

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA**

### **DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO PARA LOS EFLUENTES LÍQUIDOS PROVENIENTES DE LA LAVANDERÍA Y COCINA DEL HOTEL AKROS HODESA C.A.**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
QUÍMICO**

**JAIRO MAURICIO CULTID CABRERA**

**[jairo.cultid@epn.edu.ec](mailto:jairo.cultid@epn.edu.ec)**

**DIRECTORA: ING. LUCÍA MARGARITA MONTENEGRO AGUAS MSc.**

**[lucia.montenegro@epn.edu.ec](mailto:lucia.montenegro@epn.edu.ec)**

**Quito, Septiembre 2019**

© Escuela Politécnica Nacional (2019)  
Reservados todos los derechos de reproducción

## **DECLARACIÓN**

Yo, Jairo Mauricio Cultid Cabrera, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

Jairo Mauricio Cultid Cabrera

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el Sr. Jairo Mauricio Cultid Cabrera, bajo mi supervisión.

---

Ing. Lucía Margarita Montenegro A. MSc.

**DIRECTORA DEL PROYECTO**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
<b>1. JUSTIFICACIÓN</b>	1
<b>2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO</b>	8
2.1 Muestreo y caracterización de los efluentes	8
2.1.1 Muestreo de los efluentes	8
2.1.2 Determinación de los parámetros físico-químicos de los efluentes	9
2.2 Pruebas preliminares para determinar la tratabilidad del efluente	10
2.2.1 Pruebas preliminares por coagulación-floculación	10
2.2.2 Pruebas preliminares de ozonización a efluentes no clarificados	16
2.3 Desarrollo experimental para definir el sistema de tratamiento	17
2.3.1 Ensayos de coagulación con aumento de alcalinidad del efluente	18
2.3.2 Ensayos de coagulación con descomposición de materia orgánica en medio ácido	22
2.3.3 Ensayos realizados para determinar el tipo de floculante	26
2.3.4 Ensayos realizados para determinar los gradientes de velocidad	31
2.3.5 Ensayos realizados para determinar la dosis de floculante y los tiempos de sedimentación y floculación	34
2.3.6 Ensayos realizados para determinar el tiempo de ozonización	36
2.3.7 Determinación del orden de la reacción en la degradación de tensoactivos por ozonización	38
2.4 Resultados definitivos del tratamiento aplicando las condiciones óptimas obtenidas	43
2.5 Localización	45
2.6 Homogenización del efluente	47
2.7 Coagulación y floculación del efluente	47
2.7.1 Coagulación	47
2.7.2 Floculación	48
2.8 Sedimentación	49
2.9 Ozonización	50

	<b>PÁGINA</b>
2.9.1 Mecanismo de reacción del ozono	50
2.9.2 Producción de ozono	51
2.9.3 Descomposición del ozono residual	51
<b>3. CRITERIOS DE DISEÑO</b>	<b>52</b>
3.1 Tanques y equipos principales	52
3.1.1 Tanque de homogenización	55
3.1.2 Tanque coagulador-floculador	57
3.1.3 Sedimentador secundario	61
3.1.4 Reactor de ozonización	79
3.2 Tanques, equipos secundarios y accesorios	70
3.2.1 Tanques de almacenamiento de sustancias químicas	70
3.2.2 Bombas	72
3.2.3 Materiales de construcción de los tanques y reactores	75
<b>4. DISEÑO DE LA PLANTA</b>	<b>77</b>
4.1 Diagramas de bloques BPD y diagrama de flujo PFD	77
4.1.1 Diagrama de bloques BPD	77
4.1.2 Diagrama de flujo PFD	77
4.2 Balance de masa	83
4.3 Planificación del funcionamiento de la planta	89
4.4 Balance de energía	86
4.5 Disposición en planta (Layout) y planos de elevación (vistas)	87
4.5.1 Disposición en planta (Layout)	87
4.5.2 Planos de elevación (vistas)	87
4.6 Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID) y control	96
4.7 Dimensionamiento y especificaciones de los equipos propuestos	101
4.7.1 Dimensionamiento de los equipos propuestos	101
4.7.2 Especificaciones de los equipos	105

	<b>PÁGINA</b>
<b>5. ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD ECONÓMICA</b>	117
5.1 Costos directos	117
5.2 Costo de operación	118
5.3 Costo por multas	120
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	122
<b>ANEXOS</b>	135

## ÍNDICE DE TABLAS

		<b>PÁGINA</b>
<b>Tabla 1.1</b>	Valores promedio de los parámetros físico-químicos de los efluentes	3
<b>Tabla 2.1</b>	Guía para la frecuencia de muestreo en flujo continuo	8
<b>Tabla 2.2</b>	Métodos de análisis para descargas de aguas residuales	10
<b>Tabla 2.3</b>	Reactivos utilizados en las pruebas de tratamiento de los efluentes	11
<b>Tabla 2.4</b>	Características de los equipos utilizados en la fase experimental	12
<b>Tabla 2.5</b>	Soluciones utilizadas en la fase experimental	12
<b>Tabla 2.6</b>	Resultados de los ensayos preliminares con diferentes dosis de coagulante	13
<b>Tabla 2.7</b>	Resultados de los ensayos preliminares utilizando coagulante, alcalinizante, floculante L-1550A no iónico, L-1633 aniónico y arcilla	14
<b>Tabla 2.8</b>	Resultados de los ensayos preliminares utilizando coagulante, alcalinizante y floculante L-1640 catiónico	15
<b>Tabla 2.9</b>	Diseño experimental de la influencia de la alcalinidad y la dosis del coagulante sobre la turbidez	19
<b>Tabla 2.10</b>	Influencia de la cantidad de alcalinizante y la dosis del coagulante sobre la turbidez del efluente	19
<b>Tabla 2.11</b>	Influencia de la cantidad de alcalinizante y la dosis del coagulante sobre el pH del efluente	21
<b>Tabla 2.12</b>	Valores de las variables de entrada y salida para la optimización del tratamiento por coagulación y floculación	22
<b>Tabla 2.13</b>	Diseño experimental de la influencia de la variación de pH y la dosis de coagulante sobre la turbidez	23
<b>Tabla 2.14</b>	Influencia de la variación de pH y la dosis del coagulante sobre la reducción de la turbidez	24
<b>Tabla 2.15</b>	Influencia de la descomposición de materia orgánica en medio ácido sobre la coagulación del efluente	25



		<b>PÁGINA</b>
<b>Tabla 2.16</b>	Valores óptimos de las variables de entrada y salida en la coagulación del efluente con variación de pH	26
<b>Tabla 2.17</b>	Diseño experimental de la influencia del tipo de coagulante sobre los porcentajes de reducción de turbidez, DQO y tensoactivos	27
<b>Tabla 2.18</b>	Influencia del tipo de coagulante sobre la reducción de la turbidez del efluente	27
<b>Tabla 2.19</b>	Influencia del tipo de coagulante sobre la reducción de la DQO	28
<b>Tabla 2.20</b>	Influencia del tipo de coagulante sobre la reducción de los tensoactivos	29
<b>Tabla 2.21</b>	Diseño experimental de la influencia de las condiciones de agitación sobre la reducción de la turbidez del efluente	32
<b>Tabla 2.22</b>	Influencia de las condiciones de agitación sobre el porcentaje de reducción de la turbidez	32
<b>Tabla 2.23</b>	Optimización de variables de entrada para la maximización del porcentaje de reducción de turbidez	34
<b>Tabla 2.24</b>	Diseño experimental de la influencia de la dosis de floculante y los tiempos de floculación y sedimentación sobre la reducción de la turbidez	34
<b>Tabla 2.25</b>	Influencia de las condiciones de agitación sobre el porcentaje de reducción de la turbidez	35
<b>Tabla 2.26</b>	Optimización de variables de entrada para la maximización del porcentaje de reducción de turbidez	36
<b>Tabla 2.27</b>	Diseño experimental de la influencia del tiempo de ozonización sobre los porcentajes de reducción de los tensoactivos	37
<b>Tabla 2.28</b>	Influencia del tiempo de ozonización sobre el porcentaje de reducción de los tensoactivos	37
<b>Tabla 2.29</b>	Orden de la reacción de ozonización a muestras previamente clarificadas	40
<b>Tabla 2.30</b>	Cinética de ozonización de tensoactivos en una reacción de segundo orden	42

	<b>PÁGINA</b>
<b>Tabla 2.31</b>	Mejores resultados de los diferentes ensayos de laboratorio para el tratamiento de los efluentes del hotel AKROS 43
<b>Tabla 2.32</b>	Caracterización de los parámetros de tres muestras antes y después del tratamiento por coagulación-floculación y ozonización 44
<b>Tabla 2.33</b>	Cantidad de lodos formados por litro de muestra clarificada 44
<b>Tabla 3.1</b>	Dimensiones de las paletas y volumen utilizado en la prueba de jarras 52
<b>Tabla 3.2</b>	Propiedades físicas y volumen de la muestra utilizada en las pruebas de jarras 53
<b>Tabla 3.3</b>	Coefficiente de arrastre para distintos valores de $L_p/b_p$ en paletas planas con Número de Reynolds mayor a $10^3$ 54
<b>Tabla 3.4</b>	Condiciones de agitación de la prueba de jarras para una velocidad de 40 rpm 55
<b>Tabla 3.5</b>	Parámetros de diseño del tanque coagulador-floculador 57
<b>Tabla 3.6</b>	Características del fluido en la zona de entrada del sedimentador 64
<b>Tabla 4.1</b>	Resultados del balance de materia para la PTAR 83
<b>Tabla 4.2</b>	Diagrama de Gantt para el tratamiento de los efluentes del hotel AKROS 85
<b>Tabla 4.3</b>	Necesidades energéticas de la planta de tratamiento de efluentes líquidos 86
<b>Tabla 4.4</b>	Dimensiones y condiciones de agitación del tanque homogenizador para un volumen de operación de $3 \text{ m}^3$ 101
<b>Tabla 4.5</b>	Dimensiones y condiciones de agitación del coagulador-floculador para un volumen de operación de $3 \text{ m}^3$ 102
<b>Tabla 4.6</b>	Dimensiones del sedimentador secundario y su tabique difusor 103
<b>Tabla 4.7</b>	Dimensiones del tanque de ozonización 103
<b>Tabla 4.8</b>	Dimensiones de los tanques de almacenamiento de sustancias químicas en solución 104

		<b>PÁGINA</b>
<b>Tabla 4.9</b>	Dimensiones y condiciones de agitación del tanque de hidróxido de calcio	104
<b>Tabla 4.10</b>	Hoja de especificaciones del tanque de homogenización	105
<b>Tabla 4.11</b>	Hoja de especificaciones del tanque coagulador-floculador	106
<b>Tabla 4.12</b>	Hoja de especificaciones del sedimentador secundario	107
<b>Tabla 4.13</b>	Hoja de especificaciones del tanque de ozonización	108
<b>Tabla 4.14</b>	Hoja de especificaciones del ozonizador	109
<b>Tabla 4.15</b>	Hoja de especificaciones del destructor térmico de ozono	110
<b>Tabla 4.16</b>	Hoja de especificaciones de la bomba sumergible PAF-12-D	111
<b>Tabla 4.17</b>	Hoja de especificaciones de la bomba centrífuga CO-350/03	112
<b>Tabla 4.18</b>	Hoja de especificaciones de la bomba sumergible SRI-05-Aut	113
<b>Tabla 4.19</b>	Hoja de especificaciones de la bomba centrífuga Serie gran caudal RGT-10	114
<b>Tabla 4.20</b>	Hoja de especificaciones de la bomba centrífuga CPM-130	115
<b>Tabla 4.21</b>	Hoja de especificaciones de la bomba sumergible PAF-13	116
<b>Tabla 5.1</b>	Porcentajes de inversión de capital fijo para una planta	117
<b>Tabla 5.2</b>	Costos directos de la elaboración de la PTAR del hotel AKROS	118
<b>Tabla 5.3</b>	Costo de la energía eléctrica empleada por cada 1 m <sup>3</sup> de agua residual tratada	119
<b>Tabla 5.4</b>	Cantidad de reactivos a utilizarse por cada 3 m <sup>3</sup> de efluentes y su respectivo costo para el tratamiento de 1 m <sup>3</sup> de agua residual	120
<b>Tabla 5.5</b>	Sanciones económicas por incumplimiento de los límites permisibles en la descarga de efluentes	121
<b>Tabla AI.1</b>	Características físico-químicas de los efluentes en distintos días	136

		<b>PÁGINA</b>
<b>Tabla AV.1</b>	Prueba de jarras con dosis de coagulante entre 5 y 30 mg/L	150
<b>Tabla AV.2</b>	Prueba de jarras con dosis de coagulante entre 5 y 30 mg/L y floculante polimérico no iónico entre 1 y 6 mg/L	151
<b>Tabla AV.3</b>	Prueba de jarras con dosis de coagulante entre 50 y 300 mg/L	152
<b>Tabla AV.4</b>	Prueba de jarras con dosis de coagulante entre 250 y 500 mg/L	153
<b>Tabla AV.5</b>	Prueba de jarras con dosis de coagulante entre 300 y 550 mg/L a pH cercano al neutro	154
<b>Tabla AV.6</b>	Prueba de jarras con dosis de coagulante entre 100 y 600 mg/L	155
<b>Tabla AV.7</b>	Prueba de jarras con dosis de coagulante entre 20 y 120 mg/L con 20 mg/L de alcalinizante	156
<b>Tabla AV.8</b>	Prueba de jarras con dosis de coagulante de 60 mg/L, 20 mg/L de alcalinizante y floculante polimérico no iónico entre 0,33 y 1,00 mg/L	157
<b>Tabla AV.9</b>	Prueba de jarras con dosis de coagulante de 60 mg/L, 20 mg/L de alcalinizante y floculante polimérico aniónico entre 0,33 y 1,00 mg/L	158
<b>Tabla AV.10</b>	Prueba de jarras con dosis de coagulante de 60 mg/L, 20 mg/L de alcalinizante y 0,66 mg/L de floculante polimérico aniónico	159
<b>Tabla AV.11</b>	Prueba de jarras con dosis de coagulante de 60 mg/L, 20 mg/L de alcalinizante y 0,66 mg/L de floculante polimérico aniónico	160
<b>Tabla AV.12</b>	Prueba de jarras con dosis de coagulante de 60 mg/L, 20 mg/L de alcalinizante y 20 mg/L de arcilla	161
<b>Tabla AV.13</b>	Prueba de jarras con dosis de coagulante de 60 mg/L, entre 10 y 40 mg/L de alcalinizante y entre 5 y 20 mg/L de arcilla	162
<b>Tabla AV.14</b>	Prueba de jarras con dosis de coagulante de 60 mg/L y entre 40 y 70 mg/L de alcalinizante	163
<b>Tabla AV.15</b>	Prueba de jarras con dosis de coagulante entre 10 y 40 mg/L y 70 mg/L de alcalinizante	164

	<b>PÁGINA</b>
<b>Tabla AV.16</b>	Prueba de jarras con dosis de coagulante de 20 mg/L y entre 30 y 70 mg/L de alcalinizante 165
<b>Tabla AV.17</b>	Prueba de jarras con dosis de coagulante de 20 mg/L, 70 mg/L de alcalinizante y entre 1 y 5 mg/L de floculante polimérico catiónico L-1640 166
<b>Tabla AV.18</b>	Prueba de jarras con dosis de coagulante de 20 mg/L, 70 mg/L de alcalinizante y entre 1 y 5 mg/L de floculante polimérico catiónico L-1560 167
<b>Tabla AV.19</b>	Prueba de jarras con dosis de coagulante de 20 mg/L, entre 0 y 70 mg/L de alcalinizante y 3 mg/L de floculante polimérico catiónico L-1560 168
<b>Tabla AV.20</b>	Prueba de jarras con dosis de coagulante de 20 mg/L, entre 70 y 100 mg/L de alcalinizante, 3 mg/L de floculante polimérico catiónico L-1560 y entre 10E-3 molar y 10E-1 molar de cloruro de sodio 169
<b>Tabla AV.21</b>	Prueba de jarras con dosis de coagulante de 20 mg/L, 100 mg/L de alcalinizante, 3 mg/L de floculante polimérico catiónico L-1560 y entre 10E-3 molar y 10E-1 molar de cloruro de sodio 170
<b>Tabla AV.22</b>	Prueba de jarras con dosis de coagulante de 20 mg/L, 100 mg/L de alcalinizante, 3 mg/L de floculante polimérico catiónico L-1560 y entre 10E-3 molar y 10E-1 molar de cloruro de sodio a pH cercano al neutro 171
<b>Tabla AVI.1</b>	Condiciones iniciales de las muestras empleadas en los ensayos de coagulación con regulación de pH 172
<b>Tabla AVI.2</b>	Combinaciones entre distintas dosis de alcalinizante y de coagulante 172
<b>Tabla AVI.3</b>	Condiciones iniciales de las muestras empleadas en los ensayos de coagulación con descomposición de materia orgánica en medio ácido 174
<b>Tabla AVI.4</b>	Combinaciones entre distintos niveles de variación de pH y dosis de coagulante 174
<b>Tabla AVI.5</b>	Condiciones iniciales de las muestras empleadas en los ensayos de determinación del tipo de floculante a utilizarse 175

	<b>PÁGINA</b>	
<b>Tabla AVI.6</b>	Resultados obtenidos a partir de los distintos tipos de floculante empleados	175
<b>Tabla AVIII.1</b>	Condiciones iniciales de las muestras empleadas en los ensayos de agitación	183
<b>Tabla AVIII.2</b>	Combinaciones entre distintos niveles de velocidad y tiempo de agitación	183
<b>Tabla AVIII.3</b>	Condiciones iniciales de las muestras empleadas en los ensayos de floculación y sedimentación	187
<b>Tabla AVIII.4</b>	Combinaciones entre distintos niveles de dosis de floculante y tiempos de floculación y sedimentación	189
<b>Tabla AIX.1</b>	Condiciones iniciales de las muestras empleadas en los ensayos de tiempo de ozonización	189
<b>Tabla AIX.2</b>	Resultados obtenidos a partir de los diferentes tiempos de ozonización	189
<b>Tabla AIX.3</b>	Degradación de tensoactivos a diferentes tiempos de ozonización a partir de una concentración inicial de 0,53 mg/L	190
<b>Tabla AIX.4</b>	Degradación de tensoactivos a diferentes tiempos de ozonización a partir de una concentración inicial de 1,30 mg/L	191
<b>Tabla AIX.5</b>	Degradación de tensoactivos a diferentes tiempos de ozonización a partir de una concentración inicial de 2,80 mg/L	190
<b>Tabla AIX.6</b>	Degradación de tensoactivos a diferentes tiempos de ozonización a partir de una concentración inicial de 0,66 mg/L	192
<b>Tabla AXIII.1</b>	Velocidades límite recomendadas para fluidos en tuberías y bombas	216
<b>Tabla AXIII.2</b>	Accesorios en la planta de tratamiento de efluentes líquidos	217
<b>Tabla AXIII.3</b>	Características de las bombas centrífugas seleccionadas para cada etapa de la PTAR	219
<b>Tabla AXIII.4</b>	Dimensiones de las válvulas utilizadas en la PTAR	220
<b>Tabla AXIV.1</b>	Características de tubería de PVC con un diámetro nominal de hasta 6 plg	221

	<b>PÁGINA</b>
<b>Tabla AXIV.2</b> Características de tubería de PVC con un diámetro nominal de hasta 16 plg	220
<b>Tabla AXV.1</b> Presiones de operación y de diseño de los equipos de la PTAR	223
<b>Tabla AXVI.1</b> Costos de los deflectores y de la paleta de agitación del tanque de homogenización, construidos con acero al carbón	224
<b>Tabla AXVI.2</b> Costo de las paletas de agitación del tanque coagulador-floculador	225
<b>Tabla AXVI.3</b> Costos del sedimentador secundario y los tanques de almacenamiento obtenidos en función del volumen de hormigón armado necesario	225
<b>Tabla AXVI.4</b> Costo de la tubería de PVC para la construcción de los reactores de ozonización	226
<b>Tabla AXVI.5</b> Costos de adquisición de las bombas para el funcionamiento de la planta de tratamiento de efluentes	226
<b>Tabla AXVI.6</b> Costos de adquisición de las tuberías y sus accesorios para el funcionamiento de la planta de tratamiento de efluentes	227
<b>Tabla AXVI.7</b> Costo del generador de ozono	227
<b>Tabla AXVI.8</b> Costo del destructor térmico de ozono	228
<b>Tabla AXVI.9</b> Costos de adquisición de los tanques de polietileno para almacenamiento de sustancias químicas	228

## ÍNDICE DE FIGURAS

		<b>PÁGINA</b>
<b>Figura 1.1</b>	Índice de biodegradabilidad de los efluentes en distintas fechas	4
<b>Figura 2.1</b>	Influencia de la concentración de la solución de sulfato de aluminio sobre el porcentaje de reducción de la turbidez	12
<b>Figura 2.2</b>	Disminución de los tensoactivos en distintos tiempos de ozonización	17
<b>Figura 2.3</b>	Disminución de la DQO en distintos tiempos de ozonización	17
<b>Figura 2.4</b>	Efecto de la cantidad de alcalinizante y la dosis de coagulante sobre el porcentaje de reducción de la turbidez	20
<b>Figura 2.5</b>	Efecto de la cantidad de alcalinizante y la dosis de coagulante sobre el pH final del efluente	21
<b>Figura 2.6</b>	Efecto de la variación de pH y la dosis de coagulante sobre el porcentaje de reducción de la turbidez	24
<b>Figura 2.7</b>	Gráfica del efecto de la variación de pH y la dosis de coagulante sobre el pH final del efluente	25
<b>Figura 2.8</b>	Gráfica de medias de la influencia del tipo de floculante sobre el porcentaje de reducción de la turbidez	28
<b>Figura 2.9</b>	Gráfica de medias de la influencia del tipo de floculante sobre el porcentaje de reducción de la DQO	29
<b>Figura 2.10</b>	Gráfica de medias de la influencia del tipo de floculante sobre el porcentaje de reducción de los tensoactivos	30
<b>Figura 2.11</b>	Valor residual de tensoactivos (SAAM) en mg/L luego del tratamiento con los 5 tipos de coagulante en 3 días diferentes	30
<b>Figura 2.12</b>	Efecto de la variación de las condiciones de agitación sobre el porcentaje de reducción de la turbidez	33
<b>Figura 2.13</b>	Efectos de la dosis de floculante y los tiempos de floculación y sedimentación sobre el porcentaje de reducción de la turbidez	35



		<b>PÁGINA</b>
<b>Figura 2.14</b>	Gráfica de medias de la influencia del tiempo de ozonización sobre el porcentaje de reducción de los tensoactivos	38
<b>Figura 2.15</b>	Degradación de tensoactivos considerando una concentración inicial de 0,53 mg/L y una cinética de segundo orden	40
<b>Figura 2.16</b>	Degradación de tensoactivos considerando una concentración inicial de 1,30 mg/L y una cinética de segundo orden	41
<b>Figura 2.17</b>	Degradación de tensoactivos considerando una concentración inicial de 2,80 mg/L y una cinética de segundo orden	41
<b>Figura 2.18</b>	Degradación de tensoactivos considerando una concentración inicial de 0,66 mg/L y una cinética de segundo orden	42
<b>Figura 2.19</b>	Localización del hotel AKROS dentro del cantón Quito	45
<b>Figura 2.20</b>	Espacio disponible para la construcción de la PTAR en el subsuelo 3 del hotel AKROS	46
<b>Figura 3.1</b>	Vista frontal del taque de homogenización	55
<b>Figura 3.2</b>	Vista frontal de un tanque coagulador-floculador	58
<b>Figura 3.3</b>	Vista superior de un tanque coagulador-floculador	59
<b>Figura 3.4</b>	Vista lateral de un sedimentador horizontal rectangular	61
<b>Figura 4.1</b>	Diagrama de bloques del proceso de tratamiento de 3 m <sup>3</sup> de efluentes líquidos del hotel AKROS recolectados durante 2 horas de trabajo	78
<b>Figura 4.2</b>	Diagrama PFD de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del hotel AKROS 1/4	79
<b>Figura 4.3</b>	Diagrama PFD de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del hotel AKROS 2/4	80
<b>Figura 4.4</b>	Diagrama PFD de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del hotel AKROS 3/4	81

		<b>PÁGINA</b>
<b>Figura 4.5</b>	Diagrama PFD de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del hotel AKROS 4/4	82
<b>Figura 4.6</b>	Lay Out de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del hotel AKROS 1/4	88
<b>Figura 4.7</b>	Lay Out de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del hotel AKROS 2/4	89
<b>Figura 4.8</b>	Lay Out de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del hotel AKROS 3/4	90
<b>Figura 4.9</b>	Lay Out de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del hotel AKROS 4/4	91
<b>Figura 4.10</b>	Plano de elevación del tanque de homogenización	92
<b>Figura 4.11</b>	Plano de elevación del tanque coagulador-floculador	93
<b>Figura 4.12</b>	Plano de elevación del sedimentador secundario	94
<b>Figura 4.13</b>	Plano de elevación del reactor de ozonización	95
<b>Figura 4.14</b>	Diagrama P&ID de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del hotel AKROS 1/4	97
<b>Figura 4.15</b>	Diagrama P&ID de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del hotel AKROS 2/4	98
<b>Figura 4.16</b>	Diagrama P&ID de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del hotel AKROS 3/4	99
<b>Figura 4.17</b>	Diagrama P&ID de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del hotel AKROS 4/4	100
<b>Figura AII.1</b>	Variación del caudal en diferentes días de trabajo de agosto y septiembre del 2017	137
<b>Figura AII.2</b>	Variación del caudal en diferentes días de trabajo de octubre del 2017	137
<b>Figura AII.3</b>	Variación del caudal en diferentes días de trabajo de noviembre y diciembre del 2017	138
<b>Figura AII.4</b>	Variación del caudal en diferentes días de trabajo de abril del 2018	138

	<b>PÁGINA</b>
<b>Figura AIII.1</b>	Ficha técnica del detergente en polvo utilizado en la lavandería del hotel AKROS 140
<b>Figura AIII.2</b>	Ficha técnica del detergente líquido utilizado en la lavandería del hotel AKROS 141
<b>Figura AIII.3</b>	Ficha técnica del desengrasante utilizado en la lavandería del hotel AKROS 142
<b>Figura AIII.4</b>	Ficha técnica de la solución de hipoclorito de sodio utilizada en la lavandería del hotel AKROS 143
<b>Figura AIII.5</b>	Ficha técnica del suavizante utilizado en la lavandería del hotel AKROS 144
<b>Figura AIV.1</b>	Norma ASTM D2035-13 para la prueba de jarras 1/3 146
<b>Figura AIV.2</b>	Norma ASTM D2035-13 para la prueba de jarras 1/3 147
<b>Figura AIV.3</b>	Norma ASTM D2035-13 para la prueba de jarras 3/3 148
<b>Figura AVII.1</b>	Hoja técnica del floculante L-1538 aniónico 178
<b>Figura AVII.2</b>	Hoja técnica del floculante L-1550A no iónico 179
<b>Figura AVII.3</b>	Hoja técnica del floculante L-1560 catiónico 180
<b>Figura AVII.4</b>	Hoja técnica del floculante L-1633 aniónico 181
<b>Figura AVII.5</b>	Hoja técnica del floculante L-1640 catiónico 182
<b>Figura AIX.1</b>	Linealización de la degradación de tensoactivos a partir de una concentración inicial de 0,53 mg/L 190
<b>Figura AIX.2</b>	Linealización de la degradación de tensoactivos a partir de una concentración inicial de 1,30 mg/L 191
<b>Figura AIX.3</b>	Linealización de la degradación de tensoactivos a partir de una concentración inicial de 2,80 mg/L 192
<b>Figura AIX.4</b>	Linealización de la degradación de tensoactivos a partir de una concentración inicial de 0,66 mg/L 192
<b>Figura AXI.1</b>	Diagrama de Moody 208
<b>Figura AXII.1</b>	Flujos en el tanque homogenizador 210

	<b>PÁGINA</b>
<b>Figura AXII.2</b> Flujos en el tanque coagulador-floculador	211
<b>Figura AXII.3</b> Flujos en el sedimentador secundario	213
<b>Figura AXII.4</b> Flujos en el ozonizador	214

## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>PÁGINA</b>
<b>ANEXO I</b> Características fisicoquímicas del efluente para diferentes días de trabajo	136
<b>ANEXO II</b> Ejemplo de las variaciones del caudal durante un día de trabajo	137
<b>ANEXO III</b> Hojas técnicas de los productos de limpieza utilizados en la lavandería del hotel AKROS	139
<b>ANEXO IV</b> Norma ASTM D2035-13 para la prueba de jarras	145
<b>ANEXO V</b> Resultados de los ensayos preliminares en las pruebas de jarras	149
<b>ANEXO VI</b> Datos utilizados en los diseños experimentales para determinar las dosis de sustancias químicas	172
<b>ANEXO VII</b> Hojas técnicas de los floculantes poliméricos empleados en los ensayos de laboratorio	177
<b>ANEXO VIII</b> Datos utilizados en la elaboración de los diseños experimentales para determinar las condiciones de agitación y sedimentación	183
<b>ANEXO IX</b> Degradación de tensoactivos aniónicos mediante ozonización	189
<b>ANEXO X</b> Ejemplo de cálculo del diseño de los tanques y equipos principales de la planta de tratamiento de aguas residuales	193
<b>ANEXO XI</b> Diagrama de Moody	208
<b>ANEXO XII</b> Balance de masa de la PTAR del hotel AKROS	209
<b>ANEXO XIII</b> Ejemplo de cálculo del balance de energía en el sistema de tuberías	216

	<b>PÁGINA</b>
<b>ANEXO XIV</b> Diámetros de tubería de PVC	221
<b>ANEXO XV</b> Presión de operación y diseño de los equipos para el PFD y P&ID	222
<b>ANEXO XVI</b> Evaluación económica de la planta de tratamiento de aguas residuales del hotel AKROS	224

## 1. JUSTIFICACIÓN

En Ecuador, solamente el 8 % de las aguas servidas son tratadas mediante algún sistema antes de su descarga, esto es ocasionado principalmente por el acelerado crecimiento urbano y la falta de políticas ambientales. Se estima que el 80% de las empresas industriales, agroindustriales, de comercio y servicios en el país, que generan aguas residuales, no tratan sus efluentes y los descargan directamente a las redes de alcantarillado o a los cauces fluviales; lo cual ha ocasionado que el 70 % de los cuerpos de agua dulce por debajo de los 2 800 msnm, no sean aptos para el consumo humano debido a la presencia de organismos patógenos y sustancias tóxicas (Cabrera, Garcés y Paredes, 2013, p. 3).

En algunos hoteles alrededor del mundo se han implementado sistemas de tratamiento de aguas residuales con el objetivo de incentivar el ecoturismo y reducir el consumo de agua al tratarla y recircularla; lo que representa además disminución en sus costos de operación. Como ejemplo se puede citar al hotel Oasis Akumal ubicado en la selva Maya de México, el cual ha implementado con éxito una planta de tratamiento de aguas residuales para su reutilización de los efluentes en el riego de áreas verdes, ratificando así su permiso de funcionamiento (ECORED, 2016).

En Ecuador se están realizando este tipo de proyectos dentro de la misma industria como en el hotel Pikaia Lodge ubicado en la isla de Santa Cruz en el archipiélago de Galápagos, donde existen rigurosas normas ambientales por la fragilidad del ecosistema (SALHER, 2017). Por lo tanto, también se plantea la posibilidad de recircular los efluentes del hotel AKROS para un fin determinado si las características del agua tratada tienen la calidad suficiente para cumplir con esa función y así disminuir el consumo de agua potable.

Según los resultados de control público efectuados por la Secretaría de Ambiente en la empresa Hotel AKROS HODESA C.A el 14 de septiembre del 2015, los efluentes de la lavandería y la cocina del hotel AKROS HODESA C.A presentaron incumplimientos en los parámetros: Demanda Química de Oxígeno (DQO),

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Potencial de Hidrógeno (pH), Aceites y Grasas (AyG), sólidos suspendidos (SS) y Tensoactivos (SAAM); por lo que es necesario adoptar medidas que aseguren y mantengan el cumplimiento de los límites máximos permisibles establecidos en la normativa ambiental vigente (Secretaría de Ambiente, 2016).

El hotel AKROS dispone de una trampa de grasa por donde circula el agua proveniente de todas las cocinas; mientras que para las descargas de lavandería no cuenta con ningún sistema de tratamiento pero se intenta optimizar el consumo de detergentes. Dichas adecuaciones no han logrado disminuir la carga contaminante por debajo de los límites establecidos en la Ordenanza No. 138, y menos aún en la presencia de tensoactivos ya que no existe un tratamiento como tal; por lo que existe la necesidad de implementar una planta de tratamiento de aguas residuales (HODESA, 2017).

En la Tabla 1.1 se observan los valores promedio de los parámetros físico-químicos de los efluentes del hotel y su comparación con los límites permisibles establecidos en la Ordenanza Municipal No 138 para descarga al alcantarillado. Los promedios se calcularon a partir de las caracterizaciones realizadas desde agosto del 2017 hasta abril del 2018 como se muestra en el Anexo I. De esta manera se comprobaron los resultados otorgados por el control público para poder desarrollar un método de tratamiento de efluentes adecuado para las condiciones del hotel AKROS.

En la Tabla 1.1 también se puede apreciar el valor del coeficiente de variación que se obtuvo mediante la relación entre la desviación estándar ( $\sigma$ ) y el valor promedio. En el caso del pH y de la temperatura resultó ser menor al 7 %, lo cual indica que la variabilidad de estos factores es mínima; sin embargo, este mismo coeficiente supera el 20 % para el resto de los parámetros considerados en la caracterización de los efluentes. Con esta información se logró establecer que las aguas residuales del hotel AKROS provenientes de la lavandería y la cocina, presentan una variabilidad alta en sus características físico-químicas en función de los diferentes días de trabajo (DANE, 200, p. 5).



**Tabla 1.1.** Valores promedio de los parámetros físico-químicos de los efluentes

Parámetro	Unidades	Valor Promedio $\pm \sigma$	Límite permisible *	Coefficiente de variación (%)
Aceites y grasas	mg/L	122,29 $\pm$ 67,03	70	55
DBO	mg/L	333,65 $\pm$ 142,67	170	43
DQO	mg/L	856,29 $\pm$ 272,27	350	32
pH	---	9,86 $\pm$ 0,42	6-9	4
Sólidos Sedimentables	mL/L	0,38 $\pm$ 0,32	20	85
Sólidos Totales	mg/L	290,24 $\pm$ 206,84	1 200	71
Sólidos Suspendedos	mg/L	142,12 $\pm$ 136,02	100	96
Tensoactivos	mg/L	1,29 $\pm$ 0,72	1	56
Temperatura	°C	33,51 $\pm$ 1,61	< 40	5

$\bar{X} \pm \sigma$  ( $n = 17$ )

\*(Secretaría de Ambiente, 2018, p. 10)

El hotel AKROS fue sancionado por la Secretaría de Ambiente por primera vez en julio del 2017 de acuerdo a la Ordenanza Municipal No 138, en donde además se advierte que se revocaría su permiso de funcionamiento si existiera reincidencia sobre la misma infracción que hubiera sido sancionada en sede administrativa, en el plazo de 2 años consecutivos. Resulta entonces prioritario el implementar un sistema de tratamiento de aguas residuales (Secretaría de Ambiente, 2017, p.7).

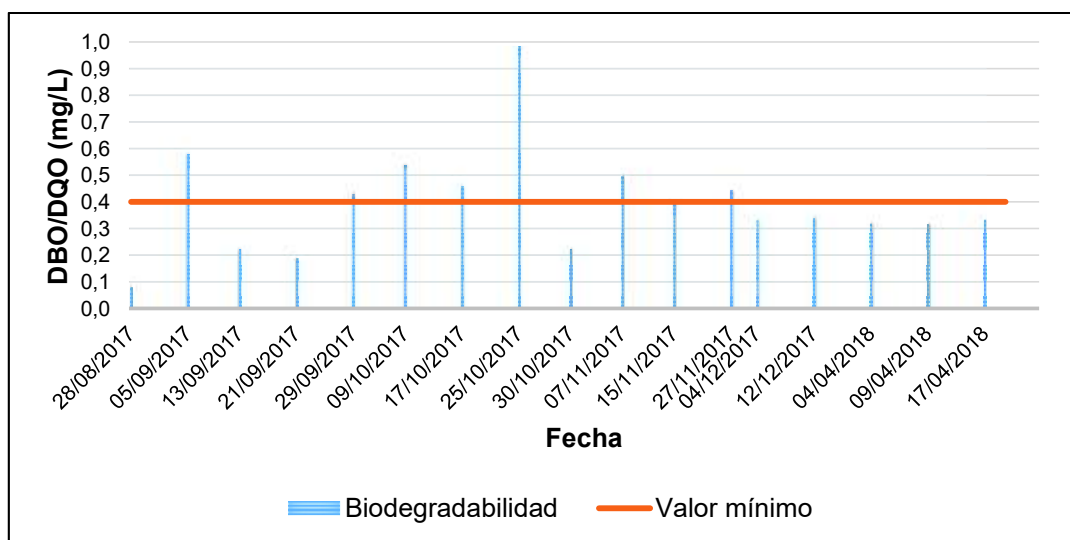
En aguas residuales de PYME's y municipios, el tratamiento biológico es el método más utilizado para la degradación de la carga contaminante por el elevado contenido de materia orgánica en los efluentes y además porque incluyen ciertas ventajas como: bajo costo de inversión, bajo costo operativo y bajo costo de mantenimiento en comparación a un tratamiento físico-químico. Sin embargo, entre sus limitaciones es importante mencionar que requiere de una amplia superficie de terreno, puede emanar olores desagradables y además necesita trabajar a temperaturas constantes para asegurar la supervivencia de las bacterias degradadoras (UDLAP, 2009, p. 22).

El espacio disponible para la construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) se encuentra en el subsuelo 3 del hotel y sus dimensiones son de 7,40 m de largo por 9,32 m de ancho y 3,00 m de altura, se trata de un espacio

cerrado y reducido por lo que no se podría optar por una planta de tratamiento biológico convencional (HODESA, 2017).

Actualmente existen en el mercado los bioreactores de lecho móvil (MBBR por sus siglas en inglés), los cuales consisten en microorganismos adsorbidos en superficies poliméricas de gran área superficial, lo que incrementa el área de contacto entre las bacterias degradadoras y el efluente, logrado así reducir el tamaño de la planta hasta en 6 veces y remover hasta el 91 % de materia orgánica (Assia et al., 2017, pp. 2 y 10). Los inconvenientes del hotel AKROS en considerar esta posibilidad, son el tipo de contaminantes, las características de los efluentes y las condiciones de caudal a las cuales trabaja, el mismo que es muy variable según los resultados de la caracterización que se observan en el Anexo II; el caudal puede permanecer en 0,0 L/s hasta por una hora y ascender rápidamente a valores cercanos a 0,8 L/s durante un lapso variable de tiempo.

El índice de biodegradabilidad representado como  $DBO_5/DQO$  debería ser mayor a 0,4 para que el tratamiento biológico sea una alternativa viable (Meoni, 2003, p. 2); sin embargo, en la Figura 1.1 se puede comprobar que los valores del índice no siempre cumplen con esta condición. El pH es cercano a 10 como se evidencia en los resultados de caracterización expuestos en la Tabla 1.1. El desarrollo de un inóculo para esta variabilidad de condiciones se volvería más complejo.



**Figura 1.1.** Índice de biodegradabilidad de los efluentes en distintas fechas

Es importante que el método de tratamiento se ajuste a las limitaciones de la entidad interesada; las principales son: el espacio disponible, la dificultad de operación, la capacitación del personal, los costos iniciales y los costos de operación de la planta. Tales motivos influyeron en la decisión de recurrir a la coagulación-floculación como tratamiento principal de los efluentes, ya que es un método que se adapta mejor a las variaciones de caudal y composición de carga contaminante, gran flexibilidad en el diseño de la planta y posibilidad de adaptación según las características del vertido (Aguilar, Sáez y Lloréns, 2002, p. 135).

Estudios de la eficiencia del tratamiento de coagulación-floculación para el tratamiento de efluentes municipales, demuestran que se podría obtener una disminución del 61% en DQO, del 53 % en DBO<sub>5</sub>; al utilizar 60 mg/L de sulfato de aluminio como coagulante y con tiempos de agitación y sedimentación de 30 min (Ibrahim et al., 2012, p. 335).

Otro problema en los efluentes del hotel AKROS es la presencia de agentes tensoactivos. En los productos comerciales con fines de limpieza, los tensoactivos más utilizados son los aniónicos del tipo lineal alquilbenceno sulfonados (LAS); llegan a ocupar el 60 % del mercado global y comprenden entre el 5 y 20 % de la formulación del detergente (Lechuga, 2005, pp. 16 y 27; Ríos, 2014, p. 154).

Existen varios productos de limpieza empleados en la lavandería del hotel AKROS como se especifica en las hojas técnicas entregadas por la empresa y presentadas en el Anexo III; el detergente cítrico en polvo es el más utilizado (HODESA, 2017). Los tensoactivos presentes en este producto son aniónicos del tipo LAS, los cuales tienen un tiempo estimado de biodegradabilidad del 90% en 4 días a partir de una concentración inicial máxima de 25 mg/L (Lechuga, 2005, p. 365).

En los ríos, los detergentes provocan la aparición de espuma y efectos tóxicos en plantas en concentraciones superiores a 1 mg/L y en peces a partir de los 2 mg/L. Además disminuyen el proceso de re-oxigenación natural en cuerpos de agua, por lo que alteran la calidad del agua y la supervivencia de seres acuáticos. El sabor

de los tensoactivos en el agua puede detectarse a niveles de 0,2 mg/L y la formación de espuma es a partir de 0,3 mg/L. (Ríos, 2014, pp. 36-38).

En el trabajo realizado por Lechuga (2005), se obtuvo la medida de la toxicidad de los lineal alquilbenceno sulfonados con el método Lumistox y se estableció que concentraciones de tensoactivos entre 9 y 27 mg/L inhiben la actividad microbiana en un 20 y 50 % respectivamente luego de 20 min de exposición. Los 10 primeros días, la toxicidad de LAS es relativamente alta en concentraciones comprendidas entre 25 y 50 mg/L, después de 15 días disminuye a cero. A concentraciones mayores a 50 mg/L su biodegradabilidad puede inhibirse (Lechuga, 2005, pp. 401 y 410).

Los procesos de oxidación avanzada son una alternativa para la modificación de las sustancias recalcitrantes en otras más biodegradables; se reduce el tamaño de las macromoléculas en cadenas pequeñas de ácidos orgánicos que pueden penetrar en las células y se facilita su biodegradación (Ríos, 2014, p. 58).

Dentro de los procesos de oxidación avanzada en el tratamiento de efluentes líquidos, la ozonización es uno de los más utilizados ya que presenta ventajas importantes como por ejemplo: eliminación de olor, color y sabor, oxidación de contaminantes orgánicos e inorgánicos, eliminación de microorganismos y no se forman compuestos organoclorados. Su aplicación no ha sido extendida debido al elevado costo de implementación; sin embargo, la baja eficiencia de los sistemas de tratamiento convencionales en la degradación de compuestos tóxicos, le han convertido en una alternativa viable y complementaria en la depuración de aguas residuales (Ríos, 2014, p. 59).

En estudios realizados para la degradación de tensoactivos aniónicos con ozono, se determinó que puede reducirse su concentración hasta un 75 % con dosis aproximadas de 1 400 mg de ozono por litro de muestra; además se comprobó que su tiempo de vida media disminuye en un 20 % bajo estas mismas condiciones con lo que aumenta la biodegradabilidad en un 37,5 % (Burgos, 2012, p. 25) y se remueve hasta el 99 % de microorganismos con lo que se podría reutilizar el agua

para riego o retretes (Veliz, Llanes, Fernández y Bataller, 2016, p. 20). Por estas razones se eligió a la ozonización como el tratamiento complementario para la degradación de agentes tensoactivos de las aguas residuales del hotel AKROS.

Debido a la variabilidad que existe en las características físico-químicas de los efluentes del hotel, fue necesario realizar una parte experimental previa al diseño de la PTAR para determinar las condiciones de trabajo óptimas en el tratamiento de las aguas residuales.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

En este proyecto se realizó el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) provenientes de la lavandería y cocina del hotel AKROS con el método de coagulación-floculación y posterior ozonización, para un caudal aproximado de 18 m<sup>3</sup>/d. Para asegurar que esta alternativa de tratamiento sea factible, fue necesario desarrollar previamente etapas de muestreo y caracterización de los efluentes, pruebas preliminares y el desarrollo experimental de cada fase del sistema propuesto.

### 2.1 MUESTREO Y CARACTERIZACIÓN DE LOS EFLUENTES

#### 2.1.1 MUESTREO DE LOS EFLUENTES

Las muestras de agua se recolectaron en los dos puntos de interés del hotel AKROS, los cuales son: la salida de efluentes del cuarto de lavandería (efluente con elevada concentración de tensoactivos) en las coordenadas UTM 17M 780643,29 m E 9979544,72 m S y la salida de la trampa de grasa (efluente con concentración de materia orgánica media) en las coordenadas UTM 17M 780615,30 m E 9979550,5 m S (HODESA, 2017).

Las descargas en el hotel se realizan de manera continua durante 12 horas por cada día de trabajo, por lo que según la Tabla 2.1, se efectuaron 4 muestreos simples en un intervalo de tiempo de una hora siguiendo las directrices estipuladas en la Norma Técnica INEN 2169-2013 (Secretaría de Ambiente, 2018, p. 8).

**Tabla 2.1.** Guía para la frecuencia de muestreo en flujo continuo

Horas por día de la descarga	Número de muestras simples	Intervalo entre toma de muestras simples (horas)	
		Mínimo	Máximo
Menor a 4	Mínimo 2	-	-
Más de 4 y hasta 16	4	1	2
Más de 16 y hasta 24	6	3	4

(Secretaría de Ambiente, 2018, p. 8)

Se prepararon las muestras compuestas de los efluentes de acuerdo a los caudales medidos en cada hora de recolección. La cantidad de muestra, recolectada en diferentes horas de trabajo, que se debía agregar para componer el volumen total se determinó según la Ecuación 2.1 (Secretaría de Ambiente, 2018, p. 8).

$$V_i = \frac{V_M * Q_i}{n_M * Q_m} \quad [2.1]$$

Donde:

- $V_i$ : Volumen individual de cada una de las alícuotas (mL)
- $V_M$ : Volumen de la muestra compuesta (mL)
- $Q_i$ : Caudal medio al momento del muestreo de cada una de las alícuotas (L/s)
- $n_M$ : Número total de alícuotas individuales que componen la muestra
- $Q_m$ : Caudal promedio en el periodo de muestreo (L/s)

Con el fin de obtener resultados representativos en cuanto a la composición de carga contaminante y la dosificación adecuada de sustancias químicas para su tratamiento, se caracterizaron los efluentes durante un período de 5 meses comprendido entre agosto del 2017 y abril del 2018. Se realizaron 18 muestreos aleatorios distribuidos en 1 por semana en diferentes días de trabajo a excepción de los fines de semana.

### **2.1.2 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE LOS EFLUENTES**

En la Tabla 2.2, tomada de la Ordenanza Municipal No. 138, se mencionan los métodos de análisis normados para la cuantificación de los parámetros físico-químicos del efluente (Secretaría de Ambiente, 2018, p. 14). Los procedimientos se encuentran publicados en la American Public Health Association (APHA, 2012).

**Tabla 2.2.** Métodos de análisis para descargas de aguas residuales

PARÁMETRO	EXPRESADO COMO	PROCEDIMIENTOS NORMADOS	TIPO
Potencial de Hidrógeno	pH	4500-H <sup>+</sup>	Potenciométrico
Temperatura	°C	2550 B	---
Sólidos Sedimentables	mL/L	2540 F	Volumétrico
Sólidos Totales	mg/L	2540 A	Gravimétrico
Aceites y grasas	mg/L	5520 B	Gravimétrico
DBO <sub>5</sub>	mg/L	5210 D	Respirométrico
DQO	mg/L	5220 D	Colorimétrico
Sólidos Suspendidos	mg/L	2540 D	Gravimétrico
Caudal	L/s	Vertedero	---
Tensoactivos	mg/L	5540 C	Colorimétrico

(Secretaría de Ambiente, 2018, p. 14)

## 2.2 PRUEBAS PRELIMINARES PARA DETERMINAR LA TRATABILIDAD DEL EFLUENTE

El diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales por el método de coagulación-floculación y posterior ozonización tuvo como punto de partida una etapa de investigación preliminar para determinar las mejores condiciones en la aplicación de las dosis de sustancias químicas y también para encontrar las condiciones de agitación que se deberán cumplir para disminuir la carga contaminante de los efluentes específicos del hotel AKROS hasta valores que no superen los límites permisibles establecidos por la Ordenanza Municipal No. 138.

### 2.2.1 PRUEBAS PRELIMINARES POR COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN

El método utilizado para la evaluación y control de coagulación-floculación fue la prueba de jarras, la cual consiste en un equipo con seis diferentes paletas de agitación que giran a la misma velocidad al mismo tiempo; cada una de ellas agitó la cantidad de 0,5 L de muestra, pero con distintas dosis de coagulante (Castrillón,



2012, p. 25). Se trabajó con una velocidad de agitación de 100 rpm durante un minuto para la mezcla rápida, 40 rpm durante 15 minutos para la mezcla lenta y 15 minutos de sedimentación de acuerdo a lo sugerido en la Norma Técnica ASTM D2035-13 para pruebas de jarras y de los ensayos preliminares, adjuntada en el Anexo IV. Estas mismas condiciones se aplicaron también durante la etapa de la determinación de las dosis de sustancias reguladoras de pH, coagulante y floculante; en el desarrollo experimental para definir el sistema de tratamiento de la Sección 2.3 (Núñez, 2015, p. 172).

### **Materiales, reactivos y equipos**

En las pruebas de tratamiento de los efluentes del hotel se utilizaron los reactivos descritos en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3.** Reactivos utilizados en las pruebas de tratamiento de los efluentes

<b>Reactivo</b>	<b>Pureza</b>	<b>Casa comercial</b>
Ácido sulfúrico	Grado reactivo 98,0 %	Productos químicos Monterrey
Óxido de calcio	Grado técnico	LOBACHEMICAL
Sulfato de Aluminio	Grado técnico	Casa de los químicos
Floculante L-1640 Catiónico	Poliacrilamida catiónica 80,0 %	LIPESA
Floculante L-1560 Catiónico	Ácido Sulfámico 2,5 % Ácido Adípico 2,5 %	LIPESA
Floculante L-1633 Aniónico	Poliacrilamida aniónica 90,0 %	LIPESA
Floculante L-1538 Aniónico	Información confidencial	LIPESA
Floculante L-1550A No iónico	Información confidencial	LIPESA

Los equipos y materiales utilizados en la fase experimental se detallan en la Tabla 2.4; mientras que las soluciones utilizadas en los ensayos se presentan en la Tabla 2.5. Debido al bajo costo en el mercado nacional, se optó por utilizar al sulfato de aluminio comercial ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ ) como coagulante para la PTAR del hotel AKROS.

El sulfato de aluminio tiene un costo de 0,53 USD/kg, mientras que otros coagulantes como el cloruro férrico o el policloruro de aluminio cuestan 1,99 y 1,20 USD/kg, respectivamente (PRODUQUIMIC, 2018, p. 1).

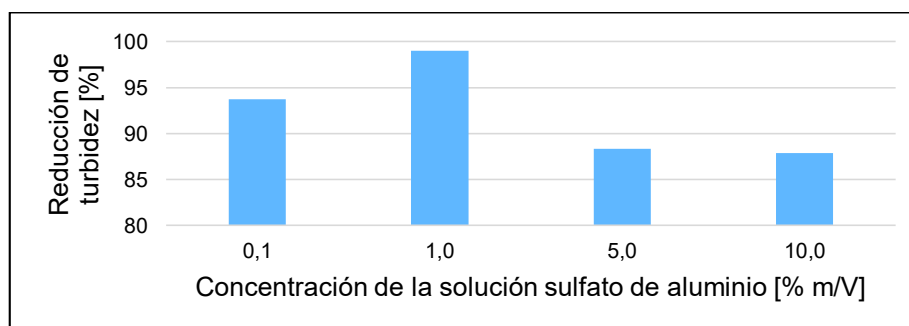
**Tabla 2.4.** Características de los equipos y materiales utilizados en la fase experimental

Equipo/Material	Marca	Modelo	Capacidad	Sensibilidad	Laboratorio
pH-metro	Thermoscientific	Orion 3 STAR	---	0,001	Análisis Instrumental DIQ
Prueba de jarras	PHIPPS&BIRD	PB-700 Jarr tester	300 rpm	1 rpm	Docente Ambiental
Ozonizador	Ozone 3	OZ-101/DL	250 mgO <sub>3</sub> /h	---	Análisis Instrumental DIQ
Espectrofotómetro	HACH	DR 2 800	1 500 mgO <sub>2</sub> /L	1 mgO <sub>2</sub> /L	Aguas y Microbiología DCN
Turbidímetro	HACH	2 100 P	1 000 NTU	0,01 NTU	Aguas y Microbiología DCN

**Tabla 2.5.** Soluciones utilizadas en la fase experimental

Solución	Concentración	Etapas
Ácido sulfúrico	0,2 N	Regulación de pH
Hidróxido de calcio	1,0 % m/V	Regulación de pH
Sulfato de aluminio	1,0 % m/V	Coagulación
Polímeros LIPESA	0,1 % m/V	Floculación

En la Figura 2.1 se observa que el sulfato de aluminio trabaja con mayor eficiencia a una concentración del 1 % en unidad de masa por unidad de volumen.



