,0	3	9	0,91	7,23	14,60	101	6.287	252	20	32	11,3
12-ene	76	8,2	1.146	330	216,0	4	6	1,17	7,16	14,90	77	5.955	15	20	22	18,6
13-ene	72	8,2	1.146	330	216,0	4	18	0,62	7,27	16,10	73	5.311	97	49	22	18,6
14-ene	74	8,0	1.146	330	216,0	4	8	0,76	7,12	15,70	72	3.183	287	119	8	18,6
15-ene	75	8,1	1.477	160	214,0	5	11	1,15	7,29	15,30	101	3.829	322	119	8	12,8
16-ene	46	8,0	1.477	160	214,0	3	21	1,79	7,04	15,00	67	3.667	133	119	8	7,0
17-ene	41	8,0	886	80	212,0	2	10	1,13	7,23	15,40	71	2.792	57	160	4	7,0
18-ene	49	8,1	295	80	212,0	3	9	1,06	7,31	15,10	71	2.705	121	160	4	7,0
19-ene	53	8,1	295	80	212,0	0	0	1,06	7,31	15,10	71	2.482	0	160	4	7,0
20-ene	54	8,1	295	80	212,0	2	8	0,95	7,08	15,20	75	2.561	149	160	4	7,0
21-ene	51	8,3	467	80	212,0	4	11	1,34	7,14	14,60	61	2.494	136	167,5	4	7,0
22-ene	59	8,1	467	335	225,1	3	7	1,04	7,22	14,50	69	2.900	96	67,5	26	5,8
23-ene	42	8,1	467	335	225,1	3	9	1,01	7,14	14,70	74	3.756	300	67,5	26	4,6
24-ene	41	8,2	455	350	238,1	3	7	0,93	7,13	15,00	72	4.657	162	56,5	38	4,6
25-ene	40	8,2	535	385	238,1	2	6	0,91	7,27	15,30	72	6.493	81	50	38	4,6
26-ene	47	8,2	535	385	238,1	0	0	0,91	7,27	15,30	72	6.187	1	50	38	4,6
27-ene	43	8,3	535	385	238,1	5	13	0,80	7,26	15,10	58	4.481	257	45	38	4,6
28-ene	62	8,5	535	385	238,1	3	7	0,77	7,35	14,70	58	6.348	283	50	38	4,6

DIA	AFLUENTE					RESIDUOS PRIMARIOS		ZONA AERÓBICA						EFLUENTE		
	Caudal medio [l/s]	pH prom. día	DQO [mg/l] AFLUENTE	SST [mg/l] AFLUENTE	DBO5 [mg/l] AFLUENTE	Basura de rejillas [sacos/día]	Arenas [sacos/día]	OD zona aeróbica [mg/l]	pH Prom. día	T Prom. [°C]	IVL [ml/g]	Volumen recirculado [m3/día]	Volumen purgado [m3/día]	DQO [mg/L] EFLUENTE	SST [mg/l] EFLUENTE	DBO5 [mg/l] EFLUENTE
29-ene	50	8,4	398	270	270,1	3	2	1,09	7,31	15,00	70	4.306	392	86,5	21	8,3
30-ene	55	8,3	398	300	270,1	1	1	1,26	7,27	14,90	70	4.743	357	86,5	21	12,0
31-ene	53	8,4	398	247	302,0	3	1	1,29	7,2	14,40	81	4.422	149	99	16	12,0
01-feb	59	8,3	365	230	302,0	5	20	1,76	7,36	15,40	78	4.117	373	99	16	12,0
03-feb	55	8,2	365	230	302,0	2	12	1,31	7,23	15,40	61	4.323	124	99	16	12,0
04-feb	64	8,1	383	373	302,0	3	13	1,50	7,31	16,50	58	4.165	424	90	19	12,0
06-feb	73	8,3	400	450	258,8	3	10	1,59	7,29	15,40	75	5.978	343	54	22	26,3
07-feb	76	8,3	400	450	215,7	3	10	2,10	7,33	15,30	75	5.840	44	54	26	26,3
14-feb	66	8,1	636	490	290,0	2	3	1,48	7,54	17,70	98	4.792	195	23	73	14,0
17-feb	64	8,1	340	440	290,0	10	0	1,30	7,23	17,20	171	6.994	422	33	60	14,0
18-feb	69	8,2	742	337	260,0	2	20	1,78	7,27	17,30	135	6.504	328	30	61	15,5
19-feb	65	8,2	742	417	260,0	1	16	1,57	7,28	16,40	135	6.316	0	30	54	15,5
20-feb	66	8,2	669	420	260,0	1	1	1,57	7,28	16,40	135	6.308	2	30	54	15,5
21-feb	70	8,6	705	397	260,0	2	0	1,57	7,28	16,40	134	4.975	0	44	48	17,0
24-feb	71	8,0	784	389	230,0	0	0	1,52	7,48	17,20	182	5.000	9	40	52	17,0
25-feb	57	8,4	645	352	230,0	2	5	1,01	7,57	16,50	182	5.143	66	62	36	17,0
26-feb	86	8,1	582	355	252,9	1	1	0,76	7,29	15,70	205	5.406	35	62	36	33,8
27-feb	80	8,3	582	355	275,7	7	0	0,87	7,33	17,06	205	5.430	0	62	36	33,8
28-feb	87	8,3	582	335	275,7	7	0	0,51	7,54	16,10	168	5.260	48	65	32	33,8
01-mar	86	8,2	349	320	275,7	2	10	0,98	7,37	15,40	168	4.627	362	65	32	33,8
02-mar	85	8,2	349	320	275,7	2	10	0,98	7,37	15,40	168	6.181	18	65	32	33,8
03-mar	79	8,3	349	320	275,7	2	10	0,98	7,37	15,40	196	4.677	189	65	32	33,8
04-mar	85	8,5	482	211	200,9	2	0	0,61	7,6	14,60	198	5.002	402	55	42	33,4
05-mar	78	8,4	615	211	200,9	3	0	1,33	7,27	14,80	198	5.121	121	55	42	33,4
06-mar	64	8,4	615	211	177,6	4	0	1,49	7,26	14,80	198	5.102	282	55	42	20,0

DIA	AFLUENTE					RESIDUOS PRIMARIOS		ZONA AERÓBICA						EFLUENTE		
	Caudal medio [l/s]	pH prom. día	DQO [mg/l] AFLUENTE	SST [mg/l] AFLUENTE	DBO5 [mg/l] AFLUENTE	Basura de rejillas [sacos/día]	Arenas [sacos/día]	OD zona aeróbica [mg/l]	pH Prom. día	T Prom. [°C]	IVL [ml/g]	Volumen recirculado [m3/día]	Volumen purgado [m3/día]	DQO [mg/L] EFLUENTE	SST [mg/l] EFLUENTE	DBO5 [mg/l] EFLUENTE
07-mar	65	8,4	615	361	128,5	3	5	1,71	7,83	14,60	185	5.237	3	55	42	20,0
08-mar	62	8,4	615	361	128,5	3	5	0,59	7,29	14,70	185	5.360	0	55	42	20,0
09-mar	66	8,4	349	356	128,5	0	5	0,59	7,29	14,70	185	5.315	13	55	42	20,0
10-mar	63	8,2	349	356	128,5	2	10	1,11	7,49	14,70	192	5.624	86	55	42	20,0
11-mar	72	8,2	349	306	128,5	0	10	1,39	7,32	15,50	198	5.248	0	72	28	20,0
12-mar	42	8,3	82	306	128,5	4	2	1,35	7,52	14,00	201	5.216	316	72	28	7,0
13-mar	40	8,5	480	285	199,5	3	18	1,07	7,47	14,30	157	4.556	319	75	24	6,0
14-mar	38	8,3	480	285	199,5	10	18	1,68	7,4	15,20	157	5.289	395	75	24	5,0
17-mar	45,9	8,3	878	285	268,0	3	15	1,26	8,1	15,30	178	4.427	318	75	24	5,0
20-mar	45,8	8,4	878	171	268,0	5	11	1,79	7,56	13,00	178	2.922	149	147	5	5,0
21-mar	51	8,4	527	102	230,5	6	20	1,85	7,62	13,20	178	2.786	110	147	5	6,0
22-mar	54	8,3	527	102	193,0	4	10	0,98	7,27	15,30	178	3.263	107	147	5	6,0
23-mar	57	8,5	527	102	193,0	4	10	0,98	7,27	15,30	178	3.601	122	147	5	6,0
24-mar	47	8,5	527	102	193,0	2	8	2,19	7,63	14,60	181	3.590	230	147	5	6,0
25-mar	51	8,4	527	102	193,0	3	12	1,75	7,5	14,00	209	3.880	110	147	5	6,0
26-mar	50	8,4	527	102	193,0	3	5	1,84	7,85	14,80	209	3.293	230	140	5	6,0
27-mar	55	8,3	527	102	243,0	3	12	1,49	7,77	16,40	137	3.190	60	140	5	8,5
28-mar	56	8,3	527	99	243,0	3	8	1,72	7,55	14,50	137	3.198	5	140	5	8,5
29-mar	55	8,3	527	99	243,0	2	0	1,72	7,52	14,20	137	3.541	2	140	5	11,0
30-mar	55	8,3	527	99	293,0	3	0	1,72	7,52	14,20	137	3.369	429	140	5	11,0
31-mar	55	8,3	527	99	293,0	3	11	2,11	7,77	13,70	131	3.108	291	140	5	11,0
01-abr	58	8,3	527	107	293,0	3	10	1,21	7,61	14,00	131	3.733	27	140	5	11,0
02-abr	56	8,3	527	107	293,0	3	13	1,30	7,7	15,20	171	3.674	147	140	5	11,0
03-abr	48	8,4	527	107	294,5	4	14	1,49	7,56	14,50	171	3.475	19	140	5	7,5
04-abr	46	8,3	527	107	294,5	2	6	1,87	7,6	14,90	189	3.541	140	148	5	4,0

DIA	AFLUENTE					RESIDUOS PRIMARIOS		ZONA AERÓBICA						EFLUENTE		
	Caudal medio [l/s]	pH prom. día	DQO [mg/l] AFLUENTE	SST [mg/l] AFLUENTE	DBO5 [mg/l] AFLUENTE	Basura de rejillas [sacos/día]	Arenas [sacos/día]	OD zona aeróbica [mg/l]	pH Prom. día	T Prom. [°C]	IVL [ml/g]	Volumen recirculado [m3/día]	Volumen purgado [m3/día]	DQO [mg/L] EFLUENTE	SST [mg/l] EFLUENTE	DBO5 [mg/l] EFLUENTE
07-abr	42	8,2	200	107	296,0	3	9	1,24	7,09	15,40	163	3.894	271	148	5	4,0
08-abr	47	7,9	200	107	296,0	3	6	1,79	7,57	14,40	163	3.799	348	148	5	4,0
09-abr	45	8,0	200	110	296,0	3	7	1,47	7,38	14,60	163	3.565	326	148	5	4,0
10-abr	53	8,1	200	110	270,0	5	8	0,98	7,32	14,00	180	3.707	24	148	5	4,0
11-abr	51	8,2	525	110	270,0	3	7	1,03	7,66	13,30	180	3.537	0	148	5	4,0
12-abr	58	8,2	525	110	244,0	4	11	1,18	7,5	13,50	180	2.873	425	148	5	4,0
13-abr	54	8,2	525	110	244,0	0	0	1,18	7,5	13,50	180	3.176	0	148	5	4,0
14-abr	55	8,3	850	110	244,0	4	14	0,77	7,46	14,20	180	3.501	0	148	5	4,0
15-abr	64	7,8	850	110	244,0	4	12	1,14	7,29	14,10	180	3.140	289	102	5	4,0
16-abr	60	8,0	641	328	250,9	3	22	1,12	7,13	12,70	180	5.952	0	52	36	4,0
17-abr	58	8,3	641	326	250,9	3	14	1,11	7,26	13,50	180	5.976	0	52	36	4,0
18-abr	36	8,3	641	326	250,9	5	13	1,04	7,36	13,10	180	5.977	0	52	36	2,0
19-abr	35	8,4	431	326	257,8	3	12	1,50	7,33	12,70	180	5.937	0	52	36	2,0
20-abr	37	8,4	431	326	257,8	0	0	1,50	7,33	12,70	180	5.851	0	52	36	2,0
21-abr	53	8,2	431	326	257,8	3	5	1,08	7,36	13,10	162	5.645	313	52	36	2,0
22-abr	39	8,1	431	326	257,8	3	9	1,54	7,58	13,10	166	5.092	3	52	36	2,0
23-abr	55	8,3	431	206	248,7	3	10	1,56	7,69	12,70	166	3.232	99	107	12	4,1
24-abr	60	8,3	431	206	248,7	3	11	1,41	7,45	12,30	182	3.795	267	107	12	4,1
25-abr	57	8,1	431	206	239,5	3	6	1,57	7,07	12,70	182	3.341	0	107	12	4,1
26-abr	63	8,5	300	209	239,5	4	20	1,11	7,47	12,60	182	3.950	0	107	12	6,2
27-abr	60	8,5	300	209	239,5	0	0	1,11	7,47	12,60	182	4.232	0	107	12	6,2
28-abr	59	8,3	300	209	239,5	3	11	1,42	7,74	13,50	182	4.468	109	107	12	6,2
29-abr	81	8,1	300	209	239,5	6	13	1,69	8,24	12,90	154	4.271	317	107	12	6,2
01-may	57	8,4	400	309	227,7	0	0	1,64	7,34	12,20	154	7.075	0	36	5	5,0
02-may	52	8,4	500	309	216,0	3	10	1,51	7,84	12,80	154	7.056	54	36	5	5,0

DIA	AFLUENTE					RESIDUOS PRIMARIOS		ZONA AERÓBICA						EFLUENTE		
	Caudal medio [l/s]	pH prom. día	DQO [mg/l] AFLUENTE	SST [mg/l] AFLUENTE	DBO5 [mg/l] AFLUENTE	Basura de rejillas [sacos/día]	Arenas [sacos/día]	OD zona aeróbica [mg/l]	pH Prom. día	T Prom. [°C]	IVL [ml/g]	Volumen recirculado [m3/día]	Volumen purgado [m3/día]	DQO [mg/L] EFLUENTE	SST [mg/l] EFLUENTE	DBO5 [mg/l] EFLUENTE
03-may	64	8,2	500	309	216,0	6	12	1,00	7,85	12,80	156	7.300	58	36	5	5,0
04-may	69	8,2	500	309	216,0	0	0	1,00	7,85	12,80	156	7.509	0	36	5	5,0
06-may	80	8,0	500	309	216,0	5	12	1,32	7,65	10,60	175	6.579	173	36	5	5,0
07-may	80	8,3	500	309	216,0	4	10	1,48	7,68	11,80	178	4.446	408	118	5	5,0
13-may	80	7,9	1.002	240	206,5	5	19	1,73	7,03	10,40	196	4.420	103	118	5	13,6
14-may	61	8,1	1.002	240	206,5	4	9	1,70	7,2	10,40	171	6.304	0	45	5	13,6
15-may	64	8,2	1.114	250	232,7	4	11	1,77	7,21	10,30	180	5.819	345	45	5	8,3
16-may	64	8,1	732	315	232,7	4	10	1,69	7,22	9,20	146	5.637	176	45	5	8,3
17-may	61	8,4	732	315	232,7	4	12	1,20	7,44	10,70	150	6.371	166	45	5	3,0
18-may	62	8,4	732	315	259,0	0	0	1,20	7,44	10,70	150	6.095	0	45	5	3,0
19-may	58	8,3	732	315	259,0	5	9	1,23	7,19	10,60	167	6.064	343	45	5	3,0
20-may	68	8,4	732	315	264,5	3	10	2,03	7,13	10,20	195	5.446	283	45	5	3,0
27-may	59	7,9	783	271	270,0	3	6	1,43	7,54	10,70	198	4.725	246	95	7	4,0
28-may	62	8,2	783	271	270,0	3	11	1,18	7,43	12,20	188	4.328	271	90	8	5,0
29-may	65	8,1	783	271	265,0	4	11	2,01	7,37	10,90	192	5.021	275	90	8	3,5
30-may	63	8,4	366	240	265,0	3	14	1,58	7,46	11,00	192	4.051	279	90	8	2,0
31-may	57	8,4	366	240	265,0	4	11	1,34	7,63	10,70	184	4.504	0	90	8	2,0
01-jun	81	8,4	366	240	265,0	0	0	1,34	7,63	10,70	184	4.361	60	90	8	5,0
02-jun	67	8,0	366	240	265,0	6	17	1,47	7,21	10,80	176	3.725	152	90	8	2,0
03-jun	66	8,4	366	240	265,0	3	10	1,46	7,39	8,70	199	4.506	143	95	8	2,0
04-jun	66	8,3	320	220	230,0	4	14	1,24	7,73	9,00	178	4.347	93	95	6	3,0
05-jun	69	8,2	320	220	230,0	4	11	1,75	7,15	8,80	188	3.936	80	95	6	3,0
06-jun	82	8,2	510	220	230,0	4	17	1,88	7,35	8,70	199	3.726	328	95	6	4,0
07-jun	64	7,9	510	220	195,0	4	8	1,36	7,46	9,50	224	4.904	0	95	6	4,0
08-jun	69	7,9	510	191	195,0	0	0	1,36	7,46	9,50	224	4.015	0	95	6	4,0

DIA	AFLUENTE					RESIDUOS PRIMARIOS		ZONA AERÓBICA						EFLUENTE		
	Caudal medio [l/s]	pH prom. día	DQO [mg/l] AFLUENTE	SST [mg/l] AFLUENTE	DBO5 [mg/l] AFLUENTE	Basura de rejillas [sacos/día]	Arenas [sacos/día]	OD zona aeróbica [mg/l]	pH Prom. día	T Prom. [°C]	IVL [ml/g]	Volumen recirculado [m3/día]	Volumen purgado [m3/día]	DQO [mg/L] EFLUENTE	SST [mg/l] EFLUENTE	DBO5 [mg/l] EFLUENTE
09-jun	65	8,0	510	120	195,0	5	14	0,91	7,44	9,70	196	4.625	264	95	6	4,0
10-jun	93	8,4	607	120	195,0	4	16	2,01	7,62	8,60	203	4.154	139	95	6	17,0
11-jun	69	8,4	607	340	198,0	3	12	1,56	7,78	9,10	234	3.963	29	60	36	4,5
12-jun	71	8,3	700	340	198,0	3	14	1,65	7,52	9,00	165	4.101	395	60	36	5,0
13-jun	74	8,1	700	340	201,0	5	11	2,17	7,09	11,10	167	5.416	85	60	36	5,0
14-jun	79	8,4	700	340	201,0	2	12	2,07	7,48	8,70	171	3.676	193	60	36	5,0
15-jun	74	8,4	700	340	201,0	0	0	2,07	7,48	8,70	171	3.937	0	60	36	5,0
16-jun	68	8,5	800	340	201,0	6	18	1,22	7,6	9,30	179	4.532	365	60	36	5,0
17-jun	76	8,3	800	340	201,0	4	13	1,72	7	8,70	225	4.566	362	60	36	5,0
19-jun	73	8,4	672	380	208,0	5	21	1,79	7,64	9,30	208	4.193	77	94	5	24,7
20-jun	72	8,4	708	300	215,1	3	20	1,91	7,44	9,90	189	3.875	160	94	5	24,7
21-jun	69	8,3	708	300	215,1	3	4	1,97	7,59	8,70	184	4.503	82	94	5	24,7
22-jun	73	8,3	708	300	215,1	0	0	1,97	7,59	8,70	184	4.022	0	94	5	24,7
23-jun	72	8,1	578	300	215,1	6	21	1,82	7,18	8,80	180	4.671	361	94	5	15,3
25-jun	81	8,1	367	300	238,3	4	13	2,21	7	8,20	274	4.016	0	53	26	20,9
01-jul	85	7,6	650	280	261,5	2	10	1,67	6,94	8,80	220	4.712	222	53	26	32,0
02-jul	86	7,5	650	280	217,7	3	11	1,34	7,32	8,40	210	5.545	469	63	26	9,0
03-jul	77	8,0	549	240	217,7	3	12	1,53	6,85	8,80	207	4.453	71	63	26	9,0
04-jul	70	7,8	382	200	174,0	3	10	1,50	6,85	8,80	220	4.977	106	63	26	9,0
05-jul	78	7,7	382	200	174,0	2	12	1,66	6,87	8,90	201	4.983	247	63	26	18,0
08-jul	77	8,0	358	250	174,0	3	10	1,51	7,27	9,00	211	5.298	456	63	26	18,0
09-jul	68	8,0	344	250	217,0	4	8	1,46	7,31	9,80	205	4.635	18	58	11	14,9
10-jul	69	8,1	333	250	217,0	5	11	1,33	7,14	9,80	203	4.093	0	58	11	17,9
11-jul	68	7,9	328	300	260,0	3	11	1,01	7,04	9,00	205	3.870	112	58	11	17,9
12-jul	77	8,0	293	300	260,0	3	7	1,27	6,86	7,90	199	3.601	502	58	13	17,9

DIA	AFLUENTE					RESIDUOS PRIMARIOS		ZONA AERÓBICA						EFLUENTE		
	Caudal medio [l/s]	pH prom. día	DQO [mg/l] AFLUENTE	SST [mg/l] AFLUENTE	DBO5 [mg/l] AFLUENTE	Basura de rejas [sacos/día]	Arenas [sacos/día]	OD zona aeróbica [mg/l]	pH Prom. día	T Prom. [°C]	IVL [ml/g]	Volumen recirculado [m3/día]	Volumen purgado [m3/día]	DQO [mg/L] EFLUENTE	SST [mg/l] EFLUENTE	DBO5 [mg/l] EFLUENTE
13-jul	67	8,1	293	300	260,0	2	1	1,48	6,67	8,70	190	4.350	0	58	13	8,8
14-jul	67	8,0	347	300	260,0	5	19	1,13	6,87	8,60	215	4.707	169	58	13	8,8
15-jul	72	8,0	347	300	260,0	2	16	0,97	7,13	8,40	239	4.745	435	58	13	8,8
16-jul	79	8,3	435	300	273,4	3	12	1,07	7,15	8,80	229	2.553	200	40	20	30,3
17-jul	97	8,2	435	300	273,4	3	17	0,98	7,24	8,30	252	3.665	0	40	20	51,8
18-jul	101	8,0	505	300	286,8	4	15	1,33	7,28	8,90	229	4.728	0	40	20	51,8
19-jul	104	8,3	505	300	286,8	4	13	1,37	7,26	8,60	229	4.000	210	40	25	51,8
20-jul	98	8,1	505	300	286,8	0	0	1,05	7,36	8,30	229	6.739	485	40	25	51,8
21-jul	97	8,1	505	300	286,8	3	17	1,10	6,96	8,30	234	3.635	87	40	25	51,8
22-jul	101	8,0	530	300	286,8	4	9	1,40	7,29	8,00	207	4.468	15	40	25	51,8
23-jul	92	7,7	530	300	277,2	3	11	0,88	7,31	7,30	234	6.094	94	66	24	43,8
24-jul	85	8,1	395	170	277,2	3	16	0,98	7,27	7,30	231	5.529	0	66	24	35,8
25-jul	81	8,1	395	170	267,6	3	10	0,90	7,35	7,93	226	5.273	147	66	24	35,8
26-jul	81	8,1	280	170	267,6	3	12	0,80	7,4	9,30	235	5.122	290	66	24	35,8
27-jul	81	7,4	280	170	267,6	3	0	0,72	7,3	6,70	235	4.855	0	66	24	35,8
28-jul	82	7,8	280	170	267,6	4	12	1,11	6,95	7,30	218	4.893	0	66	24	35,8
29-jul	79	8,2	280	170	267,6	4	10	0,88	7,1	7,20	211	7.967	0	66	24	35,8
31-jul	48	7,8	452	233	196,3	4	12	0,66	7,05	7,40	230	6.037	294	59	25	5,0
01-ago	47	7,8	623	296	125,0	3	10	0,45	7,08	7,20	243	5.300	458	59	25	5,0
02-ago	42	7,7	623	296	125,0	4	15	0,79	7,15	8,40	243	6.303	490	59	25	5,0
03-ago	50	7,7	623	296	125,0	0	0	0,58	7,18	8,20	243	5.154	0	59	25	5,0
05-ago	70	7,9	523	293	125,0	4	13	1,20	7,35	7,50	250	4.339	354	59	25	5,0
06-ago	90	7,8	523	293	123,0	4	13	0,75	7,37	7,70	218	7.262	0	56	31	15,5
07-ago	105	7,9	396	288	123,0	4	12	0,81	7,38	9,30	224	7.836	401	56	31	36,0
13-ago	92	7,6	369	286	108,5	3	14	1,22	7,16	6,80	274	6.804	0	56	28	17,0

DIA	AFLUENTE					RESIDUOS PRIMARIOS		ZONA AERÓBICA						EFLUENTE		
	Caudal medio [l/s]	pH prom. día	DQO [mg/l] AFLUENTE	SST [mg/l] AFLUENTE	DBO5 [mg/l] AFLUENTE	Basura de rejillas [sacos/día]	Arenas [sacos/día]	OD zona aeróbica [mg/l]	pH Prom. día	T Prom. [°C]	IVL [ml/g]	Volumen recirculado [m3/día]	Volumen purgado [m3/día]	DQO [mg/L] EFLUENTE	SST [mg/l] EFLUENTE	DBO5 [mg/l] EFLUENTE
14-ago	57	7,4	358	238	108,5	3	14	1,05	7,23	7,20	281	6.285	0	53	28	8,0
15-ago	52	7,6	346	189	96,0	3	11	1,08	7,22	7,40	252	6.230	0	53	28	8,0
16-ago	55	7,8	346	189	96,0	2	12	1,31	7,23	8,30	249	6.576	0	53	28	8,0
17-ago	58	7,7	346	189	96,0	1	0	1,05	7,13	8,10	249	6.583	0	53	28	8,0
18-ago	55	8,1	346	189	96,0	4	20	2,06	7,24	7,40	234	7.068	0	53	28	8,0
19-ago	47	7,6	346	189	96,0	3	11	1,13	7,37	6,80	231	6.689	0	53	28	8,0
21-ago	60	7,9	363	176	164,6	4	14	1,98	7,35	6,90	237	6.790	0	54	41	14,7
22-ago	61	7,8	360	163	233,1	4	10	1,55	7,65	7,00	262	5.945	0	54	41	14,7
23-ago	67	7,9	360	163	233,1	3	9	1,18	7,41	7,00	267	5.363	0	54	41	14,7
25-ago	66	7,6	360	163	233,1	4	19	1,09	7,1	7,60	219	3.913	0	54	41	14,7
26-ago	62	7,6	360	163	233,1	4	14	1,07	7,07	8,00	235	4.431	0	54	41	14,7
27-ago	72	8,1	391	315	239,3	3	12	1,30	7,42	8,20	218	5.307	0	65	26	32,0
28-ago	79	8,0	601	315	239,3	4	16	1,38	7,22	8,20	210	5.244	0	65	26	29,3
29-ago	82	7,7	601	315	245,4	2	10	1,43	7,09	8,60	196	5.758	418	65	26	45,3
30-ago	79	8,4	601	315	245,4	3	8	1,00	7,74	8,40	187	5.579	206	65	26	29,3
31-ago	90	8,0	601	315	245,4	0	0	1,00	7,1	7,30	187	5.808	0	65	26	49,3
01-sep	85	7,8	601	315	245,4	3	21	1,31	7,2	9,70	182	5.987	0	65	26	49,3
02-sep	75	7,9	601	315	245,4	3	14	1,51	7,36	9,60	182	5.650	35	65	26	29,3
03-sep	83	7,8	409	300	143,2	2	11	1,28	7,09	7,09	191	4.792	448	75	24	34,6
04-sep	70	8,0	217	300	143,2	2	9	1,01	7,25	10,00	196	4.692	0	75	24	20,0
10-sep	85	7,7	217	90	161,2	4	12	2,34	7,01	9,60	212	3.301	313	150	4	39,8
12-sep	102	7,8	595	90	281,4	2	5	1,44	7,22	9,20	169	3.224	302	150	4	59,6
13-sep	104	7,7	595	90	281,4	2	5	1,78	7,15	9,60	183	5.625	462	150	4	59,6
14-sep	105	7,7	595	90	281,4	0	0	1,78	7,15	9,60	183	5.576	0	150	4	59,6
17-sep	103	8,7	595	282	281,4	3	9	0,95	7,99	9,30	184	6.699	371	69	25	58,3

DIA	AFLUENTE					RESIDUOS PRIMARIOS		ZONA AERÓBICA						EFLUENTE		
	Caudal medio [l/s]	pH prom. día	DQO [mg/l] AFLUENTE	SST [mg/l] AFLUENTE	DBO5 [mg/l] AFLUENTE	Basura de rejillas [sacos/día]	Arenas [sacos/día]	OD zona aeróbica [mg/l]	pH Prom. día	T Prom. [°C]	IVL [ml/g]	Volumen recirculado [m3/día]	Volumen purgado [m3/día]	DQO [mg/L] EFLUENTE	SST [mg/l] EFLUENTE	DBO5 [mg/l] EFLUENTE
18-sep	103	8,7	595	282	281,4	0	0	0,95	7,99	9,30	184	6.435	0	69	25	56,9
19-sep	103	8,7	595	283	281,4	0	0	0,95	7,99	9,30	184	6.436	0	69	25	56,9
20-sep	106	8,0	595	283	281,4	5	8	1,55	7,36	9,40	184	6.272	21	69	25	56,9
21-sep	104	8,0	595	283	281,4	0	0	1,55	7,36	9,40	184	6.890	0	69	25	56,9
22-sep	103	8,0	595	283	281,4	4	11	0,67	7,34	10,20	184	7.376	140	69	25	56,9
23-sep	102	7,9	595	283	281,4	2	6	1,23	7,34	10,20	223	6.811	218	69	25	56,9
24-sep	98	7,5	595	283	281,4	2	1	0,99	7,23	9,50	223	5.209	372	68	25	56,9
25-sep	104	7,3	595	283	281,4	3	2	1,13	7,31	11,10	223	5.312	331	68	25	56,9

ANEXO II. Conjunto de datos proceso de tratamiento de lodos.

DIA	Volumen purgado [m3/día]	Vol. Lodo despachado [m ³ /día]	DIA	Volumen purgado [m3/día]	Vol. Lodo despachado [m ³ /día]	DIA	Volumen purgado [m3/día]	Vol. Lodo despachado [m ³ /día]
02-ene	136	0	17-feb	422	15	29-mar	2	0
03-ene	5	0	18-feb	328	30	30-mar	429	0
04-ene	115	0	19-feb	0	0	31-mar	291	0
05-ene	2	15	20-feb	2	20	01-abr	27	5
06-ene	147	0	21-feb	0	15	02-abr	147	10
07-ene	120	0	24-feb	9	0	03-abr	19	0
08-ene	277	0	25-feb	66	0	04-abr	140	0
09-ene	252	0	26-feb	35	30	07-abr	271	0
12-ene	15	15	27-feb	0	15	08-abr	348	35
13-ene	97	0	28-feb	48	15	09-abr	326	30
14-ene	287	0	01-mar	362	0	10-abr	24	0
15-ene	322	0	02-mar	18	0	11-abr	0	20
16-ene	133	0	03-mar	189	0	12-abr	425	15
17-ene	57	15	04-mar	402	0	13-abr	0	0
18-ene	121	30	05-mar	121	0	14-abr	0	0
19-ene	0	0	06-mar	282	0	15-abr	289	10
20-ene	149	15	07-mar	3	0	16-abr	0	10
21-ene	136	0	08-mar	0	13	17-abr	0	0
22-ene	96	15	09-mar	13	15	18-abr	0	15
23-ene	300	0	10-mar	86	0	19-abr	0	15
24-ene	162	30	11-mar	0	0	20-abr	0	0
25-ene	81	0	12-mar	316	0	21-abr	313	0
26-ene	1	15	13-mar	319	22	22-abr	3	0
27-ene	257	14	14-mar	395	0	23-abr	99	0
28-ene	283	15	17-mar	318	0	24-abr	267	0
29-ene	392	0	20-mar	149	0	25-abr	0	40
30-ene	357	0	21-mar	110	0	26-abr	0	0
31-ene	149	0	22-mar	107	0	27-abr	0	0
01-feb	373	0	23-mar	122	0	28-abr	109	0
03-feb	124	15	24-mar	230	25	29-abr	317	0
04-feb	424	15	25-mar	110	0	01-may	0	0
06-feb	343	0	26-mar	230	0	02-may	54	30
07-feb	44	15	27-mar	60	0	03-may	58	0
14-feb	195	0	28-mar	5	30	04-may	0	0

DIA	Volumen purgado [m3/día]	Vol. Lodo despachado [m ³ /día]	DIA	Volumen purgado [m3/día]	Vol. Lodo despachado [m ³ /día]	DIA	Volumen purgado [m3/día]	Vol. Lodo despachado [m ³ /día]
06-may	173	0	23-jun	361	0	13-ago	0	0
07-may	408	0	25-jun	0	0	14-ago	0	0
13-may	103	15	01-jul	222	25	15-ago	0	40
14-may	0	0	02-jul	469	0	16-ago	0	0
15-may	345	22	03-jul	71	0	17-ago	0	0
16-may	176	0	04-jul	106	30	18-ago	0	0
17-may	166	0	05-jul	247	0	19-ago	0	0
18-may	0	0	08-jul	456	0	21-ago	0	45
19-may	343	0	09-jul	18	25	22-ago	0	0
20-may	283	0	10-jul	0	0	23-ago	0	0
27-may	246	0	11-jul	112	15	25-ago	0	0
28-may	271	0	12-jul	502	35	26-ago	0	38
29-may	275	0	13-jul	0	0	27-ago	0	0
30-may	279	20	14-jul	169	20	28-ago	0	0
31-may	0	15	15-jul	435	0	29-ago	418	0
01-jun	60	0	16-jul	200	0	30-ago	206	40
02-jun	152	0	17-jul	0	20	31-ago	0	0
03-jun	143	0	18-jul	0	0	01-sep	0	0
04-jun	93	25	19-jul	210	15	02-sep	35	25
05-jun	80	0	20-jul	485	0	03-sep	448	0
06-jun	328	0	21-jul	87	35	04-sep	0	0
07-jun	0	30	22-jul	15	0	10-sep	313	0
08-jun	0	0	23-jul	94	0	12-sep	302	25
09-jun	264	0	24-jul	0	15	13-sep	462	0
10-jun	139	50	25-jul	147	0	14-sep	0	0
11-jun	29	25	26-jul	290	45	17-sep	371	15
12-jun	395	0	27-jul	0	0	18-sep	0	0
13-jun	85	25	28-jul	0	0	19-sep	0	0
14-jun	193	25	29-jul	0	0	20-sep	21	0
15-jun	0	0	31-jul	294	45	21-sep	0	0
16-jun	365	0	01-ago	458	35	22-sep	140	0
17-jun	362	0	02-ago	490	30	23-sep	218	50
19-jun	77	40	03-ago	0	0	24-sep	372	0
20-jun	160	0	05-ago	354	0	25-sep	331	0
21-jun	82	30	06-ago	0	40			
22-jun	0	30	07-ago	401	0			
						PROMEDIO	150,3 m ³ /día	8,5 m ³ /día

ANEXO III. Procedimiento de ajuste de modelo DBO₅ PRETRATAMIENTO.
Ajuste de modelo DBO₅

Aplicando regresión con la DBO₅ en el efluente de la planta en función de las demás variables independientes se obtiene un modelo de regresión lineal múltiple con la siguiente forma:

$$DBO_5(S_i) = \beta_0 + \beta_1 * S_1 + \beta_2 * S_2 + \beta_3 * S_3 + \varepsilon$$

Donde ε corresponde al error de predicción del modelo, β_i $i=0,1,2,3$. corresponde a los coeficientes de regresión para cada variable predictora (excepto β_0 que es el coeficiente de intersección del modelo). Además S_i $i=1,2,3$. corresponden al valor que toma cada variable predictora. (ver Tabla III,1)

TABLA III,1. Valores de coeficientes del modelo

<i>SÍMBOLO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>SÍMBOLO</i>	<i>Coefficientes</i>
	Intercepto	β_0	25,1787
S_1	Caudal [L/s] AFLUENTE	β_1	0,0448
S_2	Basura de rejas [sacos/día]	β_2	-1,8378
S_3	Arenas [sacos/día]	β_3	-0,9614

Así el modelo queda de la siguiente forma:

$$DBO_5(S_i) = 25,1787 + 0,0448 * S_1 - 1,8378 * S_2 - 0,9614 * S_3$$

Análisis de los residuos del modelo ajustado

Al analizar las gráficas de los residuos para cada variable del modelo ajustado, no se observa tendencia en ellas. Así, el modelo es adecuado para los datos. Se procede a realizar el análisis de las estadísticas de regresión.

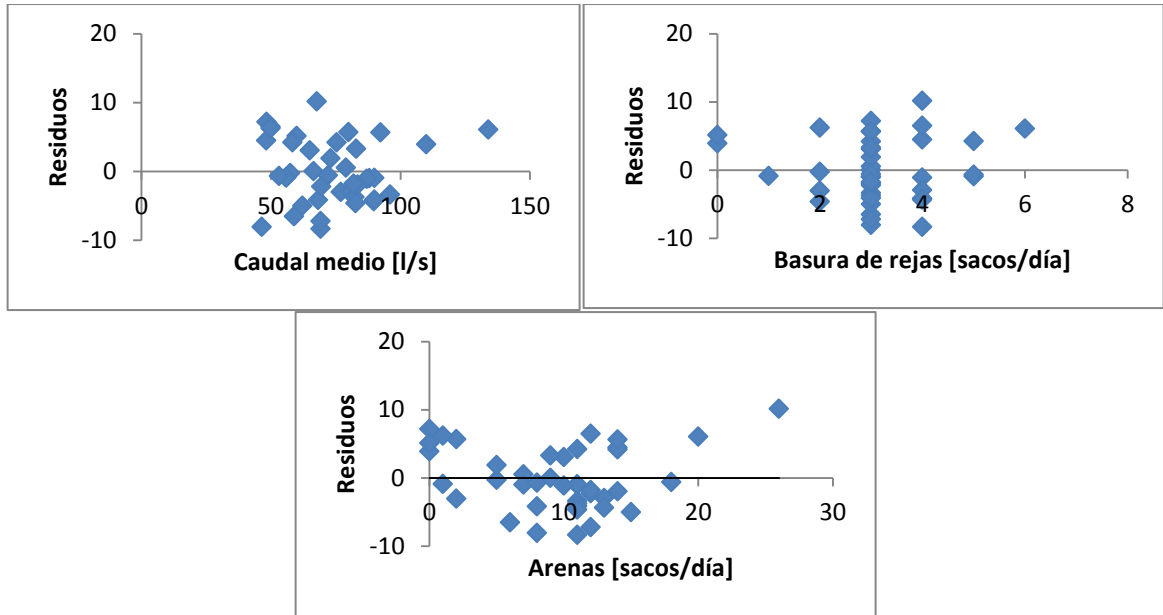


FIGURA III,1. Análisis de los residuos del modelo DBO_5

Análisis de la regresión

De la Tabla III,2 se puede ver que el coeficiente de correlación múltiple, 0,8255, indica que existe un alto grado de asociación entre la variable respuesta y la variables predictoras. Además el porcentaje de variabilidad explicada por las variables independientes es de 65,56% en el modelo.

TABLA III,2. Estadísticas de la regresión DBO_5

Coefficiente de correlación múltiple	0,8255
Coefficiente de determinación R^2	0,6814
R^2 ajustado	0,6556
Error típico	4,7859
Observaciones	41

A partir de los datos mostrados en la Tabla III,2 y residuos del ajuste, se puede observar que los errores se encuentran entre $[-8.3523; 10.1388]$, lo cual está contenido en $\pm 3 * \sqrt{CME} = \pm 3 * \text{Error típico} = \pm 14,3577$. Esto quiere decir que no existen puntos atípicos, por lo cual todos los datos son válidos para el modelo.

Significancia del modelo

Para estudiar la significancia del modelo se debe contrastar las siguientes hipótesis:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$$

$$H_1: \text{Algún } \beta_i \neq 0, i=1, 2, 3.$$

El estadístico de prueba para esta hipótesis es la prueba F, que se obtiene de la siguiente tabla.

TABLA III,3. ANOVA

<i>ANÁLISIS DE VARIANZA</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	3	1812,7054	604,23512	26,379905	2,667E-09
Residuos	37	847,48976	22,905129		
Total	40	2660,1951			

De aquí se puede obtener el valor crítico de F, que corresponde al p-value=2,667E-09 lo cual es altamente menor a un nivel de significancia $\alpha=0,05$. Esto es evidencia suficiente para rechazar nuestra hipótesis nula H_0 en favor de H_1 .

Significancia individual de los coeficientes del modelo.

Ahora se debe investigar cuales de los coeficientes asociados a cada variable son significativos, y para ello se realiza los contrastes de las hipótesis individuales.

$$H_0: \beta_1=0, \quad H_0: \beta_2=0, \quad H_0: \beta_3=0$$

$$H_1: \beta_1 \neq 0, \quad H_1: \beta_2 \neq 0, \quad H_1: \beta_3 \neq 0$$

El estadístico de prueba para estas hipótesis es la prueba t, cuyos p-value se se observan en la Tabla III,4.

TABLA III,4. Estadísticos de pruebas individuales

<i>SÍMBOLO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>SÍMBOLO</i>	<i>COEF</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>P-VALUE</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
	Intercepto	β_0	25,1787	3,6713358	6,8581756	4,383E-08	17,739833	32,617499
S ₁	Caudal [L/s] AFLUENTE	β_1	0,0448	0,0433329	1,0332389	0,3081987	-0,043028	0,1325739
S ₂	Basura de rejas [sacos/día]	β_2	-1,8378	0,8206054	-2,239586	0,0312127	-3,500521	-0,175112
S ₃	Arenas [sacos/día]	β_3	-0,9614	0,1767566	-5,439189	3,609E-06	-1,319555	-0,60327

Se puede observar que el p-value de la hipótesis de significancia del coeficiente de regresión de la variable S₁ con valor de 0,3082 confirma que no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula de la pendiente. Esto es indicativo de que la variable asociada a la pendiente respectiva no contribuye a explicar la variabilidad de la variable respuesta, y por lo tanto se recomienda quitarla del modelo.

La segunda y última iteración o ajuste de modelo, además, de las pruebas para cumplir los supuestos de existencia del modelo, se encuentra en el cuerpo de esta lectura.

ANEXO IV. Valores residuales modelo DBO₅ PRETRATAMIENTO.

<i>Observación</i>	<i>Pronóstico DBO₅ [mg/l]</i>	<i>Residuos</i>	<i>Residuos estándares</i>
1	28,24474867	5,75525133	1,232679781
2	14,27766608	-0,277666083	-0,059471489
3	8,641128032	4,358871968	0,933598384
4	16,11509125	0,884908747	0,189532838
5	20,70865418	6,291345822	1,347502367
6	12,44024091	-0,440240913	-0,094292333
7	16,11509125	-0,115091253	-0,024650646
8	25,42647964	-1,426479644	-0,30552838
9	19,85207286	-0,852072864	-0,182499935
10	22,54607935	6,453920652	1,38232321
11	28,24474867	4,75525133	1,018496297
12	6,009252818	-1,009252818	-0,216165285
13	8,641128032	-1,641128032	-0,35150252
14	15,19637867	-9,196378668	-1,969712423
15	7,784546718	3,215453282	0,688696986
16	11,39726579	-1,397265787	-0,299271254
17	9,684103158	3,315896842	0,710210338
18	17,95251642	2,047483577	0,438537166
19	13,3589535	2,641046502	0,565668541
20	-3,240004302	9,240004302	1,979056313
21	22,60821062	-2,608210619	-0,558635637
22	11,45939706	-0,459397058	-0,098395262
23	8,765390573	-5,765390573	-1,234851439
24	17,03380384	-7,033803838	-1,506524611
25	10,54068447	-8,540684473	-1,829273556
26	11,52152833	-7,521528328	-1,610987142
27	-1,526841673	8,526841673	1,826308657
28	8,703259303	-2,703259303	-0,578993495
29	12,44024091	-2,440240913	-0,5226593
30	13,29682223	-4,296822228	-0,920308355
31	11,52152833	-2,521528328	-0,540069722
32	12,44024091	-3,440240913	-0,736842784
33	9,684103158	-1,684103158	-0,360707082
34	8,703259303	-3,703259303	-0,793176979
35	9,684103158	6,315896842	1,35276079
36	12,44024091	-3,440240913	-0,736842784
37	11,52152833	-1,521528328	-0,325886238
38	14,33979735	-4,339797354	-0,929512917
39	9,621971888	5,378028112	1,151884798
40	14,27766608	3,722333917	0,797262447
41	23,5269232	5,473076796	1,172242656

**ANEXO V. Procedimiento de ajuste de modelo DQO PRETRATAMIENTO.
Ajuste de modelo DQO.**

Aplicando regresión con la DQO en el efluente de la planta en función de las demás variables independientes se obtiene un modelo de regresión lineal múltiple con la siguiente forma:

$$DQO(S_i) = \beta_0 + \beta_1 * S_1 + \beta_2 * S_2 + \beta_3 * S_3 + \varepsilon$$

Donde ε corresponde al error de predicción del modelo, β_i $i=0,1,2,3$. corresponde a los coeficientes de regresión para cada variable predictora (excepto β_0 que es el coeficiente de intersección del modelo). Además S_i $i=1,2,3$. corresponden al valor que toma cada variable predictora (ver Tabla V,1).

TABLA V,1. Valores de coeficientes del modelo

<i>SÍMBOLO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>SÍMBOLO</i>	<i>Coefficientes</i>
	Intercepto	β_0	73,4397
S_1	Caudal [L/s] AFLUENTE	β_1	0,0849
S_2	Basura de rejas [sacos/día]	β_2	-3,8009
S_3	Arenas [sacos/día]	β_3	-1,9646

Así el modelo queda de la siguiente forma:

$$DBO_5(S_i) = 73,4397 + 0,0849 * S_1 - 3,8009 * S_2 - 1,9646 * S_3$$

Análisis de los residuos del modelo ajustado

Al analizar las gráficas de los residuos para cada variable del modelo ajustado, no se observa tendencia alguna. Así, el modelo es adecuado para los datos. Se procede a realizar el análisis de las estadísticas de regresión.

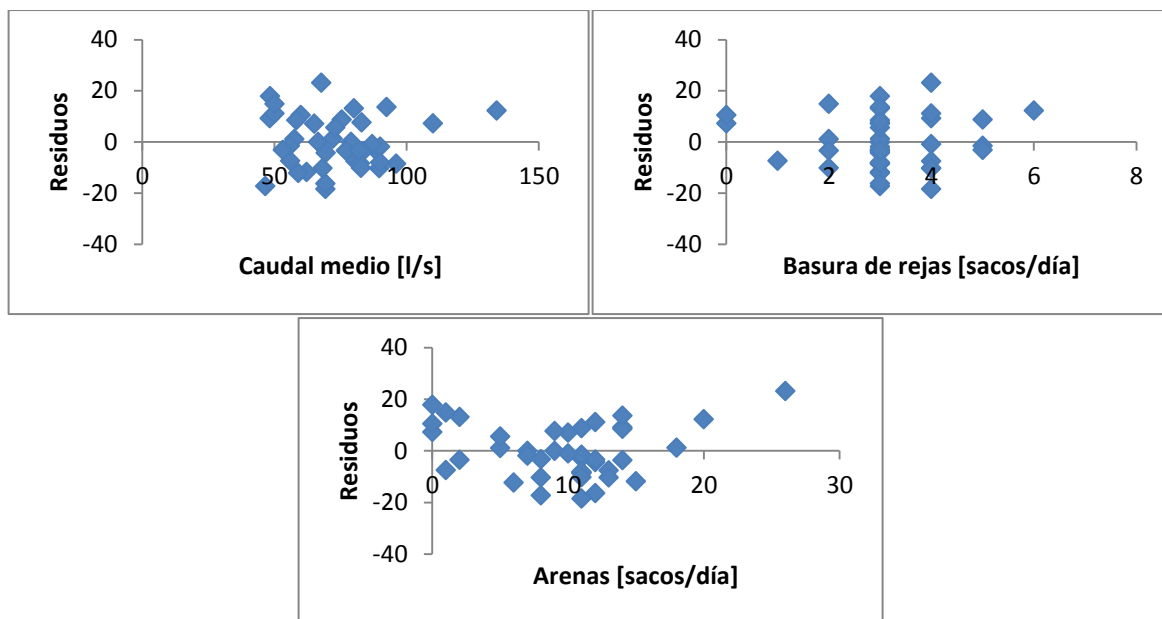


FIGURA V,1. Análisis de los residuos del modelo DQO

Análisis de la regresión

En la Tabla V,2 se puede ver que el coeficiente de correlación múltiple, 0,8044, indica que existe un alto grado de asociación entre la variable respuesta y la variables predictoras. Además el porcentaje de variabilidad explicada por las variables independientes es de 61,84% en el modelo.

TABLA V,2. Estadísticas de la regresión DQO

Coeficiente de correlación múltiple	0,804395
Coeficiente de determinación R^2	0,6470513
R^2 ajustado	0,6184338
Error típico	10,605204
Observaciones	41

A partir de la Tabla V,2 y los residuos del ajuste, se puede observar que los errores se encuentran entre $[-18.5077; 23.0943]$, lo cual está contenido en $\pm 3 * \sqrt{CME} = \pm 3 * \text{Error típico} = \pm 31,8156$. Esto quiere decir que no existen puntos atípicos, por lo cual todos los datos son válidos para el modelo.

Significancia del modelo

Para estudiar la significancia del modelo se debe contrastar las siguientes hipótesis:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$$

$$H_1: \text{Algún } \beta_i \neq 0, i=1, 2, 3.$$

El estadístico de prueba para esta hipótesis es la prueba F. Los resultados se resumen en la Tabla V,3.

TABLA V,3. ANOVA

<i>ANÁLISIS DE VARIANZA</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	3	7628,9871	2542,9957	22,610364	1,733E-08
Residuos	37	4161,4031	112,47035		
Total	40	11790,39			

De aquí se puede obtener el valor crítico de F, que corresponde al p-value=1,733E-08 lo cual es altamente menor a un nivel de significancia $\alpha=0,05$. Esto es evidencia suficiente para rechazar nuestra hipótesis nula H_0 en favor de H_1 .

Significancia individual de los coeficientes del modelo.

Ahora se debe investigar cuales de los coeficientes asociados a cada variable son significativos, y para ello se realiza los contrastes de las hipótesis individuales.

$$H_0: \beta_1=0, \quad H_0: \beta_2=0, \quad H_0: \beta_3=0$$

$$H_1: \beta_1 \neq 0, \quad H_1: \beta_2 \neq 0, \quad H_1: \beta_3 \neq 0$$

El estadístico de prueba para estas hipótesis es la prueba t, cuyos p-value se pueden obtener de la Tabla V,4.