**Figura 2.1.** Influencia de la concentración de la solución de sulfato de aluminio sobre el porcentaje de reducción de la turbidez

De acuerdo a Arboleda (2000), la solución de sulfato de aluminio es más efectiva si se prepara a esta concentración debido a que su pH es cercano a 4, lo que evita que se hidrolice antes de su aplicación al efluente (p. 181).

En el Anexo V se encuentran los datos de los ensayos preliminares realizados en las pruebas de jarras. De la Tabla 2.6 a la Tabla 2.8 se resumen los resultados más relevantes obtenidos con diferentes dosis de sustancias químicas aplicadas, se consideró aceptable a un valor de turbidez residual menor a 10 NTU para encontrar las dosis adecuadas para el tratamiento (Cárdenas, 2000, p.2).

En la Tabla 2.6 se observa que para la muestra 1 fueron necesarios 300 mg/L de coagulante para lograr clarificarla; esta misma dosis no otorgó los resultados esperados para la muestra 2 y fue necesario aumentar la dosis hasta 450 mg/L. La turbidez residual presentó resultados diferentes en cada muestra ya que cada efluente tiene un pH de trabajo y dosis de coagulante óptimos que varían en función de la naturaleza del agua (Romero, 2009, p. 248).

**Tabla 2.6.** Resultados de los ensayos preliminares con diferentes dosis de coagulante

Muestra	Fecha	pH inicial	Coagulante [mg/L]	pH final	Mejor valor residual de turbidez [NTU]
1	10/10/2017	9,51	30	9,36	122,0
1	10/10/2017	9,51	30	9,40	119,0
1	10/10/2017	9,51	300	7,89	5,9
2	18/10/2017	9,65	300	7,14	181,0
2	18/10/2017	9,65	450	6,53	1,6
2	18/10/2017	6,46	300	5,16	27,5
3	26/10/2017	9,47	300	6,02	87,9
3	26/10/2017	9,47	400	5,21	2,9

En la Tabla 2.7 se observa que para la muestra 4, la dosis de 400 mg/L de alcalinizante logró reducir la cantidad necesaria de coagulante para la clarificación; esto es debido a que los coagulantes necesitan reaccionar con la alcalinidad del agua para formar hidróxidos insolubles (Villegas, 2007, p. 83). Los floculantes aplicados en estas pruebas no disminuyeron considerablemente la turbidez residual

pero puede notarse que el L-1633 aniónico cumple mejor esta función que el L-1550A no iónico en estos efluentes ya que sus iones contribuyen a formar puentes entre los coágulos, enlazándose electrostáticamente con los cationes metálicos de aluminio (Aguilar et al., 2002, p. 64). Por otro lado, en las muestras 5 y 6, se puede apreciar que bajo las mismas condiciones de trabajo que en la muestra 4, el agua no logra clarificarse por debajo de los 10 NTU.

Según Trujillo et al. (2014), se puede mejorar la eficiencia de la coagulación al agregar sólidos constituidos por silicatos de aluminio para aumentar la turbidez del efluente y la cantidad de iones, para promover la floculación por adsorción (p. 25), por lo que en la muestra 7 se agregaron dosis de arcilla; aun así no se obtuvieron los resultados esperados.

**Tabla 2.7.** Resultados de los ensayos preliminares utilizando coagulante, alcalinizante, floculante L-1550A no iónico, L-1633 aniónico y arcilla

Muestra	Fecha	pH inicial	Coagulante [mg/L]	Alcalinizante [mg/L]	Floculante [mg/L] (Tipo)	pH final	Turbidez residual [NTU]
4	31/10/2017	11,95	60	400	0,00	8,94	3,1
4	31/10/2017	11,95	60	400	0,66 (L-1550A)	7,66	2,4
4	31/10/2017	11,95	60	400	0,66 (L-1633)	7,76	1,7
5	08/11/2017	11,33	60	400	0,66 (L-1633)	10,52	44,5
6	16/11/2017	11,95	60	400	0,66 (L-1633)	11,30	55,3
7	28/11/2017	12,29	60	400	0,00	12,11	105,0
7	28/11/2017	12,58	60	400	20,00 (Arcilla)	12,52	152,0
7	28/11/2017	12,51	60	800	5,00 (arcilla)	12,40	102,0
7	28/11/2017	12,42	60	800	0,00	12,33	26,5

En la Tabla 2.8 se observa que para la muestra 8, dosis de 60 mg/L de coagulante y 1 400 mg/L de alcalinizante fueron suficientes para clarificar el agua por debajo del nivel de las 10 NTU. En la muestra 9 se obtuvieron mejores resultados al

disminuir la dosis de coagulante a 20 mg/L; sin embargo en la muestra 10, bajo estas mismas condiciones los resultados no fueron los esperados debido a la variabilidad en la naturaleza de los efluentes.

Según los resultados obtenidos, el método funcionaría en aguas con un pH mayor a 13; pero este valor se encuentra fuera de los límites permisibles considerados en la norma vigente y constituiría un uso excesivo de hidróxido de calcio en la planta. En la muestra 12 se realizó un además un ensayo en el cual se reguló el pH inicial a 7 por ser valor en el cual el sulfato de aluminio trabaja con mayor eficiencia (AWWA, 2002, p. 312), aunque tampoco se obtuvieron resultados favorables.

Para los ensayos posteriores se decidió trabajar con floculante catiónico sobre la base de que las cargas del polímero neutralizan cargas o forman puentes adsorbiéndose sobre los coloides negativos de los efluentes (Aguilar et al., 2002, p. 66).

**Tabla 2.8.** Resultados de los ensayos preliminares utilizando coagulante, alcalinizante y floculante L-1640 catiónico

Muestra	Fecha	pH inicial	Coagulante [mg/L]	Alcalinizante [mg/L]	Floculante [mg/L]	pH final	Turbidez residual [NTU]
8	05/12/2017	13,40	60	1 400	0	13,17	8,6
8	05/12/2017	13,40	40	1 400	0	13,17	2,2
9	13/12/2017	13,63	20	1 400	0	13,60	1,2
10	05/04/2018	12,80	20	1 400	3	13,05	21,2
10	05/04/2018	12,80	20	1 400	3	12,88	14,0
10	05/04/2018	12,87	20	1 000	3	12,60	26,9
11	10/04/2018	12,43	20	400	3	12,83	412,0
11	10/04/2018	12,98	20	1 400	3	12,98	16,8
12	18/04/2018	13,19	20	2 000	3	13,31	1,9
12	18/04/2018	7,00	20	2 000	3	6,42	13,0

Por lo tanto, las dosis adecuadas de sustancias químicas para la clarificación de una muestra, no logran tener el efecto deseado en otra muestra de un día diferente; por lo que el método de coagulación-floculación por sí solo no tendría repetibilidad.

Se realizaron además pruebas de ozonización a los efluentes del hotel sin ningún tipo de tratamiento previo para verificar su efectividad en la degradación de la materia contaminante en estas condiciones y evaluar la posibilidad de utilizar únicamente este método en el sistema de tratamiento de las aguas residuales.

### **2.2.2 PRUEBAS PRELIMINARES DE OZONIZACIÓN A EFLUENTES NO CLARIFICADOS**

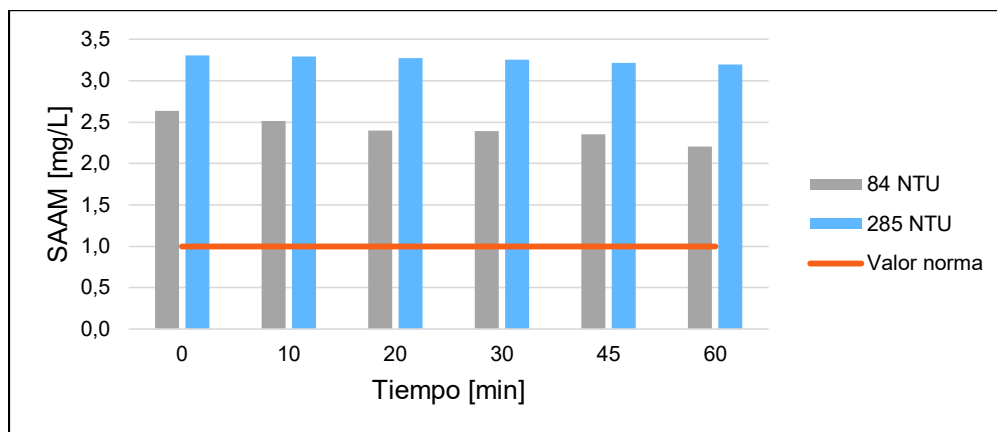
Esta etapa de experimentación tuvo como objetivo comprobar la eficiencia de la ozonización a un efluente sin tratamiento previo. Se empleó un ozonizador marca *Ozone 3* que proporcionó una cantidad de ozono de 400 mgO<sub>3</sub>/h con un flujo volumétrico de 4,5 L<sub>gas</sub>/min. En la Tabla 1.1 del apartado anterior se observa que la temperatura de las aguas residuales es cercana a 30 °C y el valor del pH está comprendido entre 9 y 10. Si bien se sabe que la solubilidad del ozono en el agua es inversamente proporcional a la temperatura y al pH (Martínez, 2005, p. 9), en este caso se conservaron los valores originales para observar el efecto de la ozonización sobre el efluente real.

En la Figura 2.2 y en la Figura 2.3 se observa que la ozonización realizada a efluentes sin clarificar no alteró significativamente los valores de los tensoactivos ni de la DQO, respectivamente. Además de la influencia de la temperatura y el pH, esto se debe principalmente a que las partículas causantes de la turbidez interfieren con los procesos de desinfección u oxidación (AWWA, 2002, p. 304).

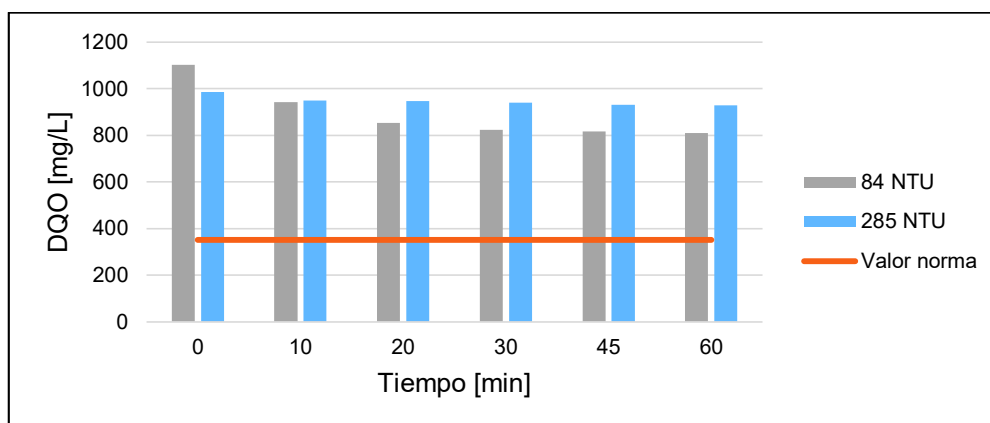
Aunque no se haya logrado disminuir la carga contaminante a concentraciones por debajo del límite permisible, se puede notar que existe una tendencia a reducirse mientras se aumenta el tiempo de ozonización. Esto supone que se necesitaría aumentar la dosis de ozono, ya sea con el incremento del flujo de ozono o con la ampliación el tiempo de ozonización (Martínez, 2017, p. 35).

Además, se debe tener en cuenta que la cantidad de energía que emplearía un ozonizador de escala industrial es importante, alrededor de 33 kW (Simon Chen

Fujian, 2017), y los costos de operación se elevarían; por lo tanto, se concluyó que es necesario clarificar los efluentes antes de aplicar este tratamiento para lograr reducir el tiempo de ozonización necesario.



**Figura 2.2.** Disminución de los tensoactivos en distintos tiempos de ozonización



**Figura 2.3.** Disminución de la DQO en distintos tiempos de ozonización

## 2.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA DEFINIR EL SISTEMA DE TRATAMIENTO

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos preliminares se concluyó que la aplicación del método de coagulación-floculación por sí solo no presenta repetibilidad debido a la naturaleza de las aguas residuales en diferentes días de trabajo. Por lo tanto, para realizar los diseños experimentales se consideraron

distintos factores de entrada y de salida con el fin de reducir la variabilidad en las características físico-químicas del efluente.

### 2.3.1 ENSAYOS DE COAGULACIÓN CON AUMENTO DE ALCALINIDAD DEL EFLUENTE

En todas las pruebas de determinación de dosis de coagulante, floculante y sustancias reguladoras de pH se utilizó el diseño experimental factorial multinivel para conocer el efecto individual y la interacción de las variables de entrada sobre las respuestas, para así buscar la combinación adecuada de niveles de los factores que mejoren el desempeño del proceso. El número de repeticiones que se llevaron a cabo en cada experimento se determinó de acuerdo al número de grados de libertad del error (Gl), el cual debe ser mayor a ocho para que un experimento sea estadísticamente representativo; esto se verificó con la ayuda del software StarGraphics Centurion (Gutiérrez y De la Vara, 2008, pp. 75, 128).

Los porcentajes de reducción en un parámetro específico fueron parte de las variables de salida en los diseños experimentales y se calcularon según se indica en la Ecuación 2.2.

$$\%R = \frac{(C_o - C_f)}{C_o} * 100 \quad [2.2]$$

Donde:

$\%R$ : Porcentaje de reducción del contaminante

$C_o$ : Valor inicial del contaminante

$C_f$ : Valor residual del contaminante

Para evaluar la influencia de la concentración de una sustancia alcalinizante en la dosis de coagulante requerida para la clarificación del efluente, se planteó el diseño experimental con dosis de 20, 40, 60, 100, 150 y 200 mg/L de sulfato de aluminio



(Ibrahim et al., 2012, p. 332) y concentraciones de 0, 400, 1 200 y 2 000 mg/L de hidróxido de calcio como variables de entrada; por su parte, el porcentaje de reducción de turbidez y el pH final fueron las variables de salida (Silva, 2015, p. 104). Los datos que se utilizaron para la elaboración del diseño experimental se encuentran en el Anexo VI y sus características se resumen en la Tabla 2.9.

**Tabla 2.9.** Diseño experimental de la influencia de la alcalinidad y la dosis del coagulante sobre la turbidez

Atributo	Valor
Número de factores experimentales	2
Número de bloques	2
Número de respuestas	2
Número de corridas	48
Grados de libertad para el error	41

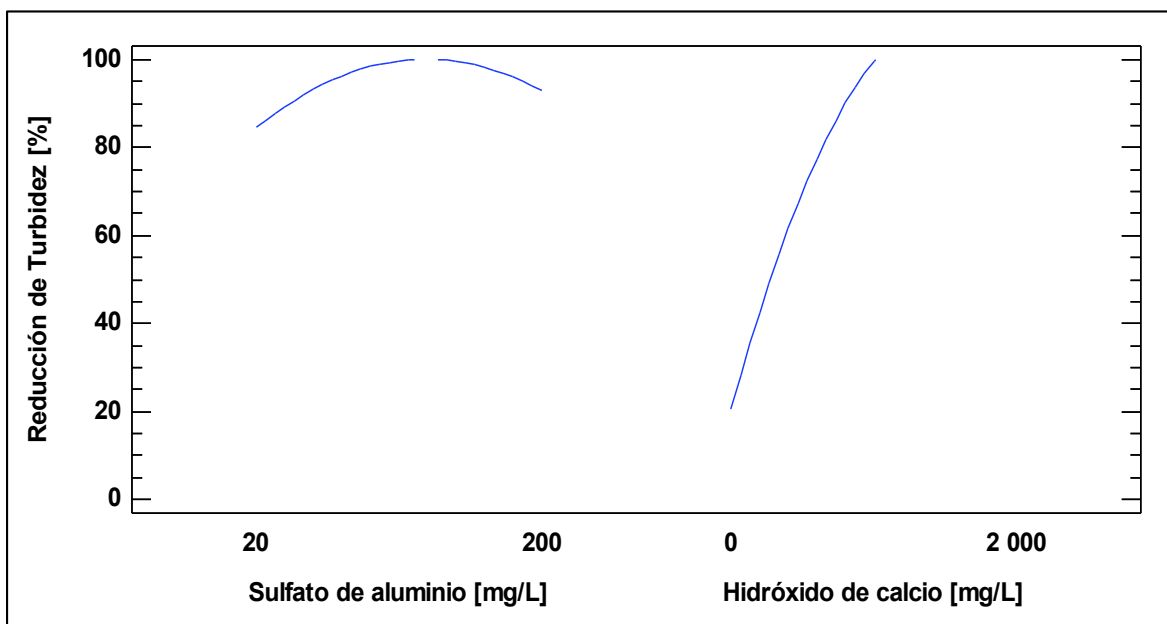
En la Tabla 2.10 se presenta el análisis de la varianza de los factores, donde se particiona la variabilidad de la reducción de la turbidez en función de cada uno de los efectos, para probar su significancia estadística. En este caso, la cantidad de hidróxido de calcio agregada y el efecto cuadrático de ambas sustancias tienen un valor-P menor que 0,05; lo que indica que son estadísticamente significativas sobre la variable de respuesta con un nivel de confianza del 95,0 % (Gutiérrez y De la Vara, 2008, p. 43).

**Tabla 2.10.** Influencia de la cantidad de alcalinizante y la dosis del coagulante sobre la turbidez del efluente

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Sulfato de aluminio [mg/L]	412,02	1	412,02	3,60	0,0648
B:Hidróxido de calcio [mg/L]	43 342,80	1	43 342,80	378,89	0,0000
AA	846,22	1	846,22	7,40	0,0095
AB	6,02	1	6,02	0,05	0,8197
BB	12 511,20	1	12 511,20	109,37	0,0000
Bloques	7,76	1	7,76	0,07	0,7958
Error total	4 690,22	41	114,39		
Total (corregido)	63 387,80	47			

En la Figura 2.4 se puede visualizar gráficamente la información descrita en la Tabla 2.10. Se puede apreciar en las pendientes de las curvas que la cantidad agregada de hidróxido de calcio tiene mayor incidencia sobre la reducción de la turbidez que la dosis de sulfato de aluminio agregada.

La forma parabólica de las gráficas indica el efecto cuadrático en la variable de salida; es decir, que a valores de sulfato de aluminio cercanos a 200 mg/L, el porcentaje de reducción de la turbidez disminuye debido a que existen más sólidos a coagular; esto disminuye la eficiencia del tratamiento porque se agregan más cargas que interaccionan repeliéndose entre sí y hacen más difícil la formación de los flóculos a causa del reestablecimiento de potencial zeta con cargas invertidas (Arboleda, 2000, p. 40; AWWA, 2002, p. 330).



**Figura 2.4.** Efecto de la cantidad de alcalinizante y la dosis de coagulante sobre el porcentaje de reducción de la turbidez

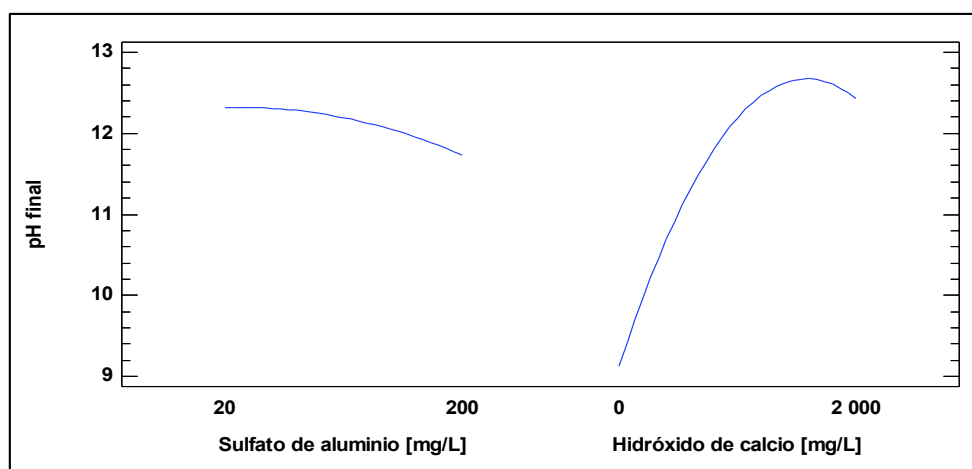
En la Tabla 2.11 se puede observar que la cantidad de hidróxido de calcio agregada y su variación cuadrática tienen efecto estadísticamente significativo sobre el pH final del efluente, con un nivel de confianza del 95,0 %; en cambio, la dosis de sulfato de aluminio no tiene un efecto representativo en la variación del pH del agua debido a que los hidróxidos son bases fuertes y tienen mayor incidencia sobre el pH que las sales (González, 2010).

**Tabla 2.11.** Influencia de la cantidad de alcalinizante y la dosis del coagulante sobre el pH del efluente

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Sulfato de aluminio [mg/L]	1,96	1	1,96	2,92	0,0952
B:Hidróxido de calcio [mg/L]	72,71	1	72,71	107,93	0,0000
AA	0,19	1	0,19	0,29	0,5924
AB	0,96	1	0,96	1,43	0,2391
BB	16,53	1	16,53	24,55	0,0000
Bloques	0,76	1	0,76	1,12	0,2959
Error total	27,62	41	0,67		
Total (corregido)	119,50	47			

En la Figura 2.5 se observa que a mayor concentración de sulfato de aluminio, el pH del efluente tiende a disminuir porque los cationes de aluminio atraen a los átomos de oxígeno, lo que ocasiona que se liberen protones de hidrógeno; sin embargo, el efecto del hidróxido de calcio es más relevante por tratarse de una base fuerte que aporta iones hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ) a la solución (Arboleda, 2000, p. 53).

La disminución del pH final a concentraciones cercanas a 2 000 mg/L de la sustancia alcalinizante pudo deberse a que hubo mayor oportunidad de reacción entre el coagulante y la alcalinidad del efluente para formar los precipitados de hidróxido de aluminio (Romero, 2009, p. 244).



**Figura 2.5.** Efecto de la cantidad de alcalinizante y la dosis de coagulante sobre el pH final del efluente

En la Tabla 2.12 se presentan los resultados de la optimización de respuestas múltiples, en la cual, se eligió la mejor combinación de coagulante con alcalinizante con los objetivos de maximizar el porcentaje de reducción de turbidez y controlar el pH en un valor cercano a 9,0 ya que es el límite establecido en la normativa ambiental.

Sin embargo, pese a que se logra reducir la turbidez en un 95,78 %, el mejor valor del pH final es de 11,8; por lo tanto se decidió emplear a la descomposición de la materia orgánica en medio ácido como un tratamiento previo para degradar a las sustancias dispersantes y antidepositantes y así favorecer a la coagulación-floculación, de manera que no se requiera elevar el pH más allá de 10,0 (Ahmadreza, Fayyaz, Akbar, Hajar y Farshid, 2015, p. 1 103).

**Tabla 2.12.** Valores de las variables de entrada y salida para la optimización del tratamiento por coagulación y floculación

<b>Factor</b>	<b>Óptimo</b>
Sulfato de aluminio [mg/L]	175,75
Hidróxido de calcio [mg/L]	972,89
<b>Respuesta</b>	
Reducción de turbidez [%]	95,78
pH final	11,84

### **2.3.2 ENSAYOS DE COAGULACIÓN CON DESCOMPOSICIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN MEDIO ÁCIDO**

En las hojas técnicas de los detergentes utilizados en la lavandería del hotel, se puede evidenciar que dentro de su composición se encuentran agentes antidepositantes y dispersantes; los cuales son compuestos orgánicos e inorgánicos, respectivamente, con carga eléctrica que cumplen con las funciones de estabilizar a los tensoactivos y a las partículas responsables de la suciedad dentro de la solución, evitando que sedimenten. Su presencia aumenta la magnitud del potencial zeta, por lo cual se requieren mayores dosis de cationes metálicos para reducirlo a cero y desestabilizar los coloides (González, 2004, pp. 15, 86).

La descomposición de materia orgánica en medio ácido tiene como objetivo remover parte de los sólidos suspendidos y degradar a los compuestos estabilizantes; por esta razón se requieren aplicar menores dosis de coagulantes a los efluentes que han sido pretratados con este método para lograr clarificarlos. Se empleó una solución de ácido sulfúrico 0,2 N para reducir el pH de la muestra hasta llegar a un valor de 4 en agitación de 40 rpm (Ahmadreza et al., 2015, pp. 1 098 y 1 099).

Las variables de entrada fueron las dosis de 20, 40, 60, 80 y 100 ppm de sulfato de aluminio y el aumento de pH desde 4 hasta 9 y desde 4 hasta 10 con la ayuda de la solución de hidróxido de calcio al 1%.

El porcentaje de reducción de turbidez y el pH final fueron las variables de salida y los atributos del diseño experimental se detallan en la Tabla 2.13.

Los datos experimentales que se utilizaron para la elaboración del diseño experimental se encuentran en el Anexo VI.

**Tabla 2.13.** Diseño experimental de la influencia de la variación de pH y la dosis de coagulante sobre la turbidez

Atributo	Valor
Número de factores experimentales	2
Número de bloques	3
Número de respuestas	2
Número de corridas	30
Grados de libertad para el error	23

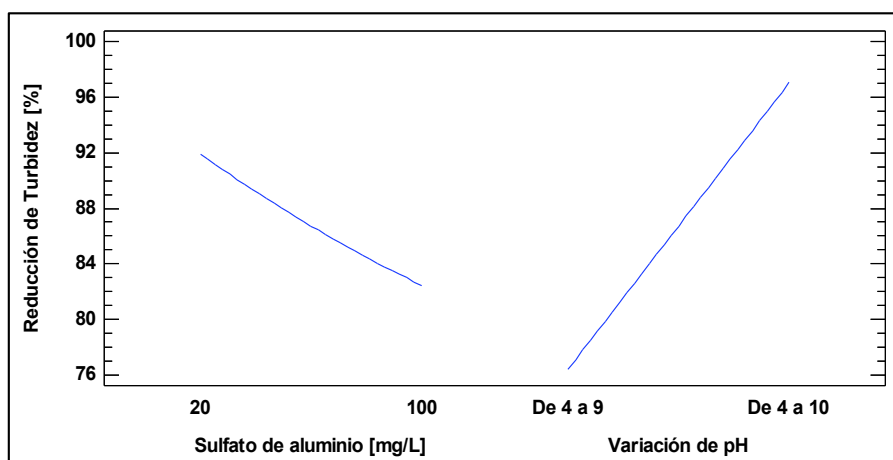
En la Tabla 2.14 se describe la variabilidad de la reducción de la turbidez en función de cada uno de los efectos, para probar su significancia estadística. La variación de pH previo al tratamiento y los bloques o días de muestreo, tienen una valor-P menor que 0,05; por lo que son significativamente influyentes en la variable de respuesta con un nivel de confianza del 95,0 % por lo que resultaron ser las condiciones más relevantes en el diseño experimental y se tomaron en cuenta para definir las condiciones para el tratamiento de los efluentes.

**Tabla 2.14.** Influencia de la variación de pH y la dosis del coagulante sobre la reducción de la turbidez

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Sulfato de aluminio [mg/L]	333,85	1	333,85	1,59	0,2197
B: Variación de pH desde 4 hasta:	3176,44	1	3176,44	15,15	0,0007
AA	1,09	1	1,09	0,01	0,9431
AB	450,03	1	450,03	2,15	0,1565
Bloques	1 835,98	2	917,99	4,38	0,0245
Error total	4 823,25	23	209,71		
Total (corregido)	1 0620,60	29			

En la Figura 2.6 se puede apreciar que el porcentaje de reducción de turbidez se ve afectado al aumentar las dosis de coagulante debido a la reestabilización del potencial zeta con cargas invertidas. Sin embargo, se ve favorecido si se trabaja con variaciones de pH desde 4 hasta valores cercanos a 10 ya que se agregan cationes divalentes de calcio a la solución, que contribuyen a reducir el potencial zeta y mejorar la coagulación (ESTRUCPLAN, 2008).

La pendiente de la curva del porcentaje de reducción de turbidez respecto a la variación de pH es mayor a la de la curva realizada en función de la dosis de coagulante, lo que significa que el efecto de la variación de pH sobre la variable de respuesta es más importante para las condiciones ensayadas en este experimento.



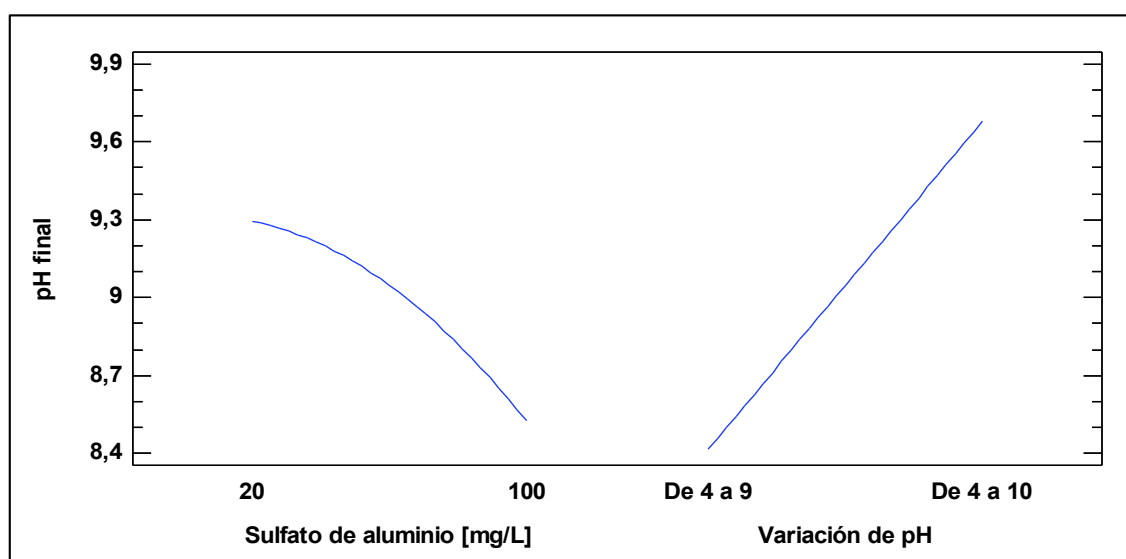
**Figura 2.6.** Efecto de la variación de pH y la dosis de coagulante sobre el porcentaje de reducción de la turbidez

En la Tabla 2.15 se encuentra el análisis de varianza de la influencia de la dosis de coagulante, la variación de pH y los días de muestreo sobre el pH final de la muestra. La dosis de sulfato de aluminio, la variación de pH previo al tratamiento y los días de muestreo resultaron ser estadísticamente incidentes con un nivel de confianza del 95,0 % ya que el valor-P es menor a 0,05.

**Tabla 2.15.** Influencia de la descomposición de materia orgánica en medio ácido sobre la coagulación del efluente

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Sulfato de Aluminio [mg/L]	2,21	1	2,21	11,47	0,0025
B:Variación de pH desde 4 hasta:	11,97	1	11,97	61,96	0,0000
AA	0,09	1	0,09	0,51	0,4809
AB	0,02	1	0,02	0,09	0,7667
Bloques	1,64	2	0,82	4,24	0,0270
Error total	4,44	23	0,19		

En la Figura 2.7 se observa que el pH disminuye con el aumento de dosis de coagulante porque el sulfato de aluminio libera protones de hidrógeno al hidratarse; y que aumenta con la adición de hidróxido de calcio debido a que es una fuente de iones hidroxilo (González, 2010).



**Figura 2.7.** Gráfica del efecto de la variación de pH y la dosis de coagulante sobre el pH final del efluente

En la Tabla 2.16 se presentan los resultados de la optimización de respuestas múltiples, en la cual se eligió la mejor combinación de la variación de pH con la dosis de coagulante, con los objetivos de maximizar el porcentaje de reducción de turbidez y controlar el pH en un valor cercano a 9,0 ya que es el límite establecido en la normativa ambiental. En este caso, con una variación de pH desde 4,0 hasta 9,7 y una concentración de 100 mg/L de sulfato de aluminio se puede reducir la turbidez en un 88,1 % y llegar a un pH final de 8,7.

**Tabla 2.16.** Valores óptimos de las variables de entrada y salida en la coagulación del efluente con variación de pH

<b>Factor</b>	<b>Óptimo</b>
Sulfato de aluminio [mg/L]	100,0
Variación de pH desde 4 hasta:	9,68
<b>Respuesta</b>	
Reducción de turbidez [%]	88,11
pH final	8,76

### **2.3.3 ENSAYOS REALIZADOS PARA DETERMINAR EL MEJOR TIPO DE FLOCULANTE**

Se aplicó un diseño experimental de un solo factor categórico, en donde el tipo de floculante fue la variable de entrada; mientras que los porcentajes de reducción en la turbidez, en la DQO y en la reducción de tensoactivos fueron las variables de salida.

En la Tabla 2.17 se indican los atributos del diseño de un solo factor categórico utilizado para analizar estos ensayos. Los datos experimentales que se emplearon para la elaboración del diseño experimental se encuentran en el Anexo AVI.

Se ensayaron cinco tipos de polímeros como floculantes para aumentar el tamaño del floc formado y disminuir el tiempo de precipitación. Se prepararon soluciones al 0,05 % (m/V) de cada polímero y se aplicó una dosis de 3 mg/L comprendida en el rango de 1 y 6 mg/L, sugerido por la empresa proveedora (LIPEQ S.A., 2012).



**Tabla 2.17.** Diseño experimental de la influencia del tipo de coagulante sobre los porcentajes de reducción de turbidez, DQO y tensoactivos

Atributo	Valor
Número de factores experimentales	1
Número de bloques	3
Número de respuestas	4
Número de corridas	15
Grados de libertad para el error	8

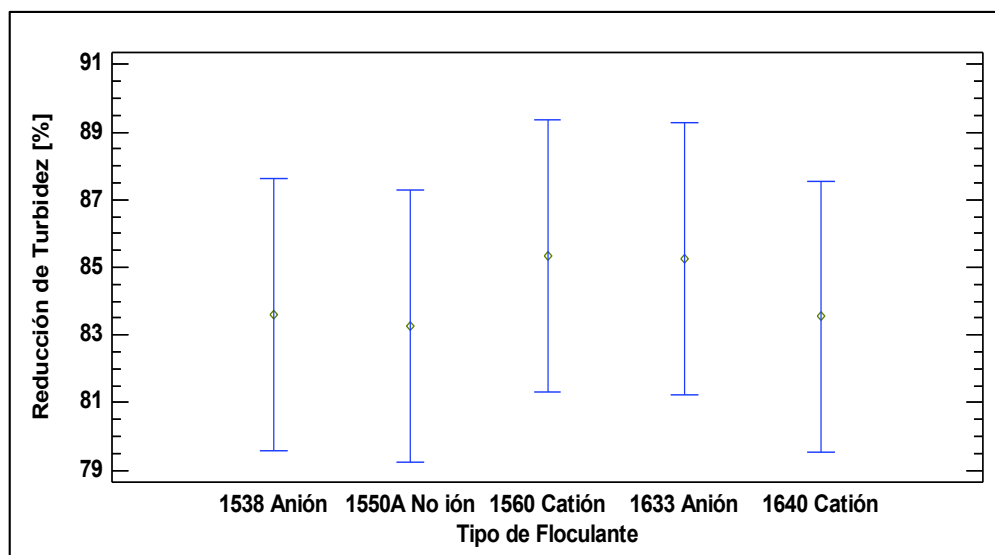
En la Tabla 2.18 se indica el ANOVA para verificar la incidencia del tipo de floculante y del bloque o día de muestreo sobre la reducción de turbidez. El bloque tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la variable de salida con un nivel de confianza del 95,0 %, lo cual es evidencia de la variabilidad de los efluentes en los diferentes días de trabajo.

**Tabla 2.18.** Influencia del tipo de coagulante sobre la reducción de la turbidez del efluente

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Tipo de Floculante	12,18	4	3,05	0,17	0,9493
B: Bloque	584,91	2	292,46	16,03	0,0016
Residuos	145,93	8	18,24		
Total (Corregido)	743,02	14			

En la Figura 2.8 se observa que el floculante L-1560 catiónico otorga mayor reducción en la turbidez que los demás; sin embargo, estadísticamente todos los floculantes presentan los mismos resultados. Este comportamiento se explica con base a que los polímeros aniónicos tienen pesos moleculares comprendidos entre 1 y 10 millones g/mol, esto les confiere la posibilidad de formar más enlaces entre los coágulos formados debido a la presencia de cationes metálicos otorgados por los coagulantes y alcalinizantes. Los polímeros no iónicos, por su parte, tienen masas moleculares comprendidas entre 3 y 15 millones g/mol y son capaces de adsorber tanto a las partículas con carga positiva como a las que poseen carga negativa. Los polímeros catiónicos tienen masas moleculares inferiores a los 5 millones g/mol y cumplen con la función de formar puentes y neutralizar cargas;

además pueden adsorber cargas negativas de las partículas coloidales con la ayuda de su elevada masa molecular (Aguilar et al., 2002, pp. 64, 66 y 68).



**Figura 2.8.** Gráfica de medias de la influencia del tipo de floculante sobre el porcentaje de reducción de la turbidez

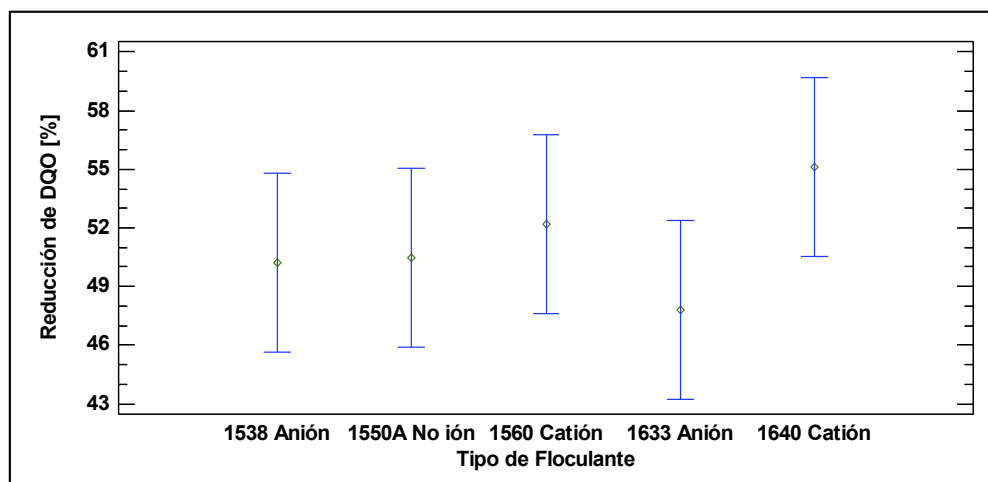
Debido a que los resultados obtenidos en la reducción de la turbidez mediante el uso de diferentes sustancias floculantes no permitieron seleccionar al polímero adecuado para el tratamiento de las aguas residuales del hotel, se decidió evaluar también la influencia del tipo de floculante sobre los porcentajes de reducción de la DQO y de los tensoactivos.

En la Tabla 2.19 se indica el análisis de varianza para verificar la incidencia del tipo de floculante y del bloque o día de muestreo sobre la reducción de la DQO. El bloque tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la variable de salida con un nivel de confianza del 95,0 %.

**Tabla 2.19.** Influencia del tipo de coagulante sobre la reducción de la DQO

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Tipo de Floculante	87,36	4	21,84	0,92	0,4959
B: Bloque	1 301,64	2	650,82	27,51	<b>0,0003</b>
Residuos	189,24	8	23,66		
Total (Corregido)	1 578,24	14			

En la Figura 2.9 se observa que estadísticamente todos los floculantes presentaron los mismos resultados, por lo que no fue posible seleccionar al producto adecuado para la floculación de los efluentes del hotel AKROS sobre la base de este criterio. Estos bajos resultados se deben a que la coagulación tiene la capacidad de sedimentar sólidos en suspensión y coloides pero no los sólidos disueltos que también forman parte de la carga contaminante. Como se observó en la Figura 2.8, todos los floculantes tienen el mismo potencial de reducir la turbidez del agua en estos efluentes y por lo tanto, la misma capacidad de reducir la DQO (Romero, 2009, p. 233).



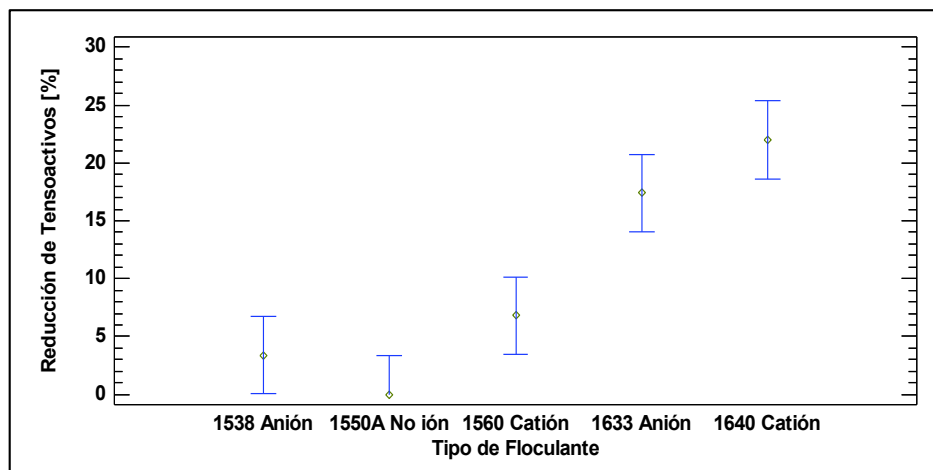
**Figura 2.9.** Gráfica de medias de la influencia del tipo de floculante sobre el porcentaje de reducción de la DQO

En la Tabla 2.20 se indica el análisis de varianza para verificar la incidencia del tipo de floculante y del bloque o día de muestreo sobre la reducción de los tensoactivos. Tanto el tipo de floculante como el bloque tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la variable de salida con un nivel de confianza del 95,0 %.

**Tabla 2.20.** Influencia del tipo de coagulante sobre la reducción de los tensoactivos

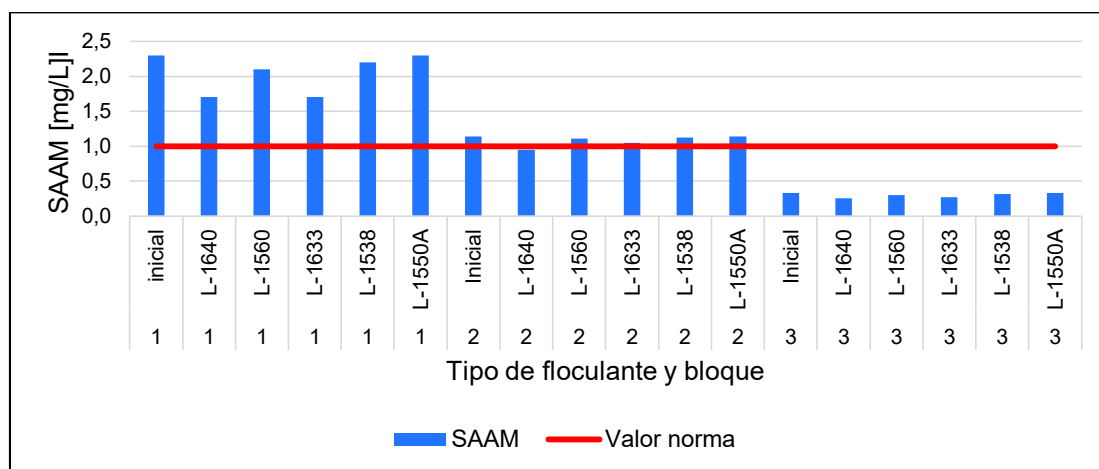
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Tipo de Floculante	1054,86	4	263,72	20,80	0,0003
B:Bloque	138,98	2	69,49	5,48	0,0317
Residuos	101,41	8	12,68		
Total (Corregido)	1295,25	14			

En la Figura 2.10 se puede apreciar que el floculante L-1640 catiónico y el L-1633 aniónico otorgan un mayor efecto estadístico sobre la reducción de los tensoactivos que los demás debido a la capacidad de neutralizar sus cargas negativas y de formar puentes entre los coágulos formados (Aguilar, Sáez, y Lloréns, 2002, p. 64).



**Figura 2.10.** Gráfica de medias de la influencia del tipo de floculante sobre el porcentaje de reducción de los tensoactivos

Sin embargo, en la Figura 2.11 se observa que la aplicación de cualquiera de los floculantes a muestras con concentraciones superiores a 1,3 mg/L de tensoactivos no es suficiente para disminuir el contaminante por debajo del límite establecido por la normativa ambiental, por lo que se debió considerar otro criterio para elegir el floculante adecuado para el tratamiento.



**Figura 2.11.** Valor residual de tensoactivos (SAAM) en mg/L luego del tratamiento con los 5 tipos de coagulante en 3 días diferentes

Según los resultados obtenidos en estos estudios, los polímeros iónicos presentaron mayor compatibilidad que los no iónicos en la floculación de los coágulos formados. Generalmente los de tipo catiónico son más eficientes en el tratamiento de efluentes municipales y potabilización de agua ya que los coloides de efluentes municipales son mayoritariamente aniónicos (Cárdenas, 2000, p. 3), esto es debido a la presencia de óxidos de silicio, de ácidos carboxílicos y grupos amino de las proteínas que se ionizan al entrar en contacto con el agua (AWWA, 2002, p. 306).

En el Anexo VII se adjuntan las hojas técnicas de los polímeros utilizados en las pruebas de floculación; de esta información se destaca que el polímero L-1560 catiónico puede ser empleado en el tratamiento de aguas potables por ser un compuesto no tóxico y además su viscosidad en una solución preparada al 0,1 % es de alrededor de 50 cP; en cambio, las viscosidades de las soluciones de polímeros aniónicos al 0,1 % están comprendidas entre 200 y 300 cP, lo cual hace que su preparación y manipulación sea más complicada por presentar mayor resistencia a fluir (TUBANOSA, 2003, pp. 18,19). Por lo tanto se eligió el polímero L-1560 catiónico como la sustancia floculante para el tratamiento de los efluentes del hotel.

#### **2.3.4 ENSAYOS RELIZADOS PARA DETERMINAR LOS GRADIENTES DE VELOCIDAD**

Se variaron las velocidades de agitación para encontrar las que mejor se ajusten al efluente a tratar. En el diseño experimental se ensayaron agitaciones rápidas de 100, 150 y 200 rpm durante 1 y 2 minutos; mientras que para la agitación lenta se utilizaron velocidades con valores de 30, 40 y 60 rpm en intervalos de 15, 20 y 30 minutos. El porcentaje de reducción de la turbidez fue la variable de salida (Arboleda, 2000, pp. 168, 182).

En la Tabla 2.21 se encuentran los atributos del diseño experimental que se utilizó para determinar las condiciones de agitación más adecuadas para el tratamiento.

Los datos experimentales que se emplearon para la elaboración del diseño experimental se encuentran en el Anexo AVIII.

**Tabla 2.21.** Diseño experimental de la influencia de las condiciones de agitación sobre la reducción de la turbidez del efluente

Atributo	Valor
Número de factores experimentales	4
Número de bloques	2
Número de respuestas	1
Número de corridas	108
Grados de libertad para el error	93

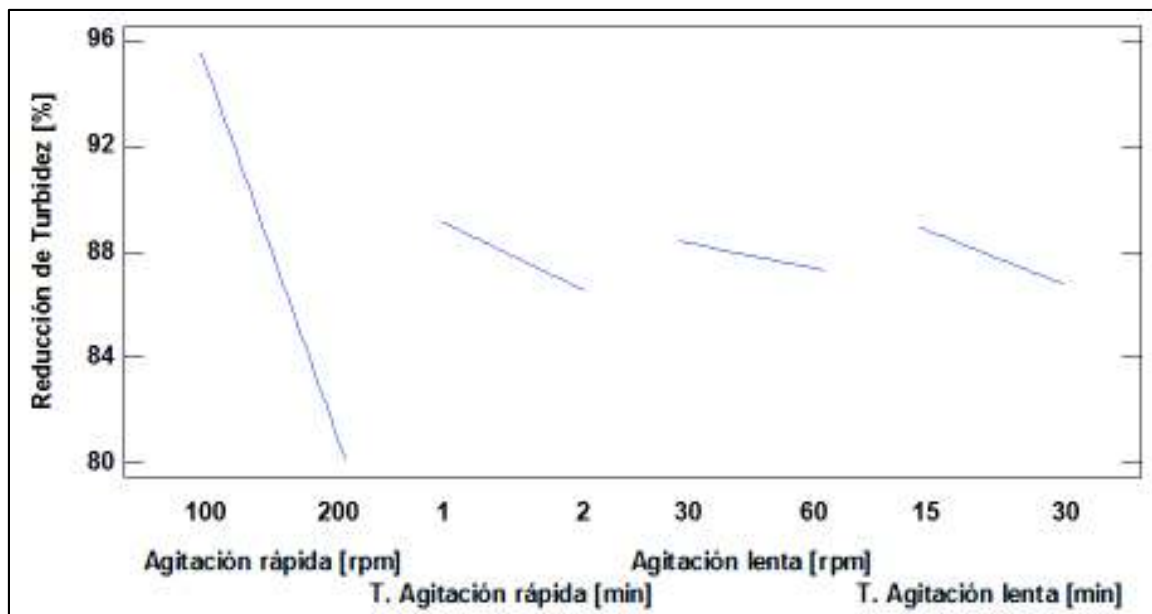
En la Tabla 2.22 se presenta el análisis de varianza de los efectos de las condiciones de agitación sobre el porcentaje de reducción de la turbidez. Como se observa en el valor-P, la agitación rápida, el tiempo de agitación rápida y los bloques (días de muestreo) tuvieron un efecto estadísticamente significativo sobre la reducción de la turbidez con un nivel de confianza del 95,0 %.

**Tabla 2.22.** Influencia de las condiciones de agitación sobre el porcentaje de reducción de la turbidez

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Agitación Rápida	4230,34	1	4 230,34	159,70	0,0000
B:Tiempo Agitación rápida	184,75	1	184,75	6,97	0,0096
C:Agitación lenta	22,21	1	22,21	0,84	0,3620
D:Tiempo agitación lenta	85,61	1	85,61	3,23	0,0752
Bloques	6 322,12	1	6322,12	238,66	0,0000
Error total	2 701,95	102	26,49		
Total (corregido)	1 3547,00	107			

En la Figura 2.12 se puede observar que el porcentaje de reducción de turbidez es perjudicado cuando se aumenta la velocidad y el tiempo de agitación. Esto se debe a que en condiciones de agitación mayores a las adecuadas, los flocs formados comienzan a romperse, lo cual aumenta la turbidez residual. La mezcla instantánea

debe generar un gradiente suficiente que provea una buena distribución del coagulante en un periodo menor a 10 s (Romero, 2009, p. 241).



**Figura 2.12.** Efecto de la variación de las condiciones de agitación sobre el porcentaje de reducción de la turbidez

Según Silva (2015), el gradiente óptimo de la mezcla rápida para mezcladores mecánicos se encuentra entre 200 y 500  $s^{-1}$ ; es decir, entre 80 y 150 rpm en una prueba de jarras estandarizada (p. 119). Por estas razones, condiciones de agitación cercanas a 200 rpm aumentan la turbidez residual.

La intensidad de la mezcla lenta no debe superar el gradiente de 100  $s^{-1}$  (60 rpm) ya que en esas condiciones los flocs comienzan a disgregarse; en cambio, si la intensidad se encuentra entre 25 y 65  $s^{-1}$ ; es decir, entre 20 y 50 rpm, tienden a aproximarse entre sí (AWWA, 2002, p. 349).

Por estos motivos, una velocidad de agitación rápida de 100 rpm durante 1 min y una velocidad de agitación lenta cercana a 40 rpm durante 15 min resultaron ser las condiciones más adecuadas para clarificar los efluentes del hotel AKROS.

En la Tabla 2.23 se resumen las condiciones de agitación adecuadas para maximizar el porcentaje de reducción de turbidez.

**Tabla 2.23.** Optimización de variables de entrada para la maximización del porcentaje de reducción de turbidez

<b>Factor</b>	<b>Óptimo</b>
Agitación rápida [rpm]	100
Tiempo agitación rápida [min]	1
Agitación lenta [rpm]	40
Tiempo agitación lenta [min]	15
Reducción de turbidez [%]	98,05

### 2.3.5 ENSAYOS REALIZADOS PARA DETERMINAR LA DOSIS DE FLOCULANTE Y LOS TIEMPOS DE SEDIMENTACIÓN Y FLOCULACIÓN

Para definir estas condiciones se utilizó un diseño experimental factorial multinivel en el cual las variables de entrada fueron los tiempos de floculación en niveles de 5, 10 y 15 minutos y de sedimentación en niveles de 5, 10 y 15 minutos. También se eligió como factor de diseño la dosis de coagulante L-1560 en niveles de 1,5 y 3,0 mg/L para tratar de reducir el consumo de este producto; por su parte, el porcentaje de reducción de turbidez fue la variable de salida. En la Tabla 2.24 se detallan los atributos del diseño experimental empleado en esta etapa de la investigación. Los datos que se emplearon para la elaboración del diseño experimental se encuentran en el Anexo AVIII.