TABLA V,4. Estadísticos de pruebas individuales

<i>SÍMBOLO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>SÍMBOLO</i>	<i>COEF.</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>P-VALUE</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
	Intercepto	β_0	73,4397	8,1354	9,0272	0,0000	56,9559	89,9235
S ₁	Caudal [L/s] AFLUENTE	β_1	0,0849	0,0960	0,8847	0,3821	-0,1096	0,2795
S ₂	Basura de rejas [sacos/día]	β_2	-3,8009	1,8184	-2,0902	0,0435	-7,4853	-0,1165
S ₃	Arenas [sacos/día]	β_3	-1,9646	0,3917	-5,0159	0,0000	-2,7582	-1,1710

Aquí se puede observar que el p-value de la hipótesis de significancia del coeficiente de regresión de la variable S₁ con valor de 0,3821 confirma que no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula de la pendiente. Esto es indicativo de que la variable asociada a la pendiente respectiva no contribuye a explicar la variabilidad de la variable respuesta, y por lo tanto se recomienda quitarla del modelo.

La segunda y última iteración o ajuste de modelo, además, de las pruebas para cumplir los supuestos de existencia del modelo, se encuentra en el cuerpo de esta lectura.

ANEXO VI. Valores residuales modelo DQO PRETRATAMIENTO.

<i>Observación</i>	<i>Pronóstico DQO [mg/L] Media</i>	<i>Residuos</i>	<i>Residuos estándares</i>
1	79,25685331	10,74314669	1,042309004
2	50,550338	-0,550338004	-0,05339425
3	38,94708512	9,052914881	0,878321312
4	54,31755	0,682450002	0,066211865
5	63,73557998	14,26442002	1,383945864
6	46,78312601	-1,783126009	-0,173000365
7	54,31755	-0,317549998	-0,030808964
8	73,45522687	-8,455226871	-0,820333126
9	62,00278244	-0,002782437	-0,000269954
10	67,50279198	16,49720802	1,600572809
11	79,25685331	9,743146687	0,945288175
12	33,59788403	0,402115971	0,039013625
13	38,94708512	-2,947085119	-0,285928643
14	52,433944	-19,433944	-1,88549737
15	37,21428757	6,785712427	0,658355449
16	44,59790311	-4,597903111	-0,446092374
17	41,13230802	6,867691982	0,666309174
18	58,08476199	5,915238008	0,573901299
19	48,66673201	6,333267993	0,614458915
20	14,61101561	21,38898439	2,07517701
21	67,65360043	-2,653600429	-0,257454515
22	44,74871156	0,251288438	0,024380213
23	39,24870202	-13,24870202	-1,285400061
24	56,201156	-13,201156	-1,280787106
25	42,86510556	-18,86510556	-1,830308193
26	44,89952001	-16,89952001	-1,639605452
27	18,0766107	16,9233893	1,64192127
28	39,09789357	-7,09789357	-0,688643523
29	46,78312601	-6,783126009	-0,658104513
30	48,51592356	-10,51592356	-1,020263627
31	44,89952001	-4,899520012	-0,475355496
32	46,78312601	-7,783126009	-0,755125342
33	41,13230802	-3,132308018	-0,303899122
34	39,09789357	-9,09789357	-0,882685182
35	41,13230802	14,86769198	1,44247581
36	46,78312601	-6,783126009	-0,658104513
37	44,89952001	-2,899520012	-0,281313837
38	50,70114645	-9,701146454	-0,941213277
39	40,98149957	9,018500433	0,874982394
40	50,550338	8,449661996	0,819793217
41	69,53720643	13,46279357	1,306171401

ANEXO VII. Valores residuales modelo SST PRETRATAMIENTO.

<i>Observación</i>	<i>Pronóstico SST [mg/l] Media</i>	<i>Residuos</i>	<i>Residuos estándares</i>
1	87,29027125	-17,29027125	-1,655005117
2	37,61947321	-5,619473211	-0,53788959
3	27,16774986	-2,167749864	-0,207494554
4	45,9062172	0,093782798	0,008976783
5	52,37612893	-11,37612893	-1,088910134
6	45,35201727	9,647982732	0,923493944
7	51,0938727	-1,093872702	-0,104704252
8	54,50498973	-0,171656396	-0,016430755
9	44,28279577	-8,282795766	-0,792819799
10	39,81945826	2,180541743	0,208718978
11	63,71001897	8,289981026	0,793507564
12	29,40870719	19,59129281	1,875256286
13	17,94306784	-2,94306784	-0,281707109
14	29,35974168	-15,35974168	-1,47021702
15	16,86922645	-1,869226446	-0,178920231
16	20,28662175	-6,28662175	-0,60174829
17	27,74025001	-7,740250013	-0,740887936
18	45,4759096	13,5240904	1,294510565
19	35,70476256	18,29523744	1,751199339
20	11,65430531	-1,654305307	-0,158348224
21	57,08353655	8,916463449	0,853473749
22	39,9578508	19,0421492	1,822692884
23	28,3746083	-1,374608298	-0,131575944
24	37,64866903	-3,648669027	-0,349246453
25	30,38610823	2,613891774	0,25019875
26	35,29775287	0,702247131	0,067218297
27	37,88222905	12,11777095	1,159899266
28	33,39059337	-7,73345051	-0,740237095
29	49,12485763	6,875142368	0,658080815
30	33,4774618	-2,477461802	-0,237139828
31	35,39600392	-10,39600392	-0,995093682
32	42,65993847	-9,659938467	-0,924638333
33	39,67229433	-4,672294334	-0,447226704
34	37,61538857	-16,61538857	-1,590406113
35	43,80975527	-13,80975527	-1,321854082
36	46,29522736	-5,295227359	-0,506853146
37	41,32272566	14,67727434	1,404892022
38	48,98412172	7,015878277	0,671551896
39	20,10914144	-0,109141443	-0,010446895
40	45,38676464	-10,38676464	-0,994209309
41	45,54986166	24,45013834	2,340339459

ANEXO VIII. Procedimiento de ajuste de modelo DBO₅ tratamiento BIOLÓGICO-SECUNDARIO.

Ajuste de modelo DBO₅

Aplicando regresión con la DBO₅ en el efluente de la planta en función de las demás variables independientes se obtiene un modelo de regresión lineal múltiple con la siguiente forma:

$$DBO_5(S_i) = \beta_0 + \beta_1 * S_1 + \beta_2 * S_2 + \beta_3 * S_3 + \beta_4 * S_4 + \varepsilon$$

Donde ε corresponde al error de predicción del modelo, β_i $i=0,1,2,3,4$. corresponde a los coeficientes de regresión para cada variable predictora (excepto β_0 que es el coeficiente de intersección del modelo). Además S_i $i=1,2,3,4$. corresponden al valor que toma cada variable predictora (ver Tabla VIII,1).

TABLA VIII,1. Valores de coeficientes del modelo

<i>SÍMBOLO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>SÍMBOLO</i>	<i>COEF.</i>
	Intercepto	β_0	31,9208
S_1	Oxígeno Disuelto [mg/L]	β_1	-25,0116
S_2	Sólidos Sedimentables a 30' [ml/L]	β_2	0,0289
S_3	Volumen Recirculado [m ³ /día]	β_3	0,0016
S_4	Volumen Purgado [m ³ /día]	β_4	-0,0110

Así, el modelo queda de la siguiente forma:

$$DBO_5(S_i) = 31,9208 - 25,0116 * S_1 + 0,0289 * S_2 + 0,0016 * S_3 - 0,0110 * S_4$$

Análisis de los residuos del modelo ajustado

Al analizar las gráficas de los residuos para cada variable del modelo ajustado, no se observa tendencia alguna. Así, el modelo es adecuado para los datos. Se procede a realizar el análisis de las estadísticas de regresión.

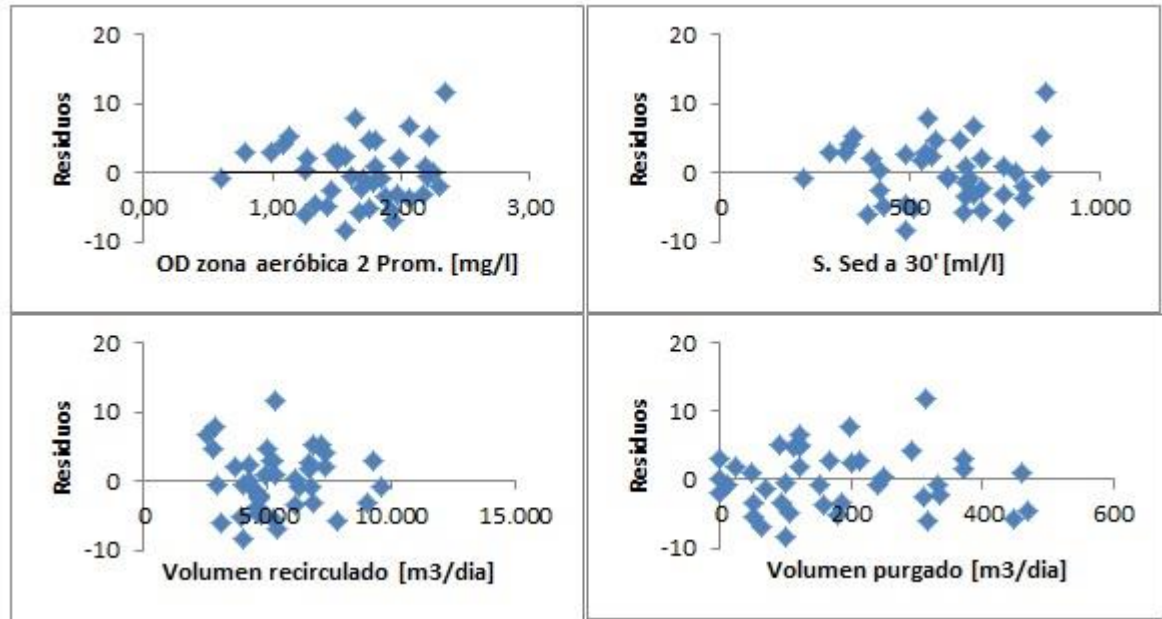


FIGURA VIII,1. Análisis de los residuos del modelo DBO₅

Análisis de la regresión

En la Tabla VIII,2 se puede ver que el coeficiente de correlación múltiple, 0,8432, indica que existe un alto grado de asociación entre la variable respuesta y la variables predictoras. Además el porcentaje de variabilidad explicada por las variables independientes es de 67,88% en el modelo.

TABLA VIII,2. Estadísticas de la regresión DBO₅

Coeficiente de correlación múltiple	0,8432
Coeficiente de determinación R ²	0,7110
R ² ajustado	0,6788
Error típico	4,6215
Observaciones	41

De los resultados obtenidos en la Tabla VIII,2 y los residuos del modelo ajustado, se puede observar que los errores se encuentran entre [-8.2705; 11.7708], lo cual está contenido en $\pm 3 * \sqrt{CME} = \pm 3 * \text{Error típico} = \pm 13,8646$. Esto quiere decir que no existen puntos atípicos, por lo cual todos los datos son válidos para el modelo.

Significancia del modelo

Para estudiar la significancia del modelo se debe contrastar las siguientes hipótesis:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0$$

$$H_1: \text{Algún } \beta_i \neq 0, i=1, 2, 3, 4.$$

El estadístico de prueba para esta hipótesis es la prueba F. Los resultados se resumen en la Tabla VIII,3.

TABLA VIII,3. ANOVA

<i>ANÁLISIS DE VARIANZA</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	4	1891,2859	472,82148	22,137299	2,736E-09
Residuos	36	768,90921	21,358589		
Total	40	2660,1951			

De aquí se puede obtener el valor crítico de F, que corresponde al p-value=2,736E-09 lo cual es altamente menor a un nivel de significancia $\alpha=0,05$. Esto es evidencia suficiente para rechazar nuestra hipótesis nula H_0 en favor de H_1 .

Significancia individual de los coeficientes del modelo.

Ahora se debe investigar cuáles de los coeficientes asociados a cada variable del modelo son significativos, y para ello se realiza los contrastes de las hipótesis individuales.

$$H_0: \beta_1=0, \quad H_0: \beta_2=0, \quad H_0: \beta_3=0 \quad H_0: \beta_4=0$$

$$H_1: \beta_1 \neq 0, \quad H_1: \beta_2 \neq 0, \quad H_1: \beta_3 \neq 0 \quad H_1: \beta_4 \neq 0$$

El estadístico de prueba para estas hipótesis es la prueba t, cuyos p-value se pueden obtener de la Tabla VIII,4.

TABLA VIII,4. Estadísticos de pruebas individuales

<i>SÍMBOLO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>SÍMBOLO</i>	<i>COEF.</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>P-VALUE</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
	Intercepto	β_0	31,9208	5,0449	6,3274	2,54E-07	21,6894	42,1523
S ₁	OD [mg/L]	β_1	-25,0116	6,6623	-3,7542	0,0006	-38,5234	-11,4997
S ₂	S. Sed a 30' [ml/L]	β_2	0,0289	0,0164	1,7685	0,0854	-0,0042	0,0621
S ₃	VOL. Recirculado[m ³ /día]	β_3	0,0016	0,0005	3,4226	0,0016	0,0006	0,0025
S ₄	VOL. Purgado [m ³ /día]	β_4	-0,0110	0,0061	-1,8142	0,0780	-0,0234	0,0013

Aquí se puede observar que los p-value de las hipótesis de significancia del coeficiente de regresión de las variable S₂ y S₄ con valores de 0,0854 y 0,0780 respectivamente, confirman que no existe evidencia suficiente para rechazar las hipótesis nulas de las pendientes. Esto es indicativo de que las variables asociadas a las pendientes respectivas no contribuyen a explicar la variabilidad de la variable respuesta, y por lo tanto se recomienda quitarla del modelo.

La segunda y última iteración o ajuste de modelo, además, de las pruebas para cumplir los supuestos de existencia del modelo, se encuentra en el cuerpo de esta lectura.

ANEXO IX. Valores residuales modelo DBO₅ tratamiento BIOLÓGICO-SECUNDARIO.

<i>Observación</i>	<i>Pronóstico DBO₅ [mg/l]</i>	<i>Residuos</i>	<i>Residuos estándares</i>
1	33,38284637	0,617153635	0,130465121
2	14,35839012	-0,358390124	-0,075763
3	8,106715275	4,893284725	1,034431217
4	10,26077701	6,739222991	1,424659105
5	23,80224087	3,197759129	0,676000285
6	13,2965548	-1,296554803	-0,274089254
7	11,89967584	4,100324164	0,866800841
8	21,49964807	2,500351929	0,52856971
9	15,23324785	3,766752145	0,796284341
10	23,0171113	5,982888698	1,264771454
11	24,61024027	8,389759734	1,773579478
12	7,194905417	-2,194905417	-1,46399889
13	6,197553295	0,802446705	0,169635729
14	10,06283469	-4,062834686	-0,858875635
15	10,6618674	0,338132595	0,071480597
16	7,095805481	2,904194519	0,613941276
17	10,75709781	2,242902194	1,474145319
18	17,83223985	2,167760152	0,458260432
19	13,24952822	2,750471783	0,581444578
20	10,02046935	-4,020469346	-0,849919682
21	19,90254067	0,097459329	0,020602719
22	12,18159687	-1,181596872	-0,249787363
23	4,428827203	-1,428827203	1,697948608
24	15,6415821	-5,641582097	-1,192619878
25	10,37944161	-8,379441612	-1,771398247
26	12,85288127	-8,852881266	-1,871482502
27	15,42588587	-8,425885866	-1,781216475
28	4,605463252	1,394536748	0,294802454
29	16,5289387	-6,528938704	-1,380205401
30	15,12461796	-6,124617964	-1,294732755
31	4,241433883	4,758566117	1,005951956
32	11,89635081	-2,896350805	-0,61228313
33	12,32695155	-4,326951554	-0,914709446
34	4,455853518	0,544146482	0,115031546
35	8,588350451	7,411649549	1,566808819
36	11,77722119	-2,777221192	-0,587099353
37	11,7605857	-1,760585699	-0,372184516
38	16,96180569	-6,961805689	-1,47171267
39	4,83511301	10,16488699	2,148838052
40	17,65569283	0,344307173	0,072785891
41	27,88911659	1,110883412	0,23483867

ANEXO X. Procedimiento de ajuste de modelo DQO tratamiento BIOLÓGICO-SECUNDARIO.

Ajuste de modelo DQO

Aplicando regresión con la DQO en el efluente de la planta en función de las demás variables independientes se obtiene un modelo de regresión lineal múltiple como sigue:

$$DQO(S_i) = \beta_0 + \beta_1 * S_1 + \beta_2 * S_2 + \beta_3 * S_3 + \beta_4 * S_4 + \varepsilon$$

Donde ε corresponde al error de predicción del modelo, β_i $i=0,1,2,3,4$. corresponde a los coeficientes de regresión para cada variable predictora (excepto β_0 que es el coeficiente de intersección del modelo). Además S_i $i=1,2,3,4$. corresponden al valor que toma cada variable predictora (ver Tabla X,1).

TABLA X,1. Valores de coeficientes del modelo

<i>SÍMBOLO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>SÍMBOLO</i>	<i>COEF.</i>
	Intercepto	β_0	87,2529
S_1	Oxígeno Disuelto [mg/L]	β_1	-54,5511
S_2	Sólidos Sedimentables a 30' [ml/L]	β_2	0,0668
S_3	Volumen Recirculado [m ³ /día]	β_3	0,0034
S_4	Volumen Purgado [m ³ /día]	β_4	-0,0236

Así, el modelo queda de la siguiente forma:

$$DQO(S_i) = 87,2529 - 54,5511 * S_1 + 0,0668 * S_2 + 0,0034 * S_3 - 0,0236 * S_4$$

Análisis de los residuos del modelo ajustado

Al analizar las gráficas de los residuos para cada variable del modelo ajustado, no se observa tendencia alguna. Así, el modelo es adecuado para los datos. Se procede a realizar el análisis de las estadísticas de regresión.

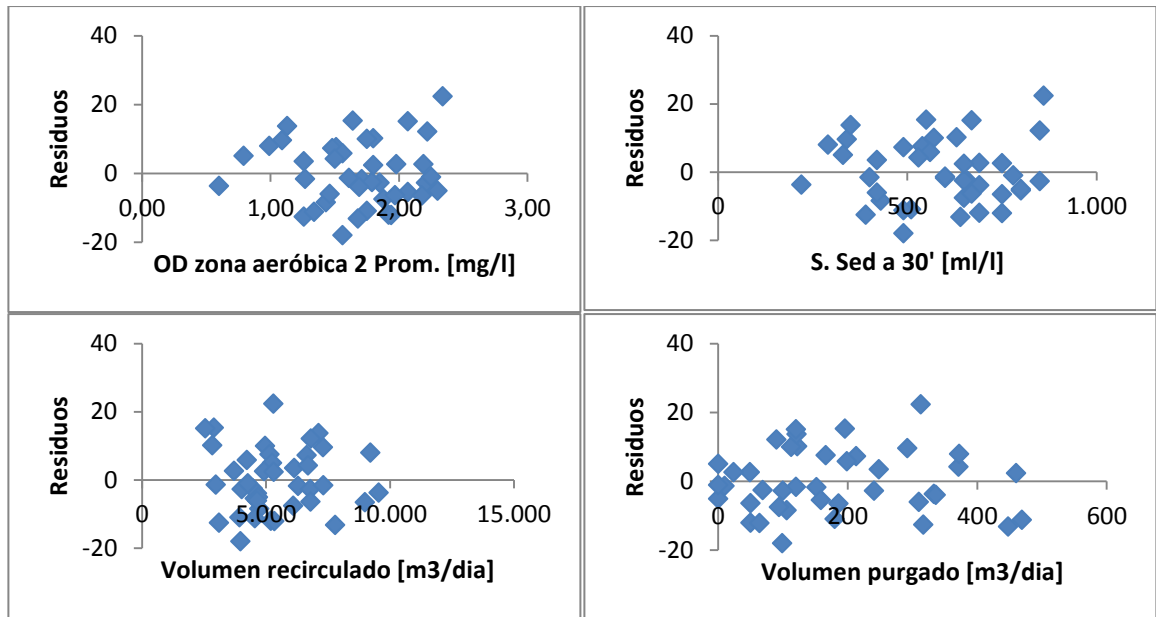


FIGURA X,1. Análisis de los residuos del modelo DQO

Análisis de la regresión

En la Tabla X,2 se puede ver que el coeficiente de correlación múltiple, 0,8420, indica que existe un alto grado de asociación entre la variable respuesta y la variables predictoras. Además el porcentaje de variabilidad explicada por las variables independientes es de 67,67% en el modelo.

TABLA X,2. Estadísticas de la regresión DQO

Coeficiente de correlación múltiple	0,8420
Coeficiente de determinación R^2	0,7090
R^2 ajustado	0,6767
Error típico	9,7622
Observaciones	41

En los datos de la tabla anterior y los residuos del modelo ajustado, se puede observar que los errores se encuentran entre $[-17.9809; 22.3647]$, lo cual está contenido en $\pm 3 * \sqrt{CME} = \pm 3 * \text{Error típico} = \pm 29,2866$. Esto quiere decir que no existen puntos atípicos, por lo cual todos los datos son válidos para el modelo.

Significancia del modelo

Para estudiar la significancia del modelo se debe contrastar las siguientes hipótesis:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0$$

$$H_1: \text{Algún } \beta_i \neq 0, i=1, 2, 3, 4.$$

El estadístico de prueba para esta hipótesis es la prueba F. Los resultados se resumen en la Tabla X,3.

TABLA X,3. ANOVA

<i>ANÁLISIS DE VARIANZA</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	4	8359,5593	2089,8898	21,929392	3,07872E-09
Residuos	36	3430,8309	95,300858		
Total	40	11790,39			

El valor crítico de F, que corresponde al p-value=3,07872E-09 es altamente menor a un nivel de significancia $\alpha=0,05$. Esto es evidencia suficiente para rechazar nuestra hipótesis nula H_0 en favor de H_1 .

Significancia individual de los coeficientes del modelo.

Ahora se debe investigar cuáles de los coeficientes asociados a cada variable del modelo son significativos, y para ello se realiza los contrastes de las hipótesis individuales.

$$H_0: \beta_1=0, \quad H_0: \beta_2=0, \quad H_0: \beta_3=0 \quad H_0: \beta_4=0$$

$$H_1: \beta_1 \neq 0, \quad H_1: \beta_2 \neq 0, \quad H_1: \beta_3 \neq 0 \quad H_1: \beta_4 \neq 0$$

El estadístico de prueba para estas hipótesis es la prueba t, cuyos p-value se pueden obtener de la Tabla X,4.

TABLA X,4. Estadísticos de pruebas individuales

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	COEF.	Error típico	Estadístico <i>t</i>	P-VALUE	Inferior 95%	Superior 95%
	Intercepto	β_0	87,2529	10,6564	8,1878	9,72E-10	65,6407	108,8651
S ₁	OD [mg/L]	β_1	-54,5511	14,0731	-3,8763	0,0004	-83,0926	-26,0096
S ₂	S. Sed a 30' [ml/L]	β_2	0,0668	0,0346	1,9320	0,0613	-0,0033	0,1369
S ₃	VOL. Recirculado[m ³ /día]	β_3	0,0034	0,0010	3,4676	0,0014	0,0014	0,0054
S ₄	VOL. Purgado [m ³ /día]	β_4	-0,0236	0,0129	-1,8349	0,0748	-0,0496	0,0025

De la Tabla X,4 se puede observar que los p-value de las hipótesis de significancia del coeficiente de regresión de las variable S₂ y S₄ con valores de 0,0613 y 0,0748 respectivamente, confirman que no existe evidencia suficiente para rechazar las hipótesis nulas de las pendientes. Esto es indicativo de que las variables asociadas a las pendientes respectivas no contribuyen a explicar la variabilidad de la variable respuesta, y por lo tanto se recomienda quitarla del modelo.

La segunda y última iteración o ajuste de modelo, además, de las pruebas para cumplir los supuestos de existencia del modelo, se encuentra en el cuerpo de esta lectura.

ANEXO XI. Valores residuales modelo DQO tratamiento BIOLÓGICO-SECUNDARIO.

<i>Observación</i>	<i>Pronóstico DQO [mg/L] Media</i>	<i>Residuos</i>	<i>Residuos estándares</i>
1	90,66170967	-0,661709667	-0,065733228
2	50,83368626	-0,833686264	-0,082817121
3	37,4764893	10,5235107	1,045389485
4	41,95242837	13,04757163	1,296125844
5	70,53695298	7,46304702	0,741367696
6	48,68718541	-3,687185408	-1,366279369
7	45,58496003	8,415039969	0,835937222
8	65,76116644	-0,761166437	-0,075613112
9	52,5192695	9,480730497	0,941801292
10	68,88757907	15,11242093	1,50124482
11	71,98076529	17,01923471	1,69066479
12	35,78001954	-1,780019539	-0,176824423
13	33,75260573	2,247394268	0,223252715
14	41,80106026	-8,801060259	-0,874283888
15	42,96201682	1,037983184	0,103111665
16	35,47870508	4,521294917	0,449138534
17	42,99046377	5,009536225	0,49763968
18	58,07948677	5,920513233	0,588134745
19	48,30190477	6,698095233	1,665378553
20	41,72954174	-5,729541742	-0,569163928
21	62,3164947	2,683505295	0,266575319
22	46,13249531	-1,132495312	-0,112500355
23	30,05641209	-4,056412089	1,597042217
24	53,31908373	-10,31908373	-1,025082021
25	42,3154162	-18,3154162	-1,81942548
26	47,44884241	-19,44884241	-1,932018309
27	52,68862364	-17,68862364	-1,757160865
28	30,34811868	1,651881323	0,164095368
29	55,13932584	-15,13932584	-1,503917513
30	52,23665103	-14,23665103	-1,414247175
31	29,42803478	10,57196522	1,050202883
32	45,70518263	-6,705182627	-0,666082604
33	46,92520816	-8,925208162	-0,886616551
34	30,06554728	-0,06554728	-0,006511367
35	38,92384949	17,07615051	1,696318719
36	45,53715422	-5,537154225	-0,550052446
37	45,33481094	-3,33481094	-0,331275027
38	56,40341723	-15,40341723	-1,530151949
39	30,96939649	19,03060351	1,890471096
40	57,71938582	1,280614183	0,127214258
41	79,22855253	3,771447471	0,374649833

ANEXO XII. Procedimiento de ajuste de modelo SST tratamiento BIOLÓGICO-SECUNDARIO.

Ajuste de modelo SST

Aplicando regresión con los SST en el efluente de la planta en función de las demás variables independientes se obtiene un modelo de regresión lineal múltiple con la siguiente forma:

$$SST(S_i) = \beta_0 + \beta_1 * S_1 + \beta_2 * S_2 + \beta_3 * S_3 + \beta_4 * S_4 + \varepsilon$$

Donde ε corresponde al error de predicción del modelo, β_i $i=0,1,2,3,4$. corresponde a los coeficientes de regresión para cada variable predictora (excepto β_0 que es el coeficiente de intersección del modelo). Además S_i $i=1,2,3,4$. corresponden al valor que toma cada variable predictora (ver Tabla XII,1).

TABLA XII,1. Valores de coeficientes del modelo

<i>SÍMBOLO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>SÍMBOLO</i>	<i>COEF.</i>
	Intercepto	β_0	62,6600
S_1	Oxígeno Disuelto [mg/L]	β_1	-38,4933
S_2	Sólidos Sedimentables a 30' [ml/L]	β_2	0,0449
S_3	Volumen Recirculado [m ³ /día]	β_3	0,0015
S_4	Volumen Purgado [m ³ /día]	β_4	0,0391

Así, el modelo queda de la siguiente forma:

$$DQO(S_i) = 62,6600 - 38,4933 * S_1 + 0,0449 * S_2 + 0,0015 * S_3 + 0,0391 * S_4$$

Análisis de los residuos del modelo ajustado

Al visualizar las gráficas de los residuos para cada variable del modelo ajustado, no se observa tendencia alguna. Así, el modelo es adecuado para los datos. Se procede a realizar el análisis de las estadísticas de regresión.

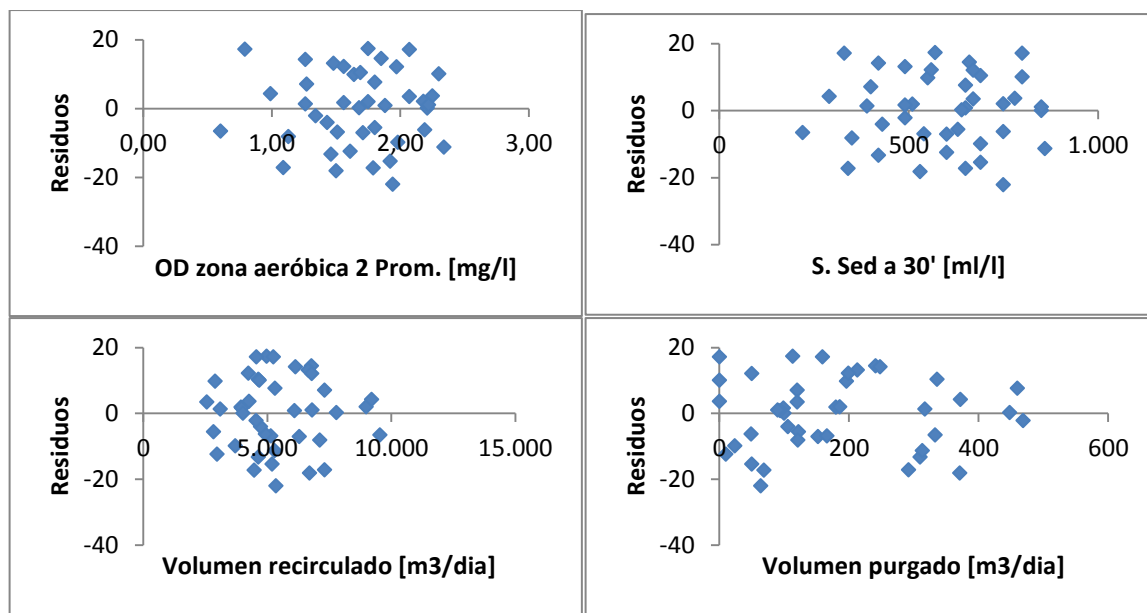


FIGURA XII,1. Análisis de los residuos del modelo SST

Análisis de la regresión

En la Tabla XII,2 se puede ver que el coeficiente de correlación múltiple, 0,7751, indica que existe un alto grado de asociación entre la variable respuesta y la variables predictoras. Además el porcentaje de variabilidad explicada por las variables independientes es de 55,65% en el modelo. Lo cual se considera como un nivel moderado en la explicación de la variabilidad de la variable respuesta.

TABLA XII,2. Estadísticas de la regresión SST

Coeficiente de correlación múltiple	0,7751
Coeficiente de determinación R^2	0,6008
R^2 ajustado	0,5565
Error típico	11,4724
Observaciones	41

De los resultados presentados en la Tabla XII,2 y los residuos del modelo ajustado, se puede observar que los errores se encuentran entre [-22.0522; 17.3535], lo cual está contenido en $\pm 3 * \sqrt{CME} = \pm 3 * \text{Error típico} = \pm 34,4173$. Esto quiere decir que no existen puntos atípicos, por lo cual todos los datos son válidos para el modelo.

Significancia del modelo

Para estudiar la significancia del modelo se debe contrastar las siguientes hipótesis:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0$$

$$H_1: \text{Algún } \beta_i \neq 0, i=1, 2, 3, 4.$$

El estadístico de prueba para esta hipótesis es la prueba F, Los resultados se resumen en la Tabla XII,3.

TABLA XII,3. ANOVA

<i>ANÁLISIS DE VARIANZA</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	4	7132,1617	1783,0404	13,547203	7,819E-07
Residuos	36	4738,2073	131,61687		
Total	40	11870,369			

De la Tabla XII,3 se obtiene el valor crítico de F, que corresponde al p-value=7,819E-07 lo cual es menor a un nivel de significancia $\alpha=0,05$. Esto es evidencia suficiente para rechazar nuestra hipótesis nula H_0 en favor de H_1 .

Significancia individual de los coeficientes del modelo.

Ahora se debe investigar cuáles de los coeficientes asociados a cada variable del modelo son significativos, y para ello se realiza los contrastes de las hipótesis individuales.

$$H_0: \beta_1=0, \quad H_0: \beta_2=0, \quad H_0: \beta_3=0 \quad H_0: \beta_4=0$$

$$H_1: \beta_1 \neq 0, \quad H_1: \beta_2 \neq 0, \quad H_1: \beta_3 \neq 0 \quad H_1: \beta_4 \neq 0$$

El estadístico de prueba para estas hipótesis es la prueba t, cuyos p-value se pueden obtener de la Tabla XII,4.

TABLA XII,4. Estadísticos de pruebas individuales

<i>SÍMBOLO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>SÍMBOLO</i>	<i>COEF.</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>P-VALUE</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
	Intercepto	β_0	62,6600	12,5233	5,0035	1,49E-05	37,2616	88,0584
S ₁	OD [mg/L]	β_1	-38,4933	16,5385	-2,3275	0,0257	-72,0349	-4,9516
S ₂	S. Sed a 30' [ml/L]	β_2	0,0449	0,0406	1,1049	0,2765	-0,0375	0,1273
S ₃	VOL. Recirculado[m ³ /día]	β_3	0,0015	0,0011	1,2863	0,2066	-0,0009	0,0038
S ₄	VOL. Purgado [m ³ /día]	β_4	0,0391	0,0151	2,5908	0,0137	0,0085	0,0698

Aquí se puede observar que los p-value de las hipótesis de significancia del coeficiente de regresión de las variable S₂ y S₃ con valores de 0,2765 y 0,2066 respectivamente, confirman que no existe evidencia suficiente para rechazar las hipótesis nulas de las pendientes para un nivel de significancia del 5%. Esto es indicativo de que las variables asociadas a las pendientes respectivas no contribuyen a explicar la variabilidad de la variable respuesta, y por lo tanto se recomienda quitarlas del modelo.

La segunda y última iteración o ajuste de modelo, además, de las pruebas para cumplir los supuestos de existencia del modelo, se encuentra en el cuerpo de esta lectura.

ANEXO XIII. Valores residuales modelo SST tratamiento BIOLÓGICO-SECUNDARIO.

<i>Observación</i>	<i>Pronóstico SST [mg/l] Media</i>	<i>Residuos</i>	<i>Residuos estándares</i>
1	70,78233249	-0,782332492	-0,068928038
2	37,37351758	-5,373517578	-0,473438123
3	33,96734165	-8,967341653	-0,790074907
4	40,96322877	5,036771225	0,443768812
5	57,80453262	-16,80453262	-1,480576971
6	38,2487079	16,7512921	1,475886171
7	34,69166692	15,30833308	1,348753097
8	45,89547668	8,437856654	0,743424202
9	42,54613299	-6,546132985	-0,576752354
10	49,11585214	-7,115852143	-0,626947922
11	51,31998804	20,68001196	1,82202922
12	29,52811227	19,47188773	1,715586455
13	21,80110431	-6,801104312	-0,599216809
14	27,96957258	-13,96957258	-1,230800518
15	31,78228484	-16,78228484	-1,478616812
16	25,42575091	-11,42575091	-1,006675048
17	33,17938858	-13,17938858	-1,161180717
18	45,36525756	13,63474244	1,201300037
19	42,91395859	11,08604141	0,976744666
20	28,15310786	-18,15310786	-1,599394285
21	51,94705773	14,05294227	1,238145872
22	46,20022704	12,79977296	1,127734374
23	17,0767562	9,923243797	0,87429544
24	41,62996675	-7,629966751	-0,672244407
25	37,74058812	-4,740588122	-0,41767336
26	38,36332994	-2,363329937	-0,2082231
27	55,0869915	-5,0869915	-0,44819351
28	23,66837219	1,988770671	0,175222252
29	60,1897361	-4,189736098	-0,369140096
30	50,2329201	-19,2329201	-1,694532018
31	27,75336709	-2,753367095	-0,24258764
32	30,87895467	2,121045329	0,186876418
33	28,26224194	6,73775806	0,593635637
34	18,21063805	2,789361948	0,245758996
35	22,98653295	7,013467049	0,617927201
36	26,83569073	14,16430927	1,247957952
37	49,34846651	6,651533492	0,586038751
38	51,52370751	4,476292493	0,394387379
39	30,41311842	-10,41311842	-0,91745624
40	52,1016981	-17,1016981	-1,506758976
41	63,71279925	6,287200755	0,55393892

ANEXO XIV. Procedimiento de ajuste de modelo DBO₅ GLOBAL.

Ajuste de modelo global DBO₅

Aplicando regresión con la DBO₅ en el efluente de la planta en función de las demás variables independientes se obtiene un modelo de regresión lineal múltiple con la siguiente forma:

$$DBO_5(S_i) = \beta_0 + \beta_1 * S_1 + \beta_2 * S_2 + \beta_3 * S_3 + \beta_4 * S_4 + \beta_5 * S_5 + \beta_6 * S_6 + \beta_7 * S_7 + \beta_8 * S_8 + \beta_9 * S_9 + \beta_{10} * S_{10} + \beta_{11} * S_{11} + \beta_{12} * S_{12} + \beta_{13} * S_{13} + \varepsilon$$

Donde ε corresponde al error de predicción del modelo, β_i $i=0, \dots, 13$. corresponde a los coeficientes de regresión para cada variable predictora (excepto β_0 que es el coeficiente de intersección del modelo). Además S_i $i=1, \dots, 13$. corresponden al valor que toma cada variable predictora (ver Tabla XIV,1).

TABLA XIV,1. Valores de coeficientes del modelo

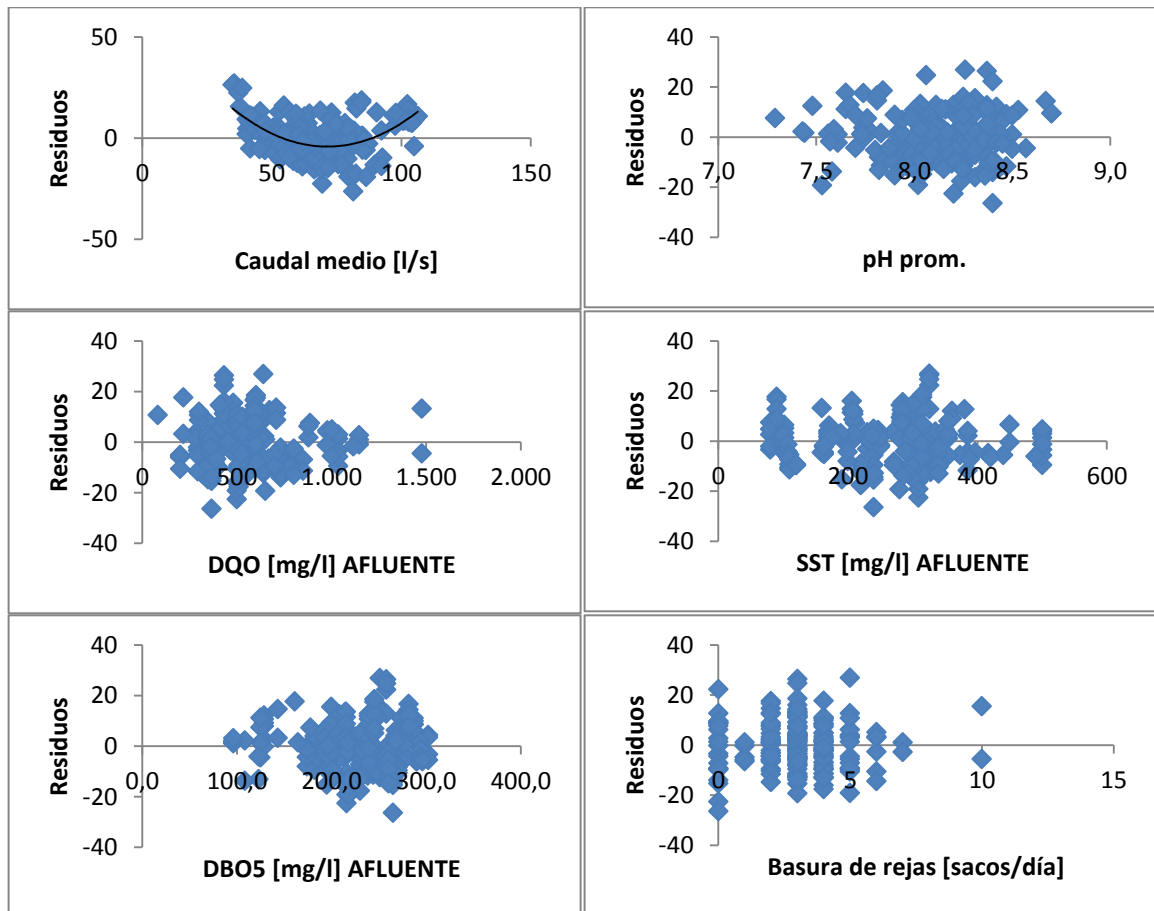
<i>SÍMBOLO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>SÍMBOLO</i>	<i>Coefficientes</i>
	Intercepto	β_0	-21,4061
S ₁	Caudal [L/s] AFLUENTE	β_1	0,6849
S ₂	pH AFLUENTE	β_2	-2,2485
S ₃	DQO [mg/L] AFLUENTE	β_3	-0,0056
S ₄	SST [mg/L] AFLUENTE	β_4	-0,0100
S ₅	DBO ₅ [mg/L] AFLUENTE	β_5	0,0698
S ₆	Basura de rejjas [sacos/día]	β_6	-0,7510
S ₇	Arenas [sacos/día]	β_7	-0,0341
S ₈	Oxígeno Disuelto zona aeróbica [mg/L]	β_8	-3,3260
S ₉	pH zona aeróbica	β_9	-1,5967
S ₁₀	Temperatura zona aeróbica [°C]	β_{10}	0,7377
S ₁₁	IVL zona aeróbica [ml/g]	β_{11}	0,0284
S ₁₂	Volumen recirculado [m ³ /día]	β_{12}	0,0013
S ₁₃	Volumen purgado [m ³ /día]	β_{13}	-0,0039

Así, el modelo queda de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 DBO_5(S_i) = & -21,4061 + 0,6849 * S_1 - 2,2485 * S_2 - 0,0056 * S_3 - 0,0100 \\
 & * S_4 + 0,0698 * S_5 - 0,7510 * S_6 - 0,0341 * S_7 - 3,3260 * S_8 - 1,5967 \\
 & * S_9 + 0,7377 * S_{10} + 0,0284 * S_{11} + 0,0013 * S_{12} - 0,0039 * S_{13}
 \end{aligned}$$

Análisis de los residuos del modelo ajustado

Al analizar los gráficos de los residuales se puede observar que los residuos muestran en general una distribución aleatoria. Sin embargo, esto no ocurre para los residuos de la variable caudal medio [l/s] en el afluente, ya que, al apreciar su gráfica, se puede observar una leve tendencia cuadrática. Esto indica que el modelo no es adecuado para los datos, por lo que es recomendable el ajuste de un nuevo modelo sugerido por lo observado en la gráfica residual. Es decir, agregar una variable con los datos del caudal medio del afluente, elevado al cuadrado.



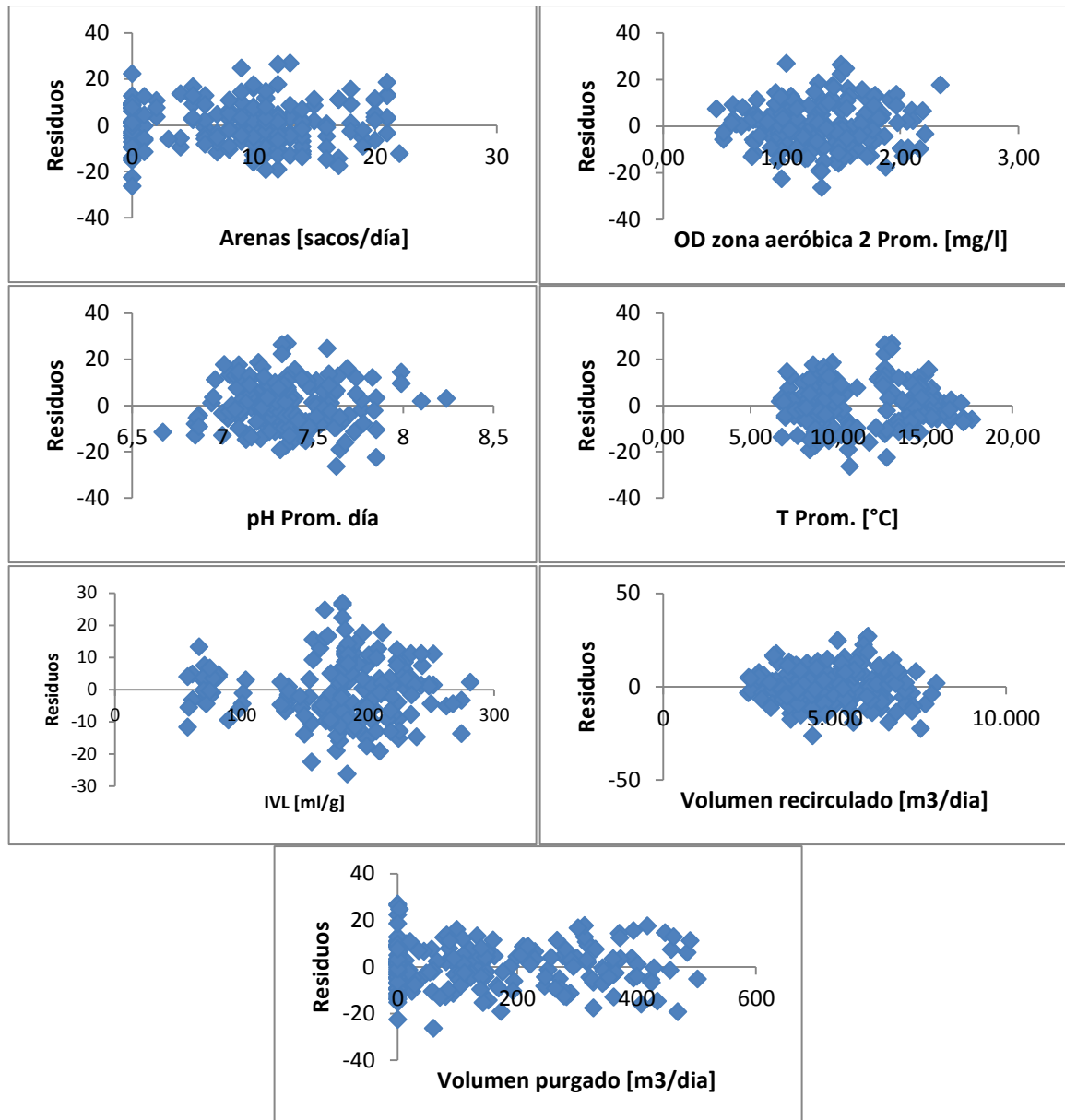


FIGURA XIV,1. Análisis de los residuos del modelo global DBO₅

Ajuste de modelo global DBO₅ (2)

Al ajustar un nuevo modelo con la adición de la variable caudal medio en el afluente al cuadrado se obtienen los siguientes coeficientes:

TABLA XIV,2. Valores de coeficientes del modelo (2)

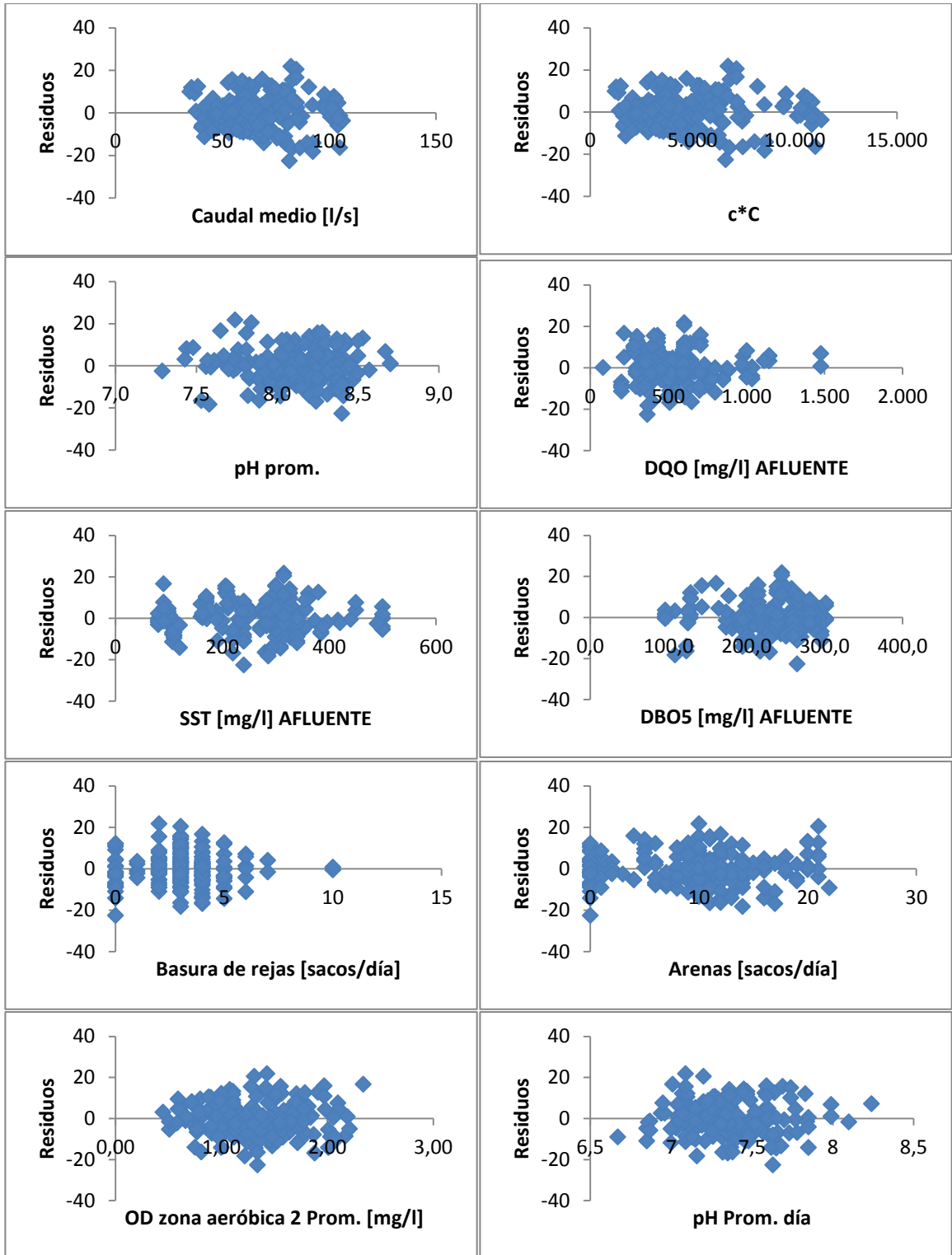
<i>SÍMBOLO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>SÍMBOLO</i>	<i>Coefficientes</i>
	Intercepto	β_0	58,9819
S_1	Caudal [L/s] AFLUENTE	β_1	-1,6072
$S_{(1A)}=(S_1)^2$	[Caudal [L/s] AFLUENTE] ²	$\beta_{(1A)}$	0,0162
S_2	pH AFLUENTE	β_2	-0,7225
S_3	DQO [mg/L] AFLUENTE	β_3	-0,0059
S_4	SST [mg/L] AFLUENTE	β_4	0,0042
S_5	DBO ₅ [mg/L] AFLUENTE	β_5	0,0457
S_6	Basura de rejas [sacos/día]	β_6	-0,5557
S_7	Arenas [sacos/día]	β_7	-0,0148
S_8	Oxígeno Disuelto zona aeróbica [mg/L]	β_8	-1,6788
S_9	pH zona aeróbica	β_9	-3,2637
S_{10}	Temperatura zona aeróbica [°C]	β_{10}	0,7461
S_{11}	IVL zona aeróbica [ml/g]	β_{11}	0,0337
S_{12}	Volumen recirculado [m ³ /día]	β_{12}	0,0001
S_{13}	Volumen purgado [m ³ /día]	β_{13}	-0,0074

Notar que este modelo ya no será lineal, debido a que una de sus variables es ajustada de forma cuadrática. El segundo modelo ajustado es el que sigue:

$$\begin{aligned}
 DBO_5(S_i) &= 58,9819 - 1,6072 * S_1 + 0,0162 * (S_1^2) - 0,7225 * S_2 - 0,0059S_3 \\
 &- 0,0042 * S_4 + 0,0457 * S_5 - 0,5557 * S_6 - 0,0148 * S_7 - 1,6788 * S_8 \\
 &- 3,2637 * S_9 + 0,7461 * S_{10} + 0,0337 * S_{11} + 0,0001 * S_{12} - 0,0074 \\
 &* S_{13}
 \end{aligned}$$

Análisis de los residuos del modelo ajustado (2)

Al visualizar las nuevas gráficas de los residuos para cada variable del nuevo modelo ajustado, no se observa tendencia alguna. Así, el modelo es adecuado para los datos. Se procede a realizar el análisis de las estadísticas de regresión.