**Tabla 2.24.** Diseño experimental de la influencia de la dosis de floculante y los tiempos de floculación y sedimentación sobre la reducción de la turbidez

<b>Atributo</b>	<b>Valor</b>
Número de factores experimentales	3
Número de bloques	2
Número de respuestas	1
Número de corridas	36
Grados de libertad para el error	26

En la Tabla 2.25 se presenta el análisis de varianza de los efectos de las variables de entrada sobre el porcentaje de reducción de la turbidez excluyendo las

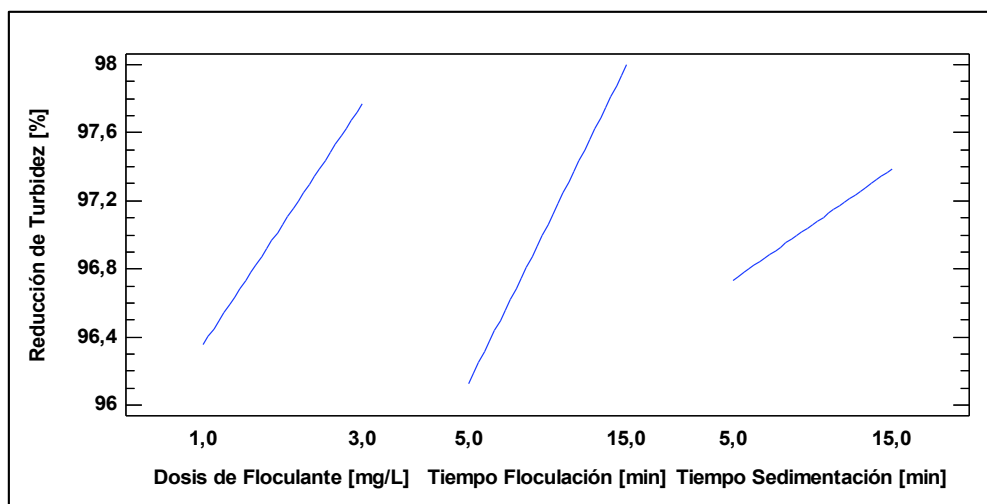


interacciones dobles y los efectos cuadráticos. Como se puede comprobar en el Valor-P, la dosis de floculante y el tiempo de floculación tuvieron efecto estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0 %.

**Tabla 2.25.** Influencia de las condiciones de agitación sobre el porcentaje de reducción de la turbidez

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Floculante [mg/L]	10,08	1	10,08	7,60	0,0097
B:Tiempo floculación [min]	21,0798	1	21,0798	15,89	0,0004
C:Tiempo sedimentación [min]	2,56157	1	2,56157	1,93	0,1746
Bloques	1,43908	1	1,43908	1,08	0,3057
Error total	41,1315	31	1,32682		
Total (Corregido)	76,2919	35			

En la Figura 2.13 se observa que al aumentar la dosis de floculante, el porcentaje de reducción de la turbidez se ve favorecido, esto se debe a que a mayores dosis de floculante existen más cadenas poliméricas que unen los coágulos desestabilizados. Excesos de polielectrolito podrían resuspender el floc debido a que cubren por completo los sitios de adsorción de los coloides, reestabilizándolos y revirtiendo el potencial zeta (Arboleda, 2000, p. 40); sin embargo, en las dosis trabajadas en este diseño experimental no se llegó a ese estado.



**Figura 2.13.** Efectos de la dosis de floculante y los tiempos de floculación y sedimentación sobre el porcentaje de reducción de la turbidez

En la Tabla 2.26 se presentan los valores de la dosis de floculante y los tiempos de floculación y sedimentación adecuados para maximizar el porcentaje de reducción de turbidez de acuerdo a los resultados obtenidos.

**Tabla 2.26.** Optimización de variables de entrada para la maximización del porcentaje de reducción de turbidez

Factor	Óptimo
Floculante [mg/L]	3,0
Tiempo floculación [min]	15,0
Tiempo sedimentación [min]	15,0
Reducción de la Turbidez [%]	99,03

### 2.3.6 ENSAYOS REALIZADOS PARA DETERMINAR EL TIEMPO DE OZONIZACIÓN

La ozonización se implementó como una etapa adicional para la degradación de tensoactivos, los cuales no pudieron ser separados mediante la coagulación-floculación según los resultados presentados en los experimentos previos.

En estudios realizados para tratamiento de efluentes líquidos para su reutilización en aguas de riego, se probaron dosis de ozono comprendidas entre 37 y 300  $mg_{O_3}/L_{muestra}$ , lo que sirvió como punto de partida para elaborar el diseño experimental (Veliz et al., 2016, p. 20).

Para este ensayo se aplicó un diseño experimental de un factor categórico con un factor de bloqueo y dos repeticiones a 1 L de agua previamente clarificada, en tiempos de 10, 20, 30, 45 y 60 minutos; los cuales aportaron dosis respectivas de 66,6; 133,2; 199,8; 299,7 y 399,6  $mg_{O_3}/L_{muestra}$  y cuyo cálculo se indica en la Ecuación 2.3 (Veliz et al., 2016, p. 21).

$$D(O_3) = \frac{C(O_3) * Q_g}{V_M} * t_c \quad [2.3]$$

Donde:

$D(O_3)$ : Dosis aplicada de ozono ( $\text{mgO}_3/\text{L}_{\text{Muestra}}$ )

$C(O_3)$ : Concentración de ozono en el gas en la entrada ( $\text{mg}/\text{L}_{\text{gas}}$ )

$Q_g$ : Flujo de gas ( $\text{L}_{\text{gas}}/\text{min}$ )

$V_M$ : Volumen de la muestra (L)

$t_c$ : Tiempo de contacto (min)

Los parámetros que se tuvieron en cuenta para seleccionar las mejores condiciones de ozonización fueron los porcentajes de reducción de tensoactivos y de DQO. En la Tabla 2.27 se presentan los atributos del diseño experimental utilizado. Los datos que se emplearon para su elaboración se encuentran en el Anexo IX.

**Tabla 2.27.** Diseño experimental de la influencia del tiempo de ozonización sobre los porcentajes de reducción de los tensoactivos

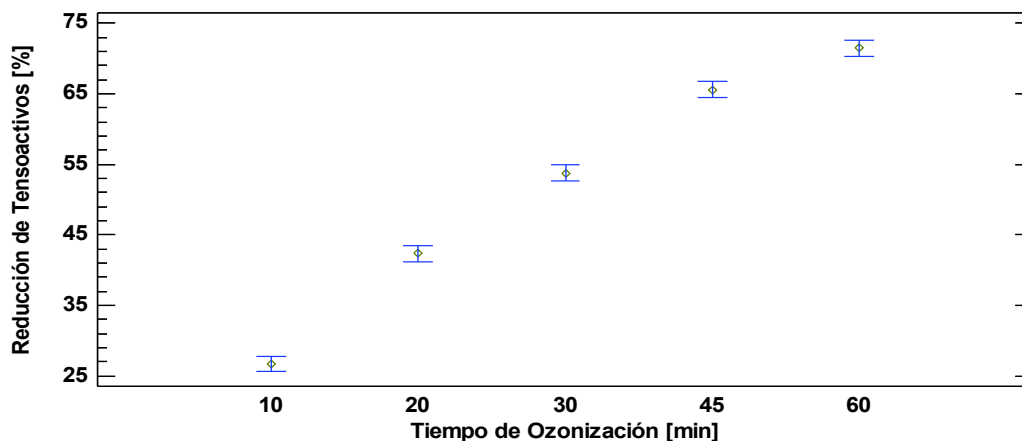
Atributo	Valor
Número de factores experimentales	1
Número de bloques	3
Número de respuestas	1
Número de corridas	15
Grados de libertad para el error	8

En la Tabla 2.28 se puede observar que tanto el tiempo de ozonización como el bloque o día de muestreo, tuvieron un efecto estadísticamente significativo sobre la reducción de tensoactivos, considerando un nivel de confianza del 95,0 %.

**Tabla 2.28.** Influencia del tiempo de ozonización sobre el porcentaje de reducción de los tensoactivos

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Tiempo de ozonización	3900,15	4	975,04	679,23	0,0000
B:Bloque	667,48	2	333,74	232,49	0,0000
Residuos	11,48	8	1,44		
Total (Corregido)	4579,11	14			

En la Figura 2.14 se puede apreciar que el tiempo de ozonización de 60 minutos, presenta un mayor porcentaje de reducción en los tensoactivos.



**Figura 2.14.** Gráfica de medias de la influencia del tiempo de ozonización sobre el porcentaje de reducción de los tensoactivos

### 2.3.7 DETERMINACIÓN DEL ORDEN DE LA REACCIÓN EN LA DEGRADACIÓN DE TENSOACTIVOS POR OZONIZACIÓN

Para determinar el orden de la reacción en la ozonización se comenzó suponiendo que el número de reacciones involucradas es elevado y que se desconocen los reactivos y productos que intervienen en ella, se consideró un estudio de la cinética global de la disminución de la concentración inicial de los tensoactivos para conocer el orden de la reacción. En la Ecuación 2.4, se describe la cinética del proceso específico de ozonización (Burgos, 2012, p. 238).

$$-\frac{dC_T}{dt} = k_1 * (C_{O_3})^n * (C_T)^m + k_2 * (C_{\bullet OH})^k * (C_T)^m + \dots \quad [2.4]$$

Donde:

$C_T$ : Concentración del tensoactivo (mg/L)

$C_{O_3}$ : Concentración de ozono (mg/L)

$C_{\bullet OH}$ : Concentración de radicales  $\bullet OH$  (mg/L)

- $k_i$ : Constantes cinéticas de la reacción  $i$   
 $t$ : Tiempo (h)  
 $n, m, k$ : Órdenes de cada reacción

Como se desconocen la mayoría de las reacciones intermedias, el tipo y la cantidad de reactivos que degradan a los tensoactivos; se simplificó la expresión anterior como se muestra en la Ecuación 2.5, la cual representa la cinética global de degradación de los tensoactivos, en donde  $k_G$  es la constante cinética global de reacción (Burgos, 2012, p. 238).

$$-\frac{dC_T}{dt} = k_G * (C_T)^n \quad [2.5]$$

Para linealizar la Ecuación 2.5, se aplicó el logaritmo base 10 a ambos extremos de la igualdad, con lo cual se llegó a la expresión 2.6 (Burgos, 2012, p. 238).

$$\log\left(-\frac{dC_T}{dt}\right) = \log(k_G) + n * \log(C_T) \quad [2.6]$$

La derivada de la concentración de tensoactivo respecto al tiempo representa una variación infinitesimal de los parámetros; es decir, en intervalos de tiempo que tienden a cero. Como los intervalos de tiempo usados en los ensayos experimentales fueron del rango de minutos, fue necesario cambiar la expresión anterior por la Ecuación 2.7 para considerar variaciones no infinitesimales (Burgos, 2012, p. 238).

$$\log\left(-\frac{\Delta C_T}{\Delta t}\right) = \log(k_G) + n * \log(\bar{C}_T) \quad [2.7]$$

Donde:

$\Delta C_T$ : Diferencia entre la concentración de tensoactivo previa y la concentración del tensoactivo residual en el intervalo de tiempo establecido.

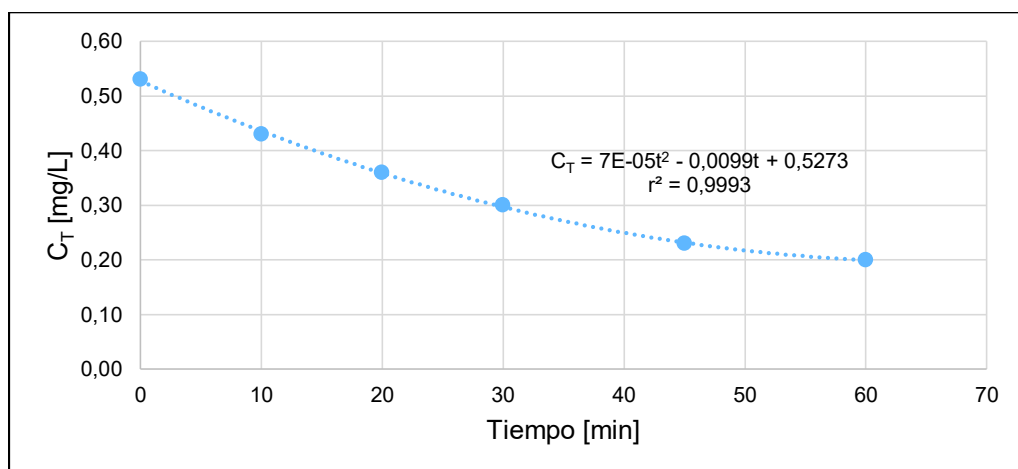
$\overline{C}_T$ : El valor promedio de la concentración de tensoactivo previa y la concentración del tensoactivo residual en el intervalo de tiempo establecido.

En el Anexo IX se presentan los resultados parciales obtenidos a partir de la Ecuación 2.7 y los datos experimentales para obtener el orden de la reacción. En la Tabla 2.29 se puede verificar que el orden de la reacción de la disminución de tensoactivos en función del tiempo de ozonización es de aproximadamente 2.

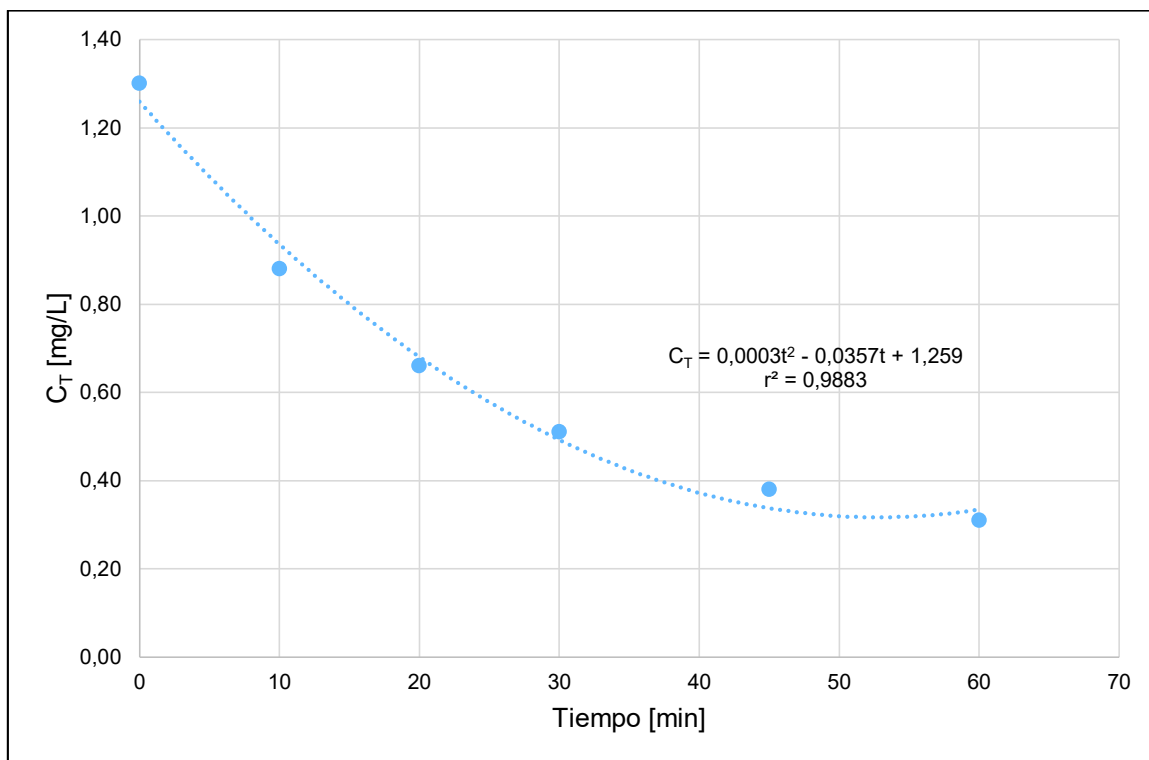
**Tabla 2.29.** Orden de la reacción de ozonización a muestras previamente clarificadas

Concentración inicial de SAAM [mg/L]	Ecuación de la Reacción	Orden de la reacción	Valor $r^2$
0,53	$\log\left(-\frac{\Delta C_T}{\Delta t}\right) = 1,8183 \log(\overline{C}_T) - 1,3911$	1,82	0,91
1,30	$\log\left(-\frac{\Delta C_T}{\Delta t}\right) = 1,8639 \log(\overline{C}_T) - 1,4317$	1,86	0,99
2,80	$\log\left(-\frac{\Delta C_T}{\Delta t}\right) = 1,5793 \log(\overline{C}_T) - 1,6977$	1,56	0,99
0,66	$\log\left(-\frac{\Delta C_T}{\Delta t}\right) = 2,3261 \log(\overline{C}_T) - 1,3099$	2,33	0,99

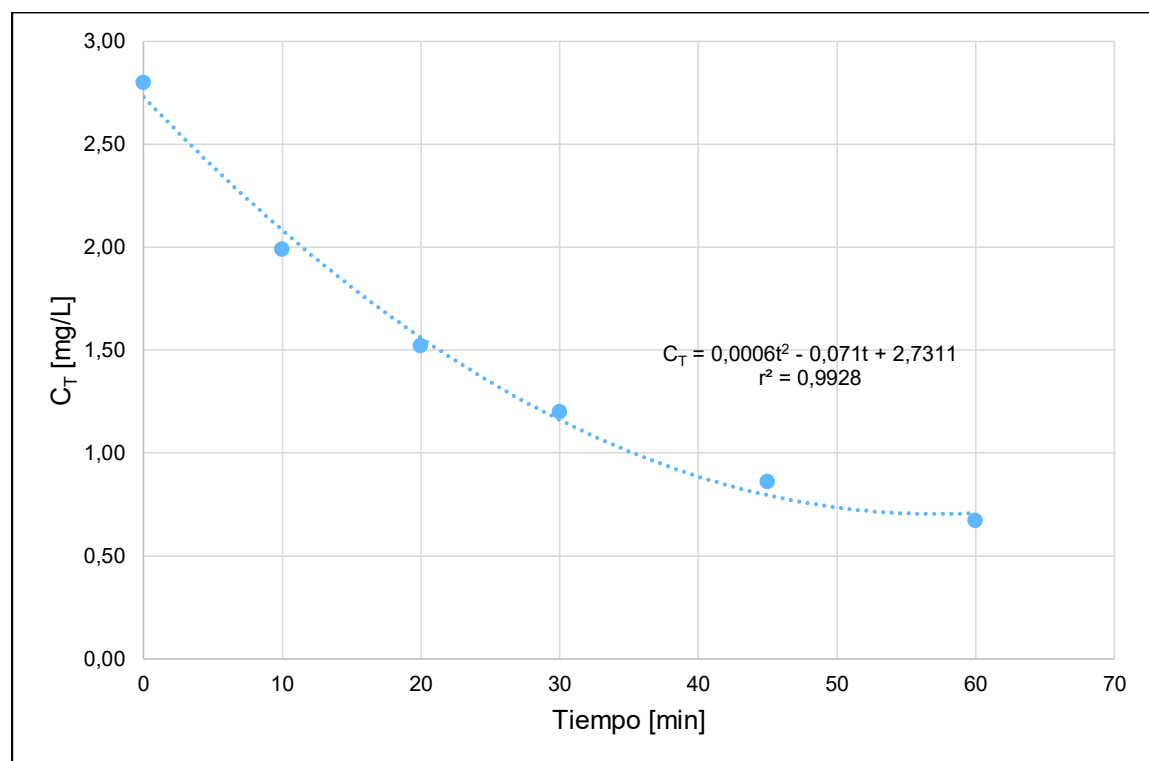
De acuerdo a estos resultados, la degradación de los tensoactivos sigue una cinética aproximada de segundo orden. Desde la Figura 2.15 hasta la Figura 2.18 se muestra la tendencia de la disminución de concentración de los tensoactivos mediante el tratamiento con ozonización, la cual varía en función de la concentración inicial.



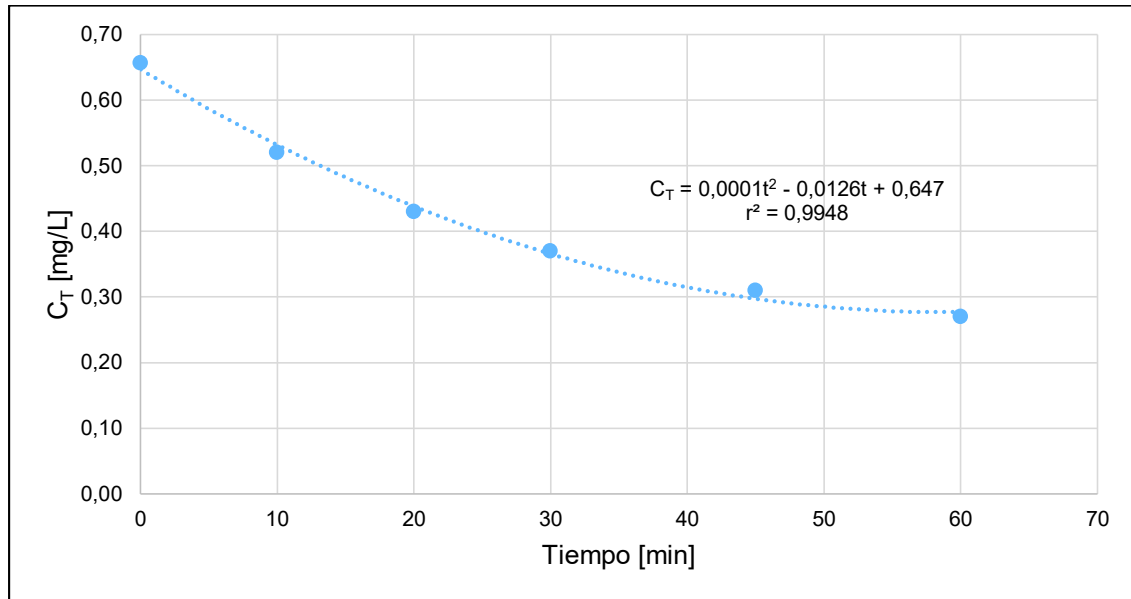
**Figura 2.15.** Degradación de tensoactivos considerando una concentración inicial de 0,53 mg/L y una cinética de segundo orden



**Figura 2.16.** Degradación de tensoactivos considerando una concentración inicial de 1,30 mg/L y una cinética de segundo orden



**Figura 2.17.** Degradación de tensoactivos considerando una concentración inicial de 2,80 mg/L y una cinética de segundo orden



**Figura 2.18.** Degradación de tensoactivos considerando una concentración inicial de 0,66 mg/L y una cinética de segundo orden

En la Tabla 2.30 se resumen las ecuaciones de la cinética de degradación de tensoactivos por ozonización.

**Tabla 2.30.** Cinética de ozonización de tensoactivos en una reacción de segundo orden

Concentración inicial de SAAM [mg/L]	Ecuación de la Reacción	Valor r <sup>2</sup>
0,53	$C_T = 7E-05t^2 - 0,0099t + 0,5273$	0,999
1,30	$C_T = 0,0003t^2 - 0,0357t + 1,259$	0,988
<b>2,80</b>	<b><math>C_T = 0,0006t^2 - 0,071t + 2,7311</math></b>	<b>0,993</b>
0,66	$C_T = 0,0001t^2 - 0,0126t + 0,647$	0,995

Debido a que los efluentes del hotel deben mantener siempre su concentración de tensoactivos por debajo de 1 mg/L para cumplir con la norma independientemente de la concentración inicial, se eligió a la Ecuación con el valor inicial de SAAM más elevado para predecir el comportamiento de la degradación de tensoactivos.

Sin embargo, no es posible estimar el tiempo requerido para degradar los tensoactivos por debajo del límite permisible en función de la concentración inicial por la variabilidad de la concentración de tensoactivos que presentan los efluentes; por lo tanto, según los resultados obtenidos se decidió implementar un tiempo de



ozonización de 1 h, correspondiente a una dosis de 400 mgO<sub>3</sub>/L, para el tratamiento de los efluentes de cualquier hora de trabajo.

## 2.4 RESULTADOS DEFINITIVOS DEL TRATAMIENTO AL APLICAR LAS CONDICIONES ÓPTIMAS OBTENIDAS

En la Tabla 2.31 se resumen los resultados de las mejores condiciones obtenidas para el tratamiento de los efluentes del hotel por el método de coagulación-floculación y posterior ozonización; las cuales se determinaron a partir de los ensayos de laboratorio analizados en el Apartado 2.3.

**Tabla 2.31.** Mejores resultados de los diferentes ensayos de laboratorio para el tratamiento de los efluentes del hotel AKROS

Parámetro	Unidades	Valor
Dosis de sulfato de aluminio	mg/L	100
Regulación de pH previo a la coagulación	---	desde 4 hasta 9,68
Dosis de floculante L-1560 catiónico	mg/L	3
Velocidad angular en agitación rápida	rpm	100
Tiempo de agitación rápida	min	1
Velocidad angular en agitación lenta	rpm	40
Tiempo de agitación rápida	min	15
Tiempo de sedimentación	min	15
Dosis de ozono	mg/L	400
Tiempo de ozonización	h	1

Estos resultados sirvieron como punto de partida para diseñar la planta de tratamiento de aguas residuales. Se realizaron pruebas adicionales a tres muestras recolectadas en días al azar y se aplicaron las condiciones descritas en la Tabla 2.31 para comprobar que el método tenga repetibilidad y sirva para tratar los efluentes de cualquier día de trabajo del hotel.

En la Tabla 2.32 se encuentran los resultados del tratamiento aplicado a los efluentes de 3 muestras recolectados en diferentes días. Presentaron un porcentaje

de disminución alrededor del 70 % en DQO, del 66 % en DBO, del 97 % en aceites y grasas, del 70 % en sólidos suspendidos, del 77 % en tensoactivos y el pH final se mantuvo en un valor comprendido entre 8 y 9. Se logró reducir la carga contaminante por debajo de los límites permisibles establecidos en la Ordenanza Municipal No.138, por lo que prosiguió con desarrollo y diseño del sistema propuesto para el tratamiento de las aguas residuales (Secretaría de Ambiente, 2018, p. 10).

**Tabla 2.32.** Caracterización de los parámetros de tres muestras antes y después del tratamiento por coagulación-floculación y ozonización

Parámetro	Valor Norma	Unidad	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
			Valor inicial	Valor final	Valor inicial	Valor final	Valor inicial	Valor final
Aceites y grasas	70	mg/L	118	<5	83	<5	126	<5
DBO	170	mg/L	183	125	682	103	451	112
DQO	350	mg/L	226	86	1 388	258	676	338
pH	6-9	---	9,72	7,95	10,25	8,28	9,92	8,34
Sólidos sedimentables	20	mL/L	0,2	0,0	0,5	0,0	0,4	0,0
Sólidos Totales	1 200	mg/L	498	113	1 010	353	986	296
Sólidos Suspendidos	100	mg/L	64	42	460	92	704	74
Tensoactivos	1	mg/L	1,2	0,3	2,3	0,6	0,53	0,10
Turbidez	---	NTU	36,2	1,2	524	6	91,30	4,09

En la Tabla 2.33 se muestran los resultados de la cantidad de lodos formada por cada litro de efluente en las diferentes muestras luego de ser tratadas mediante el sistema propuesto. Estos datos se utilizarán en el balance de masa para estimar la cantidad de lodo residual que se producirá en la PTAR, para luego ser enviados a un gestor ambiental certificado que asegure su adecuada disposición final.

**Tabla 2.33.** Cantidad de lodos formados por litro de muestra clarificada

Muestra	Fecha	Cantidad de lodo [mL]
1	20/06/2018	116,67
2	22/06/2018	187,50
3	26/06/2018	104,00
<b>Promedio</b>		<b>136,06 ± 45</b>

## 2.5 LOCALIZACIÓN

De acuerdo a los resultados obtenidos en el Apartado 1.4, el método de tratamiento propuesto es repetible y se puede aplicar a los efluentes producidos en cualquier día de trabajo, independientemente de la variabilidad que exista en sus características físico-químicas.

La planta se construirá en Ecuador, en el cantón Quito de la provincia de Pichincha. La zona está a 2787 m.s.n.m (EXA, 2019). Como se indica en la Figura 2.19, la dirección del hotel AKROS es Av. 6 de diciembre N-34 120 y Checoslovaquia (GoogleMaps, 2019). La planta se ubicará en el subsuelo tres del edificio como se puede observar en la Figura 2.20.



**Figura 2.19.** Localización del hotel AKROS dentro del cantón Quito (GoogleMaps, 2019)



## 2.6 HOMOGENIZACIÓN DEL EFLUENTE

Las aguas residuales de la lavandería y cocina se receptorán en un tanque agitado para la homogenización de los dos efluentes con el objetivo de controlar las variaciones de máximos y mínimos en el caudal, estabilizar las características físico-químicas del agua y proveer un flujo constante a la etapa posterior del tratamiento (Mollinedo, 2017, p. 1).

## 2.7 COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN DEL EFLUENTE

De acuerdo a los resultados de la caracterización de los efluentes, las aguas residuales del hotel AKROS contienen sólidos suspendidos y coloides, los cuales provocan el aumento de turbidez y carga contaminante del efluente; además generan problemas de olor, sabor y color. Estas partículas presentan tiempos de sedimentación relativamente altos y llegan a alcanzar el orden de horas o incluso años. La coagulación y floculación tienen como objetivo desestabilizar, agregar y unir a las partículas suspendidas presentes en el agua para que adquieran una mayor masa y puedan precipitar en tiempos más cortos; es decir, pasar del orden de años a minutos (Romero, 2009, p. 233).

### 2.7.1 COAGULACIÓN

Es un mecanismo de desestabilización de los sólidos suspendidos y coloides mediante la aplicación de sustancias químicas para facilitar su aglomeración y posterior precipitación. De esta manera se logra remover turbidez, materia orgánica y algunos microorganismos presentes en el efluente (Cárdenas, 2000, p. 5).

La sustancia coagulante utilizada para tratar los efluentes del hotel AKROS será el sulfato de aluminio grado técnico. El sulfato de aluminio se asocia con el agua para hidrolizarse y formar  $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ . Estos iones hidratados reaccionan con el agua y su alcalinidad expresada como  $\text{OH}^-$ ,  $(\text{CO}_3)^{2-}$  y  $(\text{HCO}_3)^-$  para generar un compuesto

inestable  $[Al(H_2O)_5(OH)]^{2+}$  que reacciona espontáneamente, reemplazando una molécula de agua por un  $(OH)^-$  hasta formar hidróxido de aluminio trihidratado  $Al(OH)_3(H_2O)_3$ ; el cual es insoluble y se sedimenta (Arboleda, 2000, pp. 52 y 53).

Las especies que tienen un solo ion de aluminio, pueden polimerizarse al reaccionar entre sí y continúan formando compuestos como  $Al_6(OH)_{15}^{3+}$ ,  $Al_8(OH)_{20}^{4+}$  y finalmente  $Al(OH)_3(H_2O)_3$  o  $[Al(OH)_4]^-$ , según el pH. Los hidróxidos de carga positiva son más efectivos en producir la coagulación que los neutros o los de carga negativa ya que trabajan mejor en la reducción del potencial zeta de los aniones; por lo que es importante que el sulfato de aluminio se distribuya en todo el efluente en el menor tiempo posible (no mayor a 10 s) para que los complejos catiónicos neutralicen a los coloides negativos, antes de que continúen sus reacciones de polimerización. Esto se logra determinando el mejor gradiente de velocidad para la agitación rápida en el ensayo de jarras (Romero, 2009, p.240).

Es posible que la coagulación se presente por adsorción o por barrido en función de la turbidez del efluente. En las aguas residuales del hotel AKROS pueden suceder ambos fenómenos debido a su variabilidad. El primer caso ocurre comúnmente en aguas de turbidez mayor a 50 NTU y consiste en la adsorción de los hidróxidos insolubles en los coloides; por otra parte, el segundo caso se presenta en aguas con turbidez menor a 50 NTU y se debe producir una sobresaturación de hidróxido de aluminio para que atrapen a los coloides. Sin embargo, si se sobredosifica el coagulante, el fenómeno puede revertirse y restaurar el coloide pero con carga invertida, lo que aumentaría nuevamente la turbidez (Cárdenas, 2000, p. 23).

### 2.7.2 FLOCULACIÓN

La floculación es la aglomeración de partículas coaguladas mediante el uso de polímeros solubles en agua y de gran masa molecular (de  $10^4$  a  $10^7$  g/mol) que contribuyen a la neutralización de cargas de los coloides y a la formación de redes. Una vez desestabilizados los coloides, se realiza una agitación lenta (con gradiente

menor a  $100 \text{ s}^{-1}$ ) para que los sólidos incrementen sus colisiones entre ellos sin romper los agregados que ya se han formado (Romero, 2006, p. 83).

El tipo de floculación aplicada al tratamiento de los efluentes del hotel será la pericinética, la cual consiste en hacer colisionar y aglomerar las partículas a partir del movimiento generado por una fuente de energía externa que para este caso será de origen mecánico (Cárdenas, 2000 p. 30).

## **2.8 SEDIMENTACIÓN**

Una vez formados los flóculos de hidróxido de aluminio, se trasladará el efluente hacia un sedimentador en donde se precipitarán hacia el fondo para luego ser retirados por un sistema de bombeo; lo cual deja al efluente clarificado y listo para la etapa de ozonización.

La sedimentación es una operación unitaria dentro del tratamiento de aguas residuales que tiene como objetivo remover las partículas sólidas de los efluentes por medio de la fuerza de gravedad al permitir que los sólidos se asienten después de un corto periodo de tiempo, el cual está generalmente comprendido entre 10 y 20 minutos (Huerta, 2017, p. 3).

El tipo de sedimentación empleada en el diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales para el hotel AKROS será la sedimentación secundaria ya que proviene directamente de la etapa de coagulación-floculación en donde se agregaron soluciones que ayudaron a la aglomeración de partículas coloidales para aumentar la velocidad de precipitación de las mismas (Romero, 2006, p.141).

No se consideró la construcción de un sedimentador primario ya que los efluentes presentaron una cantidad promedio de  $0,38 \pm 0,32 \text{ mL/L}$  de sólidos sedimentables según los resultados obtenidos en las pruebas de caracterización, como puede apreciarse en el Anexo AI, la cual no se considera relevante al no superar el límite establecido por la norma ambiental vigente. Esto es debido a que el hotel ha

implementado rejillas en los lavaplatos y en la zona de descarga del agua de lavado de ropa para contener los restos de alimentos y fibras de la cocina y lavandería, respectivamente (HODESA, 2017).

## **2.9 OZONIZACIÓN**

### **2.9.1 MECANISMO DE REACCIÓN DEL OZONO**

El ozono es una molécula compuesta por tres átomos de oxígeno ( $O_3$ ) que tiene la propiedad de ser altamente reactiva, lo que le permite reaccionar de manera no selectiva con los compuestos presentes en la solución para oxidarlos y degradarlos. Puede interactuar con otras sustancias mediante dos tipos de acción cuando es inyectado en el agua (Martínez, 2009, p. 8).

#### **2.9.1.1 Oxidación directa**

El ozono molecular reacciona instantáneamente con una gran variedad de sustancias orgánicas e inorgánicas en reacciones de óxido-reducción, cicloadición, sustitución o adición nucleofílica. La mayoría de estas reacciones presentan cinéticas de segundo orden. Este tipo de reacciones predominan en condiciones de bajo pH (Jiang, Yue, Chen y Gao, 2010, pp. 568-572).

#### **2.9.1.2 Oxidación por radicales libres hidroxilo ( $\cdot OH$ )**

Los radicales hidroxilo se generan mediante la reacción del ozono con el agua y tienen un potencial de oxidación de 2,8 V, por lo que es el oxidante más potente utilizado en el tratamiento de aguas residuales. Su vida media es del orden de microsegundos y aun así, la oxidación generada por éstos es más rápida que la directa. Este tipo de reacciones predominan en condiciones de alto pH como es el caso de las aguas residuales del hotel AKROS (Ríos, 2014, p. 62). La inestabilidad



del ozono en medio acuoso produce complejas reacciones espontáneas de segundo orden de descomposición en cadena de la carga contaminante a partir de los radicales hidroxilo formados (Zhao, Liu, Yang, Tan y Zhao, 2011, pp. 526-533).

### **2.9.2 PRODUCCIÓN DE OZONO**

Debido a su inestabilidad, la generación con ozono debe realizarse en el sitio de trabajo previsto mediante el uso de generadores que provean descargas eléctricas en corona o “silenciosas” donde se hace pasar una corriente de oxígeno a través de dos electrodos separados por un material dieléctrico y un hueco de descargas a la vez que se aplica un voltaje, lo que causa que un electrón fluya a través del hueco de descargas, esto suministrará la energía para disociar las moléculas de oxígeno para consecuentemente formar el ozono. El oxígeno puede ser abastecido por el aire del ambiente o por tanques contenedores de oxígeno puro (Ríos, 2014, p. 60).

### **2.9.3 DESCOMPOSICIÓN DEL OZONO RESIDUAL**

El ozono residual en el aire debe disminuir desde 40,0 mg/L hasta 0,1 mg/L según la Occupational Safety and Health Administration, OSHA: 29 CFR 1910.1020, para evitar problemas a la salud de los trabajadores que se encuentran desempeñando sus funciones cerca de la planta de tratamiento de efluentes, como es el caso del personal de lavandería del hotel AKROS (González, 2015, pp. 409 y 410); por lo tanto, el ozono residual deberá ser transformado a oxígeno mediante algún sistema de degradación (Couper, Fair, Penney y Walas, 2012, p. 109). La vida media del ozono a 20 °C varía entre 20 y 100 h; sin embargo puede ser degradado con un proceso térmico, elevando su temperatura hasta un valor comprendido entre 300 y 360 °C durante 5 segundos mediante un intercambiador de calor, ya que en esas condiciones el tiempo medio de vida se reduce a 0,40 s (Manley y Niegowski, 2010, p. 223).

### 3. CRITERIOS DE DISEÑO

#### 3.1 TANQUES Y EQUIPOS PRINCIPALES

En el dimensionamiento de los tanques y equipos, tanto principales como auxiliares, se tomó en cuenta un margen de seguridad del 20 % (Saravacos y Kostaropoulos, 2002, p. 5). En el diseño de tanques agitados o de almacenamiento, la norma API (2013) recomienda que el espesor no sea menor a 4,76 mm y que se debe agregar un espesor mínimo por corrosión de 1,6 mm para condiciones de desgaste tolerables (p. 56).

De acuerdo con el código ASME sección VIII División 1, se establece que el mínimo espesor para un reactor de diámetro entre 1,0 a 2,0 m, corresponde a 7 mm (Farr y Jawad, 2010, p. 33). Por su parte, las estructuras elaboradas en hormigón requieren espesores de al menos 4 cm (NRMCA, 2008, p. 2).

Los parámetros que servirán para el diseño de las etapas de homogenización, coagulación-floculación y sedimentación secundaria en el sistema de tratamiento de aguas residuales son la potencia disipada y el gradiente de velocidad. Estos valores se calcularon con el volumen de la muestra que se utilizó en cada ensayo, las dimensiones de las paletas de la prueba de jarras especificadas en la Tabla 3.1 y con las velocidades de agitación determinadas en el laboratorio (Silva, 2015, p. 118).

**Tabla 3.1.** Dimensiones de las paletas y volumen utilizado en la prueba de jarras

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Longitud de la paleta	L	m	0,075
Ancho de la paleta	b	m	0,025
Área transversal de la paleta	$A_p$	$m^2$	1,88E-3
Relación Longitud/ancho	$L_p/b_p$	---	3
Volumen de la muestra	V	$m^3$	5E-4

Como criterio de ingeniería se utilizaron los valores de la viscosidad dinámica y de la densidad del agua a 30°C para los efluentes del hotel. En la Tabla 3.2 se encuentran los datos de las propiedades termo físicas asumidas (Perry, Green y Maloney, 2001, p. 2-98).

**Tabla 3.2.** Propiedades físicas y volumen de la muestra utilizada en las pruebas de jarras

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Densidad	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1000
Viscosidad dinámica	$\mu$	kg/m.s	1E-3

(Perry et al., 2001, p. 2-98)

La potencia disipada por unidad de volumen para la prueba de jarras, la cual consta de una sola paleta de agitación, se calculó según la Ecuación 3.1 (Arboleda, 2000, p. 108).

$$P' = \frac{C_D * A_P * \rho * \left[ \frac{2 * \pi * R_P * n}{60} * (1 - K) \right]^3}{2 * V} \quad [3.1]$$

Donde:

$P'$ : Potencia disipada por unidad de volumen (kg.m<sup>2</sup>/(s<sup>3</sup>.m<sup>3</sup>))

$C_D$ : Coeficiente de arrastre

$A_P$ : Área transversal de la paleta (m<sup>2</sup>)

$\rho$ : Densidad de la muestra (kg/m<sup>3</sup>)

$R_P$ : Radio de la paleta (m)

$n$ : Velocidad angular de agitación (rpm)

$K$ : Constante de equilibrio de agitación, se sugiere un valor de 0,25 (Silva, 2015, p. 118)

$V$ : Volumen de la muestra (m<sup>3</sup>)

El número de Reynolds se calculó al aplicar la Ecuación 3.2. Debió comprobarse que tenga un valor mayor o igual a 1 000 para poder calcular el coeficiente de arrastre según la Tabla 3.3 (Arboleda, 2000, p. 122).

$$Re = \frac{L^2 * n * \rho}{60 * \mu} \quad [3.2]$$

Donde:

$L$ : Longitud de la paleta (m)

$\mu$ : Viscosidad dinámica de la muestra (kg/(m.s))

El valor de  $C_D$  se lo obtuvo mediante la relación entre la longitud y el ancho de la paleta ( $L_P/b_P$ ) con la aplicación de los datos expuestos en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3.** Coeficiente de arrastre para distintos valores de  $L_P/b_P$  en paletas planas con Número de Reynolds mayor a  $10^3$

Relación $L_P/b_P$	$C_D$
1	1,10
2	1,15
4	1,19
10	1,29
18	1,40
>18	2,01

(Silva, 2015, p. 128)

A partir de la potencia disipada por unidad de volumen se pudo calcular el gradiente de velocidad de la prueba de jarras como se puede observar en la Ecuación 3.3 (Arboleda, 2000, p. 125).

$$G = \sqrt{\frac{P'}{\mu}} \quad [3.3]$$

Donde:

$G$ : Gradiente de velocidad ( $s^{-1}$ )

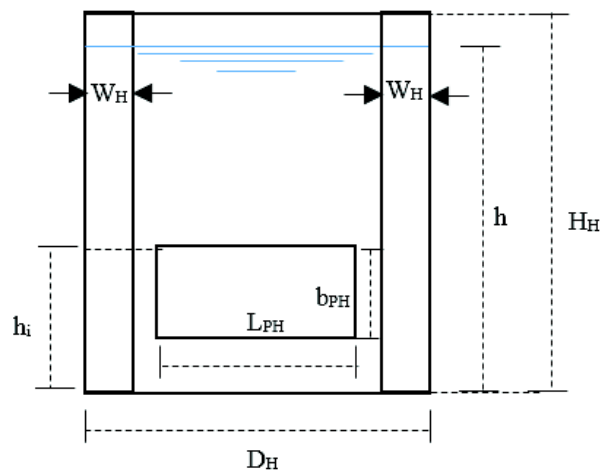
Los valores de la potencia unitaria disipada por unidad de volumen y el gradiente de velocidad de la prueba de jarras con una velocidad de 40 rpm se indican en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4.** Condiciones de agitación de la prueba de jarras para una velocidad de 40 rpm

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Número de Reynolds	Re	---	3 750,00
Coefficiente de arrastre	$C_D$	---	1,17
Potencia disipada por unidad de volumen	$P'$	$\text{kg.m}^2/(\text{s}^3.\text{m}^3)$	3,59
Gradiente de velocidad	G	$\text{s}^{-1}$	60,00

### 3.1.1 TANQUE DE HOMOGENIZACIÓN

Las dimensiones recomendadas para el diseño del tanque de homogenización según Arboleda (2000) se representan en la Figura 3.1 y sus relaciones se enuncian desde la Ecuación 3.4 hasta la Ecuación 3.8 (p. 123).



**Figura 3.1.** Vista frontal del tanque de homogenización  
(Arboleda, 2000, p. 123)

$$2,0 \leq \frac{D_H}{L_{PH}} \leq 6,6$$

[3.4]

$$2,7 \leq \frac{h}{L_{PH}} \leq 3,9 \quad [3.5]$$

$$b_{PH} = \frac{L_{PH}}{8} \quad [3.6]$$

$$W_H = \frac{L_{PH}}{10} \quad [3.7]$$

$$h_i = 1,1 * L_{PH} \quad [3.8]$$

De acuerdo al espacio disponible para la construcción de la planta y a la cantidad aproximada de efluentes que se generan (1,5 m<sup>3</sup>/h), se consideró que se podrán tratar 3 m<sup>3</sup> durante un tiempo máximo de 2 h, por lo tanto se decidió que el volumen de operación del tanque homogenizador será de 3 m<sup>3</sup> con su respectivo diámetro interno D<sub>H</sub> de 1,5 m (HODESA, 2017).

Según la Ecuación 3.9, el nivel de altura del fluido en el tanque sería 1,7 m. Se estableció además un margen de seguridad del 20 % para calcular el volumen nominal del tanque considerando que el valor máximo del diámetro debe ser de 1,5 m (Saravacos y Kostaropoulos, 2002, p. 5).

$$V_{op} = \frac{\pi}{4} * D_H^2 * h \quad [3.9]$$

Donde:

*V<sub>op</sub>*: Volumen de operación del tanque (m<sup>3</sup>)

Los cálculos de las dimensiones del tanque homogenizador y su respectivo agitador se encuentran en el Anexo AX. El gradiente de velocidad adecuado para la homogenización que se obtuvo en las pruebas de jarras fue de 60 s<sup>-1</sup>, este valor debe conservarse en el diseño del tanque homogenizador y servirá para calcular la potencia por unidad de volumen con la ayuda de la Ecuación 3.3.

Sin embargo, como las relación entre las dimensiones del agitador y el recipiente en la prueba de jarras es distinta a la que existe entre el agitador y el tanque

homogenizador de la planta, el número de revoluciones por minuto necesarias para proveer el gradiente de  $60 \text{ s}^{-1}$  puede variar, por lo que es necesario calcular la velocidad angular del tanque homogenizador con la Ecuación 3.1 que provean el mismo gradiente de la prueba de jarras (Silva, 2015, p. 118).

A partir de la potencia disipada por unidad de volumen del tanque de homogenización se puede determinar el valor de la potencia disipada, que es la responsable del movimiento del motor para la agitación del agua; este valor se calcula con la Ecuación 3.10 (Arboleda, 2000, p. 125).

$$P'' = \frac{P' * V}{g * 76,04} \quad [3.10]$$

Donde:

$P$ : Potencia ( $\text{kg.m}^2/\text{s}^3$ )

$P''$ : Potencia unitaria disipada (hp)

$g$ : Aceleración de la gravedad ( $\text{m}/\text{s}^2$ )

### 3.1.2 TANQUE COAGULADOR-FLOCULADOR

Para el cálculo de la potencia disipada por unidad de volumen y del gradiente de velocidad obtenidos en la prueba de jarras para las agitaciones rápida y lenta, a 100 rpm y 40 rpm respectivamente; se siguió el mismo procedimiento que en el diseño del tanque de homogenización. Los resultados se enuncian en la Tabla 3.5.

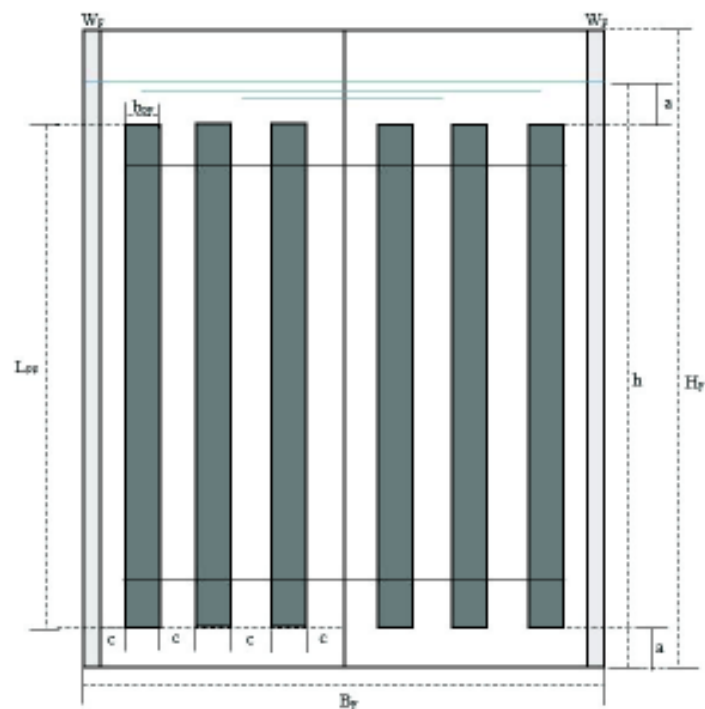
**Tabla 3.5.** Parámetros de diseño del tanque coagulador-floculador

Parámetro	Símbolo	Unidad	Agitación rápida [100 rpm]	Agitación lenta [40 rpm]
Potencia disipada por unidad de volumen	$P'$	$\text{kg.m}^2/(\text{s}^3.\text{m}^3)$	56,05	3,60
Gradiente de velocidad	$G$	$\text{s}^{-1}$	236,75	60

Un tanque floculador debe ser de sección rectangular para instalaciones relativamente pequeñas (Romero, 2006, p.100), por limitaciones de espacio en el hotel AKROS se decidió que el largo y el ancho de este tanque serán de 1,5 m al igual que el diámetro del tanque homogenizador. Como el volumen proveniente del tanque de homogenización es de  $3 \text{ m}^3$ , la altura total del floculador debe evitar desbordamientos por adición de soluciones de sustancias químicas empleadas en el tratamiento.

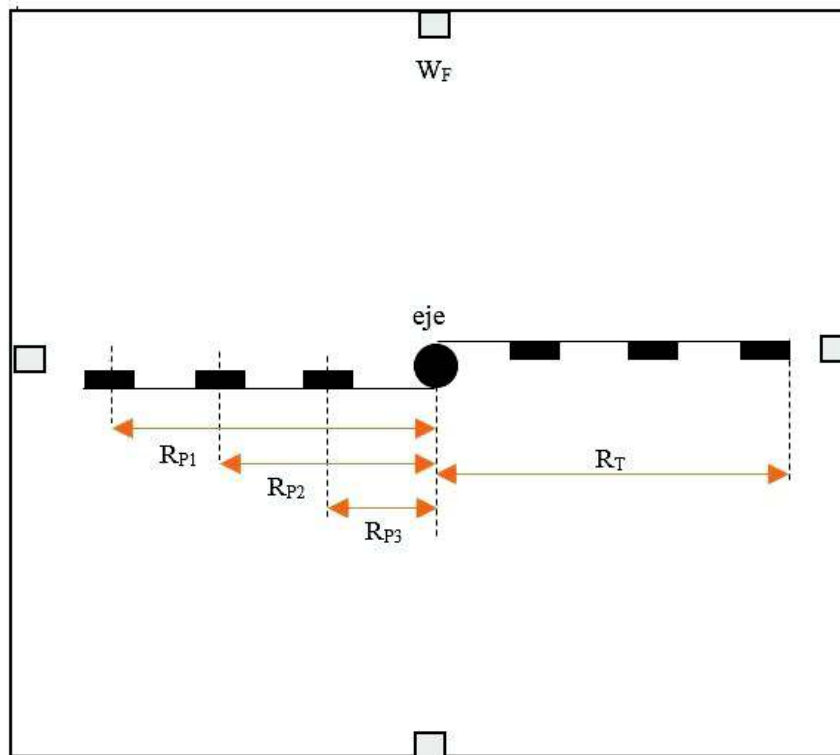
El área total de las paletas debe ser del 20 % de la sección transversal del tanque para evitar la formación de vórtices. La longitud de los agitadores no debe ser menor a 0.6 m y la distancia del extremo de la paleta al borde de la superficie y al fondo del tanque es usualmente 0,3 m. De acuerdo a estos criterios y al área superficial del tanque floculador se llegó a establecer que el número de paletas del agitador debe ser igual a seis (Silva, 2015, p. 136).

En la Figura 3.2 y en la Figura 3.3 se observan las vistas frontal y superior respectivamente de un tanque coagulador-floculador, así como también las notaciones de las dimensiones.