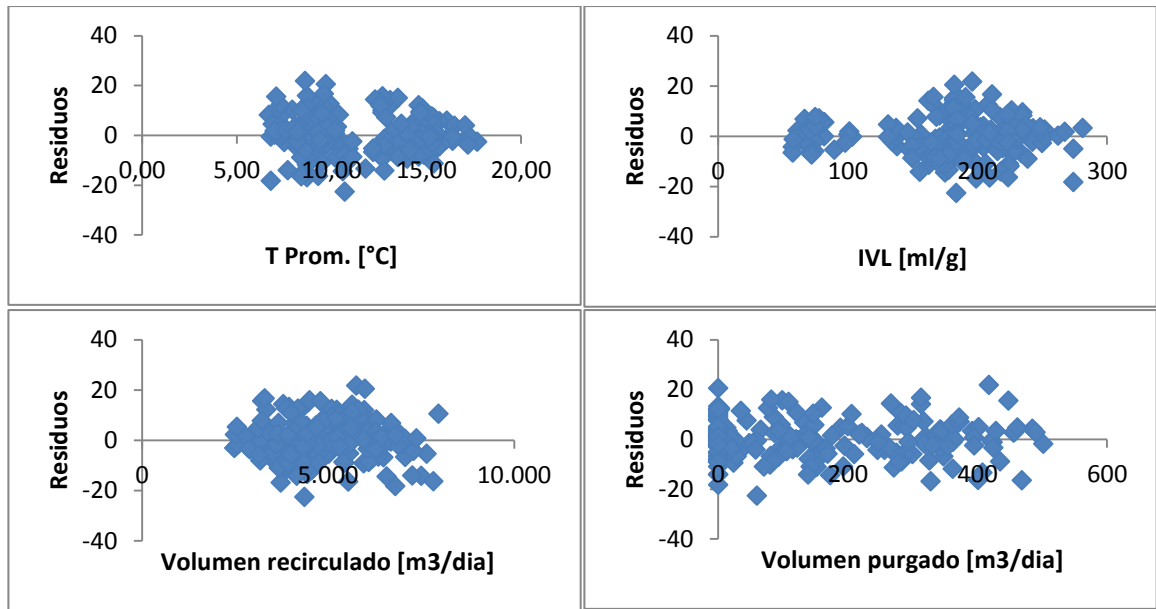


FIGURA XIV,2. Análisis de los residuos del modelo global DBO₅ (2)

Análisis de la regresión (2)

En la Tabla XIV,3 se puede ver que el coeficiente de correlación múltiple, 0,8778, indica que existe un alto grado de asociación entre la variable respuesta y la variables predictoras. Además el porcentaje de variabilidad explicada por las variables independientes es de 75,39% en el modelo.

TABLA XIV,3. Estadísticas de la regresión DBO₅ global (2)

Coefficiente de correlación múltiple	0,8778
Coefficiente de determinación R ²	0,7705
R ² ajustado	0,7539
Error típico	7,9287
Observaciones	208

De la Tabla XIV,3 y los residuos del modelo ajustado, se puede observar que los errores se encuentran entre [-22.6375; 21.7303], lo cual está contenido en $\pm 3 * \sqrt{CME} = \pm 3 * \text{Error típico} = \pm 23,7860$. Esto quiere decir que no existen puntos atípicos, por lo cual todos los datos son válidos para el modelo.

Significancia del modelo (2)

Para estudiar la significancia del modelo se debe contrastar las siguientes hipótesis:

$$H_0: \beta_1 = \beta_{1A} = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = \beta_6 = \beta_7 = \beta_8 = \beta_9 = \beta_{10} = \beta_{11} = \beta_{12} = \beta_{13} = 0$$

$$H_1: \text{Algún } \beta_i \neq 0, i=1,1A, 2, 3, \dots, 13.$$

El estadístico de prueba para esta hipótesis es la prueba F. Los resultados se resumen en la Tabla XIV,4.

TABLA XIV,4. ANOVA (2)

<i>ANÁLISIS DE VARIANZA</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	14	40740,74081	2910,052915	46,29142212	6,03291E-54
Residuos	193	12132,70595	62,86376139		
Total	207	52873,44675			

De la Tabla XIV,4 se obtiene el valor crítico de F, que corresponde al p-value=6,03291E-54 lo cual es altamente menor a un nivel de significancia $\alpha=0,05$. Esto es evidencia suficiente para rechazar nuestra hipótesis nula H_0 en favor de H_1 .

Significancia individual de los coeficientes del modelo (2)

Ahora se debe investigar cuáles de los coeficientes asociados a cada variable del modelo son significativos. Para ello se realiza los contrastes de las hipótesis individuales..

$$H_0: \beta_1=0, \quad H_0: \beta_{1A}=0, \quad H_0: \beta_2=0, \quad \dots, \quad H_0: \beta_{13}=0$$

$$H_1: \beta_1 \neq 0, \quad H_1: \beta_{1A} \neq 0, \quad H_1: \beta_2 \neq 0, \quad \dots, \quad H_1: \beta_{13} \neq 0$$

El estadístico de prueba para estas hipótesis es la prueba t, cuyos p-value se pueden obtener de la Tabla XIV,5.

TABLA XIV,5. Estadísticos de pruebas individuales (2)

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	COEF.	Error típico	Estadístico t	P-VALUE	Inferior 95%	Superior 95%
	Intercepción	β_0	58,9819	23,8439	2,4737	0,0142	11,9539	106,0100
S ₁	Caudal [L/s] AFLUENTE	β_1	-1,6072	0,2477	-6,4895	7,08E-10	-2,0957	-1,1188
S _(1A) =(S ₁) ²	[Caudal [L/s] AFLUENTE] ²	$\beta_{(1A)}$	0,0162	0,0017	9,3893	1,73E-17	0,0128	0,0197
S ₂	pH AFLUENTE	β_2	-0,7225	2,8761	-0,2512	0,8019	-6,3952	4,9502
S ₃	DQO [mg/L] AFLUENTE	β_3	-0,0059	0,0028	-2,1328	0,0342	-0,0114	-0,0004
S ₄	SST [mg/L] AFLUENTE	β_4	0,0042	0,0072	0,5763	0,5651	-0,0101	0,0184
S ₅	DBO ₅ [mg/L] AFLUENTE	β_5	0,0457	0,0131	3,4893	0,0006	0,0199	0,0715
S ₆	Basura de rejás [sacos/día]	β_6	-0,5557	0,4105	-1,3537	0,1774	-1,3653	0,2539
S ₇	Arenas [sacos/día]	β_7	-0,0148	0,1170	-0,1264	0,8996	-0,2455	0,2159
S ₈	OD zona aeróbica [mg/L]	β_8	-1,6788	1,5007	-1,1186	0,2647	-4,6388	1,2812
S ₉	pH zona aeróbica	β_9	-3,2637	2,7396	-1,1913	0,2350	-8,6671	2,1397
S ₁₀	T. zona aeróbica [°C]	β_{10}	0,7461	0,2930	2,5464	0,0117	0,1682	1,3240
S ₁₁	IVL zona aeróbica [ml/g]	β_{11}	0,0337	0,0167	2,0181	0,0450	0,0008	0,0667
S ₁₂	Volumen recirculado [m ³ /día]	β_{12}	0,0001	0,0006	0,1610	0,8723	-0,0011	0,0013
S ₁₃	Volumen purgado [m ³ /día]	β_{13}	-0,0074	0,0039	-1,9208	0,0562	-0,0150	0,0002

De la Tabla XIV,5 se puede observar que los p-value de las hipótesis de significancia de los coeficientes de regresión de 8 de las variables (S₂, S₄, S₆, S₇, S₈, S₉, S₁₂, S₁₃) predictivas son mayores al nivel de significancia del 5%, además para el mismo nivel, se observa que el cero está incluido en el intervalo de confianza de las variables antes mencionadas. Esto es evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula de los coeficientes en cuestión. Todo esto es indicativo de que las variables asociadas a las pendientes respectivas no contribuyen a explicar la variabilidad de la variable respuesta, y por lo tanto se recomienda que sean quitadas del modelo.

Ajuste de modelo global DBO₅ (3)

Al ajustar nuevamente un modelo de regresión múltiple, con la extracción de las ocho variables antes analizadas se obtienen los siguientes coeficientes:

TABLA XIV,6. Valores de coeficientes del modelo (3)

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	COEF.
	Intercepto	β_0	28,4184

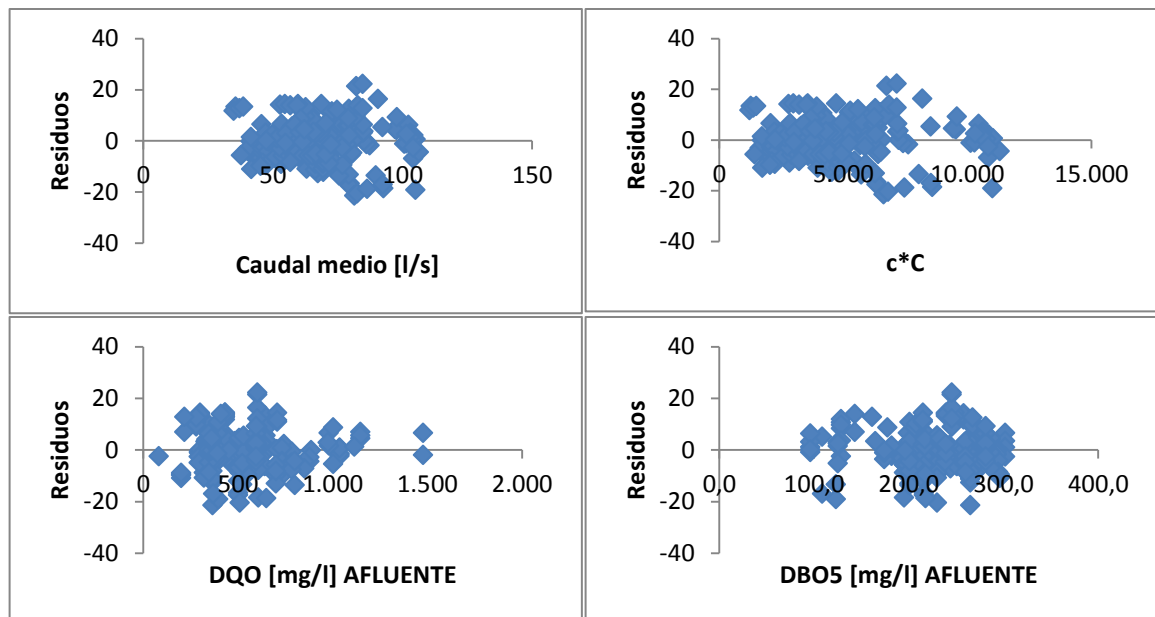
S_1	Caudal [L/s] AFLUENTE	β_1	-1,6007
$S_{(1A)}=(S_1)^2$	[Caudal [L/s] AFLUENTE] ²	$\beta_{(1A)}$	0,0163
S_3	DQO [mg/L] AFLUENTE	β_3	-0,0061
S_5	DBO ₅ [mg/L] AFLUENTE	β_5	0,0369
S_{10}	Temperatura zona aeróbica [°C]	β_{10}	0,6882
S_{11}	IVL zona aeróbica [ml/g]	β_{11}	0,0283

Así, el ajuste de un tercer modelo resulta de la siguiente forma:

$$DBO_5(S_i) = 28,4184 - 1,6007 * S_1 + 0,0163 * (S_1^2) - 0,0061 * S_3 + 0,0369 * S_5 + 0,6882 * S_{10} + 0,0283 * S_{11}$$

Análisis de los residuos del modelo ajustado (3)

Al visualizar los gráficos de los residuos de las seis variables independientes, no se observa tendencia o comportamiento alguno. Así, el modelo es adecuado para los datos.



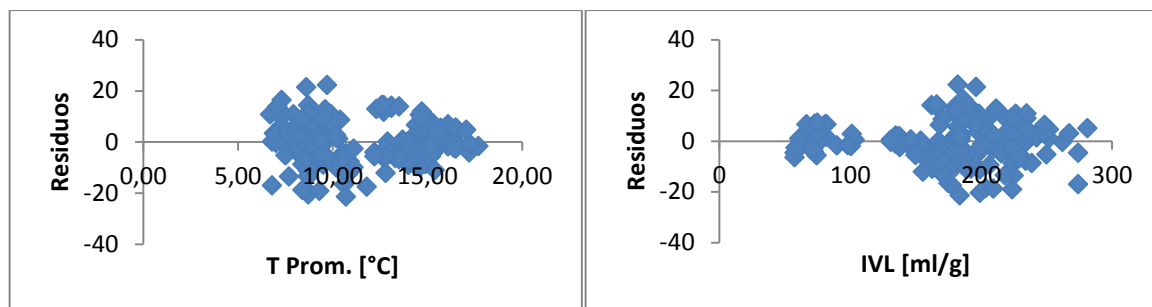


FIGURA XIV,3. Análisis de los residuos del modelo global DBO₅ (3)

Análisis de la regresión (3)

En la Tabla XIV,7 se puede ver que el coeficiente de correlación múltiple, 0,8683, indica que existe un alto grado de asociación entre la variable respuesta y las variables predictoras. Además el porcentaje de variabilidad explicada por las variables independientes es de 74,65% en el modelo. Ambas estadísticas han disminuido levemente con respecto al modelo anterior, y esto se debe principalmente a la disminución de las variables explicativas de la variable respuesta.

TABLA XIV,7. . Estadísticas de la regresión DBO₅ global (3)

Coeficiente de correlación múltiple	0,8683
Coeficiente de determinación R ²	0,7539
R ² ajustado	0,7465
Error típico	8,0464
Observaciones	208

En los datos de la tabla anterior y los residuos del modelo ajustado, se puede observar que los errores se encuentran entre [-21.4219; 22.2024], lo cual está contenido en $\pm 3 * \sqrt{CME} = \pm 3 * \text{Error típico} = \pm 24,1391$. Esto quiere decir que no existen puntos atípicos, por lo cual todos los datos son válidos para el modelo.

Significancia del modelo (3)

Para estudiar la significancia del modelo se debe contrastar las siguientes hipótesis:

$$H_0: \beta_1 = \beta_{1A} = \beta_3 = \beta_5 = \beta_{10} = \beta_{11} = 0$$

$$H_1: \text{Algún } \beta_i \neq 0, i=1,(1A),3,5,10,11.$$

El estadístico de prueba para esta hipótesis es la prueba F. Los resultados se resumen en la Tabla XIV,8.

TABLA XIV,8. ANOVA (3)

<i>ANÁLISIS DE VARIANZA</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	6	39859,8732	6643,3122	102,608691	1,92763E-58
Residuos	201	13013,5736	64,7441471		
Total	207	52873,4468			

De la Tabla XIV,8 se obtiene el valor crítico de F, correspondiente al p-value=1,92763E-58 que es altamente menor a un nivel de significancia $\alpha=0,05$. Esto es evidencia suficiente para rechazar nuestra hipótesis nula H_0 en favor de H_1 .

Significancia individual de los coeficientes del modelo (3)

Ahora se debe investigar cuáles de los coeficientes asociados a cada variable del modelo son significativos, y para ello se realiza los contrastes de las hipótesis individuales.

$$H_0: \beta_1=0, \quad H_0: \beta_{1A}=0, \quad H_0: \beta_3=0, \quad H_0: \beta_5=0, \quad H_0: \beta_{10}=0, \quad H_0: \beta_{11}=0$$

$$H_1: \beta_1 \neq 0, \quad H_1: \beta_{1A} \neq 0, \quad H_1: \beta_3 \neq 0, \quad H_1: \beta_5 \neq 0, \quad H_1: \beta_{10} \neq 0, \quad H_1: \beta_{11} \neq 0$$

El estadístico de prueba para estas hipótesis es la prueba t, cuyos p-value se pueden obtener de la Tabla XIV,9.

TABLA XIV,9. . Estadísticos de pruebas individuales (3)

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	COEF.	Error típico	Estadístico t	P-VALUE	Inferior 95%	Superior 95%
	Intercepto	β_0	28,4184	10,7518	2,6431	0,0089	7,2176	49,6191
S_1	Caudal [L/s] AFLUENTE	β_1	-1,6007	0,2396	-6,6818	2,27E-10	-2,0730	-1,1283
$S_{(1A)}=(S_1)^2$	[Caudal [L/s] AFLUENTE] ²	$\beta_{(1A)}$	0,0163	0,0017	9,8101	8,21E-19	0,0130	0,0196
S_3	DQO [mg/L] AFLUENTE	β_3	-0,0061	0,0027	-2,2649	0,0246	-0,0115	-0,0008
S_5	DBO5 [mg/L] AFLUENTE	β_5	0,0369	0,0126	2,9274	0,0038	0,0120	0,0618
S_{10}	T. zona aeróbica [°C]	β_{10}	0,6882	0,2713	2,5367	0,0119	0,1532	1,2231
S_{11}	IVL zona aeróbica [ml/g]	β_{11}	0,0283	0,0162	1,7478	0,0820	-0,0036	0,0603

De la Tabla XIV,9 se puede observar que el p-value de la hipótesis de significancia del coeficiente de regresión de las variables S_{11} con valor de 0.0820 confirma que no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula de la pendiente. Esto es indicativo de que la variable asociada a la pendiente respectiva no contribuye a explicar la variabilidad de la variable respuesta, y por lo tanto se recomienda quitarla del modelo.

Ajuste de modelo global DBO₅ (4)

Al ajustar nuevamente un modelo de regresión múltiple, con la extracción de la variable S_{11} antes analizada se obtienen los siguientes coeficientes:

TABLA XIV,10. Valores de coeficientes del modelo (4)

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	COEF.
	Intercepción	β_0	37,6641
S_1	Caudal [L/s] AFLUENTE	β_1	-1,5934
$S_{(1;2)}=(S_1)^2$	[Caudal [L/s] AFLUENTE] ²	$\beta_{(1;2)}$	0,0164
S_3	DQO [mg/L] AFLUENTE	β_3	-0,0075
S_5	DBO5 [mg/L] AFLUENTE	β_5	0,0329
S_{10}	Temperatura zona aeróbica [°C]	β_{10}	0,4116

Así, el ajuste de un cuarto modelo resulta de la siguiente forma:

$$DBO_5(S_i) = 37,6641 - 1,5934 * S_1 + 0,0164 * (S_1^2) - 0,0075 * S_3 + 0,0329 * S_5 + 0,4116 * S_{10}$$

Análisis de los residuos del modelo ajustado (4)

Al visualizar los gráficos de los residuos de las variables independientes restantes, no se observa tendencia alguna. Así, el modelo es adecuado para los datos.

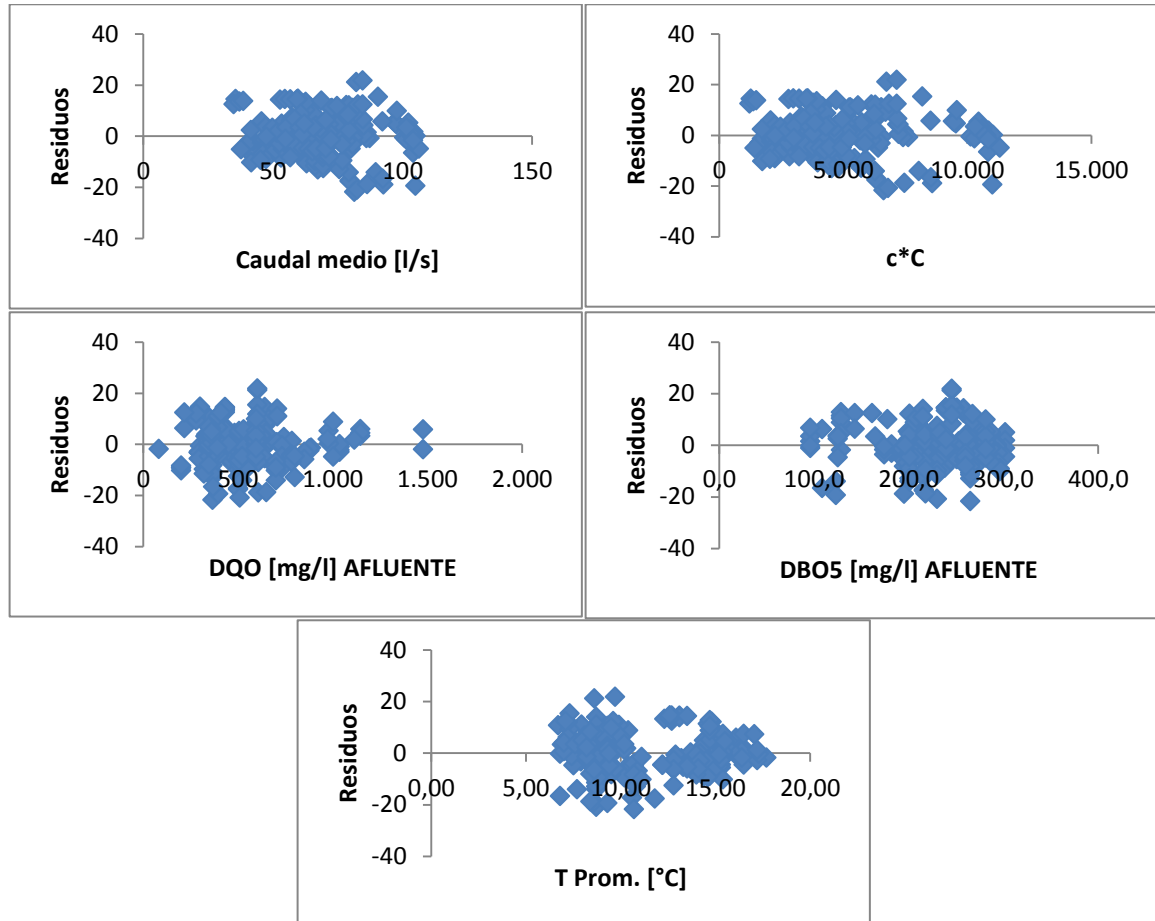


FIGURA XIV,4. Análisis de los residuos del modelo global DBO_5 (4)

Análisis de la regresión (4)

En la Tabla XIV,11 se puede ver que el coeficiente de correlación múltiple es 0,8661, indica que existe un alto grado de asociación entre la variable respuesta y la variables predictoras. Además el porcentaje de variabilidad explicada por las variables

independientes es de 74,39% en el modelo. Mostrando una variación insignificante con respecto al anterior.

TABLA XIV,11. Estadísticas de la regresión DBO₅ global (4)

Coefficiente de correlación múltiple	0,8661
Coefficiente de determinación R ²	0,7501
R ² ajustado	0,7439
Error típico	8,0872
Observaciones	208

En los datos de la tabla anterior y los residuos del ajuste de modelo DBO₅ (4) se puede observar que los errores se encuentran entre [-21.6981; 21.8039], lo cual está contenido en $\pm 3 * \sqrt{CME} = \pm 3 * \text{Error típico} = \pm 24,2616$. Esto quiere decir que no existen puntos atípicos, por lo cual todos los datos son válidos para el modelo.

Significancia del modelo (4)

Para estudiar la significancia del modelo se debe contrastar las siguientes hipótesis:

$$H_0: \beta_1 = \beta_{1A} = \beta_3 = \beta_5 = \beta_{10} = 0$$

$$H_1: \text{Algún } \beta_i \neq 0, i=1,(1A), 3, 5, 10.$$

El estadístico de prueba para esta hipótesis es la prueba F (ver Tabla XIV,12).

TABLA XIV,12. ANOVA (4)

ANÁLISIS DE VARIANZA	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	5	39662,0921	7932,41842	121,285709	7,48808E-59
Residuos	202	13211,3547	65,4027458		
Total	207	52873,4468			

De la Tabla XIV,12 se obtiene el valor crítico de F, que corresponde al p-value=7,48808E-59 lo cual es altamente menor a un nivel de significancia $\alpha=0,05$. Esto es evidencia suficiente para rechazar nuestra hipótesis nula H_0 en favor de H_1 .

Significancia individual de los coeficientes del modelo (4).

Ahora se debe investigar cuáles de los coeficientes asociados a cada variable del modelo son significativos, y para ello, se realiza los contrastes de las hipótesis individuales.

$$\begin{array}{ccccc}
 H_0: \beta_1=0, & H_0: \beta_{1A}=0, & H_0: \beta_3=0, & H_0: \beta_5=0, & H_0: \beta_{10}=0 \\
 H_1: \beta_1 \neq 0, & H_1: \beta_{1A} \neq 0, & H_1: \beta_3 \neq 0, & H_1: \beta_5 \neq 0, & H_1: \beta_{10} \neq 0
 \end{array}$$

El estadístico de prueba para estas hipótesis es la prueba t, cuyos p-value se pueden obtener de la siguiente tabla:

TABLA XIV,13. Estadísticos de pruebas individuales (4)

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	COEF.	Error típico	Estadístico t	P-VALUE	Inferior 95%	Superior 95%
	Intercepción	β_0	37,6641	9,4079	4,0034	0,0001	19,1138	56,2144
S_1	Caudal [L/s] AFLUENTE	β_1	-1,5934	0,2407	-6,6188	3,19E-10	-2,0681	-1,1187
$S_{(1;2)}=(S_1)^2$	[Caudal [L/s] AFLUENTE]2	$\beta_{(1;2)}$	0,0164	0,0017	9,7760	9,98E-19	0,0131	0,0197
S_3	DQO [mg/L] AFLUENTE	β_3	-0,0075	0,0026	-2,8617	0,0047	-0,0126	-0,0023
S_5	DBO5 [mg/l] AFLUENTE	β_5	0,0329	0,0125	2,6379	0,0090	0,0083	0,0574
S_{10}	T. zona aeróbica [°C]	β_{10}	0,4116	0,2215	1,8586	0,0645	-0,0251	0,8484

De la Tabla XIV,13 se puede observar que el p-value de la hipótesis de significancia del coeficiente de regresión de la variable S_{10} con valor de 0.0645 es mayor al nivel de significancia de 0,05, por lo cual, no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula del coeficiente en favor de H_1 . Esto es indicativo de que la variable asociada a la pendiente respectiva no contribuye a explicar la variabilidad de la variable respuesta, y por lo tanto se recomienda quitarla del modelo.

La quinta y última iteración o ajuste de modelo, además, de las pruebas para cumplir los supuestos de existencia del modelo, se encuentra en el cuerpo de esta lectura.

ANEXO XV. Valores residuales modelo DBO₅ GLOBAL.

<i>Observación</i>	<i>Pronóstico DBO₅ [mg/l] EFLUENTE</i>	<i>Residuos</i>	<i>Residuos estándares</i>	<i>Observación</i>	<i>Pronóstico DBO₅ [mg/l] EFLUENTE</i>	<i>Residuos</i>	<i>Residuos estándares</i>
1	4,80681898	-0,806818982	-0,10013957	41	8,200779365	8,799220635	1,092128702
2	6,47543611	-2,475436107	-0,307242532	42	30,15609486	3,598250922	0,446602406
3	3,91475439	-1,914754389	-0,237652664	43	24,26977548	9,484570306	1,177191923
4	4,53219404	-0,532194042	-0,066054076	44	32,35082524	1,40352054	0,174200095
5	3,49833403	0,501665971	0,062265038	45	32,35124604	1,403099745	0,174147867
6	3,39098188	0,60901812	0,075589214	46	31,17755787	2,576787916	0,319821966
7	5,46517085	5,829116113	0,723489645	47	24,54444482	9,209900961	1,143100918
8	8,5046792	2,789607759	0,346236426	48	26,91219634	6,464976547	0,802410434
9	14,4452005	4,143373455	0,514261122	49	19,45840696	13,91876593	1,727548883
10	11,4033859	7,185187986	0,891800576	50	8,514298521	11,48570148	1,425565374
11	12,9702414	5,618332479	0,697327913	51	6,844461948	13,15553805	1,632819689
12	12,1402207	-1,345933769	-0,167052624	52	5,596869399	14,4031306	1,787666543
13	1,76677836	5,233221642	0,649529293	53	9,069895995	10,93010401	1,356606545
14	6,17004992	-1,170049921	-0,145222532	54	7,586357035	12,41364296	1,540738248
15	8,69572422	-1,695724222	-0,210467401	55	12,67886793	7,321132074	0,908673484
16	8,86657785	-1,866577853	-0,23167316	56	7,502574513	-0,502574513	-0,062377803
17	8,89785318	-1,897853176	-0,235554944	57	8,487518224	-2,487518224	-0,308742122
18	7,63307052	-0,633070523	-0,078574514	58	9,426405483	-4,426405483	-0,549390074
19	9,6004208	-3,818634524	-0,473955654	59	7,599609143	-2,599609143	-0,322654458
20	9,09190352	-7,091903521	-0,880222432	60	7,605567212	-2,605567212	-0,323393952
21	10,1266306	-5,563058083	-0,690467447	61	8,000853466	-2,000853466	-0,248338982
22	9,71927589	-5,155703337	-0,639907991	62	6,746691679	-0,746691679	-0,092676778
23	8,34984572	-3,786273169	-0,469939075	63	7,429587405	-1,429587405	-0,177435423
24	8,92959179	-6,366019237	-0,790128196	64	6,618990684	-0,618990684	-0,076826974
25	10,5121694	-7,948596815	-0,986552228	65	6,511657083	-0,511657083	-0,0635051
26	10,3931016	0,888684655	0,110300453	66	6,471603173	-0,471603173	-0,058533748
27	10,7919268	1,20807323	0,149941853	67	8,929835018	-0,429835018	-0,053349629
28	11,8961091	5,103890852	0,633477205	68	9,216784688	-0,716784688	-0,088964826
29	13,2610802	2,738919815	0,339945214	69	8,895945678	2,104054322	0,261147914
30	12,3975611	-0,397561143	-0,049343908	70	11,03857111	-0,038571113	-0,004787313
31	15,0564691	-3,056469078	-0,379358326	71	10,9477081	0,052291902	0,006490289
32	18,8134749	2,533430399	0,314440582	72	11,53152637	-0,53152637	-0,065971207
33	19,2156784	7,131226928	0,885103117	73	11,05780484	-0,05780484	-0,007174536
34	14,0009059	-0,000905909	-0,000112438	74	10,62767198	-3,127671978	-0,388195782
35	14,8210617	-0,821061676	-0,101907323	75	10,81396508	-6,813965078	-0,845725678
36	13,9376282	1,562371813	0,193916163	76	13,73546189	-9,735461892	-1,208331715
37	11,4515847	4,048415327	0,502475249	77	12,76503911	-8,765039105	-1,08788621
38	12,5867556	2,913244358	0,361581771	78	13,00915102	-9,009151019	-1,118184532
39	14,7302284	2,269771616	0,281716169	79	11,79230554	-7,792305543	-0,967153899
40	13,6991	3,300899986	0,409696241	80	9,627090036	-5,627090036	-0,69841487
<i>Observación</i>	<i>Pronóstico DBO₅ [mg/l]</i>	<i>Residuos</i>	<i>Residuos estándares</i>	<i>Observación</i>	<i>Pronóstico DBO₅ [mg/l]</i>	<i>Residuos</i>	<i>Residuos estándares</i>

EFLUENTE				EFLUENTE			
81	9,657077854	-5,657077854	-0,702136854	122	15,40035549	-12,40035549	-1,539089053
82	8,817852716	-4,817852716	-0,597975145	123	25,47408853	-21,47408853	-2,665289281
83	6,993733381	-2,993733381	-0,371571789	124	9,804767667	-5,804767667	-0,720467601
84	9,623646483	-5,623646483	-0,697987469	125	12,82495514	-8,824955144	-1,09532278
85	9,73735748	-5,73735748	-0,712100883	126	10,50597573	-6,505975725	-0,807499109
86	9,288737086	-5,288737086	-0,656419677	127	35,99765219	-18,99765219	-2,357922604
87	11,43477942	13,56522058	1,683668062	128	12,32161194	-7,82161194	-0,970791307
88	13,35828084	11,64171916	1,444929746	129	12,87805415	-7,878054154	-0,977796718
89	12,3424578	12,6575422	1,571010173	130	15,26479125	-10,26479125	-1,274030236
90	9,83454761	14,16545239	1,758166749	131	19,85806497	-14,85806497	-1,844131417
91	11,76647019	13,23352981	1,642499755	132	15,10122909	-10,10122909	-1,253729469
92	9,701516293	14,4094596	1,788452077	133	10,74302523	-5,743025231	-0,712804344
93	10,97059839	13,14037751	1,630938015	134	15,96902769	-13,96902769	-1,733787198
94	9,719027245	14,39194865	1,786278678	135	15,01755628	9,644263297	1,197012462
95	12,4480527	13,7738991	1,709568515	136	14,52920616	10,13261342	1,257624783
96	11,34928045	14,87267134	1,845944309	137	12,04647695	12,61534262	1,565772509
97	11,22129543	15,00065636	1,861829365	138	14,78622041	9,87559917	1,225725068
98	25,59853882	0,623412977	0,077375853	139	15,03231546	0,298594325	0,03706049
99	9,552602516	-4,552602516	-0,565053211	140	24,8445702	-3,957297005	-0,491165959
100	7,682578729	-2,682578729	-0,332952354	141	28,66583961	3,334160388	0,413824407
101	10,89877338	-5,898773376	-0,732135263	142	28,47508346	-19,47508346	-2,417179715
102	13,84132879	-11,84132879	-1,4697046	143	19,25336474	-10,25336474	-1,272612017
103	22,05645577	-17,05645577	-2,116988047	144	13,09686548	-4,096865476	-0,508488713
104	22,04520962	-17,04520962	-2,115592214	145	19,92345316	-1,923453163	-0,238732326
105	18,98526198	-5,402577867	-0,6705492	146	18,69688609	-0,696886091	-0,086495081
106	6,0685962	7,514087911	0,932622492	147	14,06522497	0,876872024	0,10883431
107	7,972564173	0,318777883	0,039565604	148	14,39171743	3,52142806	0,43706742
108	10,25453724	-1,963195186	-0,243664968	149	15,87651775	2,036627738	0,252779161
109	8,935328298	-5,935328298	-0,736672333	150	22,36417531	-4,451029819	-0,552446361
110	10,22024237	-7,220242369	-0,896151404	151	15,63108525	-6,804794266	-0,844587429
111	9,097828046	-6,097828046	-0,756841237	152	14,84349682	-6,01720584	-0,746834689
112	13,55924421	-10,55924421	-1,310576716	153	18,07147118	-9,245180193	-1,147479654
113	9,373886704	-5,373886704	-0,666988152	154	24,59240134	5,706391242	0,708257461
114	10,29955284	-5,299552842	-0,657762092	155	46,71063231	5,06066186	0,628111773
115	11,45070777	-7,950707769	-0,986814233	156	52,54257071	-0,771276534	-0,095728164
116	13,20398038	-11,20398038	-1,390599129	157	58,51439395	-6,743099774	-0,836930123
117	11,16501356	-9,165013564	-1,13752965	158	47,75681514	4,014479036	0,498263194
118	26,641265	-21,641265	-2,686038644	159	47,25283325	4,518460922	0,560815675
119	15,39255476	-13,39255476	-1,66223738	160	53,68664444	-1,915350264	-0,237726622
120	14,84603789	-12,84603789	-1,594405603	161	39,27436021	4,497776994	0,558248458
121	13,66662075	-10,66662075	-1,323903918	162	30,53305432	5,239925918	0,650361405
Observación	Pronóstico	Residuos	Residuos	Observación	Pronóstico	Residuos	Residuos

	DBO5 [mg/l] EFLUENTE		estándares		DBO5 [mg/l] EFLUENTE		estándares
163	25,99142638	9,781553865	1,214052491	186	11,60693239	3,393067608	0,421135766
164	26,53358017	9,23940007	1,146762245	187	17,51282397	-2,512823975	-0,311882984
165	26,52194101	9,25103923	1,148206857	188	22,19518506	1,09050647	0,135349875
166	27,74371315	8,029267089	0,996564743	189	25,11839216	20,16729937	2,50309515
167	25,20143126	10,57154898	1,312103941	190	22,09959028	7,186101258	0,891913928
168	7,100093956	-2,100093956	-0,260656367	191	35,09541299	14,19027854	1,761248085
169	3,232485511	1,767514489	0,219377759	192	27,86393038	21,42176116	2,658794589
170	4,233276954	0,766723046	0,095163001	193	18,29370333	10,9919882	1,364287397
171	3,119985881	1,880014119	0,233340822	194	22,82337543	11,82288071	1,467414888
172	10,61183392	-5,611833917	-0,696521334	195	13,28644904	6,720371687	0,834109192
173	29,53641952	-14,03641952	-1,742151637	196	26,76725176	13,05033887	1,619762732
174	53,94846643	-17,94846643	-2,227701311	197	54,48157955	5,14678097	0,638800577
175	33,51955766	-16,51955766	-2,050350118	198	57,80632701	1,82203351	0,226144471
176	4,935238764	5,064761236	0,628620573	199	59,37771667	0,25064385	0,031109044
177	3,699824661	0,300175339	0,03725672	200	55,71693552	2,568559075	0,318800631
178	4,117888247	2,882111753	0,3577177	201	55,59665132	1,345977341	0,167058032
179	4,860312054	6,139687946	0,762036743	202	55,59665132	1,345977341	0,167058032
180	4,070738001	-2,070738001	-0,257012808	203	61,76075548	-4,818126812	-0,598009165
181	3,742132981	-1,742132981	-0,216227495	204	57,05043708	-0,107808418	-0,013380806
182	8,167143882	1,832856118	0,227487735	205	55,47652433	1,466104331	0,181967777
183	11,30924485	-1,309244851	-0,162498923	206	53,29034029	3,652288375	0,453309347
184	13,70356711	2,296432888	0,285025274	207	47,2586357	9,683992965	1,201943571
185	13,19383059	1,806169409	0,224175474	208	57,76531526	-0,86531526	-0,107399925

ANEXO XVI. Procedimiento de ajuste de modelo DQO GLOBAL.

Ajuste de modelo global DQO

Aplicando regresión con la DQO en el efluente de la planta en función de las demás variables independientes se obtiene un modelo de regresión lineal múltiple con la siguiente forma:

$$DQO(S_i) = \beta_0 + \beta_1 * S_1 + \beta_2 * S_2 + \beta_3 * S_3 + \beta_4 * S_4 + \beta_5 * S_5 + \beta_6 * S_6 + \beta_7 * S_7 + \beta_8 * S_8 + \beta_9 * S_9 + \beta_{10} * S_{10} + \beta_{11} * S_{11} + \beta_{12} * S_{12} + \beta_{13} * S_{13} + \varepsilon$$

Donde ε corresponde al error de predicción del modelo, β_i $i=0, \dots, 13$. corresponde a los coeficientes de regresión para cada variable predictora (excepto β_0 que es el coeficiente de intersección del modelo). Además S_i $i=1, \dots, 13$. corresponden al valor que toma cada variable predictora.

TABLA XVI,1. Valores de coeficientes del modelo

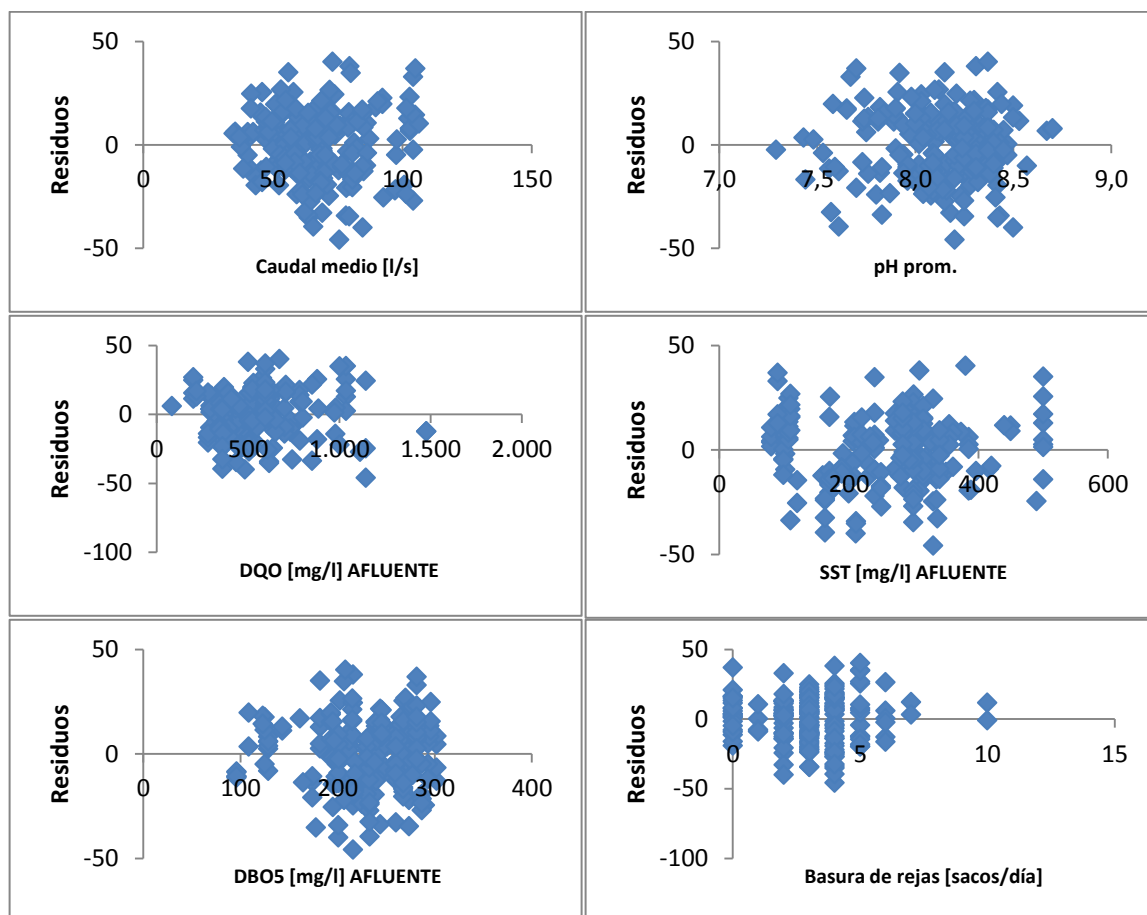
<i>SÍMBOLO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>SÍMBOLO</i>	<i>Coefficientes</i>
	Intercepto	β_0	99,9137
S_1	Caudal [L/s] AFLUENTE	β_1	0,1217
S_2	pH AFLUENTE	β_2	-5,7812
S_3	DQO [mg/L] AFLUENTE	β_3	0,0029
S_4	SST [mg/L] AFLUENTE	β_4	-0,2418
S_5	DBO5 [mg/L] AFLUENTE	β_5	-0,0196
S_6	Basura de rejas [sacos/día]	β_6	-0,3291
S_7	Arenas [sacos/día]	β_7	0,0150
S_8	Oxígeno Disuelto zona aeróbica [mg/L]	β_8	5,5266
S_9	pH zona aeróbica	β_9	16,6517
S_{10}	Temperatura zona aeróbica [°C]	β_{10}	1,7181
S_{11}	IVL zona aeróbica [ml/g]	β_{11}	-0,1233
S_{12}	Volumen recirculado [m ³ /día]	β_{12}	-0,0094
S_{13}	Volumen purgado [m ³ /día]	β_{13}	0,0108

Así, el modelo queda de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 DQO(S_i) &= 99,9137 + 0,1217 * S_1 - 5,7812 * S_2 + 0,0029 * S_3 - 0,2418 * S_4 \\
 &- 0,0196 * S_5 - 0,3291 * S_6 + 0,0150 * S_7 + 5,5266 * S_8 + 16,6517 \\
 &* S_9 + 1,7181 * S_{10} - 0,1233 * S_{11} - 0,0094 * S_{12} + 0,0108 * S_{13}
 \end{aligned}$$

Análisis de los residuos del modelo ajustado

Al analizar los gráficos de los residuales se puede observar que los residuos siguen una distribución aleatoria, por lo tanto, tenemos evidencia para afirmar que el modelo es adecuado para los datos. Ahora se procede al análisis de estadísticas de regresión.



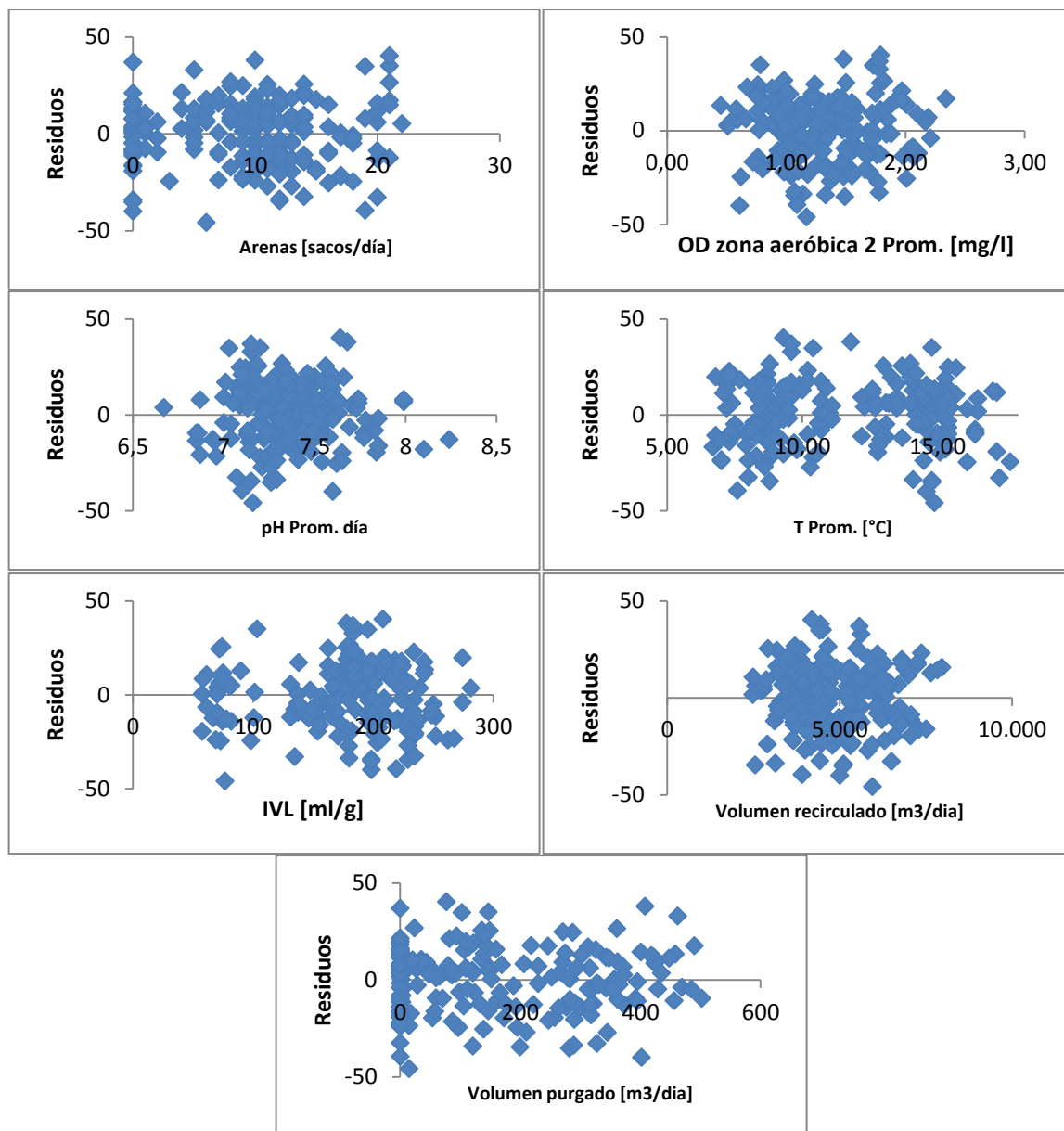


FIGURA XVI,1. Análisis de los residuos del modelo global DQO

Análisis de la regresión

En la Tabla XVI,2 se puede ver que el coeficiente de correlación múltiple, 0,8992, indica que existe un alto grado de asociación entre la variable respuesta y la variables predictoras. Además el porcentaje de variabilidad explicada por las variables independientes es de 79,56% en el modelo.

TABLA XVI,2. Estadísticas de la regresión DQO global

Coeficiente de correlación múltiple	0,8992
Coeficiente de determinación R^2	0,8085
R^2 ajustado	0,7956
Error típico	16,7274
Observaciones	208

En los datos mostrados en la Tabla XVI,2 y los residuos del ajuste de modelo DQO se puede observar que los errores se encuentran entre [-45.8706; 40.1416], lo cual está contenido en $\pm 3 * \sqrt{CME} = \pm 3 * \text{Error típico} = \pm 50,1823$. Esto quiere decir que no existen puntos atípicos, por lo cual todos los datos son válidos para el modelo.

Significancia del modelo

Para estudiar la significancia del modelo se debe contrastar las siguientes hipótesis:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = \beta_6 = \beta_7 = \beta_8 = \beta_9 = \beta_{10} = \beta_{11} = \beta_{12} = \beta_{13} = 0$$

$$H_1: \text{Algún } \beta_i \neq 0, i=1,2,\dots,13.$$

El estadístico de prueba para esta hipótesis es la prueba F. Los resultados se resumen en la Tabla XVI,3.

TABLA XVI,3. ANOVA

<i>ANÁLISIS DE VARIANZA</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	13	229137,857	17625,989	62,9932516	2,63459E-62
Residuos	194	54282,6696	279,807575		
Total	207	283420,527			

De la Tabla XVI,3 se obtiene el valor crítico de F, que corresponde al p-value=2,63459E-62 lo cual es altamente menor a un nivel de significancia $\alpha=0,05$. Esto es evidencia suficiente para rechazar nuestra hipótesis nula H_0 en favor de H_1 .

Significancia individual de los coeficientes del modelo.