**Figura 3.2.** Vista frontal de un tanque coagulador-floculador





**Figura 3.3.** Vista superior de un tanque coagulador-floculador  
(Silva, 2015, p. 128)

Mediante la Ecuación 3.11 y la Ecuación 3.12 se calculó el área total de las paletas, considerando un valor del 20 % de la sección transversal del tanque. La longitud de las paletas se obtuvo de acuerdo a la Ecuación 3.13. El ancho de las paletas se calculó en función del área total de las paletas, su longitud y el número de paletas asumidas como se observa en la Ecuación 3.14 (Silva, 2015, p. 136).

$$A_{TF} = B_F * h \quad [3.11]$$

Donde:

$A_{TF}$ : Área de la sección transversal del floculador ( $m^2$ )

$B_F$ : Ancho del floculador (m)

$h$ : Altura del nivel del líquido (m)

$$A_{PF} = \frac{20}{100} * A_{TF} \quad [3.12]$$

Donde:

$A_{PF}$ : Área total de las paletas ( $m^2$ )

$$L_{PF} = h - 2(a) \quad [3.13]$$

Donde:

$L_{PF}$ : Longitud de las paletas (m)

$a$ : Distancia del extremo de la paleta al borde de la superficie y al fondo del tanque, es usualmente 0,3 m (Silva, 2015, p. 136).

$$A_{PF} = L_{PF} * b_{PF} * N_{PF} \quad [3.14]$$

Donde:

$N_{PF}$ : Número total de travesaños del agitador

$b_{PF}$ : Ancho de cada paleta (m)

Se consideró que el ancho de los deflectores será de 0,05 m al igual que en el tanque homogenizador. El ejemplo de cálculo de las dimensiones del tanque coagulador-floculador se encuentran en el Anexo AX.

Con los gradientes de velocidad de la Tabla 3.5 se calcularon los valores de las potencias disipadas por unidad de volumen mediante la Ecuación 3.3 y con este resultado se procedió a calcular el número de revoluciones por minuto necesarias para mantener el gradiente de velocidad mediante la Ecuación 3.15 (Silva, 2015, p. 128).

$$P' = \frac{C_D * \rho * L_{PF} * b_{PF} \left[ \frac{2 * \pi * n * (1 - K)}{60} \right]^3 * \sum (R_{Pi}^3)}{V} \quad [3.15]$$

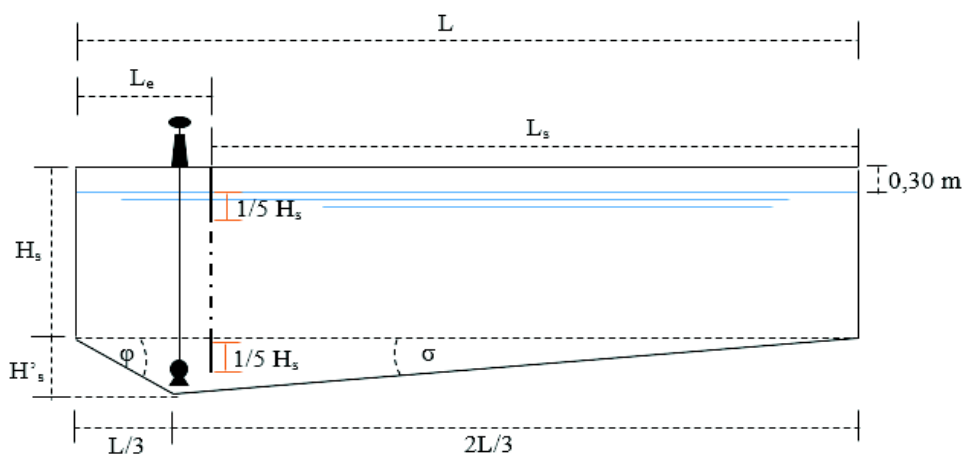
Donde:

$R_{pi}$ : Distancias desde el eje de agitación hasta la parte media de cada travesaño (m).

### 3.1.3 SEDIMENTADOR SECUNDARIO

Los decantadores son generalmente horizontales y entre este grupo pueden ser de forma rectangular o circular; aunque los rectangulares los más comunes en las plantas de tratamiento de aguas (Romero, 2006, p. 147).

La vista del esquema que se tomará como base para el dimensionamiento del sedimentador secundario de sección rectangular se presenta en la Figura 3.4. Debido al espacio limitado para la PTAR esta estructura deberá estar soterrada, por lo tanto deberá dimensionarse con la menor profundidad posible para facilitar su construcción. Según SEDAPAR (2017), la profundidad de un sedimentador debe ser de al menos 1 m y su relación con la longitud se define según la Ecuación 3.16 (p. 1).



**Figura 3.4.** Vista lateral de un sedimentador horizontal rectangular (Romero, 2006, p. 169)

$$5 \leq \frac{L_s}{H_s} \leq 25$$

[3.16]

Donde:

$L_s$ : Longitud de la zona de sedimentación (m)

$H_s$ : Altura de la zona de sedimentación (m)

El diseño de un sedimentador de sección rectangular es básicamente alargado y la relación entre el ancho y el largo varía según la Ecuación 3.17 (Arboleda, 2000, p. 250).

$$0,1 \leq \frac{B_s}{L_s} \leq 0,4 \quad [3.17]$$

Donde:

$B_s$ : Ancho del sedimentador (m)

Para obtener el caudal de diseño que recibirá el sedimentador como se indica en la Ecuación 3.18 (CEPIS, 2005, p. 20), se asumió una velocidad promedio de sedimentación de los flóculos de hidróxido de aluminio de 0,07 cm/s la cual ya ha sido comprobada experimentalmente en estudios de tratamiento de aguas por coagulación-floculación (Pérez, 2009, p. 109).

$$Q_d = A_s * v_s \quad [3.18]$$

Donde:

$Q_d$ : Caudal de diseño (m<sup>3</sup>/s)

$A_s$ : Área superficial del sedimentador (m<sup>2</sup>)

$v_s$ : Velocidad de sedimentación de las partículas de hidróxido de aluminio (m/s)

En la Ecuación 3.19, se presenta la forma de calcular el tiempo de retención del efluente en el sedimentador (CEPIS, 2005, p. 21).

$$t_r = \frac{A_s * H_s}{60 * Q_d} \quad [3.19]$$

Donde:

$t_r$ : Tiempo de residencia en el sedimentador (min)

### 3.1.3.1 Zona de entrada

La zona de entrada cumple la función de distribuir uniformemente el agua en toda el área transversal del decantador para disipar la energía que trae consigo, disminuyendo las perturbaciones ocasionadas por el paso desde el coagulador-floculador hacia el sedimentador, lo cual evita que los flóculos formados se rompan o vuelvan a suspenderse. Se recomienda que la zona de entrada tenga una longitud comprendida entre 0,7 y 1,0 m para facilitar la limpieza de la misma (CEPIS, 2005, p. 18).

En estudios experimentales se demostró que a 100 diámetros aguas debajo de los orificios de un tabique difusor, la velocidad del agua disminuye en un 94 %. La velocidad horizontal en la zona de sedimentación suele ser menor a 1 cm/s. Por lo tanto se asumirá como criterio de diseño, que la velocidad en la zona de entrada  $v_0$  será de 15 cm/s, con lo que luego de 100 diámetros de orificio aguas abajo, llegará a una velocidad horizontal de 0,9 cm/s (Arboleda, 2000, p. 252). La velocidad horizontal promedio del fluido en la zona de sedimentación se puede calcular de acuerdo a la Ecuación 3.20 (CEPIS, 2005, p. 21).

$$v_h = \frac{Q_d}{B_s * H_s} \quad [3.20]$$

Donde:

$v_h$ : Velocidad horizontal promedio en el sedimentador (m/s)

En estudios realizados con suspensiones floculentas en sedimentadores experimentales se determinó que la velocidad horizontal promedio óptima para evitar que las partículas vuelvan a suspenderse es menor o igual que 0,5 cm/s (Pérez, 2009, p. 112).

### 3.1.3.2 Diseño del tabique difusor

El tabique difusor cumple con la función de conservar el gradiente de velocidad del floculador en la entrada al sedimentador para evitar la ruptura de los flóculos, esto se logra al otorgar el mismo valor de G en los orificios del tabique difusor como se describe en la Ecuación 3.21 (Arboleda, 2000, p. 254). En la Tabla 3.6 se muestran las características del efluente a la entrada del sedimentador secundario.

**Tabla 3.6.** Características del fluido en la zona de entrada del sedimentador

Parámetro	Unidades	Símbolo	Valor
Velocidad del flujo en la entrada del orificio	cm/s	$v_0$	15
Viscosidad cinemática del fluido	cm <sup>2</sup> /s	$\nu$	0,01
Gradiente de velocidad	s <sup>-1</sup>	G	60

$$G = \sqrt{\frac{f * v_0^3}{\nu * 8 * R}} \quad [3.21]$$

Donde:

- $f$ : Constante que puede variar entre 0,02 y 0,04
- $v_0$ : Velocidad del flujo en la entrada de los orificios (m/s)
- $\nu$ : Viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s)
- $R$ : Radio hidráulico; para orificios es igual a  $d/4$
- $d$ : Diámetro del orificio (m)

Una vez obtenido el diámetro del orificio se calculó el área total de los orificios  $A_0$ , y el área de cada orificio  $a_o$  de acuerdo a la Ecuación 3.22 y a la Ecuación 3.23, respectivamente (SEDAPAR, 2017, p. 1).

$$A_o = \frac{Q_d}{v_o} \quad [3.22]$$

Donde:

$A_o$ : Área total ocupada por los orificios en el tabique difusor ( $m^2$ )

$$a_o = \frac{\pi}{4} * (d)^2 \quad [3.23]$$

Donde:

$a_o$ : Área de un orificio del tabique difusor ( $m^2$ )

Por lo tanto, el número de orificios se obtuvo con la Ecuación 3.24 (CEPIS, 2005, p. 20).

$$n_o = \frac{A_o}{a_o} \quad [3.24]$$

Donde:

$n_o$ : Número de orificios en el tabique difusor

### 3.1.3.3 Zona de salida

El diseño adecuado de la estructura de salida evita que los flocs cercanos a ella vuelvan a suspenderse en el flujo. Se ha establecido que el ancho del vertedero de salida debe controlar que el caudal por metro de vertedero esté comprendido entre

1,67 y 3,3 L/(s.m). Entre menor sea esta carga, más eficiente será el vertedero pero resultaría más complicado y costoso su diseño; de modo que se asumió que sea igual a 3,3 L/(s.m). En la Ecuación 3.25, se describe el cálculo del ancho de la zona de salida (Arboleda, 2000, p. 257).

$$E_s = \frac{1\,000 * Q_d}{q} \quad [3.25]$$

Donde:

$q$ : Caudal del vertedero por unidad de longitud (L/(s.m))

$E_s$ : Ancho del vertedero de la zona de salida del sedimentador (m)

El modo de calcular la altura que alcanzará el agua en un vertedero rectangular de acuerdo a las dimensiones seleccionadas, se expresa en la Ecuación 3.26 (SEDAPAR, 2007, p. 1).

$$H_2 = \left( \frac{Q_d}{1,84 * E_s} \right)^{2/3} \quad [3.26]$$

Donde:

$H_2$ : Altura del nivel del agua en el vertedero rectangular (m)

#### 3.1.3.4 Zona de lodos

La zona de lodos debe purgarse cada una o dos horas y la sección de la compuerta de evacuación debe ser mayor o igual a 0,3 m. Para calcular el caudal al cual deben ser evacuados los lodos se debe tener en cuenta la velocidad de arrastre como se muestra en la Ecuación 3.27 (Romero, 2006, pp. 186, 187).



$$v_A = \sqrt{\frac{8 * K}{f} * g * (S_S - 1) * d_p} \quad [3.27]$$

Donde:

$v_A$ : Velocidad de arrastre (m/s)

$K$ : Constante del floc

$g$ : Aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

$f$ : Factor de fricción del material de construcción

$S_S$ : Gravedad específica del floc

$d_p$ : Diámetro de la partícula (m)

Para el factor  $f$  se tomó un valor de 0,03 ya que que el sedimentador se construirá con concreto y la constante  $K$  es igual a 0,06 para sólidos flocculentos (Arboleda, 2000, p. 261). Según los resultados visuales en los ensayos de coagulación-floculación se estimó que el diámetro de los flóculos formados fue de 3,0 mm. La gravedad específica del floc de hidróxido de aluminio es de aproximadamente 1,05 (Pérez, 2009, p. 124).

En función de la velocidad de arrastre necesaria para evacuar los lodos formados y del diámetro de la sección circular recomendada se calculó el caudal de evacuación de los lodos como se indica en la Ecuación 3.28; considerando una compuerta de sección transversal circular con diámetro de 0,3 m (Romero, 2006, p. 188).

$$Q_e = \frac{\pi}{4} * (d_e)^2 * v_A * 1\,000 \quad [3.28]$$

Donde:

$Q_e$ : Caudal de evacuación de lodos (L/s)

$d_e$ : Diámetro de la sección transversal circular de evacuación de lodos (m)

La cantidad de los lodos formada a partir de 3 m<sup>3</sup> de efluente se estimó con la información experimental expresada en la Tabla 1.36. En la Ecuación 3.29 se muestra el cálculo realizado para el caudal de formación lodos por hora de trabajo (HODESA, 2017).

$$Q_{lodo} = V_{lodo} * V_M \quad [3.29]$$

Donde:

$Q_{lodo}$ : Caudal de formación de lodo (L/h)

$V_{lodo}$ : Volumen de lodos formado por el tratamiento de 1 L de efluente (mL)

$V_M$ : Volumen del efluente a tratar por cada hora de trabajo (m<sup>3</sup>/h)

En la Ecuación 3.30 se muestra el cálculo del tiempo de evacuación de lodos por cada dos horas de trabajo de la lavandería y la cocina del hotel.

$$t_e = \frac{Q_{lodo} * 2}{Q_e} \quad [3.30]$$

Donde:

$t_e$ : tiempo necesario para la evacuación de la zona de lodos al aplicar un caudal  $Q_e$  (s)

La profundidad de la zona de lodos se calculó con la relación de la tangente del ángulo de inclinación de la zona de sedimentación cuyo valor asumido fue de 8° según las recomendaciones de diseño, con base a la Ecuación 3.31 (CEPIS, 2005 p, 18).

$$\text{Tan}(\sigma) = \frac{3 * H'_s}{2 * L} \quad [3.31]$$

Donde:

$H'_s$ : Profundidad de la zona de lodos (m)

$\sigma$ : Ángulo de inclinación de la zona de sedimentación en grados sexagesimales.

Los cálculos realizados para las dimensiones del sedimentador y su tabique difusor se presentan en el Anexo AX.

### 3.1.4 REACTOR DE OZONIZACIÓN

De acuerdo a los resultados experimentales presentados en el Apartado 1.3.6, se debe aplicar una dosis de 400 mg de ozono por cada litro de muestra para que la concentración de tensoactivos se encuentre por debajo del límite permisible. La capacidad del equipo ozonizador que se deberá adquirir se calculó de acuerdo a la Ecuación 3.32 (Veliz et al., 2016, p. 21) si se desean tratar 3 m<sup>3</sup> durante una hora. Los cálculos y realizados se presentan en el Anexo AX.

$$Q(O_3) = \frac{D(O_3) * V_E}{1\ 000 * t_c} \quad [3.32]$$

Donde:

$D(O_3)$ : Dosis aplicada de ozono (mgO<sub>3</sub>/LMuestra)

$Q(O_3)$ : Caudal de ozono en la entrada (kgO<sub>3</sub>/h)

$V_E$ : Volumen del efluente (m<sup>3</sup>)

$t_c$ : Tiempo de contacto (h)

El diseño del reactor de ozonización de los 3 m<sup>3</sup> de efluentes se realizó sobre la base de los criterios de diseño mostrados de la Ecuación 3.33 a la Ecuación 3.35 (Perry et al., 2001, pp. 23-44) con un margen de seguridad del 20 % en la altura del tanque (Saravacos y Kostaropoulos, 2002, p. 5) y con la adición de 0,6 m por la formación de espuma; se recomienda además que la altura del difusor medida desde la base del tanque sea de 0,60 m (Langlais, Reckhow y Brink, 2010, p. 413).

$$V_{OR} = \frac{\pi}{4} * D_R^2 * h_R \quad [3.33]$$

Donde:

$V_{OR}$ : Volumen de operación del reactor ( $m^3$ )

$D_R$ : Diámetro del tanque de ozonización (m)

$h_R$ : Nivel del líquido en el tanque (m)

$$H_R = h_R + 0,2 * h_R \quad [3.34]$$

Donde:

$H_R$ : Altura del tanque de ozonización (m)

$$H_R = 5D_R + 0,6 m \quad [3.35]$$

Los cálculos de las dimensiones del tanque de ozonización se puede visualizar en el Anexo AX.

## **3.2 TANQUES, EQUIPOS SECUNDARIOS Y ACCESORIOS**

### **3.2.1 TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE SUSTANCIAS QUÍMICAS**

El tamaño de los tanques se diseñó de manera que almacenen la cantidad de soluciones necesaria para el tratamiento de los efluentes durante 12 horas de trabajo por el espacio disponible para la construcción de la planta y la facilidad de manipulación de los mismos. El ejemplo de cálculo del dimensionamiento de los tanques secundarios se presenta en el Anexo AX.

Para que el líquido contenido en los tanques pueda fluir hacia el tanque coagulador-floculador en el momento de abrir una válvula de control, es necesario que logre vencer la presión atmosférica local si está cerrado; por lo tanto se ha decidido que estos tanques presenten apertura al ambiente para que la misma presión ambiental

contribuya en este proceso (Streeter, 2000, p. 305). Sin embargo, el tanque de ácido sulfúrico no puede estar abierto al ambiente ya que sus vapores son nocivos para la salud de los trabajadores y corrosivo para otros equipos y tanques (CTR, 2018, pp. 1-6), por lo que deberá permanecer cerrado y se requerirá la instalación de una bomba que ayude a la aplicación de esta sustancia.

El tanque de polímero L-1560 se diseñó para que contenga la cantidad de solución necesaria para 36 horas; es decir, 3 días de 12 horas de trabajo, ya que la solución de este polímero tiene un tiempo de vida útil máximo de 3 días (LIPEQ S.A., 2012).

El tanque de hidróxido de calcio al 1 % es una solución sobresaturada y necesita agitarse antes de añadirse al efluente para evitar que precipiten los sólidos en exceso y mantener una mezcla homogénea (Arboleda, 2000, p. 103); por lo que para su diseño se han seguido los procedimientos y consideraciones tomadas en el tanque homogenizador. El ejemplo de cálculo se encuentra en el Anexo AX.

Según las pruebas definitivas del tratamiento de los efluentes, se estima que el tiempo necesario para disminuir el pH del agua a 4 es de 2 min y para aumentarlo a 10 es de 5 min. Se utilizó la Ecuación 3.36 y la Ecuación 3.37 para calcular el diámetro interno de las tuberías, necesario para aplicar las dosis requerida de coagulante y floculante en un lapso de 10 s cada uno. La velocidad promedio de descarga se asumió considerando un nivel medio de la altura del líquido contenido en cada tanque de almacenamiento de sustancias químicas (Çengel y Boles, 2014, p. 225).

$$\bar{v} = \sqrt{2 * g * \bar{h}} \quad [3.36]$$

$$D = \sqrt{\frac{C * 4}{t_a * \bar{v} * \pi}} \quad [3.37]$$

Donde:

- $\bar{v}$ : Velocidad promedio (m/s)  
 $\bar{h}$ : Altura promedio (m)  
 $D$ : Diámetro interno de la tubería (m)  
 $C$ : Volumen de sustancia química aplicada a 3 m<sup>3</sup> de efluente (m<sup>3</sup>)  
 $t_a$ : Tiempo de aplicación (s)

### 3.2.2 BOMBAS

La cabeza de bomba se calcula con la aplicación de la Ecuación de Bernoulli 3.38 descrita y desarrollada a continuación (Streeter, 2000, p. 305):

$$H_B = \frac{P_D - P_S}{\gamma} + \frac{v_D^2 - v_S^2}{2g} + Z_D - Z_S + hf_{SD} \quad [3.38]$$

Donde:

- $H_B$ : Cabeza de la bomba (m)  
 $P_D$ : Presión en la zona de descarga (Pa)  
 $P_S$ : Presión en la zona de succión (Pa)  
 $\gamma$ : Peso específico en (Pa/m)  
 $v_D$ : Velocidad de descarga (m/s)  
 $v_S$ : Velocidad de succión en (m/s)  
 $g$ : Aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)  
 $Z_D$ : Altura de descarga respecto al nivel de la bomba (m)  
 $Z_S$ : Altura de succión respecto al nivel de la bomba (m)  
 $hf_{SD}$ : Pérdidas por fricción y accesorios en las zonas de succión y descarga (m)

Las pérdidas totales por fricción y accesorios se determinan según la Ecuación 3.39 tanto en la zona de succión como en la zona de descarga (Streeter, 2000, p. 514).

$$hf_{SD} = hf_S + h_{Sacc} + hf_D + h_{Dacc} \quad [3.39]$$

Donde:

$hf_S$ : Pérdidas por fricción en la línea de succión (m)

$h_{Sacc}$ : Pérdidas por accesorios en la línea de succión (m)

$hf_D$ : Pérdidas por fricción en la línea de descarga (m)

$h_{Dacc}$ : Pérdidas por accesorios en la línea de descarga (m)

Las pérdidas por fricción y por accesorios se determinan según la Ecuación 3.40 y la Ecuación 3.41 respectivamente, que se aplican tanto para la línea de succión como para la línea de descarga (Streeter, 2000, p. 514).

$$hf_S = \frac{f * L_S}{D_S} * \frac{v_S^2}{2g} \quad [3.40]$$

Donde:

$f$ : Coeficiente de fricción adimensional

$L_S$ : Longitud de la línea de succión (m)

$D_S$ : Diámetro interno de la tubería en la zona de succión (m)

$$h_{Sacc} = \sum K_{acc} * \frac{v_S^2}{2g} \quad [3.41]$$

Donde:

$\sum K_{acc}$ : Sumatoria de las constantes de los accesorios involucrados

El factor de fricción se lo determinó al emplear primeramente el número de Reynolds y al aplicar el diagrama de Moody adjuntado en el Anexo AXI, en función de la rugosidad del material considerado para la tubería. Para las tuberías de la PTAR se utilizará PVC cuya rugosidad es de 7E-6 m (Streeter, 2000, p. 292).

La potencia de la bomba se determinó según la Ecuación 3.42 considerando un margen de seguridad del 10% (Streeter, 2000, p. 511; Peters y Timmerhaus, 2002, p. 37).

$$P_{bomba} = \frac{Q_i * \gamma_i * H_B}{746} \quad [3.42]$$

Donde:

$P_{bomba}$ : Potencia de la bomba (hp)

$Q_i$ : Caudal de diseño de la bomba (m<sup>3</sup>/s)

$\gamma_i$ : Peso específico del fluido en (kg.m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>)

$H_B$ : Cabeza de la bomba (m)

La altura dinámica total de la bomba (TDH por sus siglas en inglés) se obtuvo con la diferencia entre la presión de descarga y la presión de succión, según la Ecuación 3.44 (Streeter, 2000, p. 513).

$$TDH = (H_D - H_S) * \gamma \quad [3.44]$$

Donde:

$TDH$ : Altura dinámica total (Pa)

La carga neta positiva en succión disponible (NPSHD) se calcula sobre la base de la Ecuación 3.45 y es un parámetro que ayuda a prever que la bomba centrífuga no cavite. Este valor debe ser mayor a la carga neta positiva en succión requerida (NPSHR) para que la bomba trabaje de manera segura (Palacio, Tapias y Saldarriaga, 2005, pp. 32-33). Los valores del NPSHR son entregados por el fabricante.

$$NPSHD = \frac{P_S - P_V}{\gamma} - (hf_S + h_{sacc}) + Z_S + \frac{v_S^2}{2g} \quad [3.45]$$



Donde:

*NPSHD*: Carga neta en succión disponible (m)

*P<sub>v</sub>*: Presión de vapor del fluido (Pa)

### 3.2.3 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DE LOS TANQUES Y REACTORES

Como se ha mencionado, la PTAR del hotel AKROS es relativamente pequeña, tanto por el espacio disponible para su construcción, como por el volumen de aguas residuales que va a tratar; además, se trata de efluentes comunes de cocina y lavandería que no generan un ambiente capaz de provocar una corrosión agresiva a las tuberías y tanques por lo que se ha optado por elegir un material polimérico debido a su bajo costo en comparación con los aceros inoxidable (Díaz et al., 2014, p. 1).

Se eligió al polietileno de alta densidad como el material de construcción para el tanque homogenizador y el cloruro de polivinilo (PVC) para el reactor de ozonización, por su resistencia al ozono y a ambientes ácidos y alcalinos (Alonso, 2015, p. 601).

El PVC también presenta resistencia a ambientes marinos según un estudio de selección de materiales para la construcción de arrecifes marinos, en donde se demostró que se corroe 0,034 g en 15 días expuesto a ambientes salinos extremos: agua de mar, temperaturas de hasta 70 °C y velocidades de agitación de hasta 500 rpm (Díaz et al., 2014, p. 5).

Para aumentar la resistencia a la corrosión de los tanques de PVC, se los puede recubrir internamente con teflón, ya que este material no se corroe en ambientes ácidos, básicos ni presencia del ozono (Alonso, 2015, p. 601); o también, recubrirlos con pigmentos fosfatos o ferrosos elaborados con un porcentaje aproximado de 30 % de PVC, lo cual aumenta la eficiencia de la anticorrosión entre un 60 a 80 %.

Estos pigmentos, contrariamente a los cromados, no son tóxicos para el ambiente (Kalenda, Kalendová y Veselý, 2006, pp. 192-197).

El coagulador-floculador y el sedimentador secundario se construirán en hormigón. Las causas de corrosión química en este material se deben principalmente a la carbonatación, en donde el dióxido de carbono del ambiente reacciona con el hidróxido de calcio del concreto para formar carbonato de calcio que se desprende; aunque también se ve afectado por la erosión del material ocasionada por las corrientes y variaciones de temperatura de los fluidos externos. Sin embargo, es un material moldeable, resistente a la corrosión y que tiene una vida útil de 50 años aproximadamente si la mezcla utilizada para prepararlo es de buena calidad; además, actualmente se cuenta con inhibidores de corrosión compuestos por aminoalcoholes que se usan como protección preventiva en una gran variedad de ambientes agresivos, incluidas las construcciones soterradas como en este caso (Salas, 2003, pp. 11-16).

## **4. DISEÑO DE LA PLANTA**

### **4.1 DIAGRAMAS DE BLOQUES BPD Y DIAGRAMA DE FLUJO PFD**

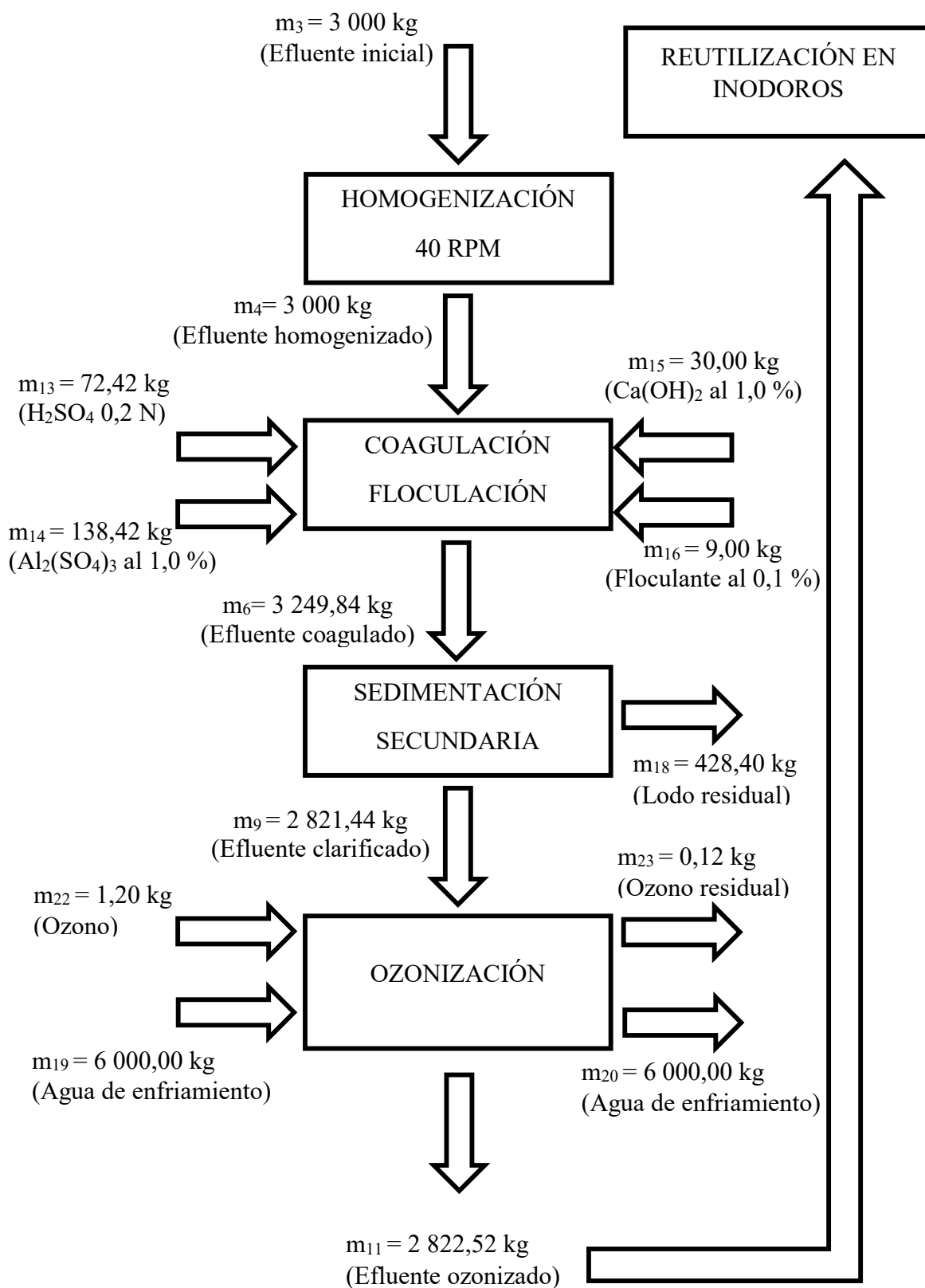
Los diagramas de bloques (BPD) y de flujo (PFD) sirven para describir un proceso industrial de forma resumida y de esta manera conocer sus operaciones unitarias más relevantes y las cantidades de materia y energía involucrada; así como también información de las dimensiones de los equipos que se utilizan. Son una guía básica que permiten al observador tener una idea acerca de la secuencia que sigue el proceso y las corrientes involucradas en el mismo (Sinnott, 2005, p. 124).

#### **4.1.1 DIAGRAMA DE BLOQUES BPD**

Los diagramas BPD presentan un esquema sencillo del proceso, en el cual se indican sus operaciones unitarias, la cantidad de materia involucrada y algunas de las condiciones de trabajo más relevantes (Sinnott, 2005, p. 134). En la Figura 4.1 se describe el proceso general propuesto que se seguirá para disminuir la carga contaminante de las aguas residuales provenientes de la cocina y de la lavandería hotel AKROS.

#### **4.1.2 DIAGRAMA DE FLUJO PFD**

Los diagramas de flujo PFD logran representar el proceso con mayor grado de detalle que los BPD. Los equipos pueden graficarse a escala y se muestran sus características más importantes; además, se agregan los flujos de energía involucrados y el control básico de la planta (Sinnott, 2005, p. 143). De la Figura 4.2 a la Figura 4.5 se muestran los diagramas PFD de la planta de tratamiento de efluentes diseñada para el hotel AKROS.



**Figura 4.1.** Diagrama de bloques del proceso de tratamiento de 3 m<sup>3</sup> de efluentes líquidos del hotel AKROS recolectados durante 2 horas de trabajo

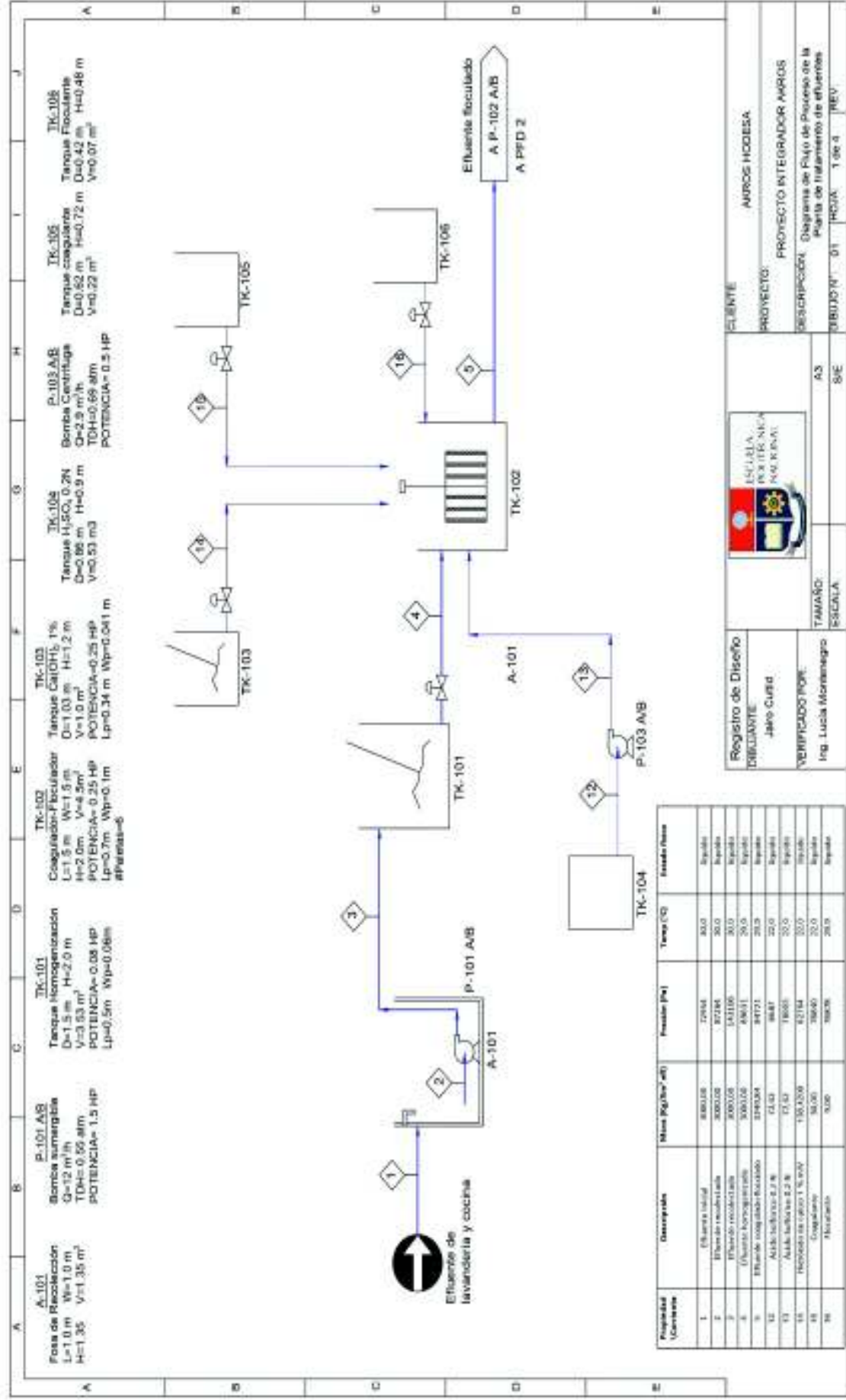


Figura 4.2. Diagrama PFD de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del hotel AKROS 1/4

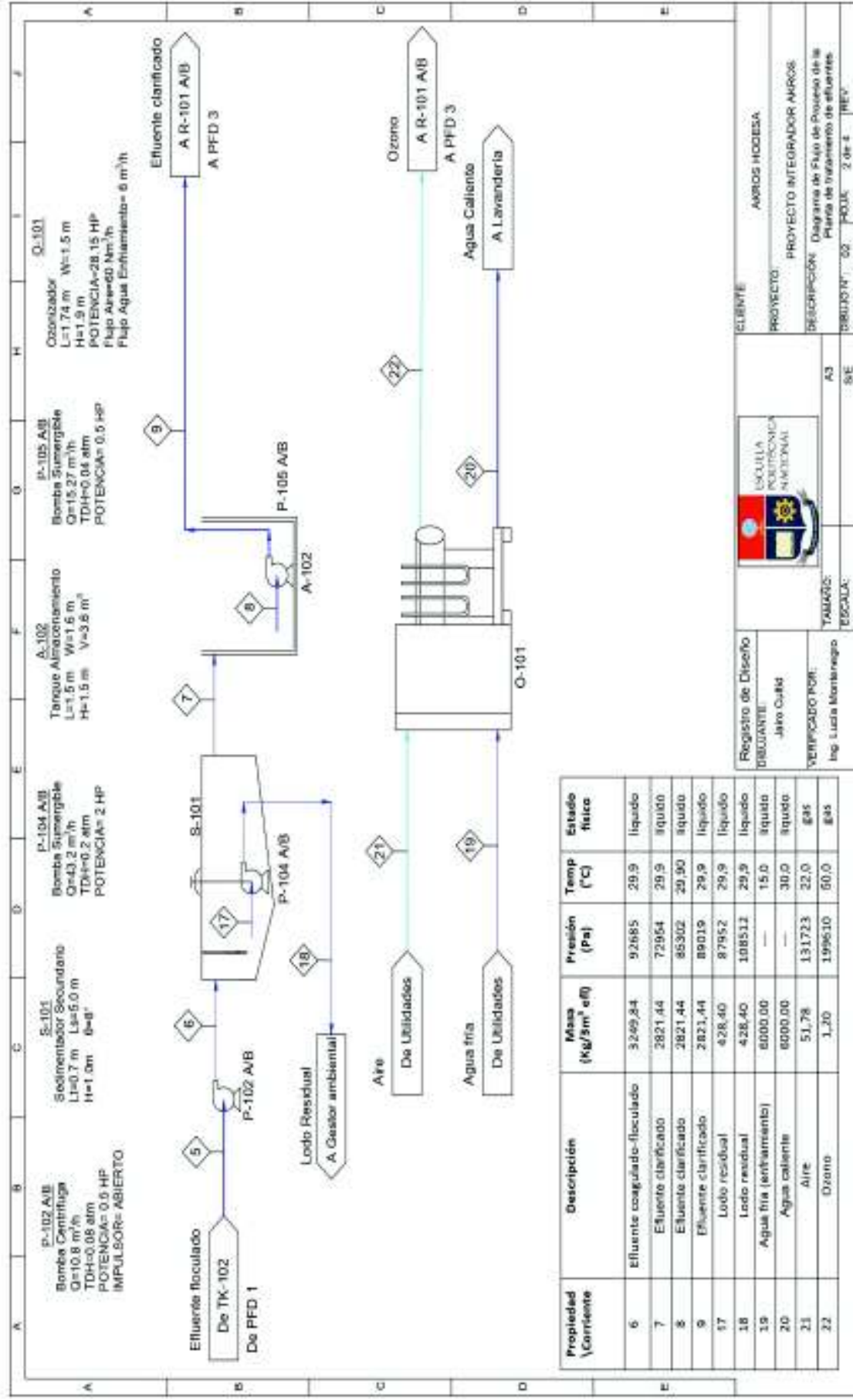
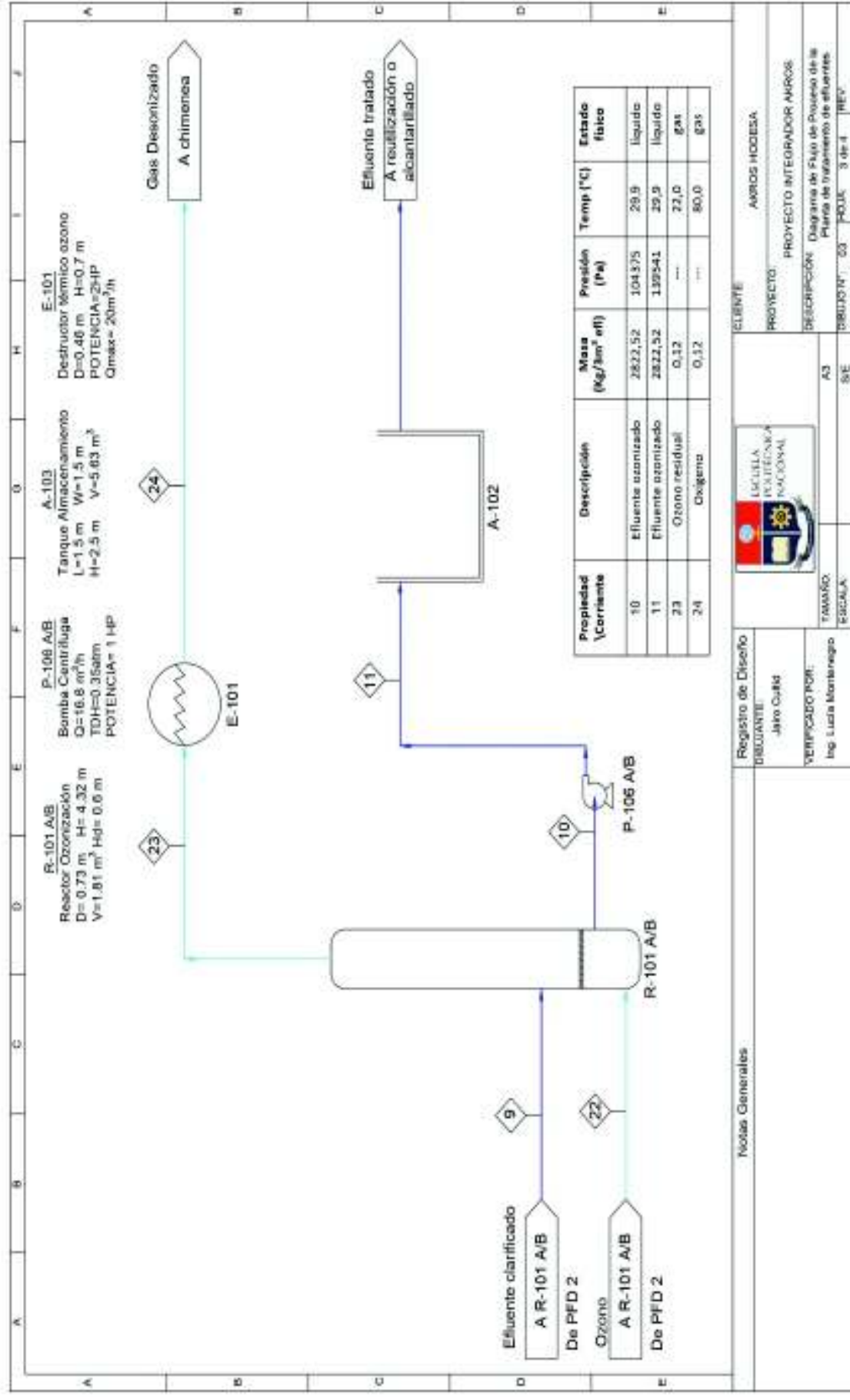


Figura 4.3. Diagrama PFD de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del hotel AKROS 2/4



Notas Generales

Registro de Diseño  
 DISEÑANTE: Jairo Cuñid  
 VERIFICADO POR: Ing. Lucia Montenegro

ESCALA: SE

CLIENTE: AKROS HOJESA

PROYECTO: PROYECTO INTEGRADOR AKROS















DESCRIPCIÓN: Diagrama de Flujo de Proceso de la Planta de tratamiento de efluentes.

TRABAJO: 03

FECHA: 3 de 1

REV.

Figura 4.4. Diagrama PFD de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del hotel AKROS 3/4

	EQUIPO BOMBA CENTRÍFUGA	<b>NOMENCLATURA</b>	EQUIPO
	FOSA DE RECOLECCIÓN	A-100	FOSA DE RECOLECCIÓN
	COAGULADOR / FLOCULADOR	P-100	BOMBA CENTRÍFUGA / SUMERGIBLE
	TANQUE DE AGITACIÓN	S-100	SEDIMENTADOR
	ALIMENTACIÓN PRINCIPAL	TK-100	TANQUE
	SEDIMENTADOR	O-100	OZONIZADOR
	OZONIZADOR	R-100	REACTOR OZONIZACIÓN
	VÁLVULA	E-100	DESTRUCTOR TÉRMICO OZONO
	DESTRUCTOR TÉRMICO OZONO	<b>LINEAS DE PROCESO</b>	
	REACTOR OZONIZACIÓN	<b>SÍMBOLO (según coloración)</b>	<b>PROCESO</b>
			Línea Principal
			Línea Secundaria
			Línea de ozono
Registro de Diseño	 <b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b> <small>SCIENTIA HOMINUM SALUS</small>	CLIENTE:	AKROS HODESA
DIBUJANTE: Jairo Cultid		PROYECTO:	PROYECTO INTEGRADOR AKROS
VERIFICADO POR: Ing. Lucía Montenegro		DESCRIPCIÓN:	Diagrama de Flujo de Proceso de la Planta de Tratamiento de Efluentes
	TAMAÑO:	A4	
	ESCALA:	S/E	DIBUJO N°: 04
			HOJA: 4 de 4
			REV:

**Figura 4.5.** Diagrama PFD de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del hotel AKROS 4/4



## 4.2 BALANCE DE MASA

En la Tabla 4.1 se presentan los resultados del balance de materia para cada corriente de la planta de tratamiento de aguas residuales, utilizando las líneas de los diagramas PFD detallados desde la Figura 4.2 hasta la Figura 4.4. Se consideró el tratamiento de 3 m<sup>3</sup> de efluentes recolectados durante dos horas, los ejemplos de cálculo se muestran en el Anexo AXII.

**Tabla 4.1.** Resultados del balance de materia para la PTAR

No. Corriente en PFD	Descripción	Masa [kg]
3	Ingreso del efluente al tanque homogenizador	3 000,00
4	Efluente homogenizado	3 000,00
13	Ácido sulfúrico 0,2 N	72,42
14	Hidróxido de calcio 1 %	138,42
15	Coagulante 1 %	30,00
16	Floculante 0,1 %	9,00
6	Efluente coagulado-floculado	3 249,84
18	Lodos residuales de la sedimentación	428,40
9	Efluente clarificado	2 821,44
22	Entrada de ozono	1,20
19	Agua de enfriamiento	6 000,00
11	Efluente ozonizado	2 822,52
23	Ozono residual	0,12

## 4.3 PLANIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA

La planificación en el funcionamiento de una planta es una herramienta útil que permite observar de manera general, la cantidad de tiempo involucrada en cada etapa del proceso. Se plantea de manera jerárquica y secuencial en cuanto a las decisiones y plazos involucrados, para lograr una integración de todas las operaciones unitarias existentes (Viveros y Salazar, 2010, p. 1).

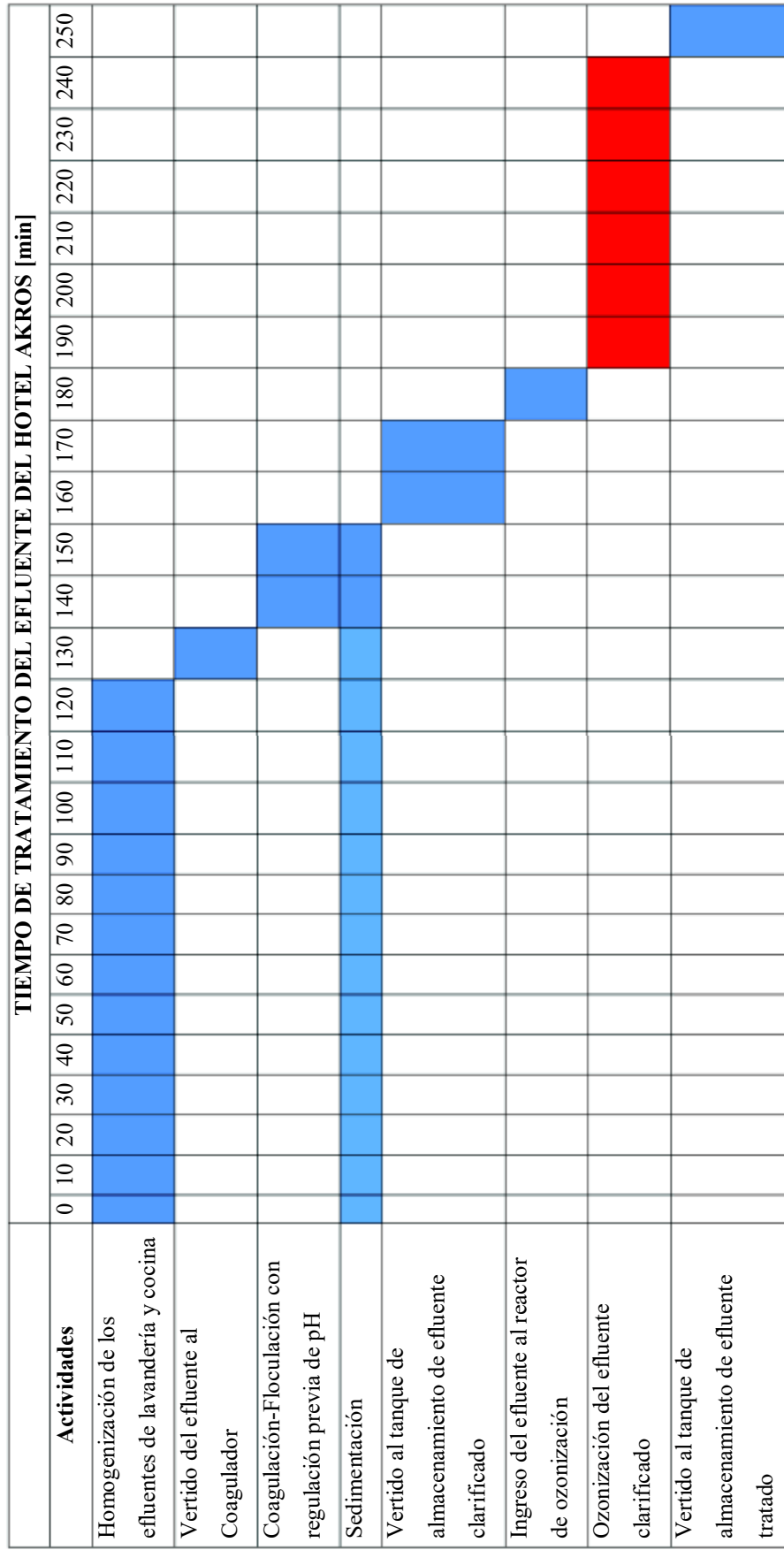
Existen algunos métodos para establecer el cronograma de actividades como por ejemplo: el diagrama de Gantt, el diagrama de PERT o el método de la cadena crítica; pero el seleccionado para el caso particular de la PTAR del hotel AKROS es el diagrama de Gantt por su facilidad de construcción, su rápida interpretación y porque además el sistema de tratamiento propuesto es relativamente sencillo (Olalde, 2006).

El diagrama de Gantt es una representación gráfica de la programación de procesos, mediante el cual se puede representar y monitorear el desarrollo de todas las actividades involucradas durante un periodo de tiempo establecido. En el eje de las ordenadas se colocan las tareas a desarrollarse mientras que en el de las abscisas se ubica el tiempo en las unidades convenientes para su lectura; lo cual permite observar gráficamente la secuencia de las etapas y su duración (Rodríguez, 2014, p. 2). Se representan las zonas con mayor riesgo con color rojo; que en este caso son los reactores de ozonización por la elevada presión que existe cuando se produce la reacción entre el efluente y el ozono dentro de un reactor cerrado. En cambio, con el color azul se indica la duración de las actividades que no representan riesgos (Naranjo, 2018, p. 42).

En la Tabla 4.2 se observa el diagrama de Gantt, elaborado con la ayuda del software Microsoft Office Project, utilizado para describir la secuencia de actividades que ocurren en la PTAR del hotel. El tiempo se indica en minutos y se considera el tratamiento de 3 m<sup>3</sup> de efluentes en días de alta demanda de las actividades de la cocina y la lavandería. Este proceso se repetirá 6 veces para tratar 18 m<sup>3</sup> de efluentes. La jornada laboral de la lavandería, de donde provienen entre el 70 y 85 % de los efluentes, inicia a las 07h00 y se extiende hasta las 19h00 (HODESA, 2017).

El tratamiento culminaría a las 21h10 si se considera un día de alta demanda. La PTAR cuenta con alarmas para prevenir el desbordamiento de líquido en el tanque de homogenización o en el coagulador-floculador. En caso de activarse, las actividades de la lavandería se suspenderán hasta que los tanques se hayan vaciado para poder receptor nuevos volúmenes de agua residual.

**Tabla 4.2.** Diagrama de Gantt para el tratamiento de los efluentes del hotel AKROS



#### 4.4 BALANCE DE ENERGÍA

En esta sección se evalúa la energía requerida para el funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales por parte de los equipos como son: agitadores, bombas, ozonizador y el sistema de destrucción del ozono residual. En la Tabla 4.3 se muestran los requerimientos de energía para los equipos de la PTAR, de acuerdo a la planificación del funcionamiento desarrollada en la Sección 4.3. El cálculo de la potencia de las bombas se encuentra en el Anexo XIII; con base a estos resultados, en el Anexo XIV se muestran las características de las tuberías requeridas para la construcción de la PTAR.

**Tabla 4.3.** Necesidades energéticas de la planta de tratamiento de efluentes líquidos

Equipo	Identificación en PFD	Potencia [kW]	Tiempo de funcionamiento [h]	Consumo [kW-h]
Bomba sumergible	P-101A/B	1,12	1,50	1,68
	P-105A/B	0,37	1,11	0,41
	P-104A/B	1,50	0,06	0,09
Bomba centrífuga	P-102A/B	0,37	1,70	0,629
	P-106A/B	0,75	1,00	0,75
	P-103A/B	0,37	0,15	0,06
Motores de agitación	TK-101	0,11	12,00	1,32
	TK-102	0,11	1,50	0,16
	TK-102	0,18	0,10	0,02
	TK-103	0,24	0,65	0,16
Ozonizador	O-101	21,00	7,20	151,20
Destructor térmico de ozono	E-101	1,50	7,20	10,80
Consumo de energía diario [kW-h]				167,29
Consumo de energía mensual [kW-h]				5 018,73

Las pérdidas de calor por conducción a través de las paredes de los tanques o de los reactores se despreciaron ya que estarán contruidos con concreto o polímero respectivamente. Estos materiales se caracterizan por tener un bajo coeficiente de transferencia de calor, generalmente menor a 0,8 W/m\*K, lo que les convierte en aislantes térmicos ya que la transferencia de calor es mínima de acuerdo a la ley

de conducción de Fourier; en la que se establece que la transferencia de calor es directamente proporcional a la conductividad térmica del material y al área transversal al flujo de energía (Inzunza, 2013, p. 4; FAO, 2007, p. 5).

A pesar de que la dilución del ácido sulfúrico es una reacción fuertemente exotérmica, el calor desprendido en la etapa de la regulación del pH del efluente con la solución de ácido sulfúrico 0,2 N tampoco se considerará en este caso. Esto es debido a que la cantidad de energía liberada por la adición de esta solución diluida sobre los 3 m<sup>3</sup> del efluente será de aproximadamente 146,62 W, por lo que se considera despreciable (Perry et al., 2001, p. 2-310).

#### **4.5 DISPOSICIÓN EN PLANTA (LAYOUT) Y PLANOS DE ELEVACIÓN (VISTAS)**

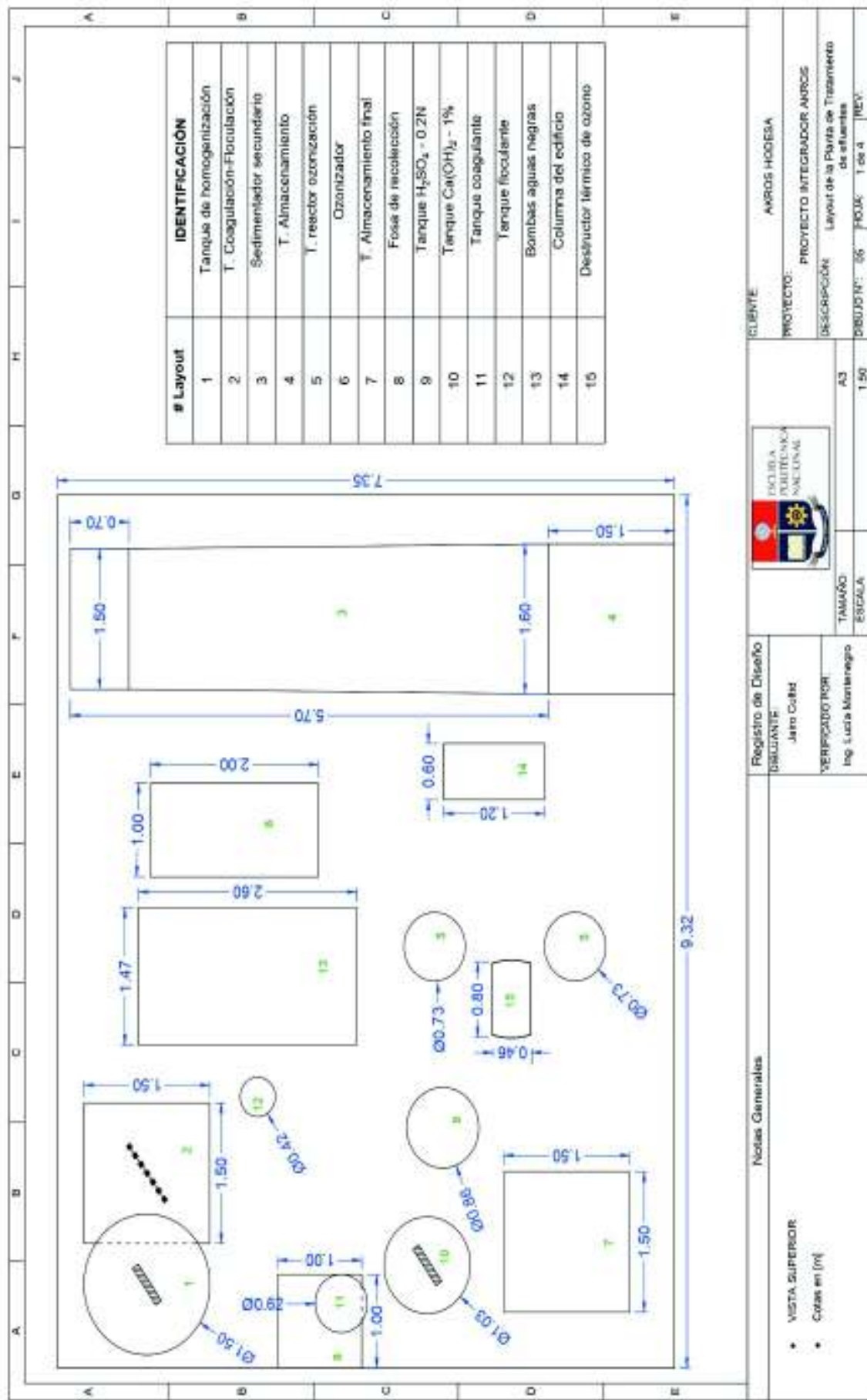
El Layout y los planos de elevación de vistas permiten observar la distribución de los equipos principales en el espacio disponible para la construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales del hotel AKROS, el cual es de 9,32 m por 7,40 m; lo que resulta en una superficie de 68,97 m<sup>2</sup>.

##### **4.5.1 DISPOSICIÓN EN PLANTA (LAYOUT)**

De la Figura 4.6 a la Figura 4.9 se puede visualizar la disposición de las operaciones unitarias principales en el espacio designado para la PTAR. La distribución de los espacios se presentan en una escala 1:50.

##### **4.5.2 PLANOS DE ELEVACIÓN (VISTAS)**

Los esquemas con las vistas superior y frontal de los equipos principales de la planta de tratamiento de efluentes se presentan de la Figura 4.10 a la Figura 4.13.



<p>Registro de Diseño                  DISEÑANTE: Jairo Cullid                  VERIFICADO POR: Ing. Lucía Montenegro</p>		<p>ESCALA: TAMAÑO A3                  1:50</p>		<p>CLIENTE: AKROS HOJESA</p>	
<p>Notas Generales</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• VISTA SUPERIOR</li> <li>• Cotas en [m]</li> </ul>		<p>PROYECTO: PROYECTO INTEGRADOR AKROS</p>		<p>DESCRIPCIÓN: Layout de la Planta de Tratamiento de efluentes</p>	
		<p>PROYECTO: PROYECTO INTEGRADOR AKROS</p>		<p>HOJA: 1 de 4</p>	
		<p>ESCALA: TAMAÑO A3</p>		<p>REV:</p>	

Figura 4.6. Lay Out de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del hotel AKROS 1/4

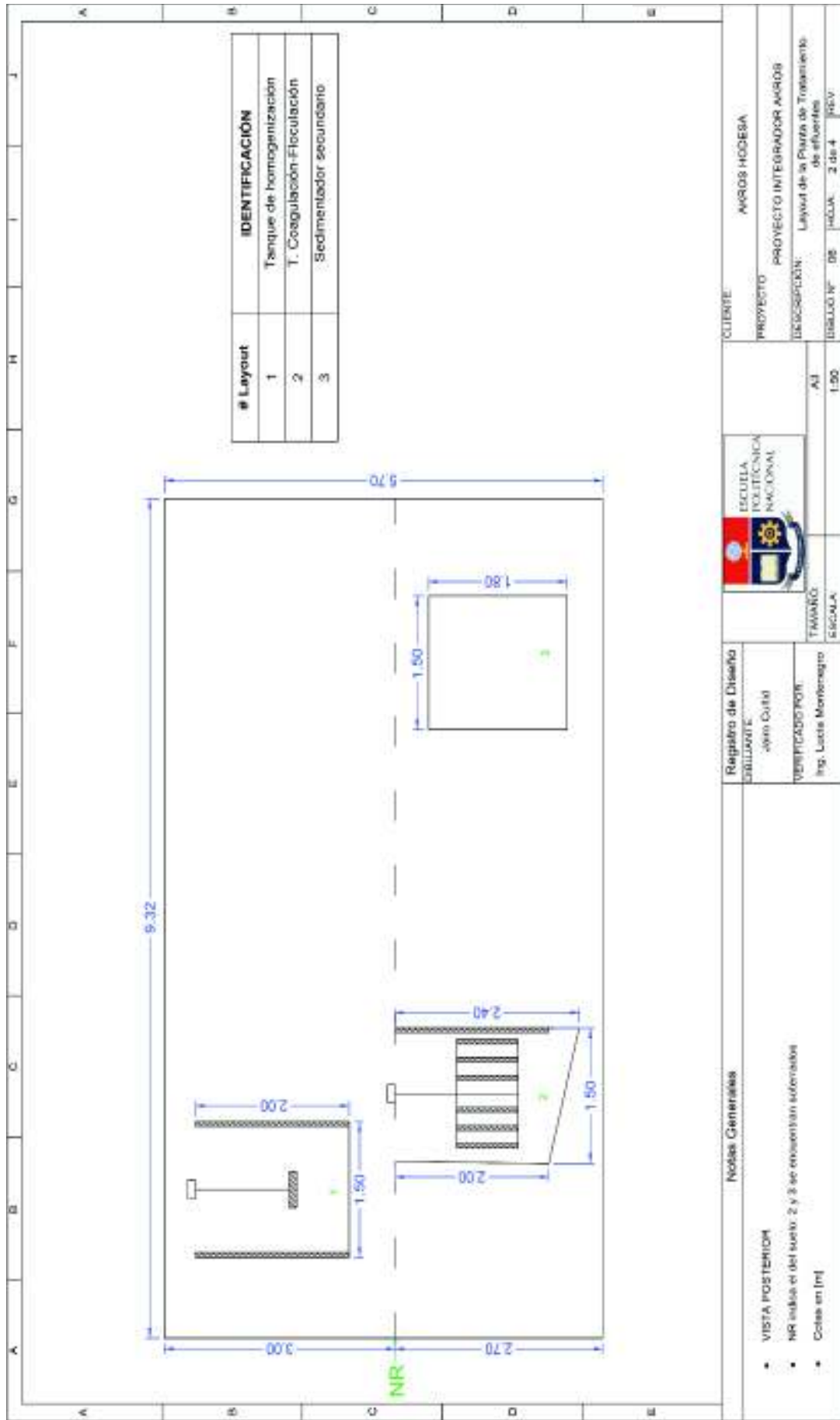
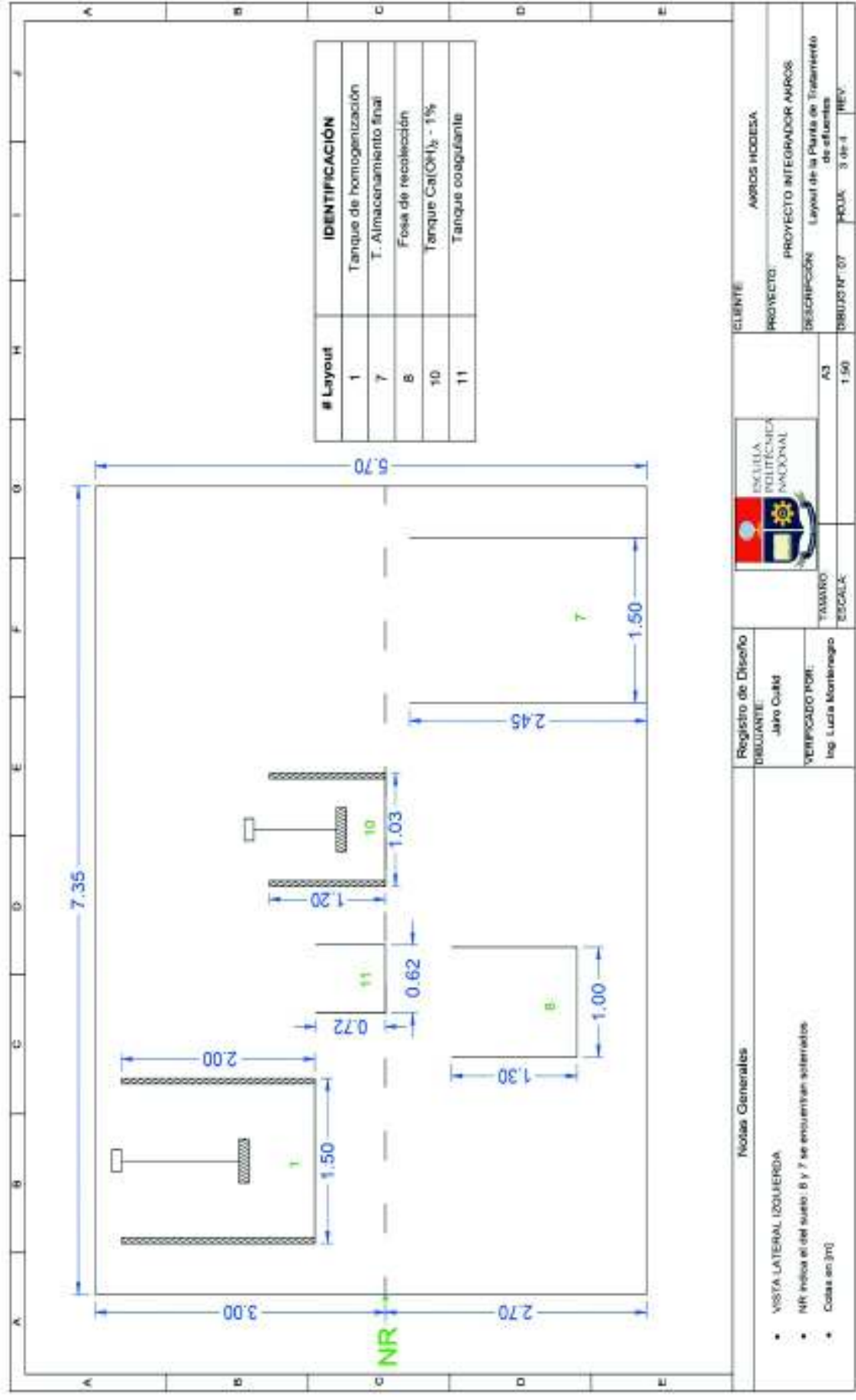


Figura 4.7. Lay Out de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del hotel AKROS 2/4



**Notas Generales**

- VISTA LATERAL (IZQUIERDA)
- MR indica el suelo. 6 y 7 se encuentran sellados
- Cotas en [m]

**Registro de Diseño**  
 DIBUJANTE: Jairo Quilit  
 VERIFICADO POR: Ing. Lucia Montenegro



**CLIENTE:** AKROS INGENIERIA  
**PROYECTO:** PROYECTO INTEGRADOR AKROS  
**DESCRIPCIÓN:** Layout de la Planta de Tratamiento de efluentes  
 DIBUJOS N° 07: PLAN: 3 de 3 REV.:

**Figura 4.8.** Lay Out de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del hotel AKROS 3/4



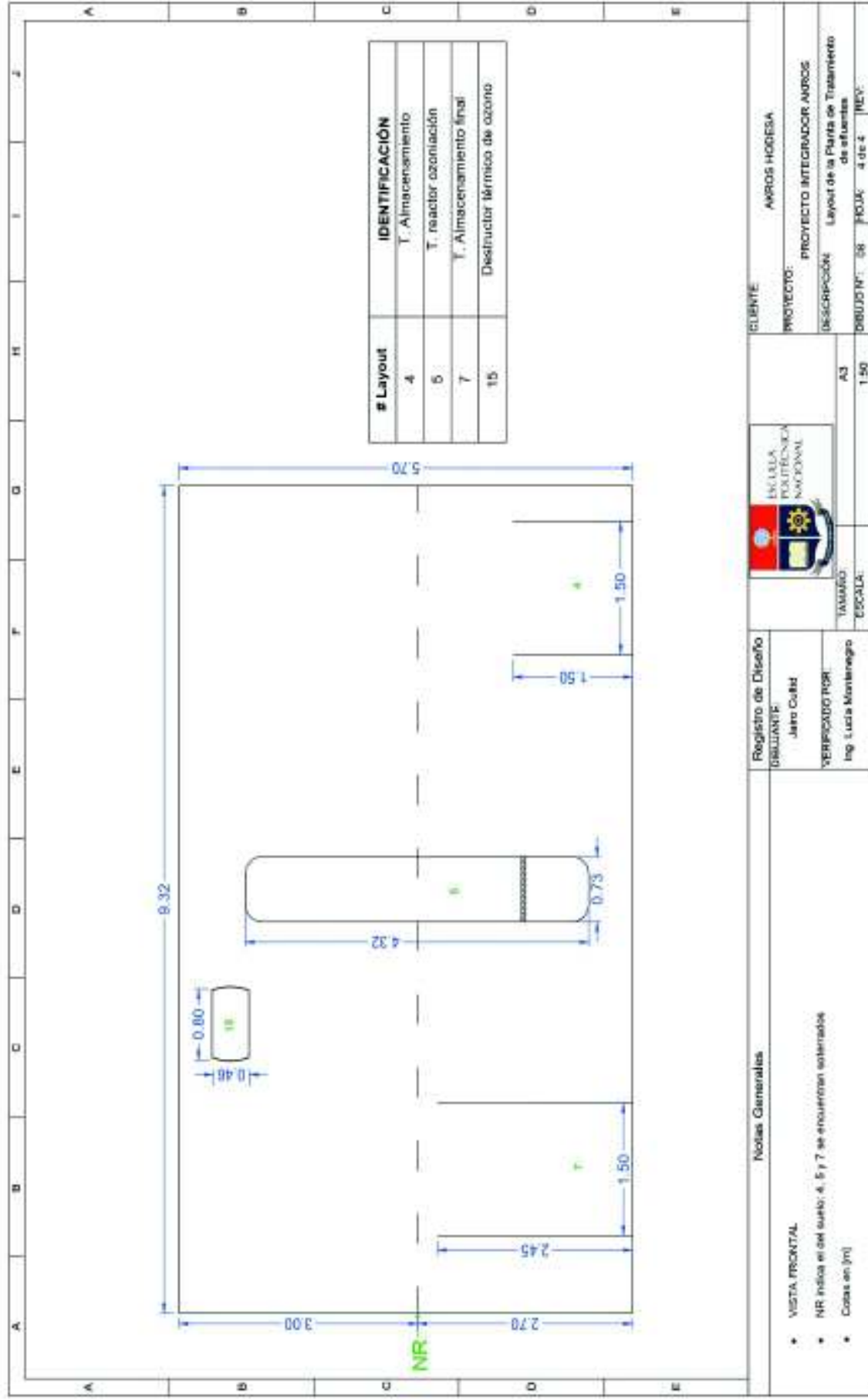


Figura 4.9. Lay Out de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del hotel AKROS 4/4

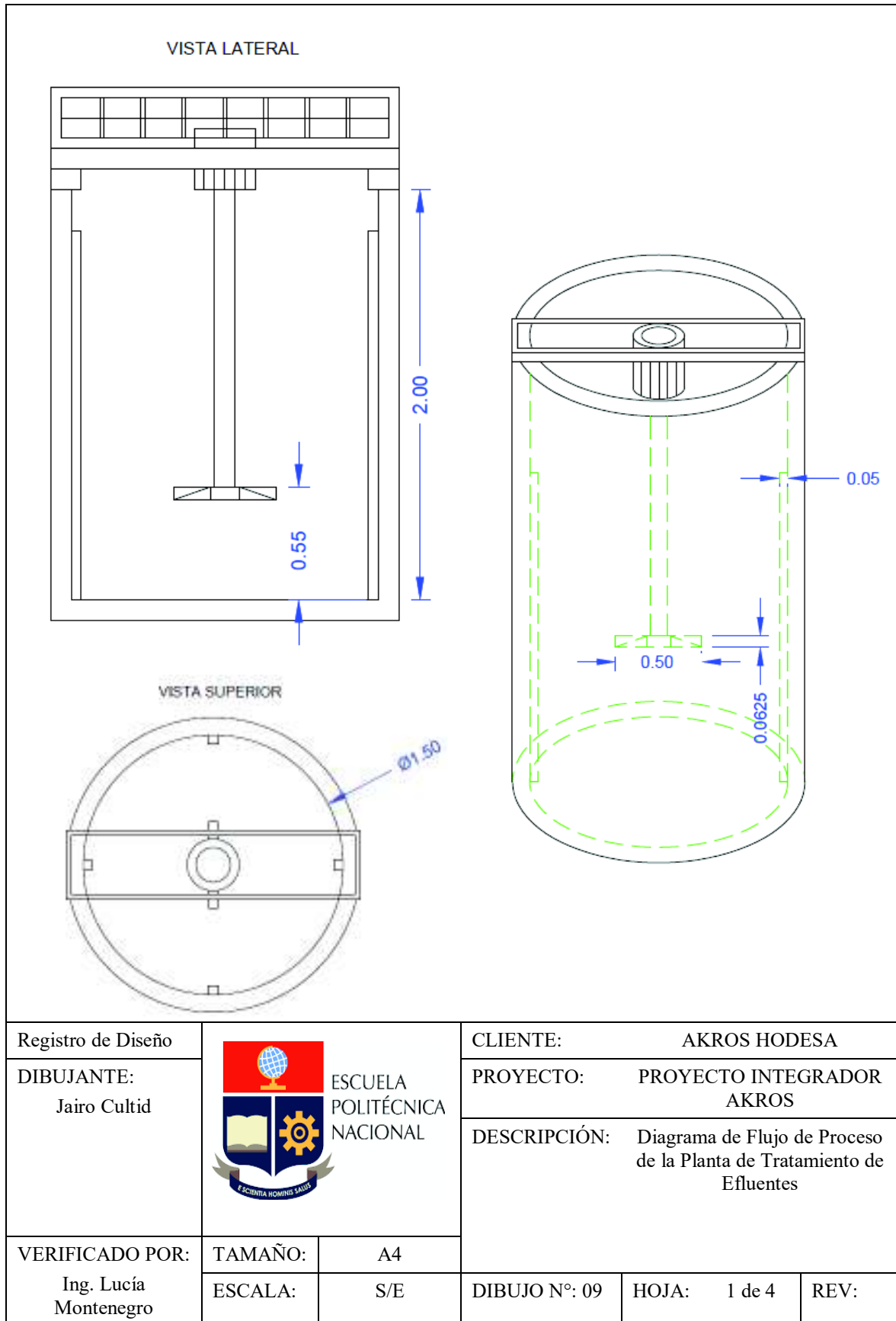
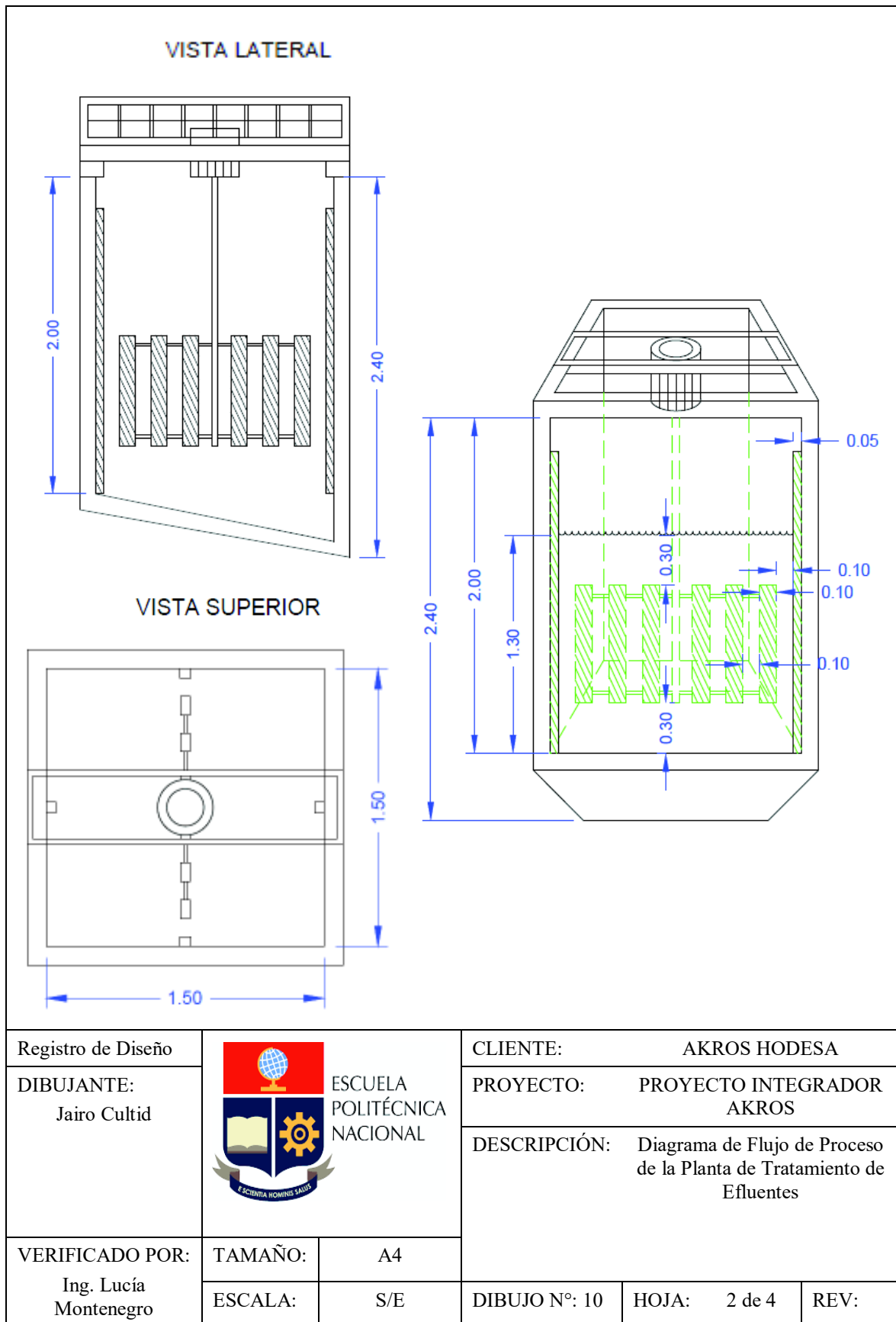
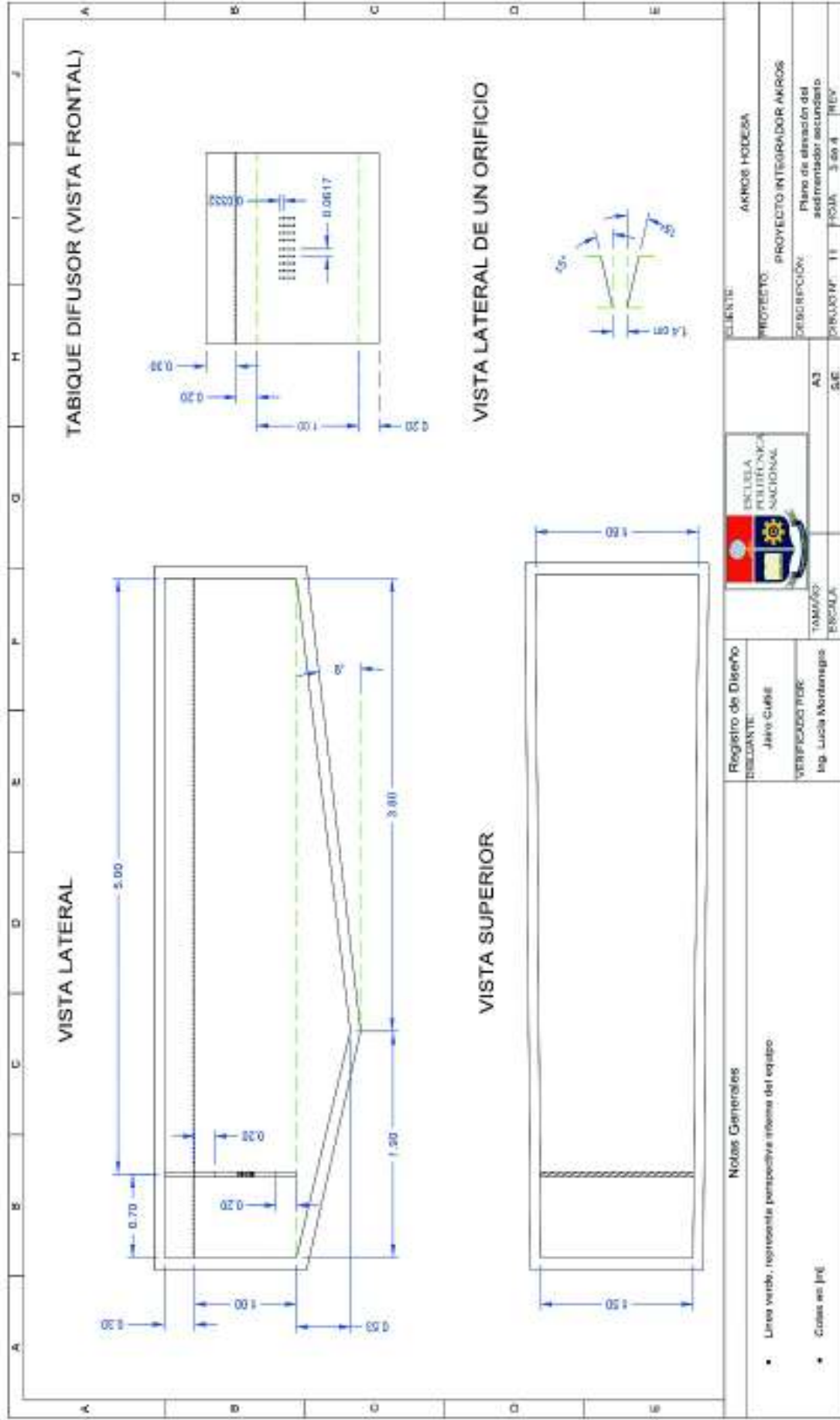


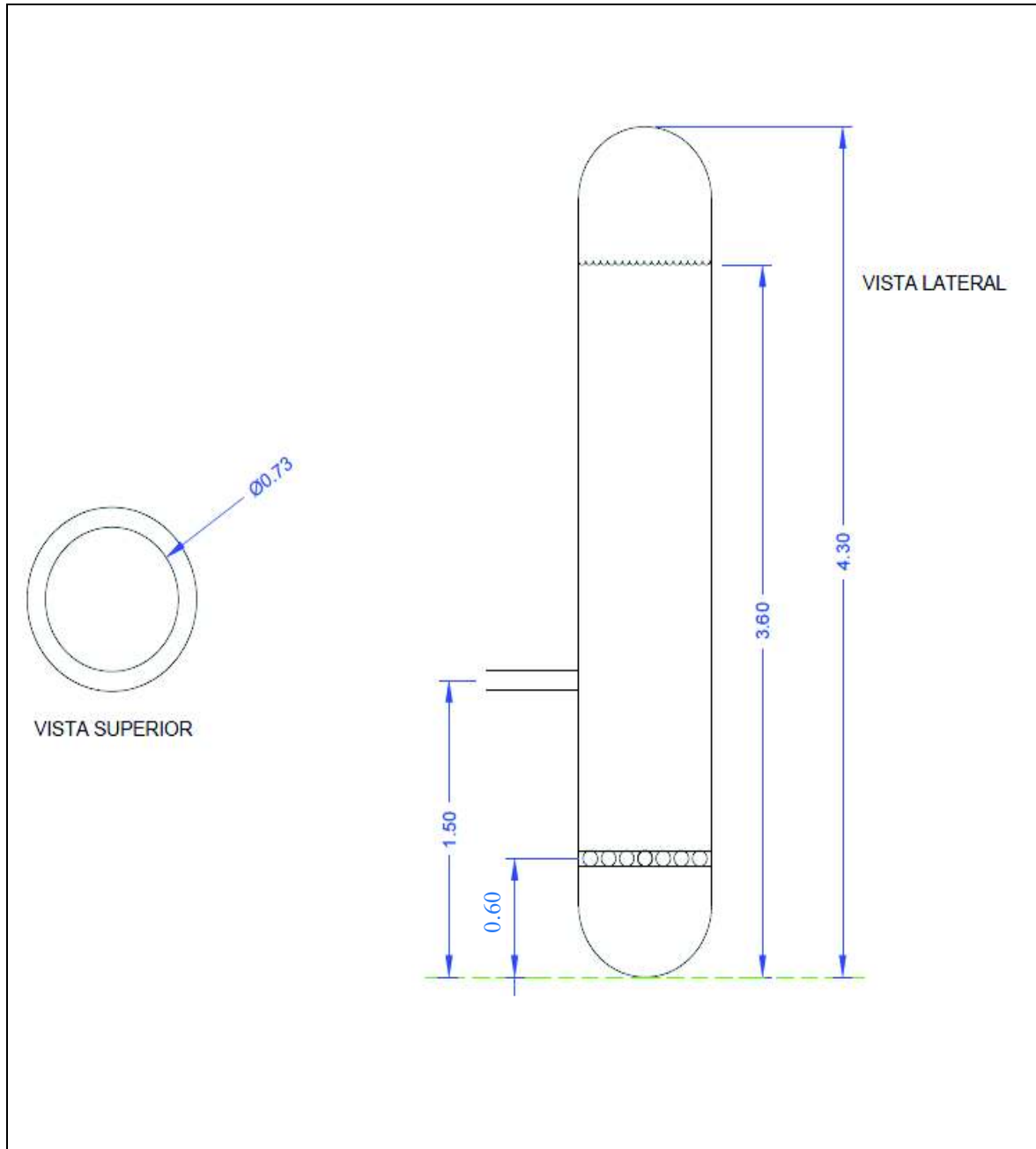
Figura 4.10. Plano de elevación del tanque de homogenización



**Figura 4.11.** Plano de elevación del tanque coagulador-floculador



**Figura 4.12.** Plano de elevación del sedimentador secundario



Registro de Diseño	 <p>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</p>	CLIENTE:	AKROS HODESA					
DIBUJANTE: Jairo Cultid		PROYECTO:	PROYECTO INTEGRADOR AKROS					
		DESCRIPCIÓN:	Diagrama de Flujo de Proceso de la Planta de Tratamiento de Efluentes					
VERIFICADO POR: Ing. Lucía Montenegro	TAMAÑO:	A4	DIBUJO N°:	12	HOJA:	4 de 4	REV:	
	ESCALA:	S/E						

**Figura 4.13.** Plano de elevación del reactor de ozonización

## **4.6 DIAGRAMA DE TUBERÍAS E INSTRUMENTACIÓN (P&ID) Y CONTROL**

En el diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID) se esquematiza el flujo del proceso en equipos, tanques, tuberías y controles (PDVSA, 2009, p. 3). El P&ID facilita la comprensión de la información del proceso ya que presenta las dimensiones de los equipos, tuberías, válvulas e instrumentación; así como también caudales, potencias, presiones y temperaturas en las diferentes líneas (Sinnott, 2005, p. 193).

Los P&ID de la PTAR se elaboraron sobre la base de los criterios de dimensionamiento, balance de masa y balance de energía, mediante la aplicación de la norma ANSI/ISA S5.1 (2009, pp. 30-74) y se pueden visualizar desde la Figura 4.15 hasta la Figura 4.18.

El ejemplo de cálculo de las presiones de operación y de diseño de las etapas del sistema de tratamiento se presenta en el Anexo AXV.

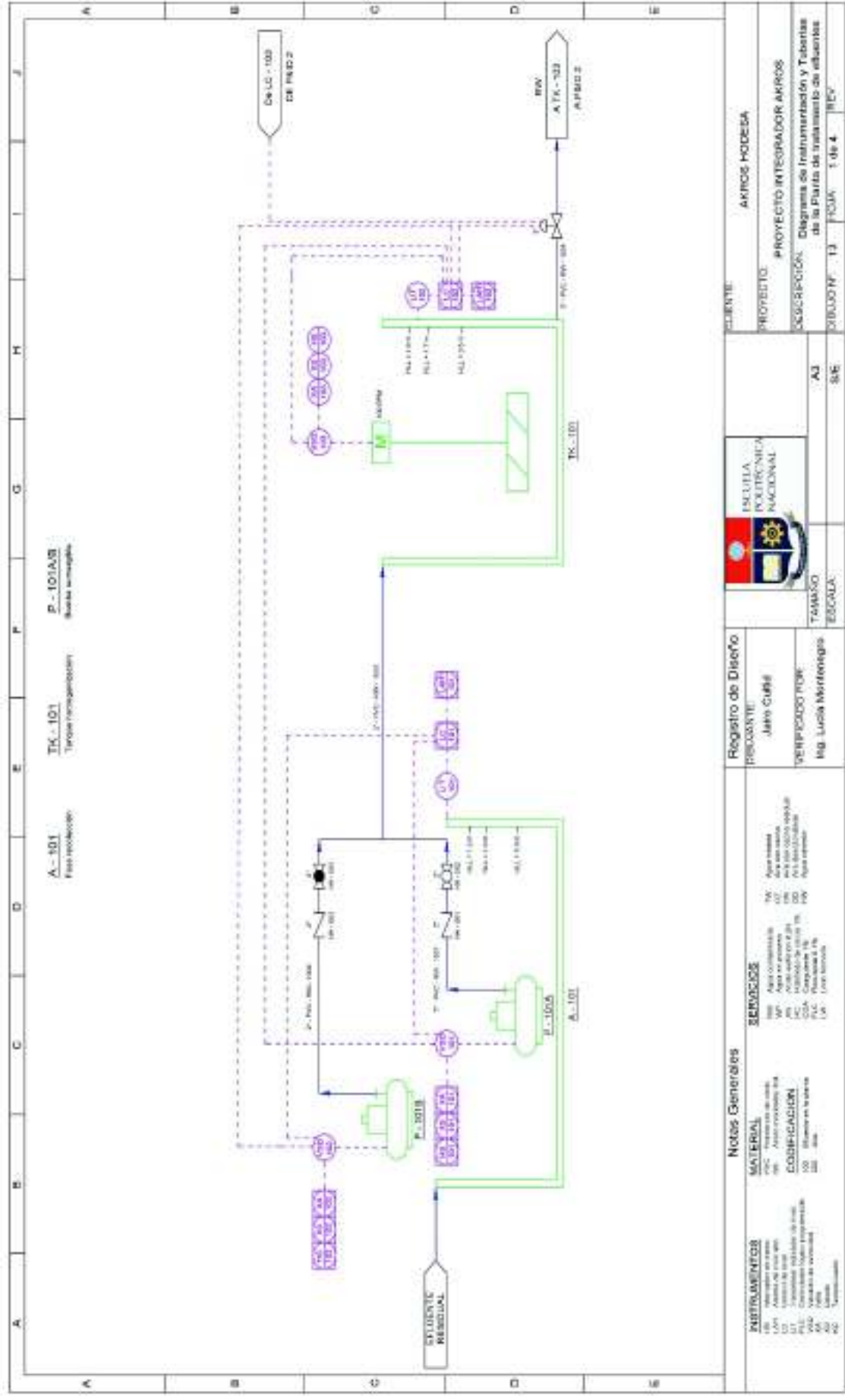


Figura 4.14. Diagrama P&ID de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del hotel AKROS 1/4

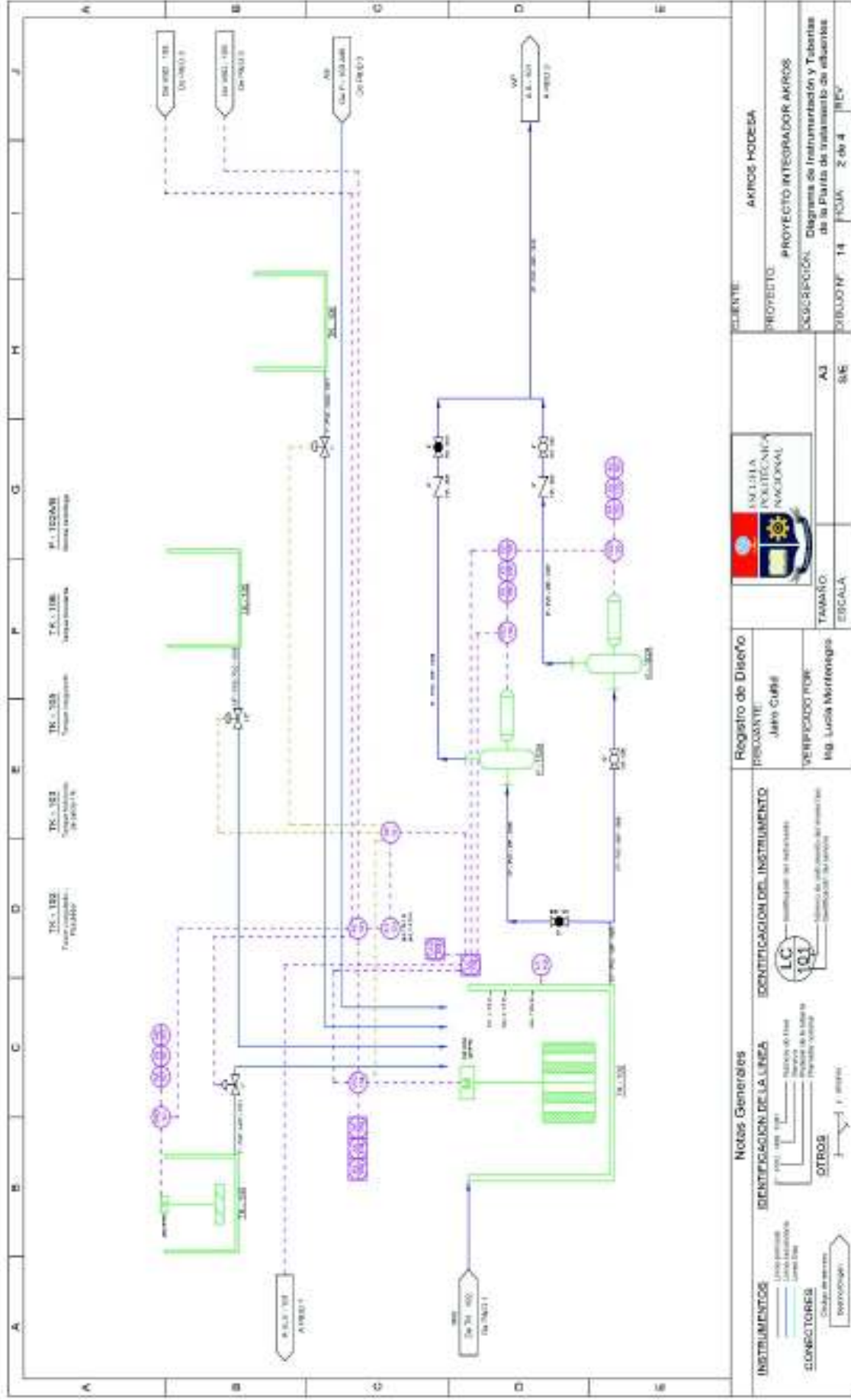


Figura 4.15. Diagrama P&ID de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del hotel AKROS 2/4





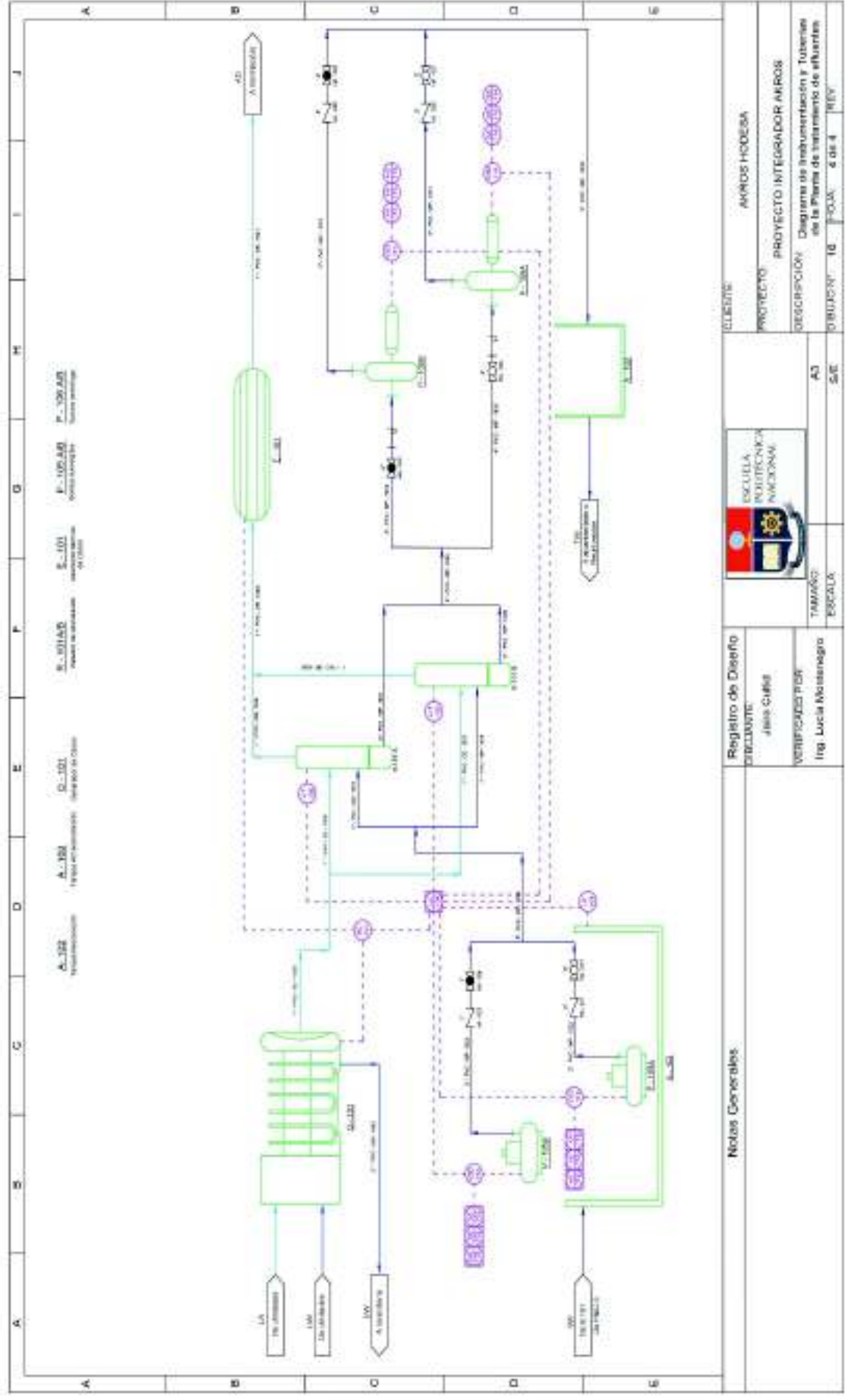


Figura 4.17. Diagrama P&ID de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del hotel AKROS 4/4

## 4.7 DIMENSIONAMIENTO Y ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS PROPUESTOS

Los criterios de diseño que se tomaron en cuenta para el cálculo del dimensionamiento y de las condiciones de trabajo de cada operación unitaria se encuentran en la Sección 3.1.

### 4.7.1 DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS PROPUESTOS

En la Tabla 4.4 se resumen las dimensiones y condiciones de agitación del tanque de homogenización para el tratamiento de 3 m<sup>3</sup> de efluentes. En la Tabla 4.5 se encuentran los valores de los parámetros de diseño del coagulador-floculador que receptorá las aguas residuales provenientes del homogenizador.

**Tabla 4.4.** Dimensiones y condiciones de agitación del tanque homogenizador para un volumen de operación de 3 m<sup>3</sup>

<b>Dimensión</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Diámetro interno del tanque	D <sub>H</sub>	m	1,50
Altura total del tanque	H <sub>H</sub>	m	2,00
Longitud del agitador del tanque	L <sub>PH</sub>	m	0,50
Ancho del agitador del tanque	b <sub>PH</sub>	m	6,25E-2
Nivel de altura del fluido	h	m	1,70
Ancho de los deflectores	W <sub>H</sub>	m	5,00E-2
Altura desde la base del tanque hasta la parte superior del agitador	h <sub>i</sub>	m	0,55
<b>Condiciones de agitación</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Gradiente de velocidad	G	s <sup>-1</sup>	60
Potencia disipada por unidad de volumen	P'	kg.m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> .m <sup>3</sup>	3,60
Potencia disipada	P	kg.m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup>	10,80
Potencia unitaria disipada	P''	hp	1,48E-2
Potencia unitaria nominal disipada	P'' <sub>nom</sub>	hp	0,08
Revoluciones por minuto	n	rpm	42
Coefficiente de arrastre	C <sub>D</sub>	---	1,26
Número de Reynolds	Re	---	175 000

**Tabla 4.5.** Dimensiones y condiciones de agitación del coagulador-floculador para un volumen de operación de 3 m<sup>3</sup>

Dimensión	Símbolo	Unidad	Valor	
Ancho del floculador	B <sub>F</sub>	m	1,50	
Altura desde la base hasta la superficie del líquido	h	m	1,30	
Altura total del floculador	H <sub>F</sub>	m	2,00	
Distancia de las paletas a la superficie del agua y al fondo del tanque	a	m	0,30	
Número total de paletas	N <sub>PF</sub>	---	6	
Longitud cada paleta	L <sub>PF</sub>	m	0,70	
Ancho de cada paleta	b <sub>PF</sub>	m	0,10	
Longitud de cada deflector	W <sub>F</sub>	m	0,05	
Espacio entre cada paleta	c	m	0,10	
Radio total del agitador	R <sub>T</sub>	m	0,60	
Radio desde el eje hasta la tercera paleta	R <sub>P1</sub>	m	0,55	
Radio desde el eje hasta la segunda paleta	R <sub>P2</sub>	m	0,35	
Radio desde el eje hasta la primera paleta	R <sub>P3</sub>	m	0,15	
Condiciones de agitación	Símbolo	Unidad	Tipo de Agitación	
			Rápida	Lenta
Gradiente de velocidad	G	s <sup>-1</sup>	237	60
Potencia disipada por unidad de volumen	P'	kg.m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> .m <sup>3</sup>	56,1	3,6
Potencia disipada	P	kg.m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup>	168,2	10,8
Potencia unitaria disipada	P''	hp	0,17	0,01
Potencia unitaria nominal disipada	P'' <sub>nom</sub>	hp	0,25	0,08
Revoluciones por minuto	N	rpm	26,6	10,65
Coefficiente de arrastre	C <sub>D</sub>	---	1,24	1,24
Número de Reynolds	Re	---	1,30E7	5,23E6

En la Tabla 4.6 se presentan las dimensiones del sedimentador secundario y su respectivo tabique difusor, el cual cumplirá con la función de clarificar al efluente coagulado mediante la precipitación de los flóculos formados en la etapa previa.

**Tabla 4.6.** Dimensiones del sedimentador secundario y su tabique difusor

<b>Parámetro del sedimentador secundario</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Ancho de la zona de entrada	$B_s$	m	1,50
Ancho de la zona de salida	$E_s$	m	1,60
Longitud total	$L$	m	5,70
Longitud de la zona de entrada	$L_e$	m	0,70
Longitud de la zona de sedimentación	$L_s$	m	5,00
Altura de la zona de sedimentación	$H_s$	m	1,00
Ángulo de inclinación de la zona de sedimentación	$\sigma$	°	8,00
Altura de la tolva de lodos	$H'_s$	m	0,53
Diámetro de la tubería de descarga de lodos	$D_l$	m	0,30
<b>Parámetro del tabique difusor</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>
Diámetro de los orificios	$d$	cm	1,4
Número de orificios	$n_o$	---	228
Ancho del tabique	$B_T$	m	1,5
Altura del tabique	$H_T$	m	1,30
Número de columnas de orificios	$C_o$	---	19
Espacio entre las columnas de orificios	$S_c$	cm	6,17
Número de filas de orificios	$F_o$	---	12
Espacio entre las filas de orificios	$S_F$	cm	3,32

En la Tabla 4.7 se observan las dimensiones del reactor en donde se llevará a cabo la ozonización del efluente clarificado.

**Tabla 4.7.** Dimensiones del tanque de ozonización

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>
Número de unidades	---	$N_R$	2
Volumen de operación por unidad	$m^3$	$V_{OP}$	1,50
Nivel del líquido en cada tanque	m	$h_R$	3,60
Diámetro de cada tanque	m	$D_R$	0,73
Altura nominal de cada tanque	m	$H_R$	4,30
Altura desde la base del tanque hasta el difusor	m	$h_D$	0,60

En la Tabla 4.8 se pueden observar las dimensiones de los tanques que se utilizarán para el almacenamiento de sustancias químicas necesarias para el tratamiento físico-químico.

**Tabla 4.8.** Dimensiones de los tanques de almacenamiento de sustancias químicas en solución

Dimensión	Tanque de ácido sulfúrico 0,2 N	Tanque de hidróxido de calcio 1 %	Tanque de sulfato de aluminio 1 %	Tanque de polímero L-1560 0,1 %
Diámetro [m]	0,86	1,03	0,62	0,42
Altura [m]	0,90	1,20	0,72	0,48
Abertura al ambiente	No	Sí	Sí	Sí

En la Tabla 4.9 se encuentran las características del tanque de la sustancia alcalinizante.