Se investigaron cuáles de los coeficientes asociados a cada variable del modelo son significativos, y para ello se realizaron contrastes de las hipótesis individuales.

$$H_0: \beta_1=0, \quad H_0: \beta_2=0, \quad \dots, \quad H_0: \beta_{13}=0$$

$$H_1: \beta_1 \neq 0, \quad H_1: \beta_2 \neq 0, \quad \dots, \quad H_1: \beta_{13} \neq 0$$

El estadístico de prueba para estas hipótesis es la prueba t, cuyos p-value se pueden obtener de la Tabla XVI,4.

TABLA XVI,4. Estadísticos de prueba independientes

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	COEF.	Error típico	Estadístico t	P-VALUE	Inferior 95%	Superior 95%
	Intercepto	β_0	99,9137	46,9496	2,1281	0,0346	7,3164	192,5109
S ₁	Caudal [L/s] AFLUENTE	β_1	0,1217	0,0880	1,3826	0,1684	-0,0519	0,2953
S ₂	pH AFLUENTE	β_2	-5,7812	6,0582	-0,9543	0,3411	-17,7297	6,1672
S ₃	DQO [mg/L] AFLUENTE	β_3	0,0029	0,0059	0,4876	0,6264	-0,0087	0,0144
S ₄	SST [mg/L] AFLUENTE	β_4	-0,2418	0,0149	-16,1889	7,34E-38	-0,2713	-0,2123
S ₅	DBO5 [mg/L] AFLUENTE	β_5	-0,0196	0,0271	-0,7229	0,4706	-0,0730	0,0338
S ₆	Basura de rejas [sacos/día]	β_6	-0,3291	0,8649	-0,3805	0,7040	-2,0349	1,3767
S ₇	Arenas [sacos/día]	β_7	0,0150	0,2467	0,0606	0,9517	-0,4717	0,5016
S ₈	OD zona aeróbica [mg/L]	β_8	5,5266	3,1445	1,7575	0,0804	-0,6752	11,7283
S ₉	pH zona aeróbica	β_9	16,6517	5,7677	2,8871	0,0043	5,2763	28,0271
S ₁₀	T. zona aeróbica [°C]	β_{10}	1,7181	0,6181	2,7794	0,0060	0,4989	2,9372
S ₁₁	IVL zona aeróbica [ml/g]	β_{11}	-0,1233	0,0352	-3,5017	0,0006	-0,1928	-0,0539
S ₁₂	Volumen recirculado [m ³ /día]	β_{12}	-0,0094	0,0012	-7,6687	8,19E-13	-0,0118	-0,0070
S ₁₃	Volumen purgado [m ³ /día]	β_{13}	0,0108	0,0081	1,3386	0,1823	-0,0051	0,0268

De la Tabla XVI,4 se puede observar que los p-value de las hipótesis individuales de los coeficientes β_1 , β_2 , β_3 , β_5 , β_6 , β_7 , β_8 , y β_{13} con valores de 0,1684, 0,3411, 0,6264, 0,4706, 0,7040, 0,9517, 0,0804 y 0,1823 respectivamente superan el nivel de significancia de 0,05, por lo que no existe evidencia suficiente para rechazar las hipótesis nulas respectivas. Esto es indicativo de que las variables asociadas a las respectivas pendientes no contribuyen a la explicación de la variabilidad de la variable respuesta DQO, y por lo tanto se recomienda quitarlas del modelo.

La segunda y última iteración o ajuste de modelo, además, de las pruebas para cumplir los supuestos de existencia del modelo, se encuentra en el cuerpo de esta lectura.

ANEXO XVII. Valores residuales modelo DQO GLOBAL.

<i>Observación</i>	<i>Pronóstico DQO [mg/L] EFLUENTE</i>	<i>Residuos</i>	<i>Residuos estándares</i>	<i>Observación</i>	<i>Pronóstico DQO [mg/L] EFLUENTE</i>	<i>Residuos</i>	<i>Residuos estándares</i>
--------------------	---	-----------------	--------------------------------	--------------------	---	-----------------	--------------------------------

1	27,42461016	28,57538984	1,724724449	41	61,88114509	0,118854908	0,007173724
2	6,483908294	13,51609171	0,815790579	42	50,8111057	11,1888943	0,675327954
3	2,05535957	17,94464043	1,083084439	43	52,75708811	9,242911894	0,557874318
4	21,5221385	-1,5221385	-0,091871695	44	65,72548495	-0,725484953	-0,043788086
5	34,66053705	33,33946295	2,01226955	45	71,98482622	-6,984826216	-0,421583069
6	40,2566101	3,743389899	0,225939738	46	57,26424375	7,73575625	0,466906944
7	33,99839038	-13,9983904	-0,844900674	47	67,99950583	-2,999505825	-0,181041136
8	18,24759632	1,752403684	0,105769807	48	93,38351201	-38,38351201	-2,316713157
9	64,50980704	-44,509807	-2,686477869	49	87,47477012	-32,47477012	-1,960079296
10	74,09334543	-25,0933454	-1,514558738	50	87,5064502	-32,5064502	-1,96199141
11	91,67768326	27,32231674	1,649092731	51	60,10698792	-5,106987925	-0,308242407
12	124,8627102	-5,86271018	-0,353855525	52	51,0497604	3,950239596	0,238424562
13	126,5326087	-7,53260871	-0,45464557	53	52,79513	2,204870001	0,133079311
14	156,7745211	3,225478943	0,194680192	54	51,96782685	3,032173148	0,183012837
15	158,4365004	1,563499595	0,094368126	55	65,11916957	6,880830426	0,415306196
16	160,5489135	-0,54891346	-0,033130763	56	66,27505586	5,724944142	0,345540382
17	155,9951114	4,004888624	0,241723013	57	82,60180564	-7,601805635	-0,458822088
18	158,5093186	8,990681385	0,542650444	58	75,66587331	-0,665873311	-0,040190107
19	93,61928862	-26,1192886	-1,576481578	59	91,70711514	-16,70711514	-1,008391141
20	83,89093061	-16,3909306	-0,989307195	60	122,6243014	24,37569859	1,471243736
21	72,25191673	-15,7519167	-0,950738242	61	141,5834507	5,41654932	0,3269266
22	48,89054686	1,109453143	0,06696325	62	134,3143196	12,68568044	0,765669456
23	51,78919437	-1,78919437	-0,107990382	63	131,1125455	15,88745449	0,958918893
24	69,36325072	-24,3632507	-1,47049242	64	135,3680152	11,63198485	0,702071564
25	52,54768174	-2,54768174	-0,153770395	65	126,5292935	20,47070654	1,235550179
26	97,69102261	-11,1910226	-0,675456412	66	138,2098001	1,790199936	0,108051075
27	85,64698071	0,85301929	0,051485675	67	148,6979111	-8,697911124	-0,524979713
28	98,53112698	0,468873023	0,028299763	68	143,8714853	-3,871485254	-0,233671187
29	109,3077298	-10,3077298	-0,622143519	69	139,8288874	0,171112571	0,010327839
30	107,4527061	-8,45270612	-0,510179878	70	141,4581926	-1,458192567	-0,088012111
31	77,4154227	12,5845773	0,759567176	71	147,8145726	-7,814572598	-0,471664061
32	38,23321543	15,76678457	0,95163562	72	137,9511801	2,048819937	0,123660599
33	40,01746839	13,98253161	0,843943487	73	136,3363066	3,663693419	0,221129498
34	43,41306977	-20,4130698	-1,232071398	74	135,3318584	4,668141643	0,281754967
35	20,3926236	12,6073764	0,76094326	75	133,6113233	14,38867666	0,868457178
36	55,01386714	-25,0138671	-1,509761668	76	126,4818585	21,51814154	1,298770201
37	36,71048924	-6,71048924	-0,405024915	77	133,3383734	14,6616266	0,884931614
38	35,86689961	-5,86689961	-0,354108386	78	132,2719277	15,72807232	0,949299065
39	54,26448017	-10,2644802	-0,619533102	79	127,1919799	20,8080201	1,25590941
40	53,92034221	-13,9203422	-0,840189921	80	133,0312858	14,96871422	0,903466498
Observación	Pronóstico DQO [mg/L] EFLUENTE	Residuos	Residuos estándares	Observación	Pronóstico DQO [mg/L] EFLUENTE	Residuos	Residuos estándares
81	137,1807115	10,81928852	0,653019662	122	89,02659392	6,075970183	0,366727257
82	134,3104821	13,68951792	0,826258062	123	92,53242418	2,57013992	0,155125903

83	131,4519461	16,54805388	0,998790682	124	80,82768064	14,27488346	0,861588963
84	132,2342848	-30,23428477	-1,82485035	125	96,20415824	-1,101594136	-0,066488904
85	49,30247743	2,697522571	0,162814336	126	110,8920866	-15,7895225	-0,953008013
86	52,40130338	-0,401303378	-0,024221463	127	115,8194982	-20,71693412	-1,250411735
87	53,41010191	-1,410101906	-0,085109503	128	64,03422677	-4,034226773	-0,243493775
88	52,87936437	-0,879364375	-0,053075785	129	67,33951352	-7,339513517	-0,442990926
89	53,69401694	-1,694016944	-0,10224576	130	50,65492969	9,345070305	0,564040292
90	58,74019073	-6,740190729	-0,406817608	131	69,68019874	-9,680198735	-0,584267635
91	66,76243382	-14,76243382	-0,891016034	132	67,20782292	-7,207822916	-0,435042478
92	114,3285542	-7,328554195	-0,442329454	133	62,99135045	-2,991350445	-0,180548902
93	103,0085227	3,991477258	0,240913543	134	47,42231051	12,57768949	0,759151448
94	102,1384228	4,861577215	0,293430155	135	53,64765788	40,48482075	2,443541822
95	101,4867994	5,513200616	0,332760181	136	75,94778006	18,18469858	1,097573626
96	98,81549677	8,184503226	0,493991959	137	71,36169557	22,77078306	1,37437587
97	101,6297428	5,37025723	0,324132549	138	75,91806633	18,2144123	1,099367056
98	113,6947686	-6,694768647	-0,404076068	139	64,32664074	29,80583789	1,798990587
99	48,98929222	-12,98929222	-0,783994549	140	55,58607174	-2,586071742	-0,1560875
100	57,28145142	-21,28145142	-1,284484299	141	60,24926872	-7,249268715	-0,437544022
101	54,90779484	-18,90779484	-1,141217538	142	58,8457053	4,154294703	0,250740714
102	52,92799964	-16,92799964	-1,021723064	143	72,63863709	-9,638637086	-0,581759099
103	53,79881999	-17,79881999	-1,074283157	144	75,65785331	-12,65785331	-0,763989895
104	75,51701298	42,48298702	2,564145119	145	78,32993471	-15,32993471	-0,925268678
105	78,83964474	39,16035526	2,363601075	146	68,26347533	-5,263475328	-0,317687515
106	66,56063669	-21,56063669	-1,30133508	147	76,74747304	-18,74747304	-1,131540997
107	67,70927142	-22,70927142	-1,370663213	148	79,66858551	-21,66858551	-1,307850546
108	56,8161809	-11,8161809	-0,713189083	149	67,12012779	-9,120127788	-0,550463439
109	54,41228724	-9,41228724	-0,568097304	150	66,43384889	-8,43384889	-0,509041712
110	57,02675362	-12,02675362	-0,725898619	151	58,60129492	-0,601294921	-0,03629235
111	51,44316351	-6,443163515	-0,38888994	152	54,91266204	3,087337963	0,186342419
112	52,50170171	-7,501701709	-0,452780117	153	55,30899006	2,691009937	0,162421253
113	76,07479176	19,02777234	1,148459018	154	78,04403025	-38,04403025	-2,29622306
114	81,15490291	8,845097092	0,533863415	155	65,42071172	-25,42071172	-1,534317581
115	71,72950301	18,27049699	1,102752159	156	59,46218188	-19,46218188	-1,17467867
116	89,80359641	0,196403591	0,011854329	157	65,74692038	-25,74692038	-1,554006553
117	88,74844129	1,251558708	0,075540313	158	40,93564001	-0,935640012	-0,056472413
118	90,10303801	-0,103038006	-0,006219064	159	63,73816632	-23,73816632	-1,432764209
119	91,00326612	-1,00326612	-0,060554121	160	63,76305568	-23,76305568	-1,434266456
120	80,93542775	14,16713635	0,855085672	161	44,54579365	21,45420635	1,294911266
121	95,2024128	-0,099848697	-0,006026567	162	80,76771896	-14,76771896	-0,891335029
Observación	Pronóstico DQO [mg/L] EFLUENTE	Residuos	Residuos estándares	Observación	Pronóstico DQO [mg/L] EFLUENTE	Residuos	Residuos estándares
163	85,62253094	-19,62253094	-1,184356856	186	90,1980153	-36,1980153	-2,184803159
164	88,35139803	-22,35139803	-1,349063052	187	52,91793854	12,08206146	0,729236833

165	86,37677538	-20,37677538	-1,229880778	188	51,55811836	13,44188164	0,811311483
166	83,65531251	-17,65531251	-1,065621477	189	46,90006852	18,09993148	1,092457339
167	57,40382721	8,596172788	0,518839094	190	59,17368576	5,826314244	0,351658776
168	57,68428772	1,315712284	0,07941243	191	46,23511317	18,76488683	1,132592041
169	48,19138375	10,80861625	0,652375516	192	49,36514203	15,63485797	0,943672928
170	41,18362117	17,81637883	1,075342955	193	54,87148851	10,12851149	0,611326442
171	52,28029141	6,719708595	0,405581368	194	58,54191403	16,45808597	0,99336049
172	61,5336015	-2,533601501	-0,152920554	195	64,59492815	10,40507185	0,628018792
173	38,29200617	17,70799383	1,068801163	196	122,2228364	27,77716363	1,67654592
174	35,40736476	20,59263524	1,242909429	197	130,8991591	19,10084088	1,152869215
175	33,28010049	22,71989951	1,371304692	198	105,7847311	44,21526886	2,668700432
176	50,45934547	2,54065453	0,153346254	199	106,2488937	43,75110635	2,640684981
177	66,29983992	-13,29983992	-0,802738273	200	61,60701034	7,392989663	0,446218585
178	64,64179944	-11,64179944	-0,702663944	201	64,10780427	4,89219573	0,295278197
179	62,86010658	-9,860106584	-0,59512633	202	63,71982051	5,280179486	0,318695728
180	60,9199293	-7,919929303	-0,478023074	203	56,0465474	12,9534526	0,781831377
181	66,07250192	-13,07250192	-0,789016836	204	50,19241615	18,80758385	1,135169104
182	67,27234203	-13,27234203	-0,801078583	205	46,22156285	22,77843715	1,374837848
183	79,87955798	-25,87955798	-1,562012159	206	46,78523293	22,21476707	1,340816419
184	81,20094806	-27,20094806	-1,641767283	207	59,51589273	8,484107267	0,512075157
185	96,98725409	-42,98725409	-2,59458116	208	61,58558179	6,414418209	0,38715496

**ANEXO XVIII. Procedimiento de ajuste de modelo SST GLOBAL.
Ajuste de modelo global SST**

Aplicando regresión con los SST en el efluente de la planta en función de las demás variables independientes se obtiene un modelo de regresión lineal múltiple con la siguiente forma:

$$SST(S_i) = \beta_0 + \beta_1 * S_1 + \beta_2 * S_2 + \beta_3 * S_3 + \beta_4 * S_4 + \beta_5 * S_5 + \beta_6 * S_6 + \beta_7 * S_7 + \beta_8 * S_8 + \beta_9 * S_9 + \beta_{10} * S_{10} + \beta_{11} * S_{11} + \beta_{12} * S_{12} + \beta_{13} * S_{13} + \varepsilon$$

Donde ε corresponde al error de predicción del modelo, β_i $i=0, \dots, 13$. corresponde a los coeficientes de regresión para cada variable predictora (excepto β_0 que es el coeficiente de intersección del modelo). Además S_i $i=1, \dots, 13$. corresponden al valor que toma cada variable predictora.

TABLA XVIII,1. Valores de coeficientes del modelo

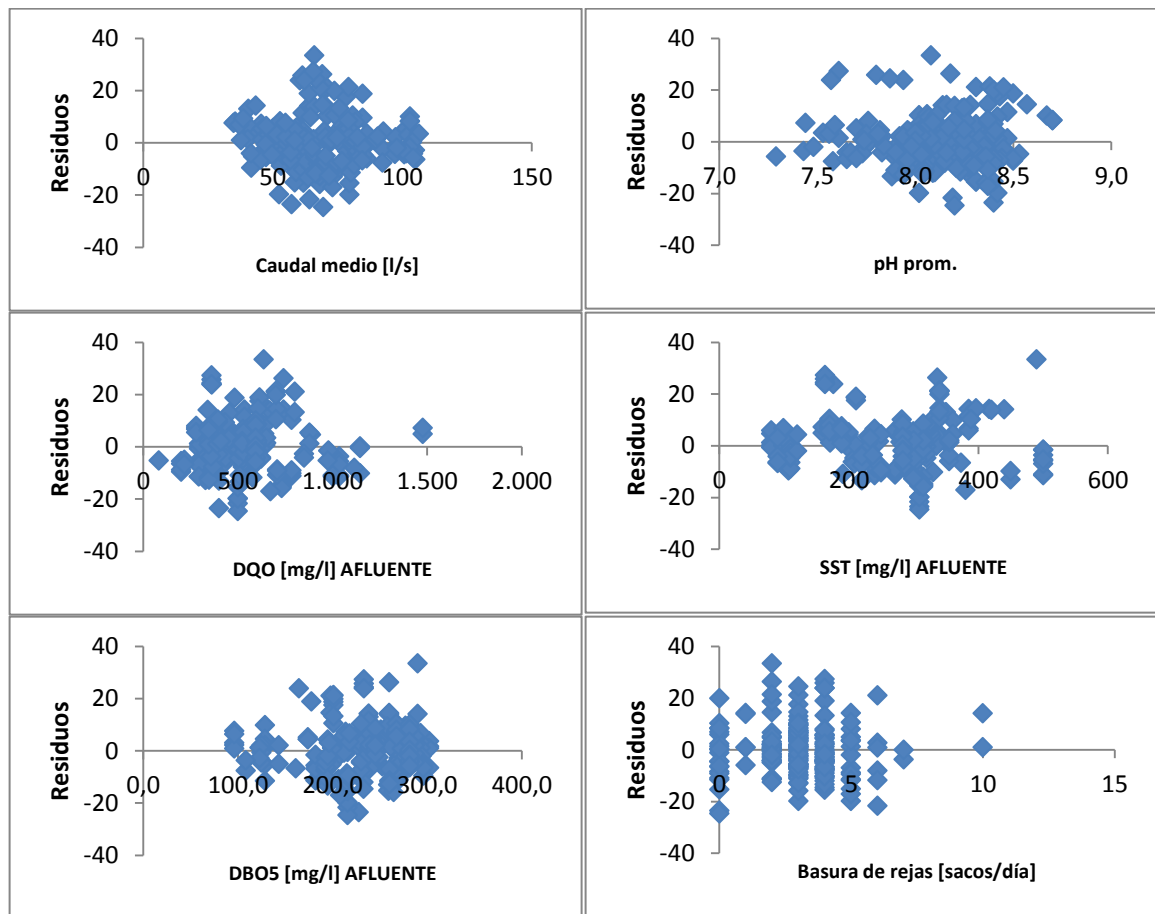
<i>SÍMBOLO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>SÍMBOLO</i>	<i>Coefficientes</i>
	Intercepto	β_0	51,1482
S_1	Caudal [L/s] AFLUENTE	β_1	0,0401
S_2	pH AFLUENTE	β_2	-5,7717
S_3	DQO [mg/L] AFLUENTE	β_3	-0,0088
S_4	SST [mg/L] AFLUENTE	β_4	0,0758
S_5	DBO5 [mg/L] AFLUENTE	β_5	-0,0190
S_6	Basura de rejás [sacos/día]	β_6	-0,4256
S_7	Arenas [sacos/día]	β_7	0,0269
S_8	Oxígeno Disuelto zona aeróbica [mg/L]	β_8	-1,4219
S_9	pH zona aeróbica	β_9	-5,6828
S_{10}	Temperatura zona aeróbica [°C]	β_{10}	1,9654
S_{11}	IVL zona aeróbica [ml/g]	β_{11}	0,0881
S_{12}	Volumen recirculado [m ³ /día]	β_{12}	0,0020
S_{13}	Volumen purgado [m ³ /día]	β_{13}	-0,0038

Así el modelo queda de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
SST(S_i) &= 51,1482 + 0,0401 * S_1 - 5,7717 * S_2 - 0,0088 * S_3 + 0,0758 * S_4 \\
&- 0,0190 * S_5 - 0,4256 * S_6 + 0,0269 * S_7 - 1,4219 * S_8 - 5,6828 * S_9 \\
&+ 1,9654 * S_{10} + 0,0881 * S_{11} + 0,0020 * S_{12} - 0,0038 * S_{13}
\end{aligned}$$

Análisis de los residuos del modelo ajustado

Al analizar los gráficos de los residuales se puede observar que los residuos muestran en general una distribución aleatoria. Sin embargo, esto no ocurre para los residuos de la variable temperatura promedio diaria en la zona aeróbica del tratamiento biológico. Al apreciar su gráfica, se puede observar una leve tendencia o comportamiento cuadrático. Esto indica que el modelo no es adecuado para los datos, por lo que es recomendable el ajuste de un nuevo modelo sugerido por lo observado en la gráfica residual. Es decir, agregar una variable con los datos del temperatura promedio diaria en la zona aeróbica del proceso biológico, elevado al cuadrado.



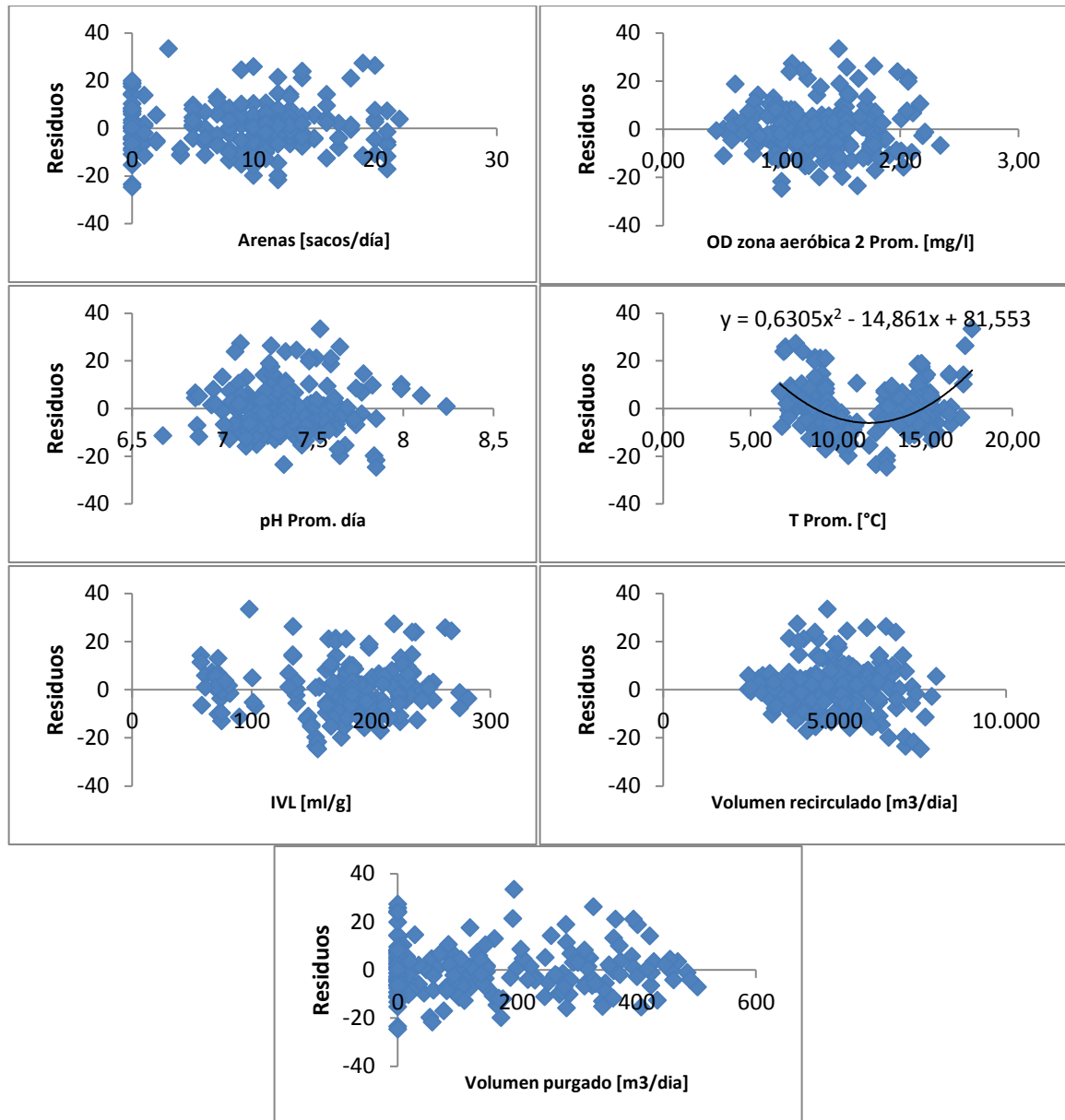


FIGURA XVIII,1. Análisis de los residuos del modelo global SST

Ajuste de modelo global SST (2)

Al ajustar un nuevo modelo con la adición de la variable Temperatura promedio en tratamiento biológico, al cuadrado, se obtienen los siguientes coeficientes:

TABLA XVIII,2. Valores de coeficientes del modelo (2)