**Tabla 4.9.** Dimensiones y las condiciones de agitación del tanque de hidróxido de calcio

Dimensión	Símbolo	Unidad	Valor
Diámetro interno del tanque	$D_B$	m	1,03
Altura total del tanque	$H_B$	m	1,20
Longitud del agitador del tanque	$L_{PB}$	m	0,34
Ancho del agitador del tanque	$b_{PB}$	m	4,30E-2
Nivel de altura del fluido	$h$	m	1,00
Ancho de los deflectores	$W_B$	m	3,00E-2
Altura desde la base del tanque hasta la parte superior del agitador	$h_i$	m	0,37
Condiciones de agitación	Símbolo	Unidad	Valor
Gradiente de velocidad	$G$	$s^{-1}$	459,00
Potencia unitaria nominal disipada	$P''_{nom}$	hp	0,25
Revoluciones por minuto	$n$	rpm	200,00
Coficiente de arrastre	$C_D$	---	1,26
Número de Reynolds	$Re$	---	385 333,33

#### 4.7.2 ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS

Una vez que los equipos principales y secundarios fueron dimensionados sobre la base de los balances de masa y energía, se seleccionaron de acuerdo a la disponibilidad en el mercado, preferentemente local. Sus características se observan desde la Tabla 4.10 hasta la Tabla 4.21.

**Tabla 4.10.** Hoja de especificaciones del tanque de homogenización

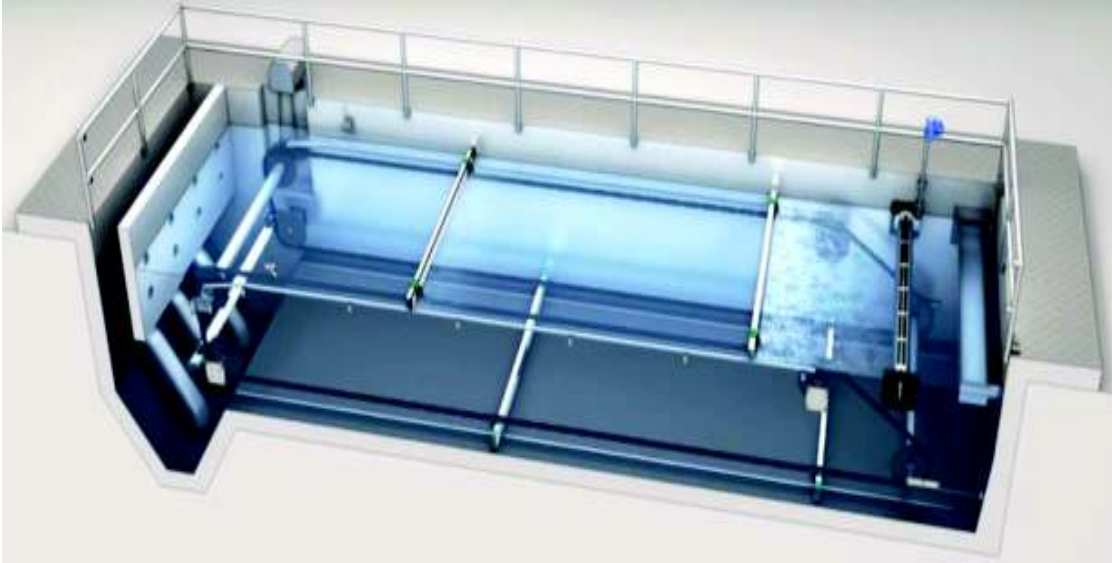
<b>HOJA DE ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS N° 1</b>	
Nombre del equipo: Tanque de homogenización	
Fabricante: Water Supply ec	Material de construcción: Polietileno de alta densidad
	Etiqueta en la planta: TK-101
Dimensiones del tanque: Diámetro: 1,5 m Altura: 2,0 m Número de unidades: 1	Parámetros de diseño: Potencia del motor agitador: 0,08 hp Ancho del deflector: 0,05 m Dimensiones del agitador: Largo: 0,50 m Ancho: 0,06 m
Principios de funcionamiento:  El tanque de homogenización recolectará los efluentes tanto de la lavandería como de la trampa de grasa y los agitará constantemente para que sus propiedades fisico-químicas sean uniformes durante todo el día de trabajo. De igual manera se encargará de disminuir las variaciones en el caudal de ingreso a la planta de tratamiento de efluentes.	
Diagrama:  	

**Tabla 4.11.** Hoja de especificaciones del tanque coagulador-floculador


<b>HOJA DE ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS N° 2</b>	
Nombre del equipo: Tanque coagulador-floculador	
Fabricante: Soluciones técnicas integrales S & S	Material de construcción: Hormigón armado
	Etiqueta en la planta: TK-102
Dimensiones: Lado: 1,50 m Altura: 2,00 m Espesor: 0,06 m  Número de unidades: 1	Parámetros de diseño: Potencia del motor agitador: 0,25 hp Ancho del deflector: 0,05 m Dimensiones del agitador: Largo: 0,70 m Ancho: 0,1 m Número De paletas del agitador: 6
Principios de funcionamiento:  El tanque de coagulación-floculación mezclará los efluentes con las dosis de sustancias reguladoras de pH, coagulante y floculante, a las condiciones determinadas experimentalmente, para formar los flocs que posteriormente precipitarán en el sedimentador secundario.	
Diagrama:  	



**Tabla 4.12.** Hoja de especificaciones del sedimentador secundario

<b>HOJA DE ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS N° 3</b>	
Nombre del equipo: Sedimentador secundario	
Fabricante: Soluciones técnicas integrales S & S	Material de construcción: Hormigón armado
	Etiqueta en la planta: S-101
Dimensiones: Largo: 5,7 m Ancho: 1,5 m Altura: 1,0 m Espesor: 0,06 m	Parámetros de diseño: Relación largo/ancho: 3,3 Relación longitud/profundidad: 5,0
Número de unidades: 1	
Principios de funcionamiento:  Remueven los flocs formados en la etapa de coagulación y floculación mediante decantación por gravedad. Los sólidos se recolectan en una tolva situada en el fondo y se extraen mediante una bomba de lodos luego del tratamiento de 3 m <sup>3</sup> de efluente.	
Diagrama:	
	


**Tabla 4.13.** Hoja de especificaciones del tanque de ozonización

<b>HOJA DE ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS N° 4</b>	
Nombre del equipo: Tanque de ozonización	
Fabricante: PAVCO	Material de construcción: Cloruro de polivinilo (PVC)
	Etiqueta en la planta: R-101
Dimensiones: Diámetro: 0,73 m Altura: 4,3 m Espesor: 33 mm  Número de unidades: 2	Parámetros de diseño: Capacidad: 1,50 m <sup>3</sup> Presión: 199,61 kPa Temperatura: 303 K
Principios de funcionamiento:  El ozono gaseoso, recorre la columna de burbujeo en forma ascendente y se disuelve a la fase líquida para oxidar las sustancias orgánicas e inorgánicas que no precipitaron luego de la coagulación y floculación.	
Diagrama: 	



**Tabla 4.14.** Hoja de especificaciones del ozonizador

<b>HOJA DE ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS N° 5</b>	
Nombre del equipo: Ozonizador HW-A-1.2K	
Fabricante: Simon Chen Fujian Allied Powe EnTech Co., Ltd.	Material de construcción: Acero inoxidable 316 L con tubos dieléctricos de vidrio de cuarzo
	Etiqueta en la planta: O-101
Dimensiones: Largo: 1,74 m Ancho: 1,50 m Altura: 1,90 m  Número de unidades: 1	Parámetros de diseño:  Potencia: 28,15 hp Flujo de aire: 60 Nm <sup>3</sup> /h Presión: 199,61 kPa Temperatura: 323 K Flujo agua de enfriamiento: 5 m <sup>3</sup> /h
Principios de funcionamiento:  El aire comprimido tomado del medio ambiente pasa a través de dos electrodos separados por un material dieléctrico y una zona de vacío de descargas. En este espacio se aplica un alto voltaje que separa las moléculas de oxígeno de la mezcla gaseosa y para posteriormente formar el ozono.	
Diagrama:	 <p>El diagrama muestra un ozonizador industrial con las siguientes partes etiquetadas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>VOLTIMETRO</li> <li>TEMPORIZADOR CICLICO</li> <li>TEMPORIZADOR DIGITAL</li> <li>AUTOMATICO/NEUTRO/MANUAL</li> <li>REGULADORES DE POTENCIA</li> <li>CONTACTO 220V</li> <li>SAIDA DE OZONO</li> <li>PRODUCCION DE OZONO</li> <li>AUTOMATICO/MANUAL</li> <li>ENCENDIDO</li> <li>ENCENDIDO</li> <li>VENTILACION</li> <li>CABLE 220V</li> </ul>

**Tabla 4.15.** Hoja de especificaciones del destructor térmico de ozono

<b>HOJA DE ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS N° 6</b>	
Nombre del equipo: Destructor térmico de ozono DOT 1 eléctrico	
Fabricante: SPARTAN	Material de construcción: Acero inoxidable 316 L
	Etiqueta en la planta: E-101
Dimensiones: Diámetro: 0,46 m Altura: 0,70 m  Número de unidades: 1	Parámetros de diseño: Potencia: 2 hp Caudal máximo: 20 m <sup>3</sup> /h Temperatura de salida del gas: 353,15 K
Principios de funcionamiento:  El gas con ozono residual entra al intercambiador eléctrico de calor, el cual eleva su temperatura hasta valores comprendidos entre 300 y 360 °C; con lo cual logra descomponerse en oxígeno antes de ser liberado al ambiente.	
Diagrama:  <div style="text-align: center;">  </div>	


**Tabla 4.16.** Hoja de especificaciones de la bomba sumergible PAF-12-D

<b>HOJA DE ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS N° 7</b>	
Nombre del equipo: Bomba sumergible PAF-12-D	
Fabricante: BOMBAS hasa	Material de construcción: Acero al carbón G20
	Etiqueta en la planta: P-101A/B
Dimensiones: Largo = 0,4 m Ancho = 0,4 m Altura = 0,8 m  Número de unidades: 1	Parámetros de diseño: Potencia = 1,5 hp Impulsor = Tipo vortex
Principios de funcionamiento:  Electrobomba sumergible especial para la impulsión de efluentes residuales, fecales, fosas sépticas y estaciones depuradoras. El impulsor y el motor se encuentran sellados dentro de una cobertura hermética para que se pueda sumergir en el fluido a bombear sin ocasionar cortocircuitos. Este tipo de bomba no presenta pérdidas por succión ni cavitaciones. El modelo PAF-12-D se utilizará para trasladar el efluente desde la fosa séptica hacia el tanque de homogenización.	
Diagrama:  <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="text-align: center;">  <p><b>TURBINA VORTEX</b></p> </div> <div style="text-align: center;">  <p><b>TURBINA ABIERTA</b></p> </div> </div>	

**Tabla 4.17.** Hoja de especificaciones de la bomba centrífuga CO-350/03 M

<b>HOJA DE ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS N° 8</b>	
Nombre del equipo: Bomba centrífuga CO-350/03 M	
Fabricante: BOMBAS hasa	Material de construcción: Acero inoxidable AISI 316-L
	Etiqueta en la planta: P-102A/B
Dimensiones: Largo : 0,5 m Ancho: 0,3 m Altura: 0,4 m  Número de unidades: 1	Parámetros de diseño: Potencia: 0,5 hp Impulsor: Tipo abierto
Principios de funcionamiento:  Electrobomba centrífuga utilizada en múltiples aplicaciones. La energía cinética de la rotación del impulsor provoca un aumento de presión en el fluido, permitiendo su desplazamiento. Este modelo se utilizará en el transporte del efluente coagulado y floculado hacia el sedimentador secundario. El impulsor abierto evitará la ruptura de los flocs.	
Diagrama:  	

**Tabla 4.18.** Hoja de especificaciones de la bomba sumergible SRI-05-Aut

<b>HOJA DE ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS N° 9</b>	
Nombre del equipo: Bomba sumergible SRI-05-Aut	
Fabricante: BOMBAS hasa	Material de construcción: Acero inoxidable AISI 316
	Etiqueta en la planta: P-105A/B
Dimensiones: Largo: 0,4 m Ancho: 0,4 m Altura: 0,7 m  Número de unidades: 1	Parámetros de diseño: Potencia: 0,5 hp Impulsor: Tipo cerrado
Principios de funcionamiento:  Electrobomba sumergible especial para la impulsión de efluentes industriales con cantidades considerables de sólidos suspendidos y valores de pH comprendidos entre 3 y 13. El impulsor y el motor se encuentran sellados dentro de una cobertura hermética para que se pueda sumergir en el fluido a bombear sin ocasionar cortocircuitos. Este tipo de bomba no presenta pérdidas por succión ni cavitaciones. El modelo SRI se utilizará para trasladar el efluente desde el tanque de recolección de fluido clarificado, hacia los tanques de ozonización.	
Diagrama:  	

**Tabla 4.19.** Hoja de especificaciones de la bomba centrífuga Serie gran caudal RGT-10


<b>HOJA DE ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS N° 10</b>	
Nombre del equipo: Bomba centrífuga Serie gran caudal RGT-10	
Fabricante: BOMBAS hasa	Material de construcción: Acero inoxidable AISI 304
	Etiqueta en la planta: P-106A/B
Dimensiones: Largo: 0,4 m Ancho: 0,3 m Altura: 0,4 m  Número de unidades: 1	Parámetros de diseño: Potencia: 1,0 hp Impulsor: Tipo cerrado
Principios de funcionamiento:  Electrobomba centrífuga de gran caudal y baja presión. La energía cinética de la rotación del impulsor provoca un aumento de presión en el fluido, permitiendo su desplazamiento. Este modelo se utilizará en el transporte del efluente ozonizado hacia un tanque de reserva de las aguas tratadas para su disposición final.	
Diagrama:  	



**Tabla 4.20.** Hoja de especificaciones de la bomba centrífuga CPM-130

<b>HOJA DE ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS N° 11</b>	
Nombre del equipo: Bomba centrífuga CPM-130	
Fabricante: LAWN Industry	Material de construcción: Acero inoxidable AISI 304
	Etiqueta en la planta: P-103A/B
Dimensiones: Largo: 0,4 m Ancho: 0,3 m Altura: 0,4 m  Número de unidades: 1	Parámetros de diseño: Potencia: 0,5 hp Impulsor: Tipo cerrado
<b>Principios de funcionamiento:</b>  Bombas hidráulicas de un solo impulsor rotatorio que transforma la energía mecánica del motor eléctrico monofásico en energía cinética y potencial requerida para transportar el fluido. En la planta de tratamiento se utilizará para agregar la solución de ácido sulfúrico 0,2 N al efluente homogenizado para disminuir su pH a un valor cercano a 4.	
<b>Diagrama:</b>  	

**Tabla 4.21.** Hoja de especificaciones de la bomba sumergible PAF-13

<b>HOJA DE ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS N° 12</b>	
Nombre del equipo: Bomba sumergible PAF-13	
Fabricante: BOMBAS hasa	Material de construcción: Acero al carbón G20
	Etiqueta en la planta: P-104A/B
Dimensiones: Largo: 0,4 m Ancho: 0,4 m Altura: 0,8 m  Número de unidades: 1	Parámetros de diseño: Potencia: 2,0 hp Impulsor: Tipo abierto
<b>Principios de funcionamiento:</b>  Electrobomba sumergible especial para la impulsión de efluentes residuales, fecales, fosas sépticas y estaciones depuradoras. El impulsor y el motor se encuentran sellados dentro de una cobertura hermética para que se pueda sumergir en el fluido a bombear sin ocasionar cortocircuitos. Este tipo de bomba no presenta pérdidas por succión ni cavitaciones. El modelo PAF-13 se utilizará para trasladar los lodos residuales del sedimentador secundario para su disposición final.	
<b>Diagrama:</b>  	

## 5. ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD ECONÓMICA

El estudio de prefactibilidad económica permite establecer la inversión que representará la ejecución del proyecto y de esta manera verificar su viabilidad económica de su instalación. Para calcular el valor estimado del costo total de la planta se tienen en cuenta los costos directos en la adquisición de los equipos, los costos de operación y costos por sanciones económicas en el caso de que la carga contaminante de los efluentes no cumpla con los límites permisibles establecidos por la normativa ambiental vigente (Silla, 2003, p. 41).

### 5.1 COSTOS DIRECTOS

Para el tanque de homogenización, el coagulador-floculador, el reactor de ozonización, el ozonizador y el destructor térmico de ozono; se deben considerar otros porcentajes de inversión además de su costo de adquisición, los cuales se detallan en la Tabla 5.1 (Saravacos y Kostaropoulos, 2002, p. 7).

**Tabla 5.1.** Porcentajes de inversión de capital fijo para una planta

Ítem de capital fijo	Porcentaje del costo del capital fijo [%]
Costo de adquisición del equipamiento	23
Instalación del equipo	12
Instalación de la tubería	14
Instrumentación y control	5
Instalación eléctrica	3
Servicios adicionales	15
Construcciones	12
Ingeniería	8
Contingencia	8

(Saravacos y Kostaropoulos, 2002, p. 7)

De acuerdo a la información presentada en la Tabla 5.1, se resumen los costos directos de la construcción de la PTAR del hotel AKROS en la Tabla 5.2, se

consideró un porcentaje adicional de implementación del 77 % sobre el costo de adquisición para los equipos cuya instalación es más complicada.

Para los equipos secundarios y tanques elaborados en hormigón se consideró un 50 % adicional sobre el costo de adquisición, el cual toma en cuenta la mano de obra, transporte de materiales, alquiler de maquinaria, asesoría técnica, etc. (Sinnot, 2005, p. 253). Los cálculos de los costos de adquisición de equipos, tanques, tuberías y bombas se presentan en el Anexo AXVI.

**Tabla 5.2.** Costos directos de la elaboración de la PTAR del hotel AKROS

Equipo	Costo de adquisición [USD]	Porcentaje adicional de implementación [%]	Costo total [USD]
Tanque de homogenización	770,31	77	1 363,45
Tanque de coagulación-floculación	66,02	77	144,77
Agitador	15,77		
Sedimentador secundario	140,12	50	182,16
Tanque de almacenamiento de efluente clarificado	49,89	50	64,86
Reactor de ozonización	2 273,26	77	4 023,67
Equipo ozonizador	4 081,19	77	7 223,71
Destructor térmico de ozono	2 074,37	77	3 671,64
Tanque de almacenamiento de efluente tratado	76,29	50	99,18
Bombas	5 474,16	50	7 116,41
Tuberías y accesorios	985,55	50	1 281,22
Tanques de almacenamiento de sustancias químicas	311,14	50	404,48
		<b>TOTAL</b>	<b>25 575,55</b>

## 5.2 COSTO DE OPERACIÓN

Los costos de operación de la planta en este caso están representados por la cantidad de los reactivos y agua potable utilizada en la coagulación-floculación de

los efluentes, además del consumo de la energía necesaria para el funcionamiento de los equipos (Silla, 2003, p. 44). En la Tabla 5.3 se observa el costo por el consumo de energía eléctrica determinado de acuerdo a la potencia y al tiempo de funcionamiento de cada equipo para tratar 3 m<sup>3</sup> de efluentes.

**Tabla 5.3.** Costo de la energía eléctrica empleada por cada 1 m<sup>3</sup> de agua residual tratada

Equipo	Identificación	Potencia [kW]	Tiempo de funcionamiento por cada 3 m <sup>3</sup> de efluente [h]	Consumo [kW-h]
Bomba sumergible	P-101A/B	1,12	0,25	0,28
	P-105A/B	0,37	0,19	0,07
	P-104A/B	1,50	0,01	0,02
Bomba centrífuga	P-102A/B	0,37	0,28	0,10
	P-106A/B	0,75	0,17	0,13
	P-103A/B	0,37	0,03	0,01
Motores de agitación	TK-101	0,11	2,00	0,22
	TK-102	0,11	0,25	0,03
	TK-102	0,18	0,02	3,60E-3
	TK-103	0,24	0,11	0,03
Ozonizador	O-101	21,00	1,2	25,20
Degradador de ozono	E-101	1,50	1,2	1,80
Consumo de energía por 3 m <sup>3</sup> de efluentes [kW-h]				27,90
Consumo de energía por 1 m <sup>3</sup> de efluentes [kW-h]				9,30
Costo de la energía eléctrica para el sector industrial [USD/kW-h]				0,087
Costo de la energía para el tratamiento de 1 m <sup>3</sup> de efluentes [USD]				0,81

(Agencia de regulación y control de la electricidad, 2018, p. 16)

No se consideraron los pagos de sueldos a operadores adicionales ya que la planta funcionará de manera automática cada dos horas aproximadamente y será suficiente capacitar al personal de mantenimiento existente en la preparación de soluciones y en la manipulación de los controles del sistema de tratamiento.

En la Tabla 5.4 se encuentran los costos por el uso de reactivos para tratar los efluentes. El ejemplo de cálculo de la masa de sustancia necesaria para tratar 3 m<sup>3</sup> de efluentes se detalla en el Anexo AXVI.

**Tabla 5.4.** Cantidad de reactivos a utilizarse por cada 3 m<sup>3</sup> de efluentes y su respectivo costo para el tratamiento de 1 m<sup>3</sup> de agua residual

REACTIVO	CANTIDAD UTILIZADA PARA 3 m <sup>3</sup> DE EFLUENTE [kg]	PRECIO [USD]	PRECIO POR METRO CÚBICO DE EFLUENTE [USD/m <sup>3</sup> ]
Sulfato de aluminio	0,3	0,53/kg	0,05
Hidróxido de calcio	1,38	0,04/kg	0,02
Ácido sulfúrico 98%	0,72	1,065/kg	0,26
Polímero catiónico	9,00E-3	6,80/kg	0,02
Agua potable (m <sup>3</sup> )	0,248	0,72/m <sup>3</sup>	0,06
		<b>Total</b>	0,41

(EPMAPS, 2017, p. 1; PRODUQUIMIC, 2018, p.1; LIPEQ S.A., 2012, p. 1)

El costo por cada metro cúbico de efluente permite comparar los costos operativos de la PTAR con el volumen de los efluentes líquidos tratados (Romero, 2016, p. 175). Esta planta fue diseñada con el propósito de recircular el agua residual tratada, hacia los inodoros del hotel; por lo tanto, cada metro cúbico tratado representa el ahorro de un metro cúbico de agua potable que sería destinada para este propósito. El cálculo del costo de operación por metro cúbico de efluente se realiza sobre la base de la Ecuación 5.1

$$C_{operación} = C_{Reactivos} + C_{Energía} - C_{ahorro\ agua} \quad [5.1]$$

$$C_{operación} = \frac{0,41\ USD}{m^3} + \frac{0,81\ USD}{m^3} - \frac{0,72\ USD}{m^3}$$

$$C_{operación} = \frac{0,50\ USD}{m^3}$$

### 5.3 COSTO POR MULTAS

En el caso de la elaboración de una planta de tratamiento de aguas residuales se compara el costo de la construcción y del funcionamiento de la PTAR con el de las multas aplicadas por sanciones al no haber cumplido con el límite máximo permisible de concentración de contaminantes en los efluentes de acuerdo a la normativa ambiental vigente. Los valores de las sanciones económicas se estipulan

en el artículo 29 del Capítulo IX de la Ordenanza Municipal N° 138 (Secretaría de Ambiente, 2017, p.7).

El valor a cancelar por sanciones debido al incumplimiento de esta norma se mide según el nivel de afectación, el cual puede ser leve, grave y muy grave con multas de 20, 40 y 100 salarios básicos unificados, respectivamente (Secretaría de Ambiente, 2017, p. 7). Según el Ministerio de Trabajo (2019), el salario básico unificado en Ecuador para el 2019 es de 395,00 USD; por lo tanto, los montos a pagar por nivel de afectación serían los expuestos en la Tabla 5.5.

**Tabla 5.5.** Sanciones económicas por incumplimiento de los límites permisibles en la descarga de efluentes

Leve [USD]	Grave [USD]	Muy grave [USD]
7 900,00	15 800,00	39 500,00

El hotel AKROS debería pagar multas anuales por el incumplimiento de la norma si es que no tratara sus efluentes antes de su descarga, se podrían solventar los costos directos con el pago de las multas en un lapso de 3,3 años si su infracción es leve, de 1,6 años si es grave y de 0,6 años si es muy grave. Sin embargo, el permiso de funcionamiento se revocará si se reincide sobre la misma infracción en 2 años consecutivos (Secretaría de Ambiente, 2017, p.7).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Agencia de regulación y control de electricidad. (2018). *Pliego tarifario para las empresas eléctricas de distribución*. Recuperado de: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/01/2018-01-11-Pliego-y-Cargos-Tarifarios-del-SPEE-20182.pdf> (Enero, 2019).
2. Aguilar, M., Sáez, J., y Lloréns, M. (2002). *Tratamiento físico-químico de aguas residuales. Coagulación-Floculación*. España: Universidad de Murcia.
3. Ahmadreza, Y., Fayyaz, M., Akbar, E., Hajar, M., y Farshid, G. (2015). *The combination of coagulation, acid cracking and Fenton-like processes for olive mill wastewater treatment*. Recuperado de: <https://doi.org/10.2166/wst.2015.080> (Mayo, 2018).
4. Alonso, P. (2015). *Corrosión y degradación*. Recuperado de: [https://www.academia.edu/26025214/Corrosion\\_y\\_degradacion](https://www.academia.edu/26025214/Corrosion_y_degradacion) (Febrero, 2019).
5. API (American Petroleum Institute). (2013). *Código API 650: Welded Steel Tanks for Oil Storage*. Recuperado de: <http://www.api.org/~media/Files/Publications/Whats%20New/650%20e12%20PA.pdf> (Enero, 2019).
6. APHA (American Public Health Association). (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. (22th ed.). Washington D.C: American Water Works Association and Water Environmental Federation.



7. AWWA (American Water Works Association). (2002). *Calidad y tratamiento de agua*. (5ta ed.). Madrid, España: McGraw-Hill.
8. ANSI/ISA S5.1. (2009). *Instrumentation Symbols and Identification*. Recuperado de: <https://archive.org/details/ANSIISA5.12009InstrumentationSymbolsAndIdentification/page/n0> (Enero, 2019).
9. Arboleda, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. (3ra ed.). Bogotá D.C., Colombia: McGraw-Hill.
10. Assia, S., Khauola, M., Erwin, N., Btissam, E., y Fouad, A. (2017). *Organic matter degradation in a greywater recycling system using a multistage moving bed biofilm reactor (MBBR)*. Recuperado de: <https://doi.org/10.2166/wst.2017.499> (Noviembre, 2018).
11. Bombas Hasa (2018a). *Catálogo general 2018*. Recuperado de: <https://www.bombashasa.com/imag/cat-tarifa/catalogo.pdf> (Enero, 2019).
12. Bombas Hasa (2018b). *Tarifa de precios 2018*. Recuperado de: <https://www.bombashasa.com/imag/cat-tarifa/tarifa.pdf> (Enero, 2019).
13. Burgos, A. (2012). *Influencia de los procesos de ozonización sobre la biodegradación y toxicidad de tensoactivos aniónicos*. Recuperado de: [http://digibug.ugr.es/bitstream/handle/10481/28769/TFM\\_ABurgos\\_protegido.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://digibug.ugr.es/bitstream/handle/10481/28769/TFM_ABurgos_protegido.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (Septiembre, 2018).
14. Cabrera, H., Garcés, M., y Paredes, P. (2013). *Producción de Aguas Servidas, Tratamiento y Uso en Ecuador*. Recuperado de: [http://www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/378/mod\\_page/content/13](http://www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/378/mod_page/content/13)

7/ECUADOR\_producci%C3%B3n\_de\_aguas\_servidas\_tratamiento\_y\_uso.pdf (Noviembre, 2018).

15. Cárdenas, Y. (2000). *Tratamiento de agua. Coagulación y floculación*. Lima, Perú: SEDAPAL.
16. Castrillón, D. (2012). *Determinación de dosis óptimas de sulfato de aluminio tipo B para la potabilización del agua en una planta de tratamiento en Villa Santana*. Recuperado de: <http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesis/textoyAnexos/6281622H565.pdf> (Agosto, 2017).
17. Çengel, Y. y Boles, M. (2014). *Termodinámica*. (8va ed.). México D.F., México: McGraw-Hill.
18. CEPIS. (2005). *Guía para el diseño de sedimentadores*. Recuperado de: <http://www.bvsde.ops-oms.org/tecapro/documentos/agua/158esp-diseno-desare.pdf> (Septiembre, 2018).
19. Couper, J., Fair, J., Penney, W. y Walas, S. (2012). *Chemical Process Equipment: Selection and Design*. (3ra. ed.). Estados Unidos: Elsevier Scientific Publishing Comp.
20. CTR (Control Técnico y Representaciones). (2018). *Hoja de seguridad del ácido sulfúrico de concentración 0,2N*. Recuperado de: <https://www.ctr.com.mx/pdfcert/MSDS%20ACIDO%20SULFURICO%200.2N.pdf> (2019).
21. CYPE Ingenieros. (2018). *Software para la arquitectura, ingeniería y construcción*. Recuperado de: <http://www.descargas.cype.es/> (Enero, 2019).

22. DANE (Dirección de censos y demografía). *Estimación del coeficiente de variación*. Recuperado de: [https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/censo/est\\_inter\\_p\\_coefvariacion.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/censo/est_inter_p_coefvariacion.pdf) (Abril, 2019)
23. Díaz, M., Pérez, M., Álvarez, F., Vásquez, L., Romero, D., Henao, A., y Romero, E. (2014) *Selección de materiales para la construcción de arrecifes artificiales*. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/profile/Fernando\\_Alberto\\_Alvarez\\_Romero/publication/262673242\\_Seleccion\\_de\\_materiales\\_para\\_la\\_construccion\\_de\\_arrecifes\\_artificiales/links/5a3000a2458515a13d8528d7/Selecccion-de-materiales-para-la-construccion-de-arrecifes-artificiales.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Fernando_Alberto_Alvarez_Romero/publication/262673242_Seleccion_de_materiales_para_la_construccion_de_arrecifes_artificiales/links/5a3000a2458515a13d8528d7/Selecccion-de-materiales-para-la-construccion-de-arrecifes-artificiales.pdf) (Febrero, 2019).
24. ECORED (Red nacional de apoyo empresarial para la protección ambiental). (2016). *Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Hotel Oasis Akumal*. Recuperado de: [http://www.ecored.com.mx/portalesp/pagina/z\\_9\\_Planta\\_de\\_Tratamiento\\_de\\_Aguas\\_Residuales\\_\\_Hotel\\_Oasis\\_Akumal.php](http://www.ecored.com.mx/portalesp/pagina/z_9_Planta_de_Tratamiento_de_Aguas_Residuales__Hotel_Oasis_Akumal.php) (Agosto, 2018).
25. EPMAPS (Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito). (2017). *Pliego tarifario EPMAPS*. Recuperado de: <https://www.aguaquito.gob.ec/wp-content/uploads/2017/04/pliego-20151.pdf> (Octubre, 2018).
26. ESTRUCPLAN. (2008). *Ingeniería de Tratamiento de Aguas Residuales: Tratamiento Físico-Químico*. Recuperado de: <https://estrucplan.com.ar/producciones/contenido-tecnico/p-efluentes-liquidos-y-gaseosos/ingenieria-de-tratamiento-de-aguas-residuales-tratamiento-fisico-quimico/> (Febrero, 2018).
27. EXA (Agencia Espacial Civil Ecuatoriana). (2019). *Estación climatológica Quito*. Recuperado de: <http://quito.exa.ec/> (Enero, 2019).

28. FAO (Food and Agriculture Organization). (2007). *Materiales termoaislantes, características técnicas y criterios de selección*. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/y5013s/y5013s07.htm#TopOfPage> (Abril, 2019).
29. Farr, J. y Jawad, M. (2010). *Guidebook for the Design of ASME Section VIII Pressure Vessels* [Versión Adobe Acrobat Reader DC]. doi: 10.1115/1.859520.
30. García, L. (2004). *Definición de detergencia*. Recuperado de: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/leia/garcia\\_h\\_da/capitulo3.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leia/garcia_h_da/capitulo3.pdf) (Enero, 2018).
31. GoogleMaps. (2019). *AKROS by Bluebay*. Recuperado de: <https://www.google.com/maps/place/Akros+by+Bluebay/@-0.1848401,-78.4811454,17z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x91d5a277eda29123:0x7e3848b3f5faf52c!8m2!3d-0.1848455!4d-78.4789567> (Noviembre, 2018).
32. Gonzáles, M. (2004). *Dispersión de minerales de origen natural y sintético en diferentes líquidos*. Recuperado de: [http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/793/1/gonzales\\_om.pdf](http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/793/1/gonzales_om.pdf) (Enero, 2018).
33. González, M. (2010). *Base fuerte*. Recuperado de: <https://quimica.laguia2000.com/conceptos-basicos/base-fuerte> (Septiembre, 2018)
34. González, F. (2015). Seguridad Industrial. Conocer la concentración del ozono en el ambiente laboral y prevenir daños a la salud al personal expuesto. Recuperado de:

<http://www.estrucplan.com.ar/secciones/articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=3533> (Diciembre, 2018).

35. Gutiérrez, H. y De la Vara, R. (2008). *Análisis y Diseño de Experimentos*. México: McGraw-Hill.
36. HODESA (Hoteles del Ecuador S.A). (2017). *Informe de inspección de las Instalaciones del hotel AKROS HODESA S.A*. Quito. Recuperado de: <http://www.ehu.eus/asignaturasKO/PM/Gestion/gespro2New.htm> (Febrero, 2019).
37. Huerta, S. (2017). *Sedimentación*. Recuperado de: <http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/sho/Sedimentacion-PIS.pdf> (Septiembre, 2018).
38. Ibrahim, M., Ismail, A., Ahmed, S., Fawzy, a., Nabil, M., Abdel-Monem, A., . . . El-Halwany, B. (2012). *Combined coagulation flocculation pre treatment unit for municipal wastewater*. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090123211001214> (Julio, 2017).
39. iCORP (Irigoyen Corp). (2018). *Obras hídricas y de agua potable*. Recuperado de: <https://www.irigoyencorp.com/obras-hidricas-y-de-agua-potable.html> (Febrero, 2019).
40. Inzunza, J. (2013). *Mecanismos de transferencia de calor*. Recuperado de: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/34475/1/Mecanismos%20de%20transmisi%C3%B3n%20de%20calor%20%28CONDUCCION%2C%20CONVECCION%2C%20RADIACION%29.pdf> (Abril, 2019).
41. Jiang, J., Yue, X., Chen, Q., y Gao, Z. (2010). *Determination of ozonization reaction rate constants of aromatic pollutants and QSAR study*. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology.

42. Kalenda, P., Kalendová, A., y Veselý, D. (2006). *Properties of anticorrosion pigments depending on their chemical composition and PVC value*. Recuperado de: <https://doi.org/10.1108/03699420610677181> (Febrero, 2019).
43. Langlais, B., Reckhow, D. y Brink, D. (2010). *Ozone in Water Treatment: Application and Engineering*. (1ra. ed.). Los Ángeles, Estados Unidos: Lewis Publishers.
44. Lechuga, M. (2005). *Biodegradación y toxicidad de tensoactivos comerciales*. Recuperado de: <http://digibug.ugr.es/bitstream/handle/10481/754/15522052.pdf;jsessionid=9973BA5D3773DEA6E498CE87A501CE01?sequence=1> (Noviembre, 2017).
45. LIPEQ S.A. (2012). *Hoja de datos de seguridad de productos químicos*. Virginia, United States: ChemTreat.
46. Manley, T y Niewosky, S. (2010). *Kirk Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/356206456/Kirk-Othmer-Encyclopedia-of-Chemical-Technology-V5-4th-Edition-pdf> (Diciembre, 2018).
47. Martín, I., Salcedo, R., y Font, R. (2011). *Mecánica de Fluidos: Flujo interno de fluidos incompresibles y compresibles*. Alicante, España: Creative Commons.
48. Martínez, K. (2009). *Ozonización*. Recuperado de: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lim/martinez\\_e\\_fl/capitulo2.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/martinez_e_fl/capitulo2.pdf) (Febrero, 2018).
49. Martínez, M. (2017). *Diseño de un SBR a escala piloto combinado con un sistema de ozonización para eliminar fangos en exceso*. Recuperado de:

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/95162/CROS%20-%20Dise%C3%B1o%20de%20un%20SBR%20a%20escala%20piloto%20combinado%20con%20un%20sistema%20de%20ozonizaci%C3%B3n%20para%20eliminar%20fan....pdf?sequence=1> (Enero, 2018).

50. Martínez, V. (2005). *Introducción a la aplicación del ozono como agente de desinfección de equipos y superficies*. Recuperado de: <https://www.cresca.upc.es/eba2005/docs/vicente-martinez.pdf> (Enero, 2018).
  
51. Meoni, G. (2003). *Variabilidad de la relación DBO/DQO en ríos de Tucuman, Argentina*. Recuperado de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/argentina13/cong39.pdf> (Agosto, 2017).
  
52. Mills, A. (2010). *Transferencia de calor*. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/44458826\\_Transferencia\\_de\\_calor\\_Anthony\\_F\\_Mills](https://www.researchgate.net/publication/44458826_Transferencia_de_calor_Anthony_F_Mills) (Enero, 2019).
  
53. Ministerio del Trabajo (2019). *Sistema de salarios*. Recuperado de: <http://salarios.trabajo.gob.ec/documentos/manualSalarios.pdf> (Febrero, 2019).
  
54. Mollinedo, Z. (2017). *Tratamiento primario - Tanque de homogenización*. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/336718469/Tratamiento-Primario-Tanque-de-Homogenizacion> (Septiembre, 2018).
  
55. Naranjo, R. (2018). *Diseño de una planta de tratamiento de efluentes generados en la fabricación de productos de limpieza mediante un proceso de oxidación avanzada*. Recuperado de: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19826/1/CD-9230.pdf> (Marzo, 2018).

56. Norma Técnica Ecuatoriana NTE-INEN-2169 (2013). Calidad del agua. Muestreo, manejo y conservación de muestras.
57. Núñez, M. (2015). *Definición de opciones de mejora en una planta de agua potable*. Recuperado de: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/3494/1/T-UCE-0017-103.pdf> (Agosto, 2017).
58. NRMCA (National Ready Mixed Concrete Association). (2008). *Corrosión del acero en el concreto*. Recuperado de: <https://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP25es.pdf> (Enero, 2019).
59. Ochoa, B. (2013). *Curso Internacional de Hidrología y Monitoreo Hidrológico en Ecosistemas Andinos*. Recuperado de: <https://es.slideshare.net/InfoAndina/4-hidrometria-b-ochoa> (Agosto, 2017).
60. Olalde, K. (2006). Técnica de Planificación del Tiempo del Proyecto. Recuperado de: <http://www.ehu.eus/asignaturasKO/PM/Gestion/gespro2New.htm> (Enero, 2019).
61. Palacio, L., Tapias, H., y Saldarriaga C. (2005). *Métodos y Algoritmos de Diseño en Ingeniería Química*. Medellín, Colombia: Editorial Universidad de Antioquia.
62. PAVCO (2018). *Tubería PVC y alcantarillado*. Recuperado de: <https://pavco.com.co/tubería-pvc-alcantarillado-novafort-pacvo> (Febrero, 2019).
63. PDVSA N° L-TP 1.1. (2009). *Preparación de diagramas de proceso*. Recuperado de: <https://vdocuments.mx/pdvsa-l-tp-11-preparacion-de-diagramas-de-proceso.html> (Enero, 2019).



64. Pérez, J. (2009). *Tratamiento de aguas. Sedimentación*. Recuperado de: <https://docplayer.es/15102100-Guia-para-el-diseno-de-desarenadores-y-sedimentadores.html> (Septiembre, 2018).
65. Perry, R., Green, D., y Maloney, J. (2001). *Manual del Ingeniero Químico* (4 ed., Vol. 1). Madrid, España: McGraw-Hill.
66. Peters, M. y Timmerhaus, K. (2002). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. (4ta ed.). Singapur: McGraw-Hill.
67. Plastigama (2018). *Características de tubería y accesorios de PVC y PEBD*. Recuperado de: [http:// http://plastigama.com/producto/tuberias-y-accesorios-de-pvc-y-pe/](http://http://plastigama.com/producto/tuberias-y-accesorios-de-pvc-y-pe/) (Enero, 2018).
68. PRODUQUIMIC. (2018). *Cotización de productos para el tratamiento de aguas*. Recuperado de: <http://produquimic.com.ec> (Junio, 2018).
69. Ríos, F. (2014). Comportamiento ambiental de tensoactivos comerciales: Biodegradabilidad toxicidad y ozonización. Recuperado de: <https://hera.ugr.es/tesisugr/24452968.pdf> (Noviembre, 2017).
70. Rodríguez, L. (2014). *Planificación estratégica II. Diagrama de Gantt*. Recuperado de: <https://www.enp.edu.uy/images/libros/Diagrama%20de%20Gantt.pdf> (Febrero, 2019).
71. Romero, J. (2006). *Purificación del agua*. (2da ed.). Bogotá D.C., Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
72. Romero, J. (2009). *Calidad del agua*. (3ra ed.). Bogotá D.C., Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.

73. Romero, J. (2016). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. (5ta ed.). Bogotá, Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
74. Salas, J. (2003). *Comportamiento del hormigón con inhibidor de corrosión en el amasado*. Recuperado de: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2003/bmfcis161c/pdf/bmfcis161c.pdf> (Ferberero, 2019).
75. SALHER. (2017). *Aplicación de la tecnología SALHER en la isla de Santa Cruz en las islas Galápagos para el hotel Pikaia Lodge*. Obtenido de <https://www.salher.com/es/soluciones/aguas-urbanas/172-tratamiento-de-aguas-para-hoteles> (Agosto, 2018).
76. Saravacos G., Kostaropoulos, A. (2002). *Handbook of Food Processing Equipment*. New York: Springer.
77. Secretaría de Ambiente. (2016). *Resultados de control público realizado por la Secretaría de Ambiente, en la empresa HOTEL AKROS HODESA C.A, el 14 de septiembre de 2015*. Quito.
78. Secretaría de Ambiente. (2017). *Ordenanza Metropolitana que establece el sistema de manejo ambiental del Distrito Metropolitano de Quito*. Obtenido de [http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/images/Secretaria\\_Ambiente/Documentos/calidad\\_ambiental/normativas/1.%20ORDENANZA\\_METROPOLITANA\\_QUE\\_ESTABLECE\\_EL\\_SISTEMA\\_D\\_871.pdf](http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/images/Secretaria_Ambiente/Documentos/calidad_ambiental/normativas/1.%20ORDENANZA_METROPOLITANA_QUE_ESTABLECE_EL_SISTEMA_D_871.pdf) (Julio, 2018).
79. Secretaría de Ambiente. (2018). *Resolución NO.SA-DGCA-NT002-2016 (Instructivos y Normas Técnicas OM 138)*. Recuperado de: <http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/index.php/calidad-y-gestion-ambiental/normativas#resoluciones> (Junio, 2018).

80. SEDAPAR (Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Arequipa). (2017). *Diseño de sedimentadores*. Recuperado de: <https://www.sedapar.com.pe/wp-content/uploads/2018/02/3.-sedimentador.pdf> (Noviembre, 2018).
81. Silla, H. (2003). *Chemical Process Engineering. Design and Economics*. Stevens Institute of Technology. New Jersey, U.S.A: Marcell Dekker, Inc.
82. Silva, M. (2015). *Potabilización, procesos y diseño de plantas*. Quito: Edicumbre.
83. Simon Chen Fujian. (2017). *Ozone Generator for Water Treatment*. Recuperado de: <https://cnapi10000.en.made-in-china.com/company-Fujian-Allied-Power-EnTech-Co-Ltd-.html> (Enero, 2019).
84. Sinnott, R. (2005). *Chemical Engineering Design*. (4ta ed.). Londres, Inglaterra: Elsevier.
85. SPARTAN (2017). *Ozone Water Treatment*. Recuperado de: <https://www.spartanwatertreatment.com/ozone-water-treatment.html> (Enero, 2019)
86. Streeter, V. (2000). *Mecánica de fluidos*. Bogotá D.C., Colombia: MsGraw-Hill, Inc.
87. Trujillo, D., Duque, L., Arcila, S., Rincón, A., Pacheco, S., y Herrera, O. (2014). *Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano*. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/rion/v27n1/v27n1a03.pdf> (Noviembre, 2017).

88. TUBANOSA (Tuberías y válvulas del noroeste). (2003). *Manual para el manejo, la conducción y el control de fluidos*. (1a ed.). Culiacán, México: Instituto Tecnológico de Culiacán.
89. UDLAP (Universidad de las Américas Puebla). (2009). *Fundamentos del tratamiento biológico*. Recuperado de: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lic/munoz\\_c\\_r/capitulo2.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/munoz_c_r/capitulo2.pdf) (Agosto, 2017).
90. Veliz, E., Llanes, J., Fernández, L., y Bataller, M. (2016). *Coagulación-floculación, filtración y ozonización de agua residual para reutilización en riego agrícola*. Recuperado de: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222016000100017](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000100017) (Agosto, 2017).
91. Villegas, M. (2007). *Purificación de aguas. Ejercicios*. (2da ed.). Bogotá D.C., Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
92. Viveros, R., Salazar, E. (2010). *Modelo de planificación de producción para un sistema multiproducto con múltiples líneas de producción*. Recuperado de: <http://www.dii.uchile.cl/~ris/RISXXIV/Viveros89.pdf> (Febrero, 2018).
93. WATERSUPPLY EC (2017). *Tanques y megatanques plásticos*. Recuperado de: <https://www.watersupplyec.com/tanques-cisternas-plasticos?Nombre=Jairo+Cultid&Email=jairo.cultid%40epn.edu.ec&N%C2%BA+tel%C3%A9fono=5111183&Detalla+tu+requerimiento=Tanque+3+500+litros+de+capacidad+de+aproximadamente+1%2C5+m+de+di%C3%A1metro+y+2%2C0+m+de+altura> (Febrero, 2019).
94. Zhao, W., Liu, F., Yang, Y., Tan, M., y Zhao, D. (2011). *Ozonization of cationic red X-GRL in aqueous solution. Kinetics and modelling*. *Journal of Hazardous Materials*, 187(1), 526-533.

**ANEXOS**

## ANEXO I

## CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DEL EFLUENTE PARA DIFERENTES DÍAS DE TRABAJO

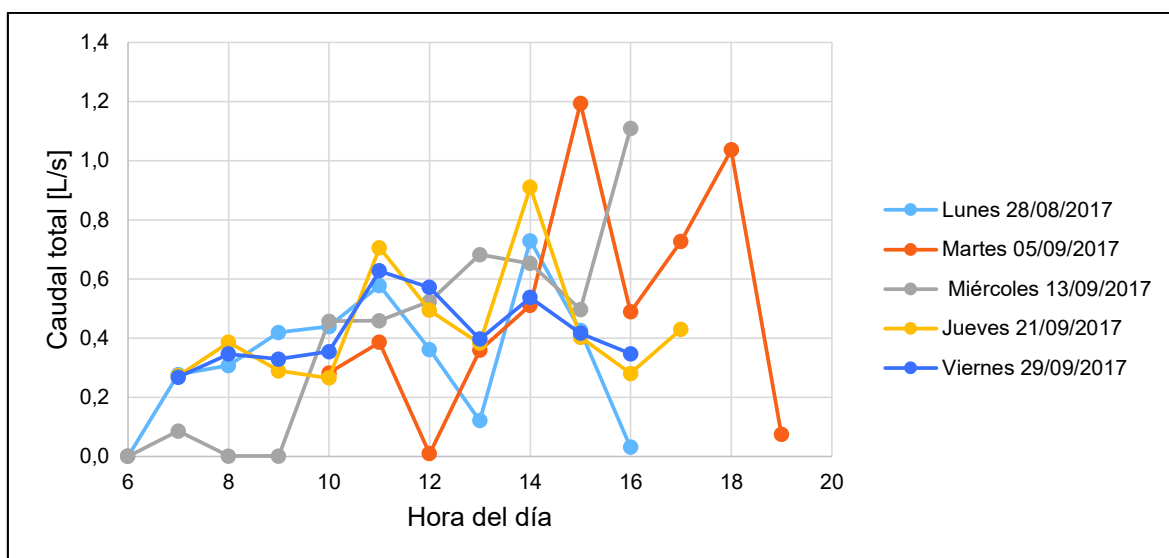
En la Tabla AI.1 se observan las características físico-químicas de las muestras compuestas, elaboradas a partir de los muestreos simples realizados en las zonas de descarga de las aguas residuales de la cocina y de la lavandería del hotel.