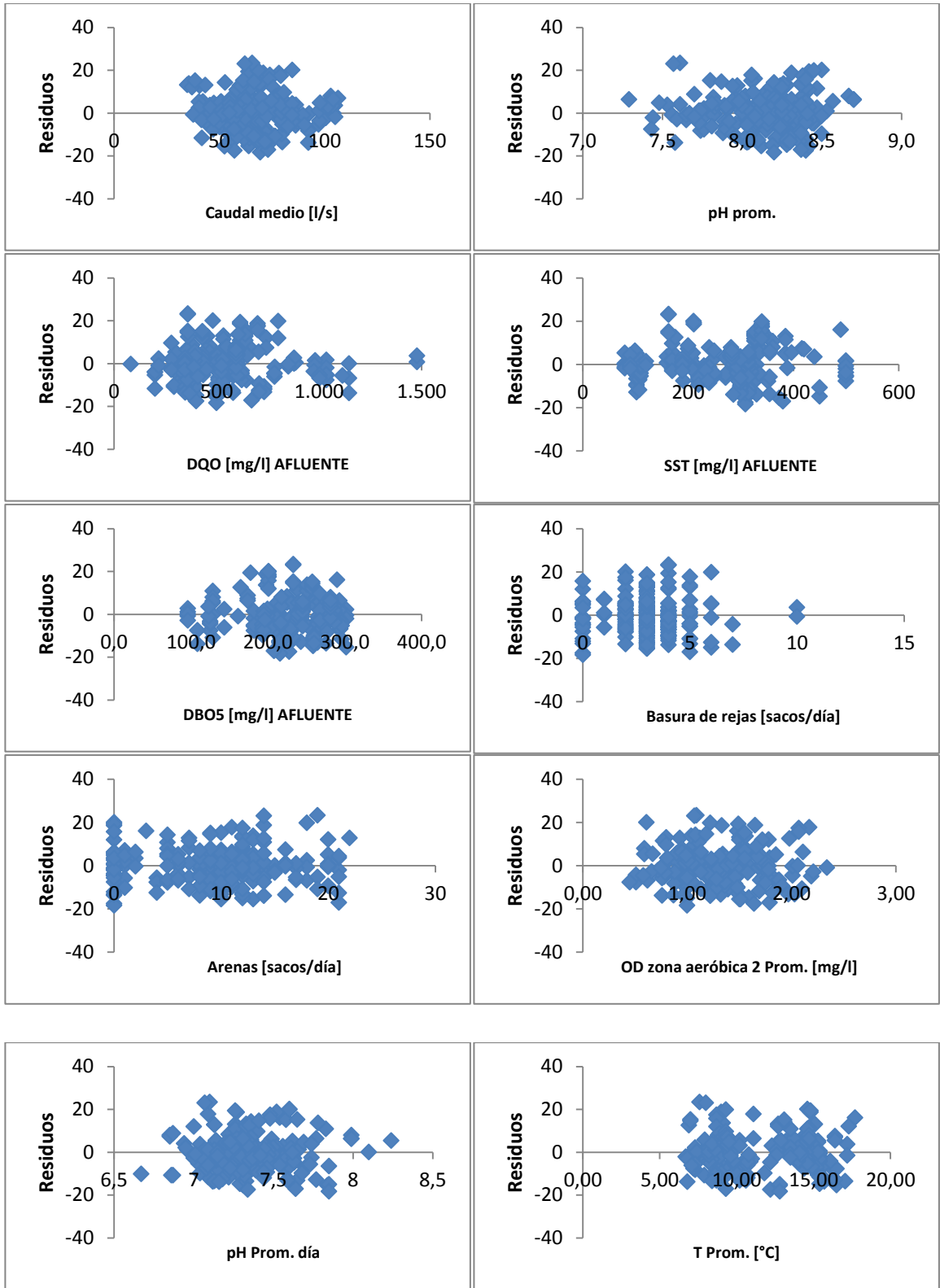
<i>SÍMBOLO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>SÍMBOLO</i>	<i>COEF.</i>
	Intercepto	β_0	95,9953
S_1	Caudal [L/s] AFLUENTE	β_1	0,0069
S_2	pH AFLUENTE	β_2	-0,6578
S_3	DQO [mg/L] AFLUENTE	β_3	-0,0058
S_4	SST [mg/L] AFLUENTE	β_4	0,0704
S_5	DBO5 [mg/L] AFLUENTE	β_5	-0,0107
S_6	Basura de rejas [sacos/día]	β_6	-0,4976
S_7	Arenas [sacos/día]	β_7	0,0161
S_8	Oxígeno Disuelto zona aeróbica [mg/L]	β_8	-0,3429
S_9	pH zona aeróbica	β_9	-3,0160
S_{10}	Temperatura zona aeróbica [°C]	β_{10}	-16,3446
$S_{10A}=(S_{10})^2$	[Temperatura zona aeróbica [°C]] ²	β_{10A}	0,7535
S_{11}	IVL zona aeróbica [ml/g]	β_{11}	0,0742
S_{12}	Volumen recirculado [m ³ /día]	β_{12}	0,0019
S_{13}	Volumen purgado [m ³ /día]	β_{13}	-0,0020

Se puede observar que este modelo ya no será lineal, debido a que una de sus variables es ajustada de forma cuadrática. El segundo modelo ajustado es el que sigue:

$$\begin{aligned}
 SST(S_i) = & 95,9953 + 0,0069 * S_1 - 0,6578 * S_2 - 0,0058 * S_3 + 0,0704 * S_4 \\
 & - 0,0107 * S_5 - 0,4976 * S_6 + 0,0161 * S_7 - 0,3429 * S_8 - 3,0160 * S_9 \\
 & - 16,3446 * S_{10} + 0,7535 * (S_{10A}^2) + 0,0742 * S_{11} + 0,0019 * S_{12} \\
 & - 0,0020 * S_{13}
 \end{aligned}$$

Análisis de los residuos del modelo ajustado (2)

Al visualizar las nuevas gráficas de los residuos para cada variable del nuevo modelo ajustado, no se observa tendencia alguna, por lo que el modelo es adecuado para los datos. Así se procede a realizar el análisis de las estadísticas de regresión.



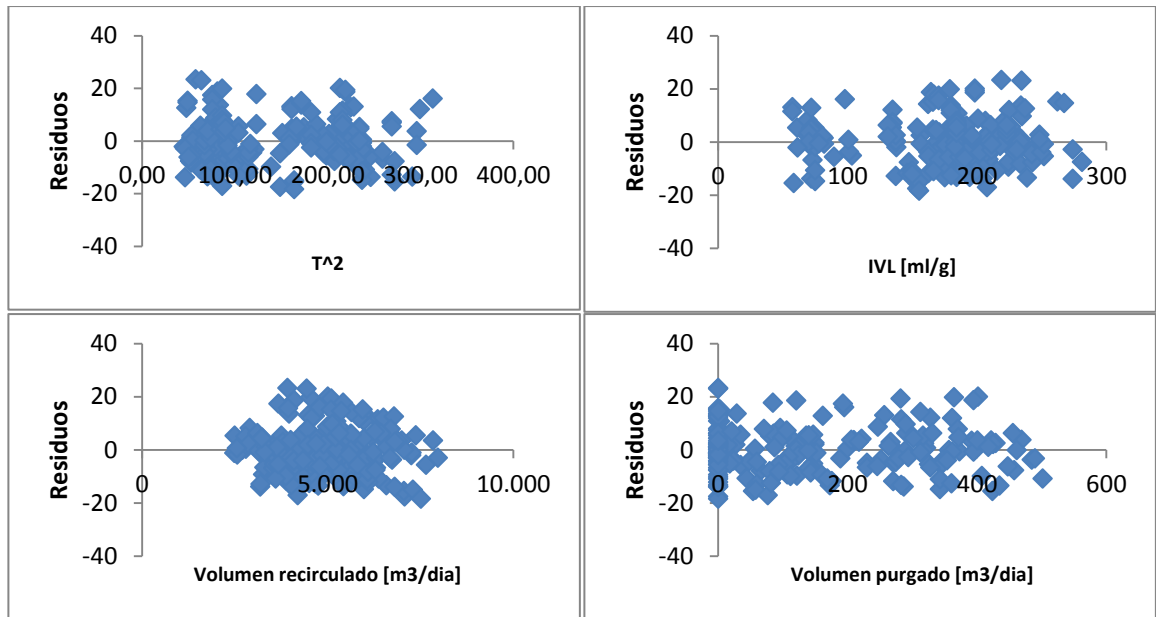


FIGURA XVIII,2. Análisis de los residuos del modelo global SST (2)

Análisis de la regresión (2)

En la Tabla XVIII,3 se puede ver que el coeficiente de correlación múltiple, 0,7934, indica que existe un alto grado de asociación entre la variable respuesta y la variables predictoras. Además el porcentaje de variabilidad explicada por las variables independientes es de 60,26% en el modelo.

TABLA XVIII,3.. Estadísticas de la regresión SST global (2)

Coeficiente de correlación múltiple	0,7934
Coeficiente de determinación R^2	0,6295
R^2 ajustado	0,6026
Error típico	8,9102
Observaciones	208

De los datos mostrados en la Tabla XVIII,3 y los residuos del ajuste de modelo SST (2) se puede observar que los errores se encuentran entre $[-18.3369; 23.2997]$, lo cual está contenido en $\pm 3 * \sqrt{CME} = \pm 3 * \text{Error típico} = 26,7305$. Esto quiere decir que no existen puntos atípicos, por lo cual todos los datos son válidos para el modelo.

Significancia del modelo (2)

En el análisis de la significancia del modelo se contrastaron las siguientes hipótesis:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = \beta_6 = \beta_7 = \beta_8 = \beta_9 = \beta_{10} = \beta_{10A} = \beta_{11} = \beta_{12} = \beta_{13} = 0$$

$$H_1: \text{Algún } \beta_i \neq 0, i=1,2,\dots,10,10A,11,12,13.$$

El estadístico de prueba para esta hipótesis es la prueba F. Los resultados se resumen en la Tabla XVIII,4.

TABLA XVIII,4. ANOVA (2)

<i>ANÁLISIS DE VARIANZA</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	14	26035,9484	1859,7106	23,424683	2,1781E-34
Residuos	193	15322,4762	79,3910681		
Total	207	41358,4246			

De la Tabla XVIII,4 se obtiene el valor crítico de F, que corresponde al p-value=2,1781E-34 lo cual es altamente menor a un nivel de significancia $\alpha=0,05$. Esto es evidencia suficiente para rechazar nuestra hipótesis nula H_0 en favor de H_1 .

Significancia individual de los coeficientes del modelo.

Se debió investigar cuáles de los coeficientes asociados a cada variable del modelo son significativos, y para ello se realizaron contrastes de las hipótesis individuales.

$$H_0: \beta_1=0, \quad \dots, \quad H_0: \beta_{10}=0, \quad H_0: \beta_{10A}=0, \quad H_0: \beta_{11}=0, \quad H_0: \beta_{12}=0, \quad H_0: \beta_{13}=0$$

$$H_1: \beta_1 \neq 0, \quad \dots, \quad H_1: \beta_{10} \neq 0, \quad H_1: \beta_{10A} \neq 0, \quad H_1: \beta_{11} \neq 0, \quad H_1: \beta_{12} \neq 0, \quad H_1: \beta_{13} \neq 0$$

El estadístico de prueba para estas hipótesis es la prueba t, cuyos p-value se pueden obtener de la Tabla XVIII,5.

TABLA XVIII,5. Estadísticos de prueba independientes (2)

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	COEF.	Error típico	Estadístico t	P-VALUE	Inferior 95%	Superior 95%
	Intercepto	β_0	95,9953	25,6591	3,7412	0,0002	45,3871	146,6035
S ₁	Caudal [L/s] AFLUENTE	β_1	0,0069	0,0471	0,1467	0,8835	-0,0860	0,0998
S ₂	pH AFLUENTE	β_2	-0,6578	3,2928	-0,1998	0,8419	-7,1522	5,8366
S ₃	DQO [mg/L] AFLUENTE	β_3	-0,0058	0,0031	-1,8362	0,0679	-0,0120	0,0004
S ₄	SST [mg/L] AFLUENTE	β_4	0,0704	0,0080	8,8202	6,77E-16	0,0547	0,0862
S ₅	DBO5 [mg/L] AFLUENTE	β_5	-0,0107	0,0145	-0,7429	0,4584	-0,0393	0,0178
S ₆	Basura de rejás [sacos/día]	β_6	-0,4976	0,4608	-1,0798	0,2816	-1,4064	0,4113
S ₇	Arenas [sacos/día]	β_7	0,0161	0,1314	0,1224	0,9027	-0,2431	0,2753
S ₈	OD zona aeróbica [mg/L]	β_8	-0,3429	1,6806	-0,2041	0,8385	-3,6577	2,9718
S ₉	pH zona aeróbica	β_9	-3,0160	3,0912	-0,9757	0,3304	-9,1128	3,0808
S ₁₀	T. zona aeróbica [°C]	β_{10}	-16,3446	2,3670	-6,9051	7,06E-11	-21,0132	-11,6761
S _{10A} =(S ₁₀) ²	[T. zona aeróbica [°C]] ²	β_{10A}	0,7535	0,0965	7,8114	3,54E-13	0,5633	0,9438
S ₁₁	IVL zona aeróbica [ml/g]	β_{11}	0,0742	0,0188	3,9391	0,0001	0,0371	0,1114
S ₁₂	Volumen recirculado [m ³ /día]	β_{12}	0,0019	0,0007	2,8456	0,0049	0,0006	0,0031
S ₁₃	Volumen purgado [m ³ /día]	β_{13}	-0,0020	0,0043	-0,4536	0,6506	-0,0105	0,0066

De la Tabla XVIII,5 se puede observar que los p-value de las hipótesis individuales de los coeficientes β_1 , β_2 , β_3 , β_5 , β_6 , β_7 , β_8 , β_9 y β_{13} con valores de 0.8835, 0.8419, 0.0679, 0.4584, 0.2816, 0.9027, 0.8385, 0.3304 y 0.6506 respectivamente superan el nivel de significancia de 5%, por lo que no existe evidencia suficiente para rechazar las hipótesis nulas respectivas. Esto es indicativo de que las variables asociadas a las respectivas pendientes no contribuyen a la explicación de la variabilidad de la variable respuesta SST, y por lo tanto se recomienda quitarlas del modelo.

La tercera y última iteración o ajuste de modelo, además, de las pruebas para cumplir los supuestos de existencia del modelo, se encuentra en el cuerpo de esta lectura.

ANEXO XIX. Valores residuales modelo SST GLOBAL.

<i>Observación</i>	<i>Pronóstico SST [mg/l] EFLUENTE</i>	<i>Residuos</i>	<i>Residuos estándares</i>	<i>Observación</i>	<i>Pronóstico SST [mg/l] EFLUENTE</i>	<i>Residuos</i>	<i>Residuos estándares</i>
1	28,0650261	0,9349739	0,10654731	41	44,36505767	-8,36505767	-0,953261285
2	35,3993902	-5,39939	-0,6153012	42	40,24244135	-4,24244135	-0,483458125
3	38,3982168	-2,398217	-0,2732949	43	52,14433762	-16,14433762	-1,83976879
4	37,3946057	-8,061272	-0,9186427	44	38,87423928	-6,874239283	-0,783371309
5	34,1750311	-6,175031	-0,7036913	45	31,22166065	0,778339346	0,088697627
6	29,844019	1,4893144	0,16971858	46	34,28848551	-2,288485515	-0,26079015
7	33,0769717	-1,076972	-0,122729	47	33,55191618	-1,551916176	-0,176852529
8	36,3314937	-4,331494	-0,4936063	48	21,76487737	20,23512263	2,305944533
9	24,0434396	-2,04344	-0,2328653	49	23,23197338	18,76802662	2,1387579
10	31,2288591	-9,228859	-1,051698	50	23,19447681	18,80552319	2,143030917
11	23,7805103	-15,78051	-1,7983079	51	31,39442342	10,60557658	1,20858528
12	12,8529269	-4,852927	-0,5530275	52	32,22822898	9,771771023	1,11356686
13	7,85321092	0,1467891	0,01672772	53	31,76651395	10,23348605	1,166182763
14	3,751304	0,248696	0,02834078	54	32,92681353	9,073186466	1,033957892
15	1,51446976	2,4855302	0,28324488	55	34,5798987	-6,579898699	-0,749828984
16	1,07437842	2,9256216	0,3333966	56	25,64292247	2,35707753	0,268606726
17	2,22699062	1,7730094	0,20204776	57	20,99513365	3,004866348	0,342427138
18	-2,76685122	6,7668512	0,77113363	58	27,9072661	-3,907266099	-0,445262382
19	15,3565017	10,643498	1,21290674	59	28,56038129	-4,560381286	-0,519689774
20	18,6347548	7,3652452	0,83932513	60	6,131627995	-1,131627995	-0,128957528
21	23,1141045	14,885895	1,69635984	61	1,864273119	3,135726881	0,357339681
22	31,1269861	6,8730139	0,78323167	62	13,85557805	-8,855578049	-1,009159775
23	30,5230939	7,4769061	0,85204973	63	14,52262232	-9,522622324	-1,085174491
24	24,6555304	13,34447	1,52070275	64	10,26070241	-5,260702406	-0,599496636
25	25,8136116	12,186388	1,38873069	65	9,830169043	-4,830169043	-0,550434119
26	16,833419	4,166581	0,47481327	66	13,07585508	-8,07585508	-0,920304473
27	19,0901581	1,9098419	0,21764087	67	19,17744228	-14,17744228	-1,615626261
28	12,7296902	3,2703098	0,37267642	68	5,29428037	-0,29428037	-0,033535463
29	17,0879734	-1,087973	-0,1239828	69	4,343971184	0,656028816	0,074759422
30	16,2081465	-0,208146	-0,0237199	70	4,004528535	0,995471465	0,113441466
31	34,195328	-14,86199	-1,6936362	71	0,620486734	4,379513266	0,499078501
32	35,4505943	-13,45059	-1,5327965	72	3,780270256	1,219729744	0,138997385
33	34,4736517	-8,473652	-0,9656364	73	13,77482597	-8,774825965	-0,999957467
34	58,3098107	15,023523	1,71204348	74	9,01757772	-4,01757772	-0,457833221
35	59,7428088	0,2571912	0,02930888	75	12,91287883	-7,91287883	-0,901732103
36	49,9450404	10,80496	1,23130647	76	14,93882457	-9,938824567	-1,132603869
37	46,4671455	7,8661878	0,89641131	77	8,43521571	-3,43521571	-0,391468687
38	46,7112626	7,6220707	0,86859233	78	9,304127673	-4,304127673	-0,490487746
39	42,4300965	5,2365702	0,59674659	79	7,743514904	-2,743514904	-0,312644174
40	53,2041049	-1,704105	-0,1941956	80	4,405911171	0,594088829	0,067700894
<i>Observación</i>	<i>Pronóstico</i>	<i>Residuos</i>	<i>Residuos estándares</i>	<i>Observación</i>	<i>Pronóstico SST</i>	<i>Residuos</i>	<i>Residuos estándares</i>

SST [mg/l] EFLUENTE			estándares	[mg/l] EFLUENTE			estándares
81	3,87215383	1,12784617	0,12852656	122	12,9891383	-6,989138296	-0,796464916
82	4,470125472	0,529874528	0,060383191	123	13,78783281	-7,787832807	-0,887482167
83	8,340691108	-3,340691108	-0,380696897	124	15,6140323	-9,614032295	-1,095591345
84	7,118287656	-2,118287656	-0,241394823	125	11,89334864	-5,893348642	-0,671591437
85	22,01500967	13,98499033	1,593694913	126	5,601756681	0,398243319	0,045382824
86	24,64718879	11,35281121	1,29373829	127	8,571346102	-2,571346102	-0,293024243
87	23,16074077	12,83925923	1,46313023	128	23,76733267	12,23266733	1,394004518
88	21,85288632	14,14711368	1,612170089	129	18,90164586	17,09835414	1,948486154
89	21,683165	14,316835	1,631511112	130	18,42628073	17,57371927	2,002657588
90	21,11693355	14,88306645	1,696037447	131	19,58429783	16,41570217	1,870692823
91	20,32984463	15,67015537	1,785732153	132	20,09938232	15,90061768	1,811995069
92	7,294052762	4,705947238	0,536278109	133	19,99335313	16,00664687	1,824077892
93	8,683114264	3,316885736	0,377984096	134	25,60392441	10,39607559	1,184711065
94	8,756550634	3,243449366	0,369615469	135	24,29530729	-19,29530729	-2,198845501
95	9,889230938	2,110769062	0,240538022	136	15,36962876	-10,36962876	-1,18169725
96	10,445759	1,554240999	0,177117461	137	19,59056483	-14,59056483	-1,662704686
97	13,89552229	-1,895522287	-0,216009032	138	18,64130952	-13,64130952	-1,554529898
98	9,159375565	2,840624435	0,323710536	139	19,22546416	-14,22546416	-1,621098716
99	19,71998434	-14,71998434	-1,677453012	140	27,72923639	-2,07209353	-0,236130654
100	21,13659839	-16,13659839	-1,838886847	141	21,08099469	4,576148168	0,521486528
101	21,75197534	-16,75197534	-1,909013682	142	23,4491171	2,550882903	0,290692307
102	22,16443763	-17,16443763	-1,956016865	143	16,79198215	9,208017854	1,049322943
103	19,38765947	-14,38765947	-1,639582093	144	16,13749004	9,862509956	1,123907245
104	15,76350226	-10,76350226	-1,226582099	145	14,3278447	11,6721553	1,330129952
105	12,21452121	-7,214521206	-0,822148995	146	18,74808793	7,251912073	0,826409966
106	13,99666964	-8,996669644	-1,025238224	147	14,92340998	-3,923409984	-0,447102099
107	14,50981319	-9,509813187	-1,083714793	148	13,65802697	-2,658026967	-0,30290218
108	18,19148077	-13,19148077	-1,503268526	149	18,8727483	-7,872748298	-0,897158927
109	17,3614557	-12,3614557	-1,408680922	150	22,44855118	-9,448551182	-1,076733526
110	16,81676866	-11,81676866	-1,346609734	151	19,6846024	-6,6846024	-0,761760758
111	18,11825332	-13,11825332	-1,494923707	152	22,77723911	-9,777239113	-1,11418999
112	19,47832325	-14,47832325	-1,649913912	153	25,48707468	-12,48707468	-1,42299615
113	14,88601203	-8,386012034	-0,955649193	154	18,831744	1,176680909	0,134091646
114	14,41564491	-6,415644908	-0,731111028	155	24,82475236	-4,816327454	-0,548856766
115	14,92847832	-6,928478322	-0,789552255	156	22,78896643	-2,780541523	-0,316863636
116	10,93806974	-2,938069739	-0,334815162	157	22,4284014	2,588448412	0,29497318
117	11,23209137	-3,232091367	-0,368321139	158	29,07740587	-4,060556054	-0,462730926
118	10,94988033	-2,949880328	-0,336161067	159	23,37658808	1,640261736	0,186920171
119	9,025364068	-1,025364068	-0,116847953	160	24,26835526	0,748494555	0,085296588
120	16,6862254	-8,686225396	-0,989860765	161	33,38298583	-9,382985827	-1,069261861
121	12,33219918	-6,332199177	-0,721601759	162	23,23676659	0,763233406	0,086976191

Observación	Pronóstico SST [mg/l] EFLUENTE	Residuos	Residuos estándares	Observación	Pronóstico SST [mg/l] EFLUENTE	Residuos	Residuos estándares
163	18,94183143	5,058168574	0,576416382	186	17,10103272	23,89896728	2,723467209
164	13,98902367	10,01097633	1,140826105	187	26,89021518	-1,342080929	-0,152940224
165	26,13741756	-2,137417556	-0,243574819	188	26,12442201	-0,576287763	-0,065672328
166	20,95939967	3,040600334	0,346499295	189	24,38441904	1,163715209	0,132614107
167	27,15260885	-3,15260885	-0,359263508	190	24,09998963	1,448144617	0,165026979
168	27,91698839	-2,924939788	-0,333318905	191	30,18217394	-4,634039694	-0,528083704
169	32,9278152	-7,9357666	-0,904340337	192	20,42927469	5,118859562	0,583332577
170	28,62905132	-3,637002718	-0,414463835	193	19,94761706	5,600517195	0,638221089
171	27,23920485	-2,247156246	-0,256080369	194	28,79020703	-4,790207029	-0,545880147
172	29,5890873	-4,597038701	-0,523867162	195	17,39036659	6,609633405	0,753217477
173	31,76298565	-0,762985653	-0,086947958	196	2,390383399	1,609616601	0,183427927
174	26,48007127	4,519928727	0,5150799	197	-0,086117226	4,086117226	0,465643814
175	40,24266224	-12,24266224	-1,395143512	198	4,752498098	-0,752498098	-0,085752822
176	33,88535418	-5,885354177	-0,670680408	199	4,655796414	-0,655796414	-0,074732938
177	26,99650267	1,003497329	0,114356074	200	20,72343533	4,34352666	0,494977557
178	22,80234303	5,197656974	0,592312135	201	20,20243033	4,864531655	0,554349997
179	23,72630532	4,273694683	0,487019677	202	20,31140845	4,755553541	0,541931121
180	27,21310535	0,786894645	0,089672568	203	19,71920076	5,347761228	0,609417644
181	30,05532668	-2,055326676	-0,234219945	204	20,93882609	4,128135897	0,470432158
182	29,19542002	11,80457998	1,345220741	205	20,33341563	4,733546363	0,539423237
183	27,94603213	13,05396787	1,487597896	206	22,26128883	2,805673162	0,319727575
184	27,19938474	13,80061526	1,572683986	207	20,41193522	4,655026772	0,530475339
185	16,94975412	24,05024588	2,740706544	208	18,78367561	6,283286383	0,716027778