**Tabla AI.1.** Características físico-químicas de los efluentes en distintos días

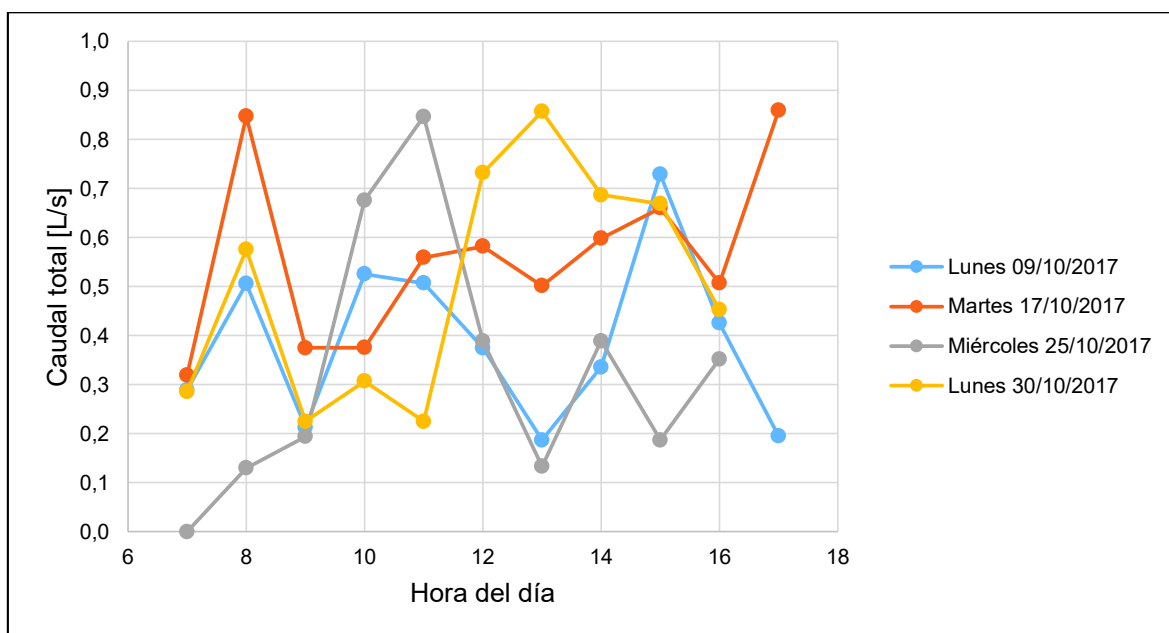
Fecha	Aceites y grasas [mg/L]	DBO [mg/L]	DQO [mg/L]	Sólidos sedim. [mL/L]	Sólidos totales [mg/L]	Sólidos susp. [mg/L]	SAAM [mg/L]	pH	Temp. [°C]
28/08/2017	90	10	124	0,20	120	48	0,67	9,56	34,28
05/09/2017	233	435	752	0,20	542	150	1,53	10,02	35,99
13/09/2017	287	232	1040	0,10	782	650	1,21	9,88	32,27
21/09/2017	82	158	838	1,00	90	66	0,46	9,92	34,17
29/09/2017	90	598	1391	1,00	112	70	0,46	9,56	34,43
09/10/2017	143	464	865	0,30	494	80	2,54	9,51	32,53
17/10/2017	234	435	952	0,20	592	136	0,19	9,65	35,32
25/10/2017	142	458	466	0,30	494	88	1,35	9,47	31,71
30/10/2017	119	232	1040	0,30	240	132	1,20	9,72	33,46
07/11/2017	87	466	940	0,20	160	110	0,88	9,48	30,52
15/11/2017	80	322	810	0,50	180	126	1,45	9,61	36,82
27/11/2017	96	420	947	0,10	210	160	2,31	10,10	32,00
04/12/2017	74	366	1104	0,30	220	160	1,85	11,00	34,30
12/12/2017	97	286	840	0,50	160	90	1,30	10,58	33,24
04/04/2018	53	240	750	0,10	160	122	2,63	9,80	32,86
09/04/2018	112	310	978	1,00	248	162	1,20	9,49	32,66
17/04/2018	60	240	720	0,10	130	66	0,71	10,19	33,13

## ANEXO II

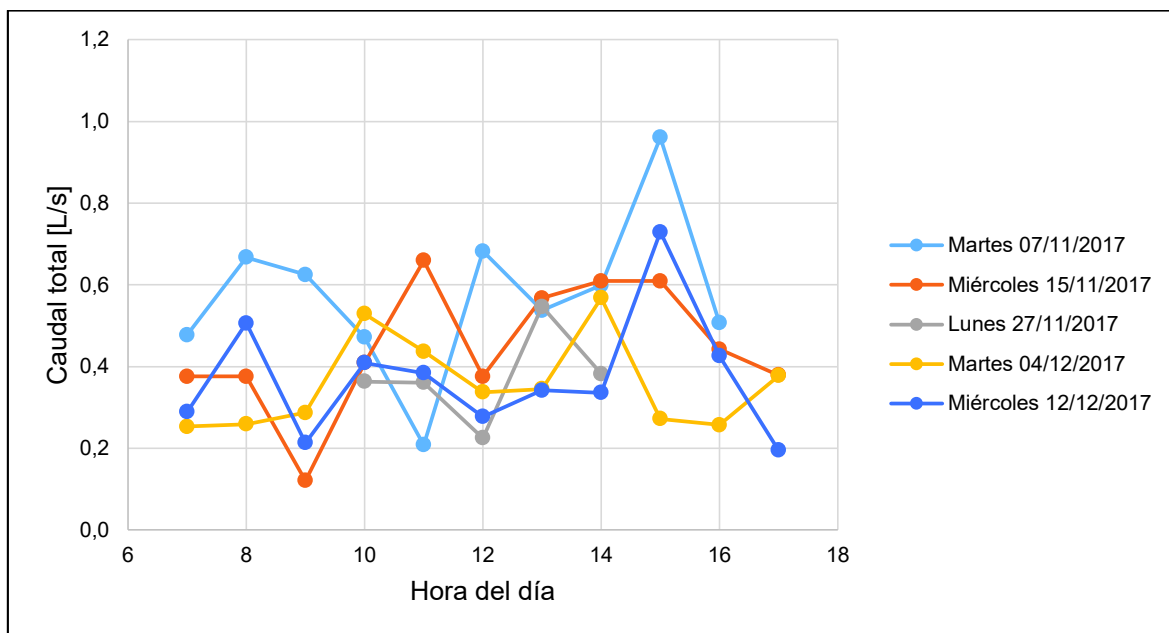
**EJEMPLO DE LAS VARIACIONES DEL CAUDAL DURANTE UN  
DÍA DE TRABAJO**



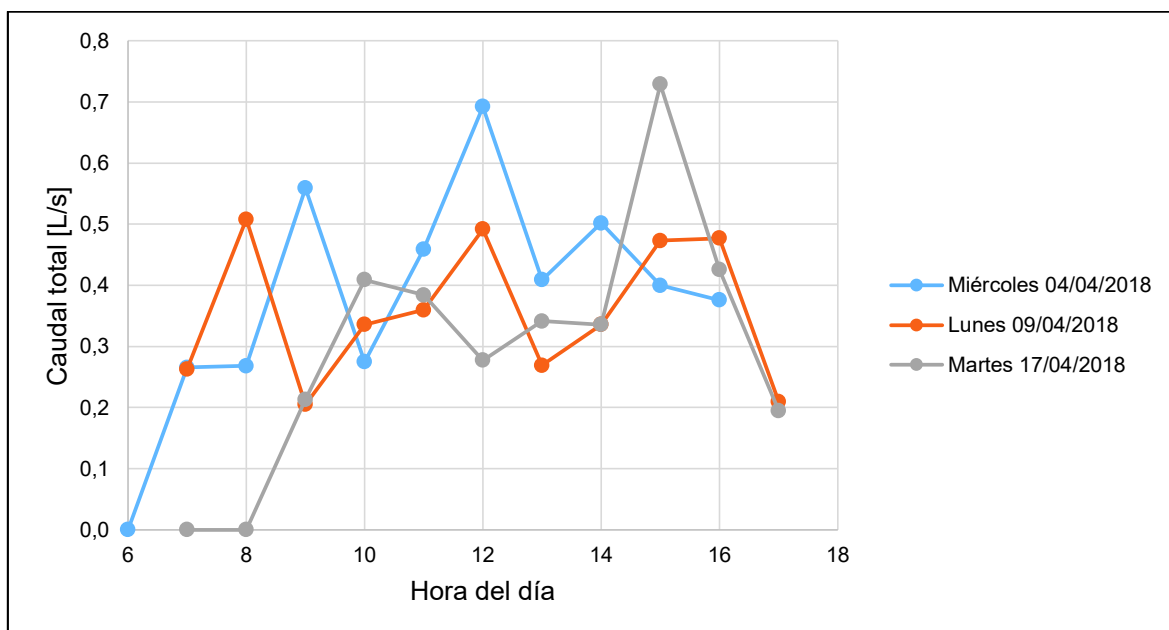
**Figura AII.1.** Variación del caudal en diferentes días de trabajo de agosto y septiembre del 2017



**Figura AII.2.** Variación del caudal en diferentes días de trabajo de octubre del 2017



**Figura AII.3.** Variación del caudal en diferentes días de trabajo de noviembre y diciembre del 2017



**Figura AII.4.** Variación del caudal en diferentes días de trabajo de abril del 2018



**ANEXO III**

**HOJAS TÉCNICAS DE LOS PRODUCTOS DE LIMPIEZA  
UTILIZADOS EN LA LAVANDERÍA DEL HOTEL AKROS**

<b>FICHA TÉCNICA</b>  <b>DETERGENTE</b> <b>CÍTRICO</b>											
CÓDIGO: <b>1012-13-01</b>											
DESCRIPCIÓN	Detergente en polvo para lavadora										
PRESENTACIONES	Sacos de polipropileno de 25 y 50 kilos										
USOS	Lavado de ropa										
APLICACIÓN	usar 1 gr. Por cada libra de ropa aplicar directamente en la lavadora										
COMPOSICION	Tensoactivos , dispersantes, antidepositantes y derivado citrico										
RIESGO / SEGURIDAD	<table border="1"> <tr> <td>0 = NINGUNO</td> <td>FUEGO</td> </tr> <tr> <td>1 = MINIMO</td> <td>SALUD</td> </tr> <tr> <td>2 = MEDIO</td> <td>REACTIV.</td> </tr> <tr> <td>3 = ALTO</td> <td>ESPEC.</td> </tr> </table>	0 = NINGUNO	FUEGO	1 = MINIMO	SALUD	2 = MEDIO	REACTIV.	3 = ALTO	ESPEC.		Evitar el contacto con ojos No ingerir No requiere de medidas especiales de seguridad <b>OJOS:</b> Lavar con agua por 15 minutos <b>INGESTIÓN:</b> Beber leche, no inducir el vómito acudir a emergencias médicas
0 = NINGUNO	FUEGO										
1 = MINIMO	SALUD										
2 = MEDIO	REACTIV.										
3 = ALTO	ESPEC.										
CORR = CORROSIVO	MEDIDAS DE PROTECCIÓN										
CARACTERÍSTICAS	Consistencia: polvo fino Color: blanco pH 9 (solución de 1 gr en 1000 cc de agua)										
MANEJO	Mantener el producto en su envase original, bien cerrado										
AMBIENTE	BIODEGRADABLE										
AGRA S.A. (02) 600 9243 - (02) 380 3896		Quito email: <a href="mailto:agra@uiro.sabnet.net">agra@uiro.sabnet.net</a>									

**Figura AIII.1.** Ficha técnica del detergente en polvo utilizado en la lavandería del hotel AKROS

<b>FICHA TÉCNICA</b>  <b>DETERGENTE LIQUIDO NEUTRO</b> CODIGO: 2223		 <b>DETERGENTE LIQUIDO NEUTRO</b> LA 44 1 GALÓN
DESCRIPCIÓN	Detergente líquido multipropósito con pH neutro.	
PRESENTACIONES	Envases de polietileno de alta densidad: 1 litro, galón. Canecas de 20, 60 K	
USOS	Remoción de la grasa y suciedad en tejidos, superficies de todo tipo, especialmente, cuando se debe evitar el uso de detergentes ácidos o alcalinos	
APLICACIÓN	Aplicar con una brocha, puro o en solución en agua, en proporción adecuada para el tipo de grasa y mugre que se quiere remover. <b>PURO:</b> Sin mezclar <b>FUERTE:</b> 1 parte de DET.LIQ. NEUTRO en 10 partes de agua <b>ESTANDAR:</b> 1 parte de DET.LIQ. NEUTRO en 20 partes de agua <b>SUAVE:</b> 1 parte de DET.LIQ. NEUTRO en 50 partes de agua Para usar en lavadora, poner 1/4 de taza ( 2 oz.) por cada 18 lbs de ropa	
COMPOSICION	SLES, DDBS, Trietanolamina, secuestrantes, antidepositantes, preservantes	
RIESGO / SEGURIDAD	0 = NINGUNO 1 = MINIMO 2 = MEDIO 3 = ALTO CORR = CORROSIVO	 <b>FUEGO</b> <b>SALUD</b> <b>REACTIV.</b> <b>ESPEC.</b> <b>MEDIDAS DE PROTECCIÓN</b>
	Evitar el contacto con ojos. No ingerir <b>OJOS:</b> Lavar con agua por 15 minutos <b>PIEL:</b> Retirar la ropa contaminada y lavar la piel <b>INGESTIÓN:</b> Beber AGUA, no inducir el vómito acudir a emergencias médicas	
CARACTERÍSTICAS	Consistencia: líquido Color: color rojo ambarino pH: 6.8-7.2 (neutro) Densidad: .98-1.02	
MANEJO	Mantener el producto en su envase original, no ponerlo en vasos o botellas para evitar la ingestión accidental. Almacenar lejos del calor	
AMBIENTE	BIODEGRADABLE	
AGRA S.A. (02) 600 9243 - (02) 380 3896		Quito email: <a href="mailto:agra@ulo.satnet.net">agra@ulo.satnet.net</a>

Figura AIII.2. Ficha técnica del detergente líquido utilizado en la lavandería del hotel AKROS



<b>FICHA TÉCNICA</b>  <b>DEGREASE</b> CÓDIGO: <b>T2007</b>		 <b>DEGREASE</b> DESENGASANTE DE MEDIO ALTO PUNTO
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Desengrasante alcalino de alto poder formulado para remover grasas de todo tipo	
<b>PRESENTACIONES</b>	Envases de polietileno de alta densidad: 1 litro, galón. Canecas de 20, 60 y 200 lts	
<b>USOS</b>	Remoción de la grasa en suelos, baldosas, hornos, campanas extractoras, utensilios, maquinaria, motores, piezas y herramientas áreas de trabajo, garajes, pisos y paredes y en algunos tejidos	
<b>APLICACIÓN</b>	Aplicar con una brocha, puro o en solución en agua, en proporción adecuada para el tipo de grasa que se quiere remover. <b>PURO:</b> Sin mezclar <b>FUERTE:</b> 1 parte de DEGREASE en 10 partes de agua <b>ESTANDAR:</b> 1 parte de DEGREASE en 20 partes de agua <b>SUAVE:</b> 1 parte de DEGREASE en 50 partes de agua	
<b>COMPOSICION</b>	Tensoactivos no iónicos, solventes, dispersantes y agua	
<b>RIESGO / SEGURIDAD</b> 0 = NINGUNO 1 = MINIMO 2 = MEDIO 3 = ALTO CORR = CORROSIVO	 <b>MEIDAS DE PROTECCIÓN</b>	<b>Evitar el contacto con ojos y piel . No ingerir</b> <b>OJOS:</b> Lavar con agua por 15 minutos <b>PIEL:</b> Retirar la ropa contaminada y lavar la piel <b>INGESTIÓN :</b> Beber AGUA, no inducir el vómito acudir a emergencias médicas
<b>CARACTERÍSTICAS</b>	Consistencia: líquido Color: color rojo ambarino pH: 13-14 Densidad: 0.98 - 1.08 grs cm3	
<b>MANEJO</b>	Mantener el producto en su envase original, no ponerlo en vasos o botellas para evitar la ingestión accidental. Almacenar lejos del calor y no mezclar con ácidos	
<b>AMBIENTE</b>	<b>BIODEGRADABLE</b>	
AGRA S.A. (02) 600 9243 - (02) 380 3896	Quito email: <a href="mailto:agra@agra-sa.com">agra@agra-sa.com</a>	

Figura AIII.3. Ficha técnica del desengrasante utilizado en la lavandería del hotel AKROS

**FICHA TÉCNICA**

**AGRA**

**COLORO 5 %**

CÓDIGO: **T2806**

**COLORO**  
HIPOCLORITO DE SODIO al 5%  
F11-03  
23  
KLOS

**TETRA**

**eco**

<b>DESCRIPCIÓN</b>	Limpiador desinfectante para pisos y paredes de baldosa, vinil , terrazo etc. y loza sanitaria, ETC. Blanqueador para textiles										
<b>PRESENTACIONES</b>	Envases de polietileno de alta densidad: 1 litro, galón. Canecas de 20, 60lts										
<b>USOS</b>	Limpieza, sanitización de ambientes y utensilios. Desmanchado de textiles										
<b>APLICACIÓN</b>	<b>DESINFECCIÓN DE COCINAS Y BAÑOS:</b> Diluir 1/3 de taza de hipoclorito en un galón de agua, limpiar las áreas (pisos, mesones, sanitarios, etc.) con esta solución. Dejar actuar por unos minutos y enjuagar. <b>CISTERNAS:</b> mezclar 20 cm <sup>3</sup> de hipoclorito por cada m <sup>3</sup> de agua <b>DESINFECCIÓN DE VERDURAS:</b> diluir 10 gotas de hipoclorito en un litro de agua , dejar las verduras por 5 minutos y luego enjuagar completamente <b>DESMANCHADO DE ROPA:</b> Emplear 1/8 de taza de hipoclorito Para una carga de 18 libras de ropa ,										
<b>COMPOSICIÓN</b>	Hipoclorito de sodio al 5% p/p , Hidróxido de sodio, agua										
<b>RIESGO / SEGURIDAD</b>	<table border="1"> <tr> <td>0 = NINGUNO</td> <td>FUEGO</td> <td rowspan="4"> </td> <td rowspan="4"> <b>Evitar el contacto con ojos y piel . No ingerir</b>  <b>OJOS:</b> Lavar con agua por 15 minutos  <b>PIEL:</b> Retirar la ropa contaminada y lavar la piel  <b>INGESTIÓN :</b> Beber agua, no inducir el vómito acudir a emergencias médicas         </td> </tr> <tr> <td>1 = MINIMO</td> <td>SALUD</td> </tr> <tr> <td>2 = MEDIO</td> <td>REACTIV.</td> </tr> <tr> <td>3 = ALTO</td> <td>ESPEC.</td> </tr> </table> <p><b>CORR = CORROSIVO</b></p> <p><b>MEDIDAS DE PROTECCIÓN</b></p>	0 = NINGUNO	FUEGO		<b>Evitar el contacto con ojos y piel . No ingerir</b> <b>OJOS:</b> Lavar con agua por 15 minutos <b>PIEL:</b> Retirar la ropa contaminada y lavar la piel <b>INGESTIÓN :</b> Beber agua, no inducir el vómito acudir a emergencias médicas	1 = MINIMO	SALUD	2 = MEDIO	REACTIV.	3 = ALTO	ESPEC.
0 = NINGUNO	FUEGO		<b>Evitar el contacto con ojos y piel . No ingerir</b> <b>OJOS:</b> Lavar con agua por 15 minutos <b>PIEL:</b> Retirar la ropa contaminada y lavar la piel <b>INGESTIÓN :</b> Beber agua, no inducir el vómito acudir a emergencias médicas								
1 = MINIMO	SALUD										
2 = MEDIO	REACTIV.										
3 = ALTO	ESPEC.										
<b>CARACTERÍSTICAS</b>	Consistencia: liquido Color: ligeramente amarillo/verdoso Olor: característico pH <b>12.8 - 13.8 /alcalino</b> Densidad <b>1.1 apx.</b>										
<b>MANEJO</b>	Mantener el producto en su envase original, no ponerlo en vasos o botellas para evitar la ingestión accidental. Almacenar lejos del calor No poner en recipientes metálicos , especialmente de aluminio <b>NO MEZCLAR CON ACIDOS , AMONIACO Y DETERGENTES ACIDOS</b>										
<b>AMBIENTE</b>	<b>DEGRADABLE</b>										
AGRA S.A. (02) 600 9243 - (02) 380 3896 Quito email: <a href="mailto:agra@uio.satnet.net">agra@uio.satnet.net</a>											

**Figura AIII.4.** Ficha técnica de la solución de hipoclorito de sodio utilizada en la lavandería del hotel AKROS











FICHA TÉCNICA											
  											
<b>SUAVE PLUS</b> <b>SUAVE</b>											
<b>SUAVIZANTE TEXTIL CON AROMA</b> <small>Artículo 17 del Reglamento 127 1999 de Normas Técnicas U27 E. del 2000  No aplica. Brevetado por AGRA S.A.</small>											
<b>CÓDIGO: 2021</b>  											
DESCRIPCIÓN	SUAVE Y SUAVE PLUS son acondicionadores textiles y correctores del pH para el suavizado y reducción del estrés del lavado en las fibras. Suaviza, resalta los colores, aromatiza, equilibra el pH y reduce la estática										
PRESENTACIONES	Galones y canecas de 20, 60 y 200 litros <b>SUAVE PLUS:</b> AROMATIZADO. Aroma vainilla y floral <b>SUAVE:</b> SIN AROMA										
USOS	Complemento del detergente en el lavado de ropa y fibras textiles										
APLICACIÓN	Usar 4 oz. (1/2 de taza) por cada 20 lbs. de ropa . Diluir completamente el suavizante en agua en un 1 litro de agua y verter en la lavadora al empezar la fase de enjuague. <b>NO APLICAR EL PRODUCTO PURO DIRECTAMENTE SOBRE LA ROPA.</b> Para lavado manual , disuelva 1/2 taza de SUAVE en una tina de agua (20 lt.) . Exprima el agua de jabón de las prendas y sumérgala en la tina con SUAVE por 10 minutos, enjuague completamente										
COMPOSICION	Esteres cuaternizados, IPA , carbopolimero, aromas, emulsificante										
RIESGO / SEGURIDAD	<table border="1"> <tr> <td>0 = NINGUNO</td> <td>FUEGO</td> <td rowspan="4">  </td> <td rowspan="4"> <b>Evitar el contacto con ojos y piel . No ingerir</b>  <b>OJOS:</b> Lavar con agua por 15 minutos  <b>PIEL:</b> Retirar la ropa contaminada y lavar la piel  <b>INGESTIÓN :</b> no inducir el vómito            acudir a emergencias médicas         </td> </tr> <tr> <td>1 = MINIMO</td> <td>SALUD</td> </tr> <tr> <td>2 = MEDIO</td> <td>REACTIV.</td> </tr> <tr> <td>3 = ALTO</td> <td>ESPEC.</td> </tr> </table>	0 = NINGUNO	FUEGO		<b>Evitar el contacto con ojos y piel . No ingerir</b> <b>OJOS:</b> Lavar con agua por 15 minutos <b>PIEL:</b> Retirar la ropa contaminada y lavar la piel <b>INGESTIÓN :</b> no inducir el vómito acudir a emergencias médicas	1 = MINIMO	SALUD	2 = MEDIO	REACTIV.	3 = ALTO	ESPEC.
0 = NINGUNO	FUEGO		<b>Evitar el contacto con ojos y piel . No ingerir</b> <b>OJOS:</b> Lavar con agua por 15 minutos <b>PIEL:</b> Retirar la ropa contaminada y lavar la piel <b>INGESTIÓN :</b> no inducir el vómito acudir a emergencias médicas								
1 = MINIMO	SALUD										
2 = MEDIO	REACTIV.										
3 = ALTO	ESPEC.										
CORR = CORROSIVO	MEDIDAS DE PROTECCIÓN										
CARACTERÍSTICAS	APARIENCIA: Gel liviano COLOR: blanco azulado DENSIDAD: 0.93 GR. / cm3 apx. pH : 5-6 ( en solución en agua al 1 x 1.000)										
MANEJO	Mantener el producto en sitios secos y bien ventilados y evitar el calor excesivo. No almacenar en envases de aluminio.										
AMBIENTE	BIOGRADABLE										
AGRA S.A.	(02) 600 9243 - (02) 380 3896 Quito email: <a href="mailto:agra@agra-sa.com">agra@agra-sa.com</a>										

Figura AIII.5. Ficha técnica del suavizante utilizado en la lavandería del hotel AKROS

**ANEXO IV**

**NORMA ASTM D2035-13 PARA LA PRUEBA DE JARRAS**



Designation: D2035 – 13

## Standard Practice for Coagulation-Flocculation Jar Test of Water<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation D2035; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

### 1. Scope

1.1 This practice covers a general procedure for the evaluation of a treatment to reduce dissolved, suspended, colloidal, and nonsettleable matter from water by chemical coagulation-flocculation, followed by gravity settling. The procedure may be used to evaluate color, turbidity, and hardness reduction.

1.2 The practice provides a systematic evaluation of the variables normally encountered in the coagulation-flocculation process.

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as standard.

1.4 *This standard does not purport to address the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

### 2. Referenced Documents

#### 2.1 ASTM Standards:<sup>2</sup>

D1129 Terminology Relating to Water

D1193 Specification for Reagent Water

D1293 Test Methods for pH of Water

D3370 Practices for Sampling Water from Closed Conduits

D6855 Test Method for Determination of Turbidity Below 5 NTU in Static Mode

D7315 Test Method for Determination of Turbidity Above 1 Turbidity Unit (TU) in Static Mode

### 3. Terminology

3.1 *Definitions*—For definitions of terms used in this practice, refer to Terminology D1129.

<sup>1</sup> This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee D19 on Water and is the direct responsibility of Subcommittee D19.03 on Sampling Water and Water-Formed Deposits, Analysis of Water for Power Generation and Process Use, On-Line Water Analysis, and Surveillance of Water.

Current edition approved Jan. 1, 2013. Published February 2013. Originally approved in 1964. Last previous edition approved in 2008 as D2035-08. DOI: 10.1520/D2035-13.

<sup>2</sup> For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

### 4. Summary of Practice

4.1 The coagulation-flocculation test is carried out to determine the chemicals, dosages, and conditions required to achieve optimum results. The primary variables to be investigated using the recommended practice include, but are not limited to:

4.1.1 Chemical additives,

4.1.2 pH,

4.1.3 Temperature, and

4.1.4 Order of addition and mixing conditions.

### 5. Significance and Use

5.1 This practice permits the evaluation of various coagulants and coagulant aids used in the treatment of water and waste water for the same water and the same experimental conditions.

5.2 The effects of concentration of the coagulants and coagulant aids and their order of addition can also be evaluated by this practice.

### 6. Interferences

6.1 There are some possible interferences that may make the determination of optimum jar test conditions difficult. These include the following:

6.1.1 *Temperature Change (During Test)*—Thermal or convection currents may occur, interfering with the settling of coagulated particles. This can be prevented by temperature control.

6.1.2 *Gas Release (During Test)*—Flotation of coagulated floc may occur due to gas bubble formation caused by mechanical agitator, temperature increase or chemical reaction.

6.1.3 *Testing-Period*—Biological activity or other factors may alter the coagulation characteristics of water upon prolonged standing. For this reason the period between sampling and testing should be kept to a minimum, with the time being recorded.

### 7. Apparatus

7.1 *Multiple Stirrer*—A multiposition stirrer with continuous speed variation from about 20 to 150 rpm should be used. The stirring paddles should be of light gage corrosion-resistant material all of the same configuration and size. An illuminated base is useful to observe the floc formation. Precautionary



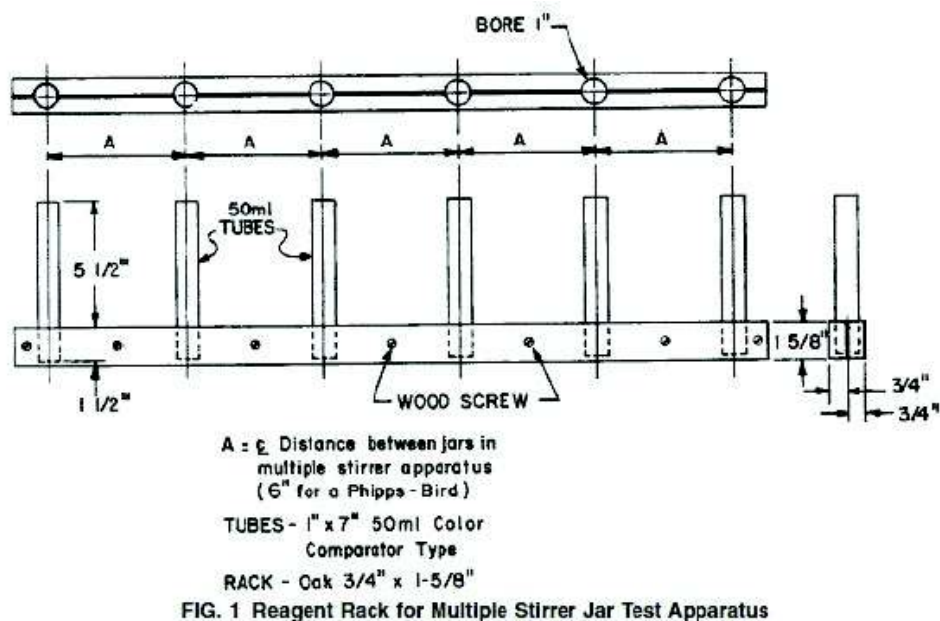


FIG. 1 Reagent Rack for Multiple Stirrer Jar Test Apparatus

measures should be taken to avoid heat being imparted by the illumination system which may counteract normal settling.

7.2 *Jars (or Beakers)*, all of the same size and shape; 1500-mL Griffin beakers may be used (1000-mL recommended minimum size).

7.3 *Reagent Racks*— A means of introducing each test solution to all jars simultaneously. There should be at least one rack for each test solution or suspension. The racks should be similar to that shown in Fig. 1.

## 8. Reagents

8.1 *Purity of Reagents*—Reagent grade chemicals shall be used in all tests. Unless otherwise indicated, it is intended that all reagents shall conform to the specifications of the Committee on Analytical Reagents of the American Chemical Society, where such specifications are available.<sup>3</sup> Other grades may be used, provided it is first ascertained that the reagent is of sufficiently high purity to permit its use without lessening the accuracy of the determination.

8.2 *Purity of Water*—Reference to water that is used for reagent preparation, rinsing or dilution shall be understood to mean water that conforms to the quantitative specifications of Type IV reagent water of Specification D1193.

8.3 The following chemicals and additives are typical of those used for test solutions and suspensions. The latter, with the exception of coagulant aids, may be prepared daily by mixing chemicals with water to a concentration of 10 ( $\pm 0.1$ ) g/L (1.0 mL of test solution or suspension when added to 1 L of sample is equivalent to 10 mg/L):

### Prime Coagulants

Alum [ $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ ]  
 Ferric sulfate [ $Fe_2(SO_4)_3 \cdot xH_2O$ ]  
 Ferric chloride ( $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ )  
 Ferrous sulfate ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ )  
 Magnesium carbonate ( $MgCO_3 \cdot 3H_2O$ )  
 Sodium aluminate ( $NaAlO_2$ )

### Coagulant Aids

Activated silica  
 Anionic (polyelectrolyte)  
 Cationic (polyelectrolyte)  
 Nonionic Polymer

### Oxidizing Agents

Chlorine ( $Cl_2$ )  
 Chlorine dioxide ( $ClO_2$ )  
 Potassium permanganate ( $KMnO_4$ )  
 Calcium hypochlorite [ $Ca(ClO)_2 \cdot 4H_2O$ ]  
 Sodium hypochlorite ( $NaClO$ )

### Alkalis

Calcium carbonate ( $CaCO_3$ )  
 Dolomitic lime  
 (58%  $CaO$ , 40%  $MgO$ )  
 Lime, hydrated [ $Ca(OH)_2$ ]  
 Magnesium oxide ( $MgO$ )  
 Sodium carbonate ( $Na_2CO_3$ )  
 Sodium hydroxide ( $NaOH$ )

### Weighting Agents

Bentonite  
 Kaolin  
 Other clays and minerals

### Miscellaneous

Activated carbon (powdered)

8.4 *Coagulant Aids*— There are numerous commercially available coagulant aids or polyelectrolytes. All polyelectrolytes are classified anionic, cationic or nonionic, depending upon their composition. These aids may have the ability to produce large, tough, easily-settled floc when used alone or in conjunction with inorganic coagulants. A small dosage (under 1 mg/L) may permit a reduction in the dosage of, or complete elimination of, the coagulant. In the latter case, the polyelectrolyte would be considered the prime coagulant rather than a coagulant aid. Aids come in powdered and liquid form. Powdered aids should be prepared as 0.1% solutions with appropriate aliquots to provide proper dosage. Always add

<sup>3</sup> *Reagent Chemicals, American Chemical Society Specifications*. American Chemical Society, Washington, DC. For suggestions on the testing of reagents not listed by the American Chemical Society, see *Analar Standards for Laboratory Chemicals*, BDH Ltd., Poole, Dorset, U.K., and the *United States Pharmacopeia and National Formulary*, U.S. Pharmacopeial Convention, Inc. (USPC), Rockville, MD.

powdered aids to the dissolving water rather than the reverse, and add slowly to the shoulder of a vortex created by stirring. If a vortex is not formed, the dry powder will merely collect on the surface of the water in gummy masses and become very difficult to dissolve. Dissolving time may vary from several minutes to several hours. Suggested manufacturers' procedures for wetting, dissolving, and storing should be followed when available. Liquid forms can be readily prepared to the above strength without difficulty.<sup>4</sup>

## 9. Sampling

9.1 Collect the water sample under test in accordance with the applicable Practices D3370.

## 10. Procedure

10.1 Measure equal volumes (1000 mL) of sample into each of the jars or 1500-mL Griffin beakers. As many sample portions may be used as there are positions on the multiple stirrer. Locate beakers so that the paddles are off-center, but clear the beaker wall by about 6.4 mm (¼ in.). Record the sample temperature at the start of the test.

10.2 Load the test chemicals in the reagent racks. Use one rack for each series of chemical additions. Make up each tube in the rack to a final volume of 10 mL, with water, before using. There may be a situation where a larger volume of reagent will be required. Should this condition prevail, fill all tubes with water to a volume equal to the largest volume of reagent in the reagent rack. When adding slurries, it may be necessary to shake the rack to produce a swirling motion just prior to transfer.

10.3 Start the multiple stirrer operating at the "flash mix" speed of approximately 120 rpm. Add the test solution or suspensions, at predetermined dosage levels and sequence. Flash mix for approximately 1 min after the additions of chemicals. Record the flash mix time and speed (rpm).

10.4 Reduce the speed as necessary to the minimum required to keep floc particles uniformly suspended throughout

<sup>4</sup> A periodically updated "Report on Coagulant Aids for Water Treatment" is published by the Environmental Protection Agency Office of Water Supply, Cincinnati, Ohio 45268, listing coagulant aids that may be used in water treatment without adverse physiological effects on those using the water, based on information submitted by the manufacturers or distributors, or both.

the "slow mix" period. Slow mix for 20 min. Record the time for the first visible floc formation. Every 5 min (during the slow mix period), record relative floc size and mixer speed (rpm). If coagulant aids are used, mixing speed is critical because excessive stirring tends to break up early floc formation and may redisperse the aid.

10.5 After the slow mix period, withdraw the paddles and observe settling of floc particles. Record the time required for the bulk of the particles to settle. In most cases this time will be that required for the particles to settle to the bottom of the beaker; however, in some cases there may be interfering convection currents. If so, the recorded settling time should be that at which the unsettled or residual particles appear to be moving equally upward and downward.

10.6 After 15 min of settling, record the appearance of floc on the beaker bottom. Record the sample temperature. By means of a pipet or siphon, withdraw an adequate sample volume of supernatant liquor from the jar at a point one half of the depth of the sample, to conduct color,<sup>5</sup> turbidity, pH and other required analyses, (Note 1) determined in accordance with Test Methods D6855 or D7315 (for turbidity) and D1293 (for pH). A suggested form for recording results is appended (see Fig 2).

NOTE 1—Tests for residual chemicals should be included, for example, alum; residual Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; copperas; residual Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; etc.

10.7 Repeat steps 10.1-10.6 until all pertinent variables have been evaluated.

10.8 The times given in 10.3, 10.4, and 10.6 are only suggestions.

## 11. Reproducibility

11.1 It is recognized that reproducibility of results is important. To demonstrate reproducibility, the so-called 3 and 3 procedure is suggested. In this procedure, duplicate sets of 3 jars each are treated simultaneously with the same chemical dosages in jars 1 and 4, 2 and 5, and 3 and 6.

## 12. Keywords

12.1 coagulation; flocculation; jar tests

<sup>5</sup> For the color determination, reference is made to *Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water*, Fourteenth edition, American Public Health Association, Inc., New York, NY, 1975, pp. 64-71.

**Figura AIV.3** Norma ASTM D2035-13 para la prueba de jarras 3/3

**ANEXO V****RESULTADOS DE LOS ENSAYOS PRELIMINARES EN LAS  
PRUEBAS DE JARRAS**

**Tabla AV.1.** Prueba de jarras con dosis de coagulante entre 5 y 30 mg/L

FECHA	MUESTRA INICIAL		DOSIFICACIÓN				OBSERVACIONES VISUALES		AGUA SEDIMENTADA				
	Turbidez inicial [NTU]	Dureza total [mg/L]	Tiempo [min]	Velocidad [rpm]	Coagulante: Sulfato de aluminio [mg/L]	Alcalinizante: Hidróxido de calcio 1% [mL]	Ayudante: --- [mg/L]	Volumen de jarras [mL]	Tiempo de flocc [min]	Velocidad [rpm]	Tiempo de sedim [min]	Turbidez residual [NTU]	Alcalinidad residual [mg/L]
Martes 10/10/2017	159	34	1	100	5	0	0	500	Mezcla lenta	15			
	9,51				10	0	0			40			
Jarra	pH	Alcalinidad total [mg/L]	Coagulante: Sulfato de aluminio [mg/L]	Alcalinizante: Hidróxido de calcio 1% [mL]	Ayudante: --- [mg/L]	Tiempo de formación del floc	Índice de Wilcomb	pH	Turbidez residual [NTU]	Alcalinidad residual [mg/L]			
1	9,51	34	5	0	0	3'58"	2	9,48	125	30			
2	9,51	34	10	0	0	4'17"	2	9,47	124	28			
3	9,51	34	15	0	0	4'52"	2	9,43	127	27			
4	9,51	34	20	0	0	6'02"	2	9,41	125	23			
5	9,51	34	25	0	0	6'21"	2	9,37	123	23			
6	9,51	34	30	0	0	7'00"	2	9,36	122	24			
<b>OTRAS OBSERVACIONES</b>													
<p><b>INDICE DE WILCOMB</b></p> <p>Orden de aplicación de los productos químicos:</p> <p>Temperatura del agua [°C]      30</p> <p>0.- Flocc coloidal. Ningún signo de aglutinación  2.- Visible. Flocc muy pequeño casi imperceptible para un observador no entrenado  4.- Disperso. Flocc bien formado que sedimenta muy lentamente o no sedimenta  6.- Claro. Flocc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud  8.- Bueno. Flocc que se deposita fácil pero no completamente  10.- Excelente. Flocc que se deposita completamente, dejando el agua cristalina</p>													



**Tabla AV.2.** Prueba de jarras con dosis de coagulante entre 5 y 30 mg/L y floculante polimérico no iónico entre 1 y 6 mg/L

FECHA	MUESTRA INICIAL		DOSIFICACIÓN				OBSERVACIONES VISUALES		AGUA SEDIMENTADA				
	Turbidez inicial [NTU]	Dureza total [mg/L]	Tiempo [min]	Velocidad [rpm]	Coagulante: Sulfato de aluminio [mg/L]	Alcalinizante: Hidróxido de calcio 1% [mL]	Ayudante: Polímero no iónico L-1550A 0,1% [mg/L]	Volumen de jarras [mL]	Tiempo de formación del floc	Índice de Wilcomb	pH	Turbidez residual [NTU]	Alcalinidad residual [mg/L]
Martes	159	34	Mezcla rápida					500					
10/10/2017			1	100									
		9,51											
Jarra	pH												
1	9,51	34	5	0	1			1'44"	2	9,5	116	29	
2	9,51	34	10	0	2			4'43"	2	9,49	120	28	
3	9,51	34	15	0	3			4'28"	2	9,48	121	29	
4	9,51	34	20	0	4			4'15"	2	9,45	119	29	
5	9,51	34	25	0	5			2'12"	2	9,43	119	26	
6	9,51	34	30	0	6			3'52"	2	9,4	119	17	
<b>OTRAS OBSERVACIONES</b>													
Orden de aplicación de los productos químicos: Coagulante y floculante en la mezcla rápida													
Temperatura del agua [°C] 30													
<b>INDICE DE WILCOMB</b>													
0.- Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación													
2.- Visible. Floc muy pequeño casi imperceptible para un observador no entrenado													
4.- Disperso. Floc bien formado que sedimenta muy lentamente o no sedimenta													
6.- Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud													
8.- Bueno. Floc que se deposita fácil pero no completamente													
10.- Excelente. Floc que se deposita completamente, dejando el agua cristalina													

**Tabla AV.3.** Prueba de jarras con dosis de coagulante entre 50 y 300 mg/L

FECHA	MUESTRA INICIAL		DOSIFICACIÓN				OBSERVACIONES VISUALES		AGUA SEDIMENTADA				
	Turbidez inicial [NTU]	Dureza total [mg/L]	Tiempo [min]	Velocidad [rpm]	Coagulante: Sulfato de aluminio [mg/L]	Alcalinizante: Hidróxido de calcio 1% [mL]	Ayudante: --- [mg/L]	Volumen de jarras [mL]	Tiempo de floc [min]	Velocidad [rpm]	Tiempo de sedim [min]	Turbidez residual [NTU]	Alcalinidad residual [mg/L]
Martes	159	34	1	100	0	0	0	500	Mezcla rápida	Mezcla lenta			
10/10/2017		9,51											
Jarra	pH												
1	9,51	34	50	100	0	0	0	4'30"	2	9,48	107	26	
2	9,51	34	100	150	0	0	0	1'54"	2	9,49	109	20	
3	9,51	34	150	200	0	0	0	0'51"	6	9,01	60,2	16	
4	9,51	34	200	250	0	0	0	0'23"	6	8,72	15	15	
5	9,51	34	250	300	0	0	0	1'07"	4	8,35	7,66	12	
6	9,51	34	300		0	0	0	1'21"	4	7,89	5,86	8	
<b>OTRAS OBSERVACIONES</b>													
Orden de aplicación de los productos químicos:													
Temperatura del agua [°C] 30													
<b>INDICE DE WILCOMB</b>													
0.- Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación													
2.- Visible. Floc muy pequeño casi imperceptible para un observador no entrenado													
4.- Disperso. Floc bien formado que sedimenta muy lentamente o no sedimenta													
6.- Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud													
8.- Bueno. Floc que se deposita fácil pero no completamente													
10.- Excelente. Floc que se deposita completamente, dejando el agua cristalina													

**Tabla AV.4.** Prueba de jarras con dosis de coagulante entre 250 y 500 mg/L

FECHA	MUESTRA INICIAL		DOSIFICACIÓN				OBSERVACIONES VISUALES		AGUA SEDIMENTADA				
	Turbidez inicial [NTU]	Dureza total [mg/L]	Tiempo [min]	Velocidad [rpm]	Coagulante: Sulfato de aluminio [mg/L]	Alcalinizante: Hidróxido de calcio 1% [mL]	Ayudante: --- [mg/L]	Volumen de jarras [mL]	Tiempo de floc [min]	Velocidad [rpm]	Tiempo de sedim [min]	Turbidez residual [NTU]	Alcalinidad residual [mg/L]
Miércoles 18/10/2017	249	45	1	100	250	0	0	500	Mezcla lenta	15	40	15	35
	9,65	9,65			300	0	0						28
Jarra 1	9,65	9,65			350	0	0						23
Jarra 2	9,65	9,65			400	0	0						20
Jarra 3	9,65	9,65			450	0	0						16
Jarra 4	9,65	9,65			500	0	0						14
<b>OTRAS OBSERVACIONES</b>													
Orden de aplicación de los productos químicos													
Temperatura del agua [°C] 30													
<b>INDICE DE WILCOMB</b>													
0.- Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación													
2.- Visible. Floc muy pequeño casi imperceptible para un observador no entrenado													
4.- Disperso. Floc bien formado que sedimenta muy lentamente o no sedimenta													
6.- Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud													
8.- Bueno. Floc que se deposita fácil pero no completamente													
10.- Excelente. Floc que se deposita completamente, dejando el agua cristalina													

**Tabla AV.5.** Prueba de jarras con dosis de coagulante entre 300 y 550 mg/L a pH cercano al neutro

FECHA	MUESTRA INICIAL		DOSIFICACIÓN				OBSERVACIONES VISUALES		AGUA SEDIMENTADA		
	Turbidez inicial [NTU]	249	Mezcla rápida		Coagulante: Sulfato de aluminio [mg/L]	Alcalinizante: Hidróxido de calcio 1% [mL]	Ayudante: --- [mg/L]	Volumen de jarras [mL]	500	Mezcla lenta	Tiempo de floc [min]
Dureza total [mg/L]	45	Tiempo [min]	1	Velocidad [rpm]							
Jarra	pH	Alcalinidad total [mg/L]	Coagulante: Sulfato de aluminio [mg/L]	Alcalinizante: Hidróxido de calcio 1% [mL]	Ayudante: --- [mg/L]	Tiempo de formación del floc	Índice de Wilcomb	pH	Turbidez residual [NTU]	Alcalinidad residual [mg/L]	
1	6,46	45	300	0	0	1'48"	4	5,16	27,5	8	
2	6,46	45	350	0	0	1'35"	4	4,99	31,2	6	
3	6,46	45	400	0	0	1'18"	4	4,88	35	5	
4	6,46	45	450	0	0	2'01"	4	4,81	38,9	4	
5	6,46	45	500	0	0	2'10"	4	4,76	41,3	4	
6	6,46	45	550	0	0	2'27"	4	4,695	45,9	3	

OTRAS OBSERVACIONES		INDICE DE WILCOMB
Orden de aplicación de los productos químicos: Ácido sulfúrico 0,2 N en regulación de pH y coagulante en mezcla rápida		
Temperatura del agua [°C]	30	
		0.- Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación 2.- Visible. Floc muy pequeño casi imperceptible para un observador no entrenado 4.- Disperso. Floc bien formado que sedimenta muy lentamente o no sedimenta 6.- Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud 8.- Bueno. Floc que se deposita fácil pero no completamente 10.- Excelente. Floc que se deposita completamente, dejando el agua cristalina



**Tabla AV.6.** Prueba de jarras con dosis de coagulante entre 100 y 600 mg/L

FECHA	MUESTRA INICIAL		DOSIFICACIÓN				OBSERVACIONES VISUALES		AGUA SEDIMENTADA				
	Turbidez inicial [NTU]	Dureza total [mg/L]	Tiempo [min]	Velocidad [rpm]	Coagulante: Sulfato de aluminio [mg/L]	Alcalinizante: Hidróxido de calcio 1% [mL]	Ayudante: --- [mg/L]	Volumen de jarras [mL]	Tiempo de flocc [min]	Velocidad [rpm]	Tiempo de sedim [min]	Turbidez residual [NTU]	Alcalinidad residual [mg/L]
Jueves	148	60	1	100	0	0	0	500	Mezcla rápida	Mezcla lenta			
26/10/2018		9,47									15		
Jarra	pH										40		
											15		
1	9,47	60			100	0	0	1'52"				132	45
2	9,47	60			200	0	0	1'41"				127	43
3	9,47	60			300	0	0	2'10"				87,9	37
4	9,47	60			400	0	0	2'30"				2,88	8
5	9,47	60			500	0	0	2'25"				2,94	4
6	9,47	60			600	0	0	2'45"				3,55	4
<b>OTRAS OBSERVACIONES</b>													
<p><b>INDICE DE WILCOMB</b></p> <p>0.- Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación</p> <p>2.- Visible. Floc muy pequeño casi imperceptible para un observador no entrenado</p> <p>4.- Disperso. Floc bien formado que sedimenta muy lentamente o no sedimenta</p> <p>6.- Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud</p> <p>8.- Bueno. Floc que se deposita fácil pero no completamente</p> <p>10.- Excelente. Floc que se deposita completamente, dejando el agua cristalina</p>													
<p>Orden de aplicación de los productos químicos:</p> <p>Temperatura del agua [°C]      30</p>													

**Tabla AV.7.** Prueba de jarras con dosis de coagulante entre 20 y 120 mg/L con 20 mg/L de alcalinizante

FECHA	MUESTRA INICIAL	DOSIFICACIÓN		OBSERVACIONES VISUALES	AGUA SEDIMENTADA		
Martes 31/10/2017	Turbidez inicial [NTU]	Mezcla rápida		Volumen de jarras [mL]	Mezcla lenta		
	Dureza total [mg/L]	Tiempo [min]	1		Tiempo de floc [min]	15	
	pH	Velocidad [rpm]	100		Velocidad [rpm]	40	
Jarra	Alcalinidad total [mg/L]	Coagulante: Sulfato de aluminio [mg/L]	Alcalinizante: Hidróxido de calcio 1% [mL]	Tiempo de formación del floc	Índice de Wilcomb	Turbidez residual [NTU]	Alcalinidad residual [mg/L]
1	11,95	20	20	0'19"	6	11,43	66
2	11,95	40	20	0'10"	6	10,33	55
3	11,95	60	20	0'36"	6	8,94	29
4	11,95	80	20	0'47"	4	7,09	22
5	11,95	100	20	2'33"	2	6,33	13
6	11,95	120	20	3'41"	2	5,52	9
<b>OTRAS OBSERVACIONES</b>							
<p>Orden de aplicación de los productos químicos: Alcalinizante en regulación de pH y coagulante en mezcla rápida</p> <p>Temperatura del agua [°C] 30</p> <p><b>INDICE DE WILCOMB</b></p> <p>0.- Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación  2.- Visible. Floc muy pequeño casi imperceptible para un observador no entrenado  4.- Disperso. Floc bien formado que sedimenta muy lentamente o no sedimenta  6.- Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud  8.- Bueno. Floc que se deposita fácil pero no completamente  10.- Excelente. Floc que se deposita completamente, dejando el agua cristalina</p>							

**Tabla AV.8.** Prueba de jarras con dosis de coagulante de 60 mg/L, 20 mg/L de alcalinizante y floculante polimérico no iónico entre 0,33 y 1,00 mg/L

FECHA	MUESTRA INICIAL	DOSIFICACIÓN		OBSERVACIONES VISUALES	AGUA SEDIMENTADA			
Martes 31/10/2017	Turbidez inicial [NTU]	Mezcla rápida		Volumen de jarras [mL]	Mezcla lenta			
	Dureza total [mg/L]	Tiempo [min]	1		Tiempo de floc [min]	15		
	pH	Velocidad [rpm]	100		Velocidad [rpm]	40		
Jarra	pH	Coagulante: Sulfato de aluminio [mg/L]	Alcalinizante: Hidróxido de calcio 1% [mL]	Ayudante: No iónico L-1550A 0,1% [mg/L]	Turbidez residual [NTU]	Alcalinidad residual [mg/L]		
1	11,95	60	20	0,33	6	7,8	2,67	82
2	11,95	60	20	0,66	6	7,66	2,35	76
3	11,95	60	20	1,00	6	7,85	3,73	73
4								
5								
6								
<b>OTRAS OBSERVACIONES</b>								
Orden de aplicación de los productos químicos: Alcalinizante en regulación de pH, coagulante y floculante en mezcla rápida								
Temperatura del agua [°C] 30								
<b>INDICE DE WILCOMB</b>								
0.- Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación								
2.- Visible. Floc muy pequeño casi imperceptible para un observador no entrenado								
4.- Disperso. Floc bien formado que sedimenta muy lentamente o no sedimenta								
6.- Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud								
8.- Bueno. Floc que se deposita fácil pero no completamente								
10.- Excelente. Floc que se deposita completamente, dejando el agua cristalina								

**Tabla AV.9.** Prueba de jarras con dosis de coagulante de 60 mg/L, 20 mg/L de alcalinizante y floculante polimérico aniónico entre 0,33 y 1,00 mg/L

FECHA	MUESTRA INICIAL	DOSIFICACIÓN		OBSERVACIONES VISUALES	AGUA SEDIMENTADA		
Martes	Turbidez inicial [NTU]	Mezcla rápida		Volumen de jarras [mL]	Mezcla lenta		
31/10/2017	Dureza total [mg/L]	Tiempo [min]	1		Tiempo de floc [min]	15	
	pH	Velocidad [rpm]	100		Velocidad [rpm]	40	
Jarra	pH	Coagulante: Sulfato de aluminio [mg/L]	Alcalinizante: Hidróxido de calcio 1% [mL]	Ayudante: Aniónico L-1633 0,1% [mg/L]	Índice de Wilcomb	Turbidez residual [NTU]	Alcalinidad residual [mg/L]
1	11,95	60	20	0,33	4	2,45	73
2	11,95	60	20	0,66	4	1,67	75
3	11,95	60	20	1,00	2	2,25	70
4							
5							
6							
<b>OTRAS OBSERVACIONES</b>							
Orden de aplicación de los productos químicos: Alcalinizante en regulación de pH, coagulante y floculante en mezcla rápida							
Temperatura del agua [°C] 30							
<b>INDICE DE WILCOMB</b>							
0.- Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación							
2.- Visible. Floc muy pequeño casi imperceptible para un observador no entrenado							
4.- Disperso. Floc bien formado que sedimenta muy lentamente o no sedimenta							
6.- Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud							
8.- Bueno. Floc que se deposita fácil pero no completamente							
10.- Excelente. Floc que se deposita completamente, dejando el agua cristalina							

**Tabla AV.10.** Prueba de jarras con dosis de coagulante de 60 mg/L, 20 mg/L de alcalinizante y 0,66 mg/L de floculante polimérico aniónico

FECHA	MUESTRA INICIAL		DOSIFICACIÓN			OBSERVACIONES VISUALES		AGUA SEDIMENTADA		
	Miércoles 08/11/2017	Turbidez inicial [NTU]	152	Mezcla rápida			Volumen de jarras [mL]	500	Mezcla lenta	
	Dureza total [mg/L]	118	Tiempo [min]	1	Tiempo de floc [min]	15				
	pH	9,48	Velocidad [rpm]	100		Velocidad [rpm]	40			
Jarra	pH	Alcalinidad total [mg/L]	Coagulante: Sulfato de aluminio [mg/L]	Alcalinizante: Hidróxido de calcio 1% [mL]	Ayudante: Aniónico L-1633 0,1% [mg/L]	Tiempo de formación del floc	Índice de Wilcomb	Turbidez residual [NTU]	Alcalinidad residual [mg/L]	
1	11,33	246	60	20	0,66	1'60"	4	43,3	180	
2	11,33	246	60	20	0,66	1'53"	4	44,5	187	
3	11,33	246	60	20	0,66	2'14"	2	39,8	176	
4										
5										
6										
<b>OTRAS OBSERVACIONES</b>										
Orden de aplicación de los productos químicos: Alcalinizante en regulación de pH, coagulante y floculante en mezcla rápida										
Temperatura del agua [°C] 30										
<b>INDICE DE WILCOMB</b>										
0.- Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación										
2.- Visible. Floc muy pequeño casi imperceptible para un observador no entrenado										
4.- Disperso. Floc bien formado que sedimenta muy lentamente o no sedimenta										
6.- Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud										
8.- Bueno. Floc que se deposita fácil pero no completamente										
10.- Excelente. Floc que se deposita completamente, dejando el agua cristalina										

**Tabla AV.11.** Prueba de jarras con dosis de coagulante de 60 mg/L, 20 mg/L de alcalinizante y 0,66 mg/L de floculante polimérico aniónico

FECHA	MUESTRA INICIAL		DOSIFICACIÓN				OBSERVACIONES VISUALES		AGUA SEDIMENTADA			
	Jueves 16/11/2017	Turbidez inicial [NTU]	291	Mezcla rápida				Volumen de jarras [mL]	500	Mezcla lenta		
	Dureza total [mg/L]	140	Tiempo [min]	1			Tiempo de floc [min]			15		
	pH	9,61	Velocidad [rpm]	100					Velocidad [rpm]	40		
					Coagulante: Sulfato de aluminio [mg/L]	60			Tiempo de formación del floc		Turbidez residual [NTU]	Alcalinidad residual [mg/L]
Jarra	pH				Alcalinizante: Hidróxido de calcio 1% [mL]	20			Índice de Wilcomb			
1	11,95	246			Ayudante: Aniónico L-1633 0,1% [mg/L]	0,66			4	1'15"	55,3	235
2	11,95	246				0,66			4	0'57"	68	243
3	11,95	246				0,66			4	1'36"	64,6	245
4	11,95	246				0,66			4	1'53"	61,5	243
5												
6												
<b>OTRAS OBSERVACIONES</b>												
Orden de aplicación de los productos químicos: Alcalinizante en regulación de pH, coagulante y floculante en mezcla rápida												
Temperatura del agua [°C] 30												
<b>INDICE DE WILCOMB</b>												
0.- Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación												
2.- Visible. Floc muy pequeño casi imperceptible para un observador no entrenado												
4.- Disperso. Floc bien formado que sedimenta muy lentamente o no sedimenta												
6.- Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud												
8.- Bueno. Floc que se deposita fácil pero no completamente												
10.- Excelente. Floc que se deposita completamente, dejando el agua cristalina												

**Tabla AV.12.** Prueba de jarras con dosis de coagulante de 60 mg/L, 20 mg/L de alcalinizante y 20 mg/L de arcilla

FECHA	MUESTRA INICIAL		DOSIFICACIÓN				OBSERVACIONES VISUALES		AGUA SEDIMENTADA				
	Turbidez inicial [NTU]	Dureza total [mg/L]	Tiempo [min]	Velocidad [rpm]	Coagulante: Sulfato de aluminio [mg/L]	Alcalinizante: Hidróxido de calcio 1% [mL]	Ayudante: Solución de Arcilla 0,5% [mg/L]	Volumen de jarras [mL]	Tiempo de formación del floc	Índice de Wilcomb	pH	Turbidez residual [NTU]	Alcalinidad residual [mg/L]
Martes 28/11/2017	190	---	Mezcla rápida				---	500	130"	2	12,11	105	---
	---	---	1	100	---	---	240"						
							20 <sup>a</sup>	---	0	10,20	216	---	
							20d	---	0	10,27	215	---	
							20d	2'15"	2	12,52	152	---	
							---	---	0	9,86	187	---	
<b>OTRAS OBSERVACIONES</b>													
Orden de aplicación de los productos químicos: [a] se agregó en la etapa de regulación de pH y [d] en la mezcla rápida													
Temperatura del agua [°C] 30													
<b>INDICE DE WILCOMB</b>													
0.- Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación													
2.- Visible. Floc muy pequeño casi imperceptible para un observador no entrenado													
4.- Disperso. Floc bien formado que sedimenta muy lentamente o no sedimenta													
6.- Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud													
8.- Bueno. Floc que se deposita fácil pero no completamente													
10.- Excelente. Floc que se deposita completamente, dejando el agua cristalina													

**Tabla A V.13.** Prueba de jarras con dosis de coagulante de 60 mg/L, entre 10 y 40 mg/L de alcalinizante y entre 5 y 20 mg/L de arcilla

FECHA	MUESTRA INICIAL		DOSIFICACIÓN				OBSERVACIONES VISUALES		AGUA SEDIMENTADA			
	Turbidez inicial [NTU]	190	Mezcla rápida		Coagulante: Sulfato de aluminio [mg/L]	Alcalinizante: Hidróxido de calcio 1% [mL]	Ayudante: Solución de Arcilla 0,5% [mg/L]	Volumen de jarras [mL]	Índice de Wilcomb	pH	Turbidez residual [NTU]	Alcalinidad residual [mg/L]
Martes 28/11/2017	Dureza total [mg/L]	---	Tiempo [min]	1								
	pH	10,1			Velocidad [rpm]	40	Tiempo de sedim [min]	15				
Jarra	pH											
1	12,29		60	10a	---		---	0		10,94	235	---
2	12,30		60	30a	---		2'30"	2		12,06	90,3	---
3	12,42		60	40a	---		3'45"	4		12,33	26,5	---
4	12,51		60	40a	5d		2'00"	2		12,4	102	---
5	12,63		60	40a	10d		1'15"	2		12,45	89,1	---
6	12,78		60	40a	20d		---	0		12,56	112	---
<b>OTRAS OBSERVACIONES</b>												
<p>Orden de aplicación de los productos químicos: [a] se agregó en la etapa de regulación de pH y [d] en la mezcla rápida</p> <p>Temperatura del agua [°C] 30</p>												
<b>INDICE DE WILCOMB</b>												
<p>0.- Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación</p> <p>2.- Visible. Floc muy pequeño casi imperceptible para un observador no entrenado</p> <p>4.- Disperso. Floc bien formado que sedimenta muy lentamente o no sedimenta</p> <p>6.- Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud</p> <p>8.- Bueno. Floc que se deposita fácil pero no completamente</p> <p>10.- Excelente. Floc que se deposita completamente, dejando el agua cristalina</p>												



**Tabla AV.14.** Prueba de jarras con dosis de coagulante de 60 mg/L y entre 40 y 70 mg/L de alcalinizante

FECHA	MUESTRA INICIAL		DOSIFICACIÓN				OBSERVACIONES VISUALES		AGUA SEDIMENTADA				
	Turbidez inicial [NTU]	Dureza total [mg/L]	Tiempo [min]	Velocidad [rpm]	Coagulante: Sulfato de aluminio [mg/L]	Alcalinizante: Hidróxido de calcio 1% [mL]	Ayudante: [mg/L]	Volumen de jarras [mL]	Tiempo de formación del floc	Índice de Wilcomb	pH	Turbidez residual [NTU]	Alcalinidad residual [mg/L]
Miércoles 05/12/2017	453	---	1	100	60	40	---	500	1'30"	4	12,84	54,3	---
					60	50	---		2'10"	4	13,05	34,2	---
					60	60	---		2'35"	4	13,03	30,9	---
					60	70	---		3'20"	6	13,17	8,59	---
<b>OTRAS OBSERVACIONES</b>													
Orden de aplicación de los productos químicos: alcalinizante en regulación de pH y coagulante en mezcla rápida													
Temperatura del agua [°C] 30													
<b>INDICE DE WILCOMB</b>													
0.- Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación													
2.- Visible. Floc muy pequeño casi imperceptible para un observador no entrenado													
4.- Disperso. Floc bien formado que sedimenta muy lentamente o no sedimenta													
6.- Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud													
8.- Bueno. Floc que se deposita fácil pero no completamente													
10.- Excelente. Floc que se deposita completamente, dejando el agua cristalina													

**Tabla AV.15.** Prueba de jarras con dosis de coagulante entre 10 y 40 mg/L y 70 mg/L de alcalinizante

FECHA	MUESTRA INICIAL		DOSIFICACIÓN				OBSERVACIONES VISUALES		AGUA SEDIMENTADA				
	Turbidez inicial [NTU]	Dureza total [mg/L]	Tiempo [min]	Velocidad [rpm]	Coagulante: Sulfato de aluminio [mg/L]	Alcalinizante: Hidróxido de calcio 1% [mL]	Ayudante: [mg/L]	Volumen de jarras [mL]	Tiempo de formación del floc	Índice de Wilcomb	pH	Turbidez residual [NTU]	Alcalinidad residual [mg/L]
Miércoles 05/12/2017	453	---	1	100				500					
		11,0											
Jarra	pH	Alcalinidad total [mg/L]											
1	13,4	---	10	70	---		3'40"	8	12,84	3,45	---		
2	13,4	---	20	70	---		4'10"	8	13,05	2,92	---		
3	13,4	---	30	70	---		4'10"	8	13,03	2,89	---		
4	13,4	---	40	70	---		4'10"	10	13,17	2,21	---		
5													
6													
<b>OTRAS OBSERVACIONES</b>													
Orden de aplicación de los productos químicos: alcalinizante en regulación de pH y coagulante en mezcla rápida													
Temperatura del agua [°C] 30													
<b>INDICE DE WILCOMB</b>													
0.- Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación													
2.- Visible. Floc muy pequeño casi imperceptible para un observador no entrenado													
4.- Disperso. Floc bien formado que sedimenta muy lentamente o no sedimenta													
6.- Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud													
8.- Bueno. Floc que se deposita fácil pero no completamente													
10.- Excelente. Floc que se deposita completamente, dejando el agua cristalina													

**Tabla AV.16.** Prueba de jarras con dosis de coagulante de 20 mg/L y entre 30 y 70 mg/L de alcalinizante

FECHA	MUESTRA INICIAL	DOSIFICACIÓN			OBSERVACIONES VISUALES	AGUA SEDIMENTADA	
Jueves	Turbidez inicial [NTU]	Mezcla rápida			Volumen de jarras [mL]	Mezcla lenta	
13/12/2017	Dureza total [mg/L]	Tiempo [min]	1	500		Tiempo de floc [min]	15
	pH	Velocidad [rpm]	100			Velocidad [rpm]	40
Jarra	Alcalinidad total [mg/L]	Coagulante: Sulfato de aluminio [mg/L]	Alcalinizante: Hidróxido de calcio 1% [mL]	Ayudante: [mg/L]	Tiempo de formación del floc	Turbidez residual [NTU]	Alcalinidad residual [mg/L]
1	13,40	20	60	---	3'30"	1,70	---
2	13,40	20	50	---	3'30"	1,84	---
3	13,38	20	40	---	2'20"	2,39	---
4	12,25	20	30	---	1'40"	5,84	---
5	13,63	20	70	---	3'30"	1,24	---
6							
<b>OTRAS OBSERVACIONES</b>							
Orden de aplicación de los productos químicos: alcalinizante en regulación de pH y coagulante en mezcla rápida							
Temperatura del agua [°C] 30							
Los tensoactivos no se redujeron considerablemente; pasaron de 1,46 a 1,38 mg/L							
<b>INDICE DE WILCOMB</b>							
0.- Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación							
2.- Visible. Floc muy pequeño casi imperceptible para un observador no entrenado							
4.- Disperso. Floc bien formado que sedimenta muy lentamente o no sedimenta							
6.- Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud							
8.- Bueno. Floc que se deposita fácil pero no completamente							
10.- Excelente. Floc que se deposita completamente, dejando el agua cristalina							

**Tabla AV.17.** Prueba de jarras con dosis de coagulante de 20 mg/L, 70 mg/L de alcalinizante y entre 1 y 5 mg/L de floculante polimérico catiónico L-1640

FECHA	MUESTRA INICIAL	DOSIFICACIÓN			OBSERVACIONES VISUALES	AGUA SEDIMENTADA		
Jueves	Turbidez inicial [NTU]	Mezcla rápida			Volumen de jarras [mL]	Mezcla lenta		
05/04/2018	Dureza total [mg/L]	Tiempo [min]	1	500		Tiempo de floc [min]	15	
	pH	Velocidad [rpm]	100			Velocidad [rpm]	40	
Jarra	pH	Coagulante: Sulfato de aluminio [mg/L]	Alcalinizante: Hidróxido de calcio 1% [mL]	Ayudante: Coagulante catiónico L-1640 [mg/L]	Tiempo de formación del floc	Índice de Wilcomb	Turbidez residual [NTU]	Alcalinidad residual [mg/L]
1	12,8	20	70	1	0'10"	8	20,5	---
2	12,8	20	70	3	0'40"	8	21,2	---
3	12,8	20	70	5	1'00"	8	18,5	---
4								
5								
6								
<b>OTRAS OBSERVACIONES</b>								
Orden de aplicación de los productos químicos: alcalinizante en regulación de pH, coagulante floculante en mezcla rápida								
Temperatura del agua [°C] 30								
<b>INDICE DE WILCOMB</b>								
0.- Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación								
2.- Visible. Floc muy pequeño casi imperceptible para un observador no entrenado								
4.- Disperso. Floc bien formado que sedimenta muy lentamente o no sedimenta								
6.- Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud								
8.- Bueno. Floc que se deposita fácil pero no completamente								
10.- Excelente. Floc que se deposita completamente, dejando el agua cristalina								

**Tabla AV.18.** Prueba de jarras con dosis de coagulante de 20 mg/L, 70 mg/L de alcalinizante y entre 1 y 5 mg/L de floculante polimérico catiónico L-1560

FECHA	MUESTRA INICIAL	DOSIFICACIÓN		OBSERVACIONES VISUALES	AGUA SEDIMENTADA		
Jueves	Turbidez inicial [NTU]	Mezcla rápida		Volumen de jarras [mL]	Mezcla lenta		
05/04/2018	Dureza total [mg/L]	Tiempo [min]	1		Tiempo de floc [min]	15	
	pH	Velocidad [rpm]	100		Velocidad [rpm]	40	
Jarra	pH	Coagulante: Sulfato de aluminio [mg/L]	Alcalinizante: Hidróxido de calcio 1% [mL]	Tiempo de formación del floc	pH	Turbidez residual [NTU]	Alcalinidad residual [mg/L]
1	12,8	20	70	0'30"	12,97	25,9	---
2	12,8	20	70	0'08"	12,88	14	---
3	12,8	20	70	0'03"	12,86	25,1	---
4							
5							
6							
<b>OTRAS OBSERVACIONES</b>							
Orden de aplicación de los productos químicos: alcalinizante en regulación de pH, coagulante floculante en mezcla rápida							
Temperatura del agua [°C] 30							
<b>INDICE DE WILCOMB</b>							
0.- Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación							
2.- Visible. Floc muy pequeño casi imperceptible para un observador no entrenado							
4.- Disperso. Floc bien formado que sedimenta muy lentamente o no sedimenta							
6.- Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud							
8.- Bueno. Floc que se deposita fácil pero no completamente							
10.- Excelente. Floc que se deposita completamente, dejando el agua cristalina							

**Tabla AV.19.** Prueba de jarras con dosis de coagulante de 20 mg/L, entre 0 y 70 mg/L de alcalinizante y 3 mg/L de floculante polimérico catiónico L-1560

FECHA	MUESTRA INICIAL	DOSIFICACIÓN		OBSERVACIONES VISUALES	AGUA SEDIMENTADA				
Jueves	Turbidez inicial [NTU]	Mezcla rápida		Volumen de jarras [mL]	Mezcla lenta				
05/04/2018	Dureza total [mg/L]	Tiempo [min]	1		Tiempo de floc [min]	15			
	pH	Velocidad [rpm]	100		Velocidad [rpm]	40			
Jarra	pH	Coagulante: Sulfato de aluminio [mg/L]	Alcalinizante: Hidróxido de calcio 1% [mL]	Ayudante: Coagulante catiónico L-1560 [mg/L]	Tiempo de formación del floc	Índice de Wilcomb	Turbidez residual [NTU]	Alcalinidad residual [mg/L]	
1	11,81	20	10	3	2'11"	4	11,95	97	---
2	12,32	20	20	3	2'36"	4	12,39	52,4	---
3	12,62	20	30	3	2'50"	6	12,60	34,1	---
4	12,74	20	40	3	2'40"	6	12,69	31,9	---
5	12,87	20	50	3	3'15"	8	12,6	26,9	---
6	9,8	20	0	3	4'22"	2	9,74	161	---
<b>OTRAS OBSERVACIONES</b>									
Orden de aplicación de los productos químicos: alcalinizante en regulación de pH, coagulante floculante en mezcla rápida									
Temperatura del agua [°C] 30									
<b>INDICE DE WILCOMB</b>									
0.- Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación									
2.- Visible. Floc muy pequeño casi imperceptible para un observador no entrenado									
4.- Disperso. Floc bien formado que sedimenta muy lentamente o no sedimenta									
6.- Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud									
8.- Bueno. Floc que se deposita fácil pero no completamente									
10.- Excelente. Floc que se deposita completamente, dejando el agua cristalina									

**Tabla AV.20.** Prueba de jarras con dosis de coagulante de 20 mg/L, entre 70 y 100 mg/L de alcalinizante, 3 mg/L de floculante polimérico catiónico L-1560 y entre 10E-3 molar y 10E-1 molar de Cloruro de sodio

FECHA	MUESTRA INICIAL	DOSIFICACIÓN		OBSERVACIONES VISUALES	AGUA SEDIMENTADA			
Martes 10/04/2018	Turbidez inicial [NTU]	Mezcla rápida		Volumen de jarras [mL]	Mezcla lenta			
	Dureza total [mg/L]	Tiempo [min]	1			Tiempo de floc [min]	15	
	pH	Velocidad [rpm]	100			Velocidad [rpm]	40	
Jarra	Alcalinidad total [mg/L]	Coagulante: Sulfato de aluminio [mg/L]	Alcalinizante: Hidróxido de calcio 1% [mL]	Ayudante: Coagulante catiónico L-1560 [mg/L]	Tiempo de formación del floc	Índice de Wilcomb	Turbidez residual [NTU]	Alcalinidad residual [mg/L]
1	12,43	20*	70	3	1'15"	4	405	---
2	12,43	20**	70	3	1'23"	4	381	---
3	12,43	20***	70	3	0'45"	4	459	---
4	12,43	20	70	3	0'30"	4	412	---
5	12,98	20	100	3	2'12"	8	16,8	---
6								
<b>OTRAS OBSERVACIONES</b>						<b>INDICE DE WILCOMB</b>		
Orden de aplicación de los productos químicos: alcalinizante y NaCl en regulación de pH, coagulante floculante en mezcla rápida						0.- Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación		
Temperatura del agua [°C] 30						2.- Visible. Floc muy pequeño casi imperceptible para un observador no entrenado		
* Concentración molar 10E-3 de NaCl						4.- Disperso. Floc bien formado que sedimenta muy lentamente o no sedimenta		
** Concentración molar de 10E-2 de NaCl						6.- Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud		
*** Concentración molar de 10E-1 de NaCl						8.- Bueno. Floc que se deposita fácil pero no completamente		
						10.- Excelente. Floc que se deposita completamente, dejando el agua cristalina		

**Tabla AV.21.** Prueba de jarras con dosis de coagulante de 20 mg/L, 100 mg/L de alcalinizante, 3 mg/L de floculante polimérico catiónico L-1560 y entre 10E-3 molar y 10E-1 molar de Cloruro de sodio

FECHA	MUESTRA INICIAL	DOSIFICACIÓN		OBSERVACIONES VISUALES	AGUA SEDIMENTADA		
Miércoles 18/04/2018	Turbidez inicial [NTU] 38,9 Dureza total [mg/L] --- pH 10,19	Mezcla rápida Tiempo [min] 1 Velocidad [rpm] 100		Volumen de jarras [mL] 500	Mezcla lenta Tiempo de floc [min] 15 Velocidad [rpm] 40 Tiempo de sedim [min] 15		
Jarra	pH	Coagulante: Sulfato de aluminio [mg/L]	Alcalinizante: Hidróxido de calcio 1% [mL]	Tiempo de formación del floc	pH	Turbidez residual [NTU]	Alcalinidad residual [mg/L]
1	13,19	20	100	0'08"	13,31	1,89	---
2	13,19	20*	100	0'08"	13,23	2,05	---
3	13,19	20**	100	0'08"	13,04	1,83	---
4	13,19	20***	100	0'08"	12,81	2,05	---
5	7,00	20	100	2'12"	6,42	13	---
<b>OTRAS OBSERVACIONES</b>							
Orden de aplicación de los productos químicos: alcalinizante y NaCl en regulación de pH, coagulante floculante en mezcla rápida							
Temperatura del agua [°C] 30							
* Concentración molar 10E-3 de NaCl ** Concentración molar de 10E-2 de NaCl *** Concentración molar de 10E-1 de NaCl A la jarra 5 se le reguló el pH desde 13,19 hasta 7 con ácido sulfúrico 0,2 N; el floc se tornó filiforme y no esférico Los tensoactivos no presentaron reducción considerable al aplicar NaCl, pasó de 1,33 a 1,28 mg/L con la concentración molar 10E-1							
<b>INDICE DE WILCOMB</b>							
0.- Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación 2.- Visible. Floc muy pequeño casi imperceptible para un observador no entrenado 4.- Disperso. Floc bien formado que sedimenta muy lentamente o no sedimenta 6.- Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud 8.- Bueno. Floc que se deposita fácil pero no completamente 10.- Excelente. Floc que se deposita completamente, dejando el agua cristalina							



**Tabla AV.22.** Prueba de jarras con dosis de coagulante de 20 mg/L, 100 mg/L de alcalinizante, 3 mg/L de floculante polimérico catiónico L-1560 y entre 10E-3 molar y 10E-1 molar de Cloruro de Sodio a pH cercano al neutro

FECHA	MUESTRA INICIAL		DOSIFICACIÓN			OBSERVACIONES		AGUA SEDIMENTADA					
	Turbidez inicial [NTU]	Dureza total [mg/L]	Tiempo [min]	Velocidad [rpm]	Alcalinizante: Hidróxido de calcio 1% [mL]	Coagulante: Sulfato de aluminio [mg/L]	Ayudante: Coagulante catiónico L-1560 [mg/L]	Volumen de jarras [mL]	Tiempo de floc [min]	Velocidad [rpm]	Tiempo de sedim [min]	Turbidez residual [NTU]	Alcalinidad residual [mg/L]
Miércoles 18/04/2018	38,9	---	1	100				500	15	40	15		
Jarra	pH	10,19			Alcalinizante: Hidróxido de calcio 1% [mL]	Coagulante: Sulfato de aluminio [mg/L]	Ayudante: Coagulante catiónico L-1560 [mg/L]	Tiempo de formación del floc				Turbidez residual [NTU]	Alcalinidad residual [mg/L]
1	6,99	---	20*	100	100	20*	3	1'30"	8		6,91	16,9	---
2	6,8	---	20**	100	100	20**	3	1'15"	8		6,84	17,2	---
3	6,96	---	20***	100	100	20***	3	1'56"	6		6,63	23,2	---
<b>OTRAS OBSERVACIONES</b>													
Orden de aplicación de los productos químicos: alcalinizante y NaCl en regulación de pH, coagulante floculante en mezcla rápida													
Temperatura del agua [°C]													
* Concentración molar 10E-3 de NaCl													
** Concentración molar de 10E-2 de NaCl													
*** Concentración molar de 10E-1 de NaCl													
A las jarras 1,2 y 3 se les reguló el pH desde 13,19 hasta 7 con ácido sulfúrico 0,2 N; el floc se tornó filiforme y no esférico													
Los tensoactivos no presentaron reducción considerable al aplicar NaCl, pasó de 1,33 a 1,28 mg/L con la concentración molar 10E-1													
<b>INDICE DE WILCOMB</b>													
0.- Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación													
2.- Visible. Floc muy pequeño casi imperceptible para un observador no entrenado													
4.- Disperso. Floc bien formado que sedimenta muy lentamente o no sedimenta													
6.- Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud													
8.- Bueno. Floc que se deposita fácil pero no completamente													
10.- Excelente. Floc que se deposita completamente, dejando el agua cristalina													

## ANEXO VI

## DATOS UTILIZADOS EN LOS DISEÑOS EXPERIMENTALES PARA DETERMINAR LAS DOSIS DE SUSTANCIAS QUÍMICAS

- Ensayos realizados para determinar las dosis de alcalinizante y coagulante

**Tabla AVI.1.** Condiciones iniciales de las muestras empleadas en los ensayos de coagulación con regulación de pH

Día	Turbidez inicial [NTU]	pH inicial
1	157	9,72
2	589	10,27

**Tabla AVI.2.** Combinaciones entre distintas dosis de alcalinizante y de coagulante

Día	Coagulante [ppm]	Alcalinizante [mg/L]	Turbidez [NTU]	Reducción Turbidez [%]	pH final
1	20	0	134,0	14,65	9,28
1	20	400	93,6	40,38	11,20
1	20	1 200	26,6	83,06	12,02
1	20	2 000	23,1	85,29	12,14
1	40	0	133,0	15,29	8,67
1	40	400	92,2	41,27	11,11
1	40	1 200	15,2	90,32	12,07
1	40	2 000	22,9	85,41	12,10
1	60	0	131,0	16,56	8,25
1	60	400	42,5	72,93	11,62
1	60	1 200	9,9	93,70	12,06
1	60	2 000	12,0	92,33	16,00
1	100	0	132,0	15,92	7,88
1	100	400	36,0	77,07	11,48
1	100	1 200	4,1	97,36	12,15
1	100	2 000	7,1	95,47	12,04
1	150	0	127,0	19,11	7,45
1	150	400	62,2	60,38	10,93

**Tabla AVI.2.** Combinaciones entre distintas dosis de alcalinizante y de coagulante  
(continuación...)

Día	Coagulante [mg/L]	Alcalinizante [mg/L]	Turbidez [NTU]	Reducción Turbidez [%]	pH
1	150	1 200	3,8	97,57	12,08
1	150	2 000	4,2	97,33	12,10
1	200	0	133,0	15,29	7,08
1	200	400	45,6	70,96	10,55
1	200	1 200	2,1	98,68	12,15
1	200	2 000	6,4	95,90	12,09
2	20	0	556,0	5,60	9,99
2	20	400	484,0	17,83	11,36
2	20	1 200	10,1	98,29	11,98
2	20	2 000	4,1	99,30	12,13
2	40	0	549,0	6,79	9,95
2	40	400	259,0	56,03	11,37
2	40	1 200	5,2	99,11	12,01
2	40	2 000	2,1	99,65	12,13
2	60	0	554,0	5,94	9,90
2	60	400	105,0	82,17	11,47
2	60	1 200	7,6	98,71	12,08
2	60	2 000	1,8	99,69	12,12
2	100	0	560,0	4,92	9,67
2	100	400	87,7	85,11	11,35
2	100	1 200	4,5	99,24	12,05
2	100	2 000	1,2	99,80	12,12
2	150	0	548,0	6,96	9,27
2	150	400	164,0	72,16	11,21
2	150	1 200	3,9	99,33	12,04
2	150	2 000	1,2	99,79	12,12
2	200	0	544,0	7,64	8,86
2	200	400	302,0	48,73	10,94
2	200	1 200	5,6	99,05	12,07
2	200	2 000	1,8	99,69	12,33

- **Ensayos realizados para determinar la influencia de la descomposición de materia orgánica en medio ácido y la dosis de coagulante sobre la turbidez**

**Tabla AVI.3.** Condiciones iniciales de las muestras empleadas en los ensayos de coagulación con descomposición de materia orgánica en medio ácido

Día	Turbidez inicial [NTU]	pH inicial
1	749	6,90
2	548	10,40
3	619	9,91

**Tabla AVI.4.** Combinaciones entre distintos niveles de variación de pH y dosis de coagulante

Día	Coagulante [mg/L]	Variación de pH desde 4 hasta:	Turbidez [NTU]	Reducción de Turbidez [%]	pH final
1	20	9	46,3	93,82	8,22
1	40	9	250,0	66,62	7,85
1	60	9	292,0	61,01	7,89
1	80	9	524,0	30,04	7,33
1	100	9	529,0	29,37	7,38
1	20	10	34,7	95,37	10,20
1	40	10	17,4	97,68	10,14
1	60	10	14,0	98,13	9,79
1	80	10	16,1	97,85	9,82
1	100	10	10,5	98,60	8,96
2	20	9	51,4	90,62	8,63
2	40	9	28,3	94,84	9,23
2	60	9	18,6	96,61	9,10
2	80	9	15,5	97,17	8,87
2	100	9	14,7	97,32	8,91
2	20	10	26,5	95,16	9,76
2	40	10	20,3	96,30	9,86
2	60	10	15,1	97,24	9,61
2	80	10	17,8	96,75	9,65
2	100	10	16,3	97,03	9,41
3	20	9	168,0	72,86	9,11
3	40	9	63,1	89,81	9,20

**Tabla AVI.4.** Combinaciones entre distintos niveles de variación de pH y dosis de coagulante (**continuación...**)

Día	Coagulante [mg/L]	Variación de pH desde 4 hasta:	Turbidez [NTU]	Reducción de Turbidez [%]	pH final
3	60	9	99,8	83,88	8,06
3	80	9	248,0	59,94	7,77
3	100	9	85,4	86,20	7,69
3	20	10	16,0	97,42	9,60
3	40	10	15,1	97,56	9,60
3	60	10	11,5	98,14	9,45
3	80	10	11,3	98,17	9,37
3	100	10	16,1	97,40	8,94

- **Ensayos realizados para determinar el tipo de floculante a utilizarse**

**Tabla AVI.5.** Condiciones iniciales de las muestras empleadas en los ensayos de determinación del tipo de floculante a utilizarse

Día	pH inicial	Turbidez inicial [NTU]	DQO inicial [mg/L]	SAAM inicial [mg/L]
1	10,12	322,0	900	2,30
2	9,95	126,0	600	1,14
3	9,86	35,2	146	0,33

**Tabla AVI.6.** Resultados obtenidos a partir de los distintos tipos de floculante empleados

Día	Floculante	pH	Turbidez [NTU]	DQO [mg/L]	SAAM [mg/L]	%Reducción de Turbidez	%Reducción de DQO	%Reducción de SAAM
1	L-1640	9,46	49,5	390	1,70	84,63	56,67	26,09
1	L-1560	9,86	19,4	380	2,10	93,98	57,78	8,70
1	L-1633	9,65	20,5	400	1,70	93,63	55,56	26,09
1	L-1538	9,66	22,1	360	2,20	93,14	60,00	4,35
1	L-1550A	10,01	19,4	310	2,30	93,98	65,56	0,00
2	L-1640	9,85	14,1	236	0,95	88,81	60,67	17,11
2	L-1560	9,90	15,0	246	1,11	88,10	59,00	2,63
2	L-1633	9,90	19,1	262	1,05	84,84	56,33	7,89
2	L-1538	9,83	24,4	278	1,13	80,63	53,67	1,32
2	L-1550A	9,86	27,2	290	1,14	78,41	51,67	0,00

**Tabla AVI.6.** Resultados obtenidos a partir de los distintos tipos de floculante empleados  
(continuación...)

<b>Día</b>	<b>Floculante</b>	<b>pH</b>	<b>Turbidez [NTU]</b>	<b>DQO [mg/L]</b>	<b>SAAM [mg/L]</b>	<b>%Reducción de Turbidez</b>	<b>%Reducción de DQO</b>	<b>%Reducción de SAAM</b>
3	L-1640	9,51	8,0	76	0,26	77,19	47,95	22,73
3	L-1560	9,65	9,2	88	0,30	73,89	39,73	9,09
3	L-1633	9,57	8,0	100	0,27	77,33	31,51	18,18
3	L-1538	9,34	8,1	92	0,32	77,07	36,99	4,55
3	L-1550A	9,26	8,0	96	0,33	77,39	34,25	0,00

## **ANEXO VII**

### **HOJAS TÉCNICAS DE LOS FLOCULANTES POLIMÉRICOS EMPLEADOS EN LOS ENSAYOS DE LABORATORIO**



## LIPESA 1538

### POLÍMERO ANIÓNICO

- Ideal para la deshidratación mecánica de lodos inorgánicos o minerales
- Aplicable a una gran variedad de aguas y efluentes industriales
- Trabaja en un rango amplio de pH: 1,0 - 12,0
- Fácilmente soluble en agua
- Excelente relación costo-rendimiento: Trabaja a dosis muy bajas

### Usos principales

LIPESA 1538 ha sido especialmente formulado para ser utilizado en la deshidratación mecánica de lodos, provenientes de procesos de clarificación y espesamiento de efluentes industriales, especialmente los minerales. LIPESA 1538 tiene también aplicación en la clarificación y espesamiento de aguas industriales y muchos otros procesos como el papelero y azucarero. LIPESA 1538 cumple con los requisitos de la FDA para uso en producción de azúcar bajo la Regulación Federal 21CFR.173.5.

### Descripción General

LIPESA 1538 es un polímero sólido de "muy alto peso molecular", fuertemente aniónico, con las siguientes características:

Forma:	Granular de flujo libre
Color:	Blanco
Olor:	Inodoro
Viscosidad Brookfield (cP):	Minimo 2000 al 0,5% Minimo 1000 al 0,25% Minimo 300 al 0,1%
Solubilidad:	Máxima en agua 0,5%

### Dosis

La dosis de LIPESA 1538 varía de acuerdo al tipo de proceso y efluente tratado. Las dosis típicas son:

- Deshidratación mecánica: 10 – 150 g/m<sup>3</sup>
- Espesamiento y clarificación: 0,05 – 30 g/m<sup>3</sup>

En todo caso, el Representante Técnico LIPESA le asesorará en el establecimiento de la dosis adecuada a su situación particular.

### Modo de Empleo y Alimentación

LIPESA 1538 se debe alimentar de manera continua al proceso, en un punto de buena agitación y mezcla, utilizando bombas de dosificación de acero dulce o cualquier otro material. Para obtener el mejor rendimiento del producto, se debe preparar en soluciones hasta un 0,5% de concentración y alimentar luego al 0,1% de concentración como máximo.

El tiempo de preparación de las soluciones de LIPESA 1538 es de 40 minutos. Se recomienda realizarlo de la siguiente manera:

- Agregarlo lentamente al agua mientras se agita. Esto evita la formación de grumos o apelmazamiento
- Agitar suavemente durante 10 – 15 minutos
- Dejar en reposo durante 5 – 10 minutos
- Y finalmente, agitar por 15 – 20 minutos

### Despacho y Almacenamiento

LIPESA 1538 se despacha en bolsas de 25 kg. y 750 Kg. Se recomienda almacenarlo en un lugar seco y fresco. Mantener los envases cerrados para evitar la hidratación. Tiempo de almacenamiento (vida útil): 24 meses a partir de la fecha de elaboración indicada en el envase.

### Manejo y Seguridad

LIPESA 1538 no presenta riesgos en su manejo. Como todo producto químico, evite el contacto con piel y ojos. No lo ingiera. En caso de contacto con los ojos, piel y ropa, lavarse con mucha agua. Si se presenta irritación en los ojos, acudir inmediatamente a un médico.

Figura AVII.1. Hoja técnica del floculante L-1538 aniónico





## LIPESA 1550 A

### POLIMERO NO IÓNICO

- Ideal para la deshidratación mecánica de lodos inorgánicos o minerales
- Aplicable a una gran variedad de aguas y efluentes industriales
- Trabaja en un rango amplio de pH
- Fácilmente emulsionable en agua
- Excelente relación costo-rendimiento: Trabaja a dosis muy bajas

#### Usos principales

LIPESA 1550 A ha sido especialmente formulado para ser utilizado en la deshidratación mecánica de lodos, provenientes de procesos de clarificación de agua potable e industrial y en el espesamiento de efluentes industriales, especialmente los minerales. LIPESA 1550 A tiene también aplicación en espesamiento de lodos en procesos como el papelería, azucarero, lodos de perforación, etc.

#### Descripción General

LIPESA 1550 A es un polímero de "muy alto peso molecular", no iónico, con las siguientes características:

Forma:	Sólido
Color:	Bianco
Olor:	Inodoro
pH a 25°C:	5,00 – 8,00 al 0,5 %
pH a 25°C:	5,00 – 7,00 al 0,1 %
Solubilidad:	0,5% máx. en agua
Viscosidad Brookfield (Cp):	Máximo 20 al 0,1%

#### Dosis

Las dosis de LIPESA 1550 A varía de acuerdo al tipo de proceso y efluente tratado. Las dosis típicas son:

- Deshidratación mecánica: 10-800 g/m<sup>3</sup>
- Espesamiento y clarificación: 0.1 – 300 g/m<sup>3</sup>

En cualquier caso, el Representante Técnico LIPESA le asesorará en el establecimiento de la dosis óptima a su situación particular.

#### Modo de empleo y alimentación

LIPESA 1550 A se debe alimentar de manera continua al proceso, en un punto de buena agitación y mezcla, utilizando bombas de dosificación de acero dulce o cualquier otro material. Para obtener el mejor rendimiento del producto, se debe preparar en soluciones hasta un 0.5% de concentración y alimentar luego al 0.1% de concentración como máximo. El tiempo de preparación de las soluciones de LIPESA 1550A es de aproximadamente 40 minutos. Se recomienda realizarlo de la siguiente manera:

- Agregarlo lentamente al agua mientras se agita. Esto evita la formación de grumos o apelmazamiento.
- Agitar suavemente durante 10 – 20 minutos
- Dejar en reposo durante 5 -10 minutos.
- Y finalmente, agitar por 10 – 25 minutos

El punto de inyección, en el caso de tratamiento de estaciones, deberá hacerse en un punto de buena mezcla y en todo caso dependerá de sistema de tratamiento usado. El Representante Técnico LIPESA le asesorará en el establecimiento del sitio adecuado para la inyección del producto, bien sea en estaciones de tratamiento o en aplicaciones especiales.

#### Despacho y almacenamiento

LIPESA 1550 A se despacha en bolsas de 25 Kg y 750Kg. Se recomienda almacenarlo en un lugar seco y fresco. Mantener los envases cerrados para evitar la hidratación. No almacenar por más de seis meses en planta.

#### Manejo y Seguridad

El producto LIPESA 1550 A no presenta riesgos en su manejo. Como todo producto químico, evite el contacto con piel y ojos. No lo ingiera. En caso de contacto con los ojos, piel y ropa, lávase con mucho agua. Si se presenta irritación en los ojos, acudir inmediatamente a un médico.

BD-03-15-NYR

Rev.: 1

Figura AVII.2. Hoja técnica del floculante L-1550A no iónico

## LIPESA 1560 PWG



Una empresa de la familia Chemfiwat

### POLÍMERO CATIÓNICO

- Ideal para deshidratación mecánica de lodos inorgánicos.
- Aplicable a una gran variedad de aguas y efluentes industriales.
- Trabaja en un rango amplio de pH: 1,0 - 12,0.
- Excelente relación costo - rendimiento: trabaja a dosis muy bajas.
- Puede ser empleado en el tratamiento de aguas potables según la normatividad NSF/ANSI Standard 60.

### Usos principales

LIPESA 1560 PWG ha sido especialmente formulado para ser empleado en procesos de clarificación de aguas potables, en el proceso de deshidratación de lodos provenientes de procesos de clarificación y espesamiento de efluentes industriales.

### Descripción general

LIPESA 1560 PWG es un polímero catiónico de mediano peso molecular, con las siguientes características:

<b>Apariencia:</b>	<b>Sólido granular</b>
<b>Color:</b>	<b>Blanco</b>
<b>Solubilidad:</b>	<b>&lt; 5,0 g/L</b>
<b>Viscosidad dinámica (cP):</b>	<b>230 @ 5,0 g/L</b>
	<b>100 @ 2,5 g/L</b>
	<b>50 @ 1,0 g/L</b>

### Dosis

La dosis de LIPESA 1560 PWG varía de acuerdo al tipo de proceso y efluente tratado. Las dosis típicas son:

- Deshidratación mecánica: 10 - 150 ppm.
- Espesamiento y clarificación: 0,05 - 30 ppm.

En todo caso, el Representante Técnico de LIPESA le asesorará en el establecimiento de las dosis adecuadas a su situación particular.

### Modo de empleo y alimentación

LIPESA 1560 PWG se debe alimentar de manera continua al proceso, en un punto de buena agitación y mezcla, utilizando bombas de dosificación de acero o cualquier material. Para obtener el mejor rendimiento del producto, se debe preparar en soluciones hasta un 0,5% de concentración y alimentar luego al 0,1 % de concentración como máximo.

El tiempo de preparación de las soluciones de LIPESA 1560 PWG es de 40 minutos. Se recomienda realizarlo de la siguiente manera:

- Agregarlo lentamente al agua mientras se agita. Esto evita la formación de grumos o apeyamamiento.
- Agitar suavemente durante 10 - 15 minutos.
- Dejar en reposo durante 5 - 10 minutos.
- Finalmente m agitar por 15- 20 minutos.

### Despacho y almacenamiento

LIPESA 1560 PWG se despacha generalmente en sacos de 25 kg de peso neto aproximado. Se recomienda almacenarlo en un lugar seco y fresco, por un periodo no mayor a veinticuatro (24) meses. Mantener los envases cerrados para evitar hidratación.

### Manejo y seguridad

LIPESA 1560 PWG no se considera un producto peligroso, sin embargo, se recomienda el uso de elementos de protección personal durante su manipulación. En contacto con el agua, el producto ocasiona superficies resbaladizas. Para mayor información, consulte la Hoja de seguridad del producto LIPESA 1560 PWG.

Figura AVII.3. Hoja técnica del floculante L-1560 catiónico



## LIPESA 1633

### POLIMERO ANIÓNICO

- Ideal para la deshidratación mecánica de lodos (orgánicos o minerales)
- Aplicable a una gran variedad de aguas y efluentes industriales
- Trabaja en un rango amplio de pH: 1,0 - 12,0
- Fácilmente emulsionable en agua
- Excelente relación costo-rendimiento: Trabaja a dosis muy bajas

### Usos principales

LIPESA 1633 ha sido especialmente formulado para ser utilizado en la deshidratación mecánica de lodos, provenientes de procesos de clarificación y espesamiento de efluentes industriales, especialmente los minerales. LIPESA 1633 tiene también aplicación en la clarificación y espesamiento de aguas industriales y muchos otros procesos como el papelería y azucarero.

### Descripción General

LIPESA 1633 es un polímero sólido de "muy alto peso molecular", fuertemente aniónico, con las siguientes características:

Color:	Bianco
Olor:	Inodoro
pH al 0,1%:	6,00 – 8,00
Solubilidad:	Max 0,5 en agua
Viscosidad Brookfield (cP):	< 200 al 0,1% en agua

### Dosis

La dosis de LIPESA 1633 varía de acuerdo al tipo de proceso y efluente tratado. Las dosis típicas son:

- Deshidratación mecánica: 10 – 150 g/m<sup>3</sup>
- Espesamiento y clarificación: 0,05 – 30 g/m<sup>3</sup>

En todo caso, el Representante Técnico LIPESA lo asesorará en el establecimiento de la dosis adecuada a su situación particular.

### Modo de Empleo y Alimentación

LIPESA 1633 se debe alimentar de manera continua al proceso, en un punto de buena agitación y mezcla, utilizando bombas de dosificación de acero dulce o cualquier otro material. Para obtener el mejor rendimiento del producto, se debe preparar en soluciones hasta un 0,5% de concentración y alimentar luego al 0,1% de concentración como máximo. El tiempo de preparación de las soluciones de LIPESA 1633 es de 40 minutos. Se recomienda realizarlo de la siguiente manera:

- Agregarlo lentamente al agua mientras se agita. Esto evita la formación de grumos o apelmazamiento
- Agitar suavemente durante 10 – 15 minutos
- Dejar en reposo durante 5 – 10 minutos
- Y finalmente, agitar por 15 – 20 minutos

### Despacho y Almacenamiento

LIPESA 1633 se despacha en bolsas de 25 kg. y 750 Kg. Se recomienda almacenarlo en un lugar seco y fresco. Mantener los envases cerrados para evitar la hidratación. No almacenar por más de 24 meses en planta.

### Manejo y Seguridad

LIPESA 1633 no presenta riesgos en su manejo. Como todo producto químico, evite el contacto con piel y ojos. No lo ingiera. En caso de contacto con los ojos, piel y ropa, lavarse con mucha agua. Si se presenta irritación en los ojos, acudir inmediatamente a un médico.

BD-02-14-NYR

Rev.: 1

"La aplicación o métodos de manejo, almacenamiento, uso y disposición del producto y/o sus envases están fuera de nuestro control, por lo tanto la empresa no asume y desconoce toda responsabilidad por pérdidas, daños u otra situación que esté relacionada con el manejo, uso o disposición del producto y sus envases.  
La empresa no asume responsabilidad alguna por daños al operador o a terceros personas causados por uso anormal del material y/o sus envases, aun siguiendo procedimientos razonables de seguridad.  
Los datos suministrados fueron obtenidos de fuentes confiables, sin embargo, no se expresa ni se implica garantía alguna con respecto a la exactitud de estos datos o los resultados que se obtengan por el uso del material."

LIPESA REF: J-08010036-4

FUMACOFRES - S.R. REV: 21.02.08

Figura AVII.4. Hoja técnica del floculante L-1633 aniónico



## LIPESA 1640

### POLIMERO CATIONICO

Ideal para la deshidratación mecánica de lodos inorgánicos o minerales

Aplicable a una gran variedad de aguas y efluentes industriales

Trabaja en un rango amplio de pH de pH: 1.0 – 13.0

Fácilmente emulsionable en agua

Excelente relación costo-rendimiento; Trabaja a dosis muy bajas

### Usos principales

LIPESA 1640 ha sido especialmente formulado para ser utilizado en la deshidratación mecánica de lodos, provenientes de procesos de clarificación de agua potable e industrial y en el espesamiento de efluentes industriales, especialmente los minerales. LIPESA 1640 tiene también aplicación en espesamiento de lodos en procesos como el papelerero, azucarero, lodos de perforación, etc.

### Descripción General

LIPESA 1640 es un polímero de "muy alto peso molecular", ligeramente catiónico, con las siguientes características:

Forma:	Sólido
Color:	Bianco
Olor:	Inodoro
pH al 0.5%:	2,50 – 4,50
Densidad:	0,800 Kg/m <sup>3</sup> aprox.

### Dosis

La dosis de LIPESA 1640 varía de acuerdo al tipo de proceso y efluente tratado. Las dosis típicas son:

- Deshidratación mecánica: 10-200 g/m<sup>3</sup>
- Espesamiento y clarificación: 0,1 – 300 g/m<sup>3</sup>

En cualquier caso, el Representante Técnico LIPESA le asesorará en el establecimiento de la dosis óptima a su situación particular.

### Modo de empleo y alimentación

LIPESA 1640 se debe alimentar de manera continua al proceso, en un punto de buena agitación y mezcla, utilizando bombas de dosificación de acero dulce o cualquier otro material. Para obtener el mejor rendimiento del producto, se debe preparar en soluciones hasta un 0.5% de concentración y alimentar luego al 0.1% de concentración como máximo.

El tiempo de preparación de las soluciones de LIPESA 1640 es de aproximadamente 40 minutos. Se recomienda realizarlo de la siguiente manera:

- Agregarlo lentamente al agua mientras se agita. Esto evita la formación de grumos o apelmazamiento.
- Agitar suavemente durante 10 – 20 minutos
- Dejar en reposo durante 5-10 minutos.
- Y finalmente, agitar por 10 – 25 minutos

El punto de inyección, en el caso de tratamiento de estaciones, deberá hacerse en un punto de buena mezcla y en todo caso dependerá de sistema de tratamiento usado. El Representante Técnico LIPESA le asesorará en el establecimiento del sitio adecuado para la inyección del producto, bien sea en estaciones de tratamiento o en aplicaciones especiales.

### Despacho y almacenamiento

LIPESA 1640 se despacha en bolsas de 25 Kg y 750Kg. Se recomienda almacenarlo en un lugar seco y fresco. Mantener los envases cerrados para evitar la hidratación. No almacenar por más de doce meses en planta.

### Manejo y Seguridad

El producto LIPESA 1640 no presenta riesgos en su manejo. Como todo producto químico, evite el contacto con piel y ojos. No lo ingiera. En caso de contacto con los ojos, piel y ropa, lavarse con mucho agua. Si se presenta irritación en los ojos, acudir inmediatamente a un médico.

Figura AVII.5. Hoja técnica del floculante L-1640 catiónico



## ANEXO VIII

**DATOS UTILIZADOS EN LA ELABORCIÓN DE LOS DISEÑOS  
EXPERIMENTALES PARA DETERMINAR LAS CONDICIONES DE  
AGITACIÓN Y SEDIMENTACIÓN**

- **Ensayos realizados para determinar las condiciones de agitación**

**Tabla AVIII.1.** Condiciones iniciales de las muestras empleadas en los ensayos de agitación

Día	Turbidez inicial [NTU]
1	85
2	550

**Tabla AVIII.2.** Combinaciones entre distintos niveles de velocidad y tiempo de agitación

Día	Agitación Rápida [rpm]	Tiempo [min]	Agitación Lenta [rpm]	Tiempo [min]	Turbidez final [NTU]	Reducción de Turbidez [%]
1	100	1	30	15	4,5	94,71
1	100	1	40	15	2,2	97,41
1	100	1	60	15	6,1	92,82
1	100	1	30	20	4,2	95,06
1	100	1	40	20	3,1	96,35
1	100	1	60	20	5,7	93,29
1	100	1	30	30	5,6	93,41
1	100	1	40	30	3,5	95,88
1	100	1	60	30	8,5	90,00
1	100	2	30	15	5,1	94,00
1	100	2	40	15	4,4	94,82
1	100	2	60	15	6,2	92,71
1	100	2	30	20	5,8	93,18
1	100	2	40	20	5,3	93,76
1	100	2	60	20	6,3	92,59
1	100	2	30	30	6,1	92,82
1	100	2	40	30	5,8	93,18

**Tabla AVIII.2.** Combinaciones entre distintos niveles de velocidad y tiempo de agitación  
(continuación...)

<b>Día</b>	<b>Agitación Rápida [rpm]</b>	<b>Tiempo [min]</b>	<b>Agitación Lenta [rpm]</b>	<b>Tiempo [min]</b>	<b>Turbidez final [NTU]</b>	<b>Reducción de Turbidez [%]</b>
1	100	2	60	30	7,4	91,29
1	150	1	30	15	11,9	86,00
1	150	1	40	15	10,2	88,00
1	150	1	60	15	12,1	85,76
1	150	1	30	20	14,8	82,59
1	150	1	40	20	13,4	84,24
1	150	1	60	20	15,2	82,12
1	150	1	30	30	16,5	80,59
1	150	1	40	30	15,9	81,29
1	150	1	60	30	17,0	80,00
1	150	2	30	15	16,8	80,24
1	150	2	40	15	15,4	81,88
1	150	2	60	15	17,6	79,29
1	150	2	30	20	19,7	76,82
1	150	2	40	20	18,2	78,59
1	150	2	60	20	21,0	75,29
1	150	2	30	30	20,9	75,41
1	150	2	40	30	19,1	77,53
1	150	2	60	30	22,3	73,76
1	200	1	30	15	23,5	72,35
1	200	1	40	15	22,3	73,76
1	200	1	60	15	24,1	71,65
1	200	1	30	20	26,2	69,18
1	200	1	40	20	25,4	70,12
1	200	1	60	20	27,1	68,12
1	200	1	30	30	28,2	66,82
1	200	1	40	30	26,7	68,59
1	200	1	60	30	29,0	65,88
1	200	2	30	15	28,8	66,12
1	200	2	40	15	27,6	67,53
1	200	2	60	15	29,9	64,82
1	200	2	30	20	30,2	64,47
1	200	2	40	20	28,1	66,94
1	200	2	60	20	31,6	62,82

**Tabla AVIII.2.** Combinaciones entre distintos niveles de velocidad y tiempo de agitación  
(continuación...)

<b>Día</b>	<b>Agitación Rápida [rpm]</b>	<b>Tiempo [min]</b>	<b>Agitación Lenta [rpm]</b>	<b>Tiempo [min]</b>	<b>Turbidez final [NTU]</b>	<b>Reducción de Turbidez [%]</b>
1	200	2	30	30	32,3	62,00
1	200	2	40	30	30,6	64,00
1	200	2	60	30	35,4	58,35
2	100	1	30	15	10,7	98,05
2	100	1	40	15	9,2	98,33
2	100	1	60	15	11,3	97,95
2	100	1	30	20	11,5	97,91
2	100	1	40	20	10,1	98,16
2	100	1	60	20	13,6	97,53
2	100	1	30	30	12,7	97,69
2	100	1	40	30	11,5	97,91
2	100	1	60	30	13,8	97,49
2	100	2	30	15	15,2	97,24
2	100	2	40	15	13,3	97,58
2	100	2	60	15	16,4	97,02
2	100	2	30	20	16,7	96,96
2	100	2	40	20	14,2	97,42
2	100	2	60	20	17,0	96,91
2	100	2	30	30	16,9	96,93
2	100	2	40	30	15,8	97,13
2	100	2	60	30	18,1	96,71
2	150	1	30	15	19,4	96,47
2	150	1	40	15	18,3	96,67
2	150	1	60	15	20,3	96,31
2	150	1	30	20	21,1	96,16
2	150	1	40	20	19,5	96,45
2	150	1	60	20	23,2	95,78
2	150	1	30	30	21,7	96,05
2	150	1	40	30	20,2	96,33
2	150	1	60	30	22,5	95,91
2	150	2	30	15	24,3	95,58
2	150	2	40	15	23,4	95,75
2	150	2	60	15	25,8	95,31
2	150	2	30	20	24,6	95,53

**Tabla AVIII.2.** Combinaciones entre distintos niveles de velocidad y tiempo de agitación  
(continuación...)

<b>Día</b>	<b>Agitación Rápida [rpm]</b>	<b>Tiempo [min]</b>	<b>Agitación Lenta [rpm]</b>	<b>Tiempo [min]</b>	<b>Turbidez final [NTU]</b>	<b>Reducción de Turbidez [%]</b>
2	150	2	40	20	23,8	95,67
2	150	2	60	20	25,7	95,33
2	150	2	30	30	26,2	95,24
2	150	2	40	30	25,0	95,45
2	150	2	60	30	28,3	94,85
2	200	1	30	15	29,1	94,71
2	200	1	40	15	27,6	94,98
2	200	1	60	15	30,5	94,45
2	200	1	30	20	29,5	94,64
2	200	1	40	20	28,2	94,87
2	200	1	60	20	31,3	94,31
2	200	1	30	30	31,2	94,33
2	200	1	40	30	29,3	94,67
2	200	1	60	30	33,6	93,89
2	200	2	30	15	37,9	93,11
2	200	2	40	15	36,3	93,40
2	200	2	60	15	38,6	92,98
2	200	2	30	20	39,1	92,89
2	200	2	40	20	37,2	93,24
2	200	2	60	20	42,2	92,33
2	200	2	30	30	39,8	92,76
2	200	2	40	30	38,9	92,93
2	200	2	60	30	42,4	92,29

- **Ensayos realizados para determinar la dosis de floculante y los tiempos de floculación y sedimentación**

**Tabla AVIII.3.** Condiciones iniciales de las muestras empleadas en los ensayos de floculación y sedimentación

<b>Día</b>	<b>Turbidez inicial [NTU]</b>	<b>pH inicial</b>
1	852	9,63
2	106	10,02



**Tabla AVIII.4.** Combinaciones entre distintos niveles de dosis de floculante y tiempos de floculación y sedimentación

<b>Día</b>	<b>Dosis de Floculante [mg/L]</b>	<b>Tiempo de floculación [min]</b>	<b>Tiempo de sedimentación [min]</b>	<b>Turbidez residual [NTU]</b>	<b>Reducción de Turbidez [NTU]</b>
1	1,5	5	5	66,80	92,16
1	1,5	5	10	45,10	94,71
1	1,5	5	15	35,70	95,81
1	1,5	10	5	48,10	94,35
1	1,5	10	10	40,30	95,27
1	1,5	10	15	38,80	95,45
1	1,5	15	5	20,10	97,64
1	1,5	15	10	18,20	97,86
1	1,5	15	15	17,50	97,95
1	3,0	5	5	21,50	97,48
1	3,0	5	10	17,60	97,93
1	3,0	5	15	16,00	98,12
1	3,0	10	5	14,90	98,25
1	3,0	10	10	12,40	98,54
1	3,0	10	15	12,40	98,54
1	3,0	15	5	11,20	98,69
1	3,0	15	10	8,95	98,95
1	3,0	15	15	8,90	98,96
2	1,5	5	5	3,30	96,89
2	1,5	5	10	3,27	96,92
2	1,5	5	15	3,20	96,98
2	1,5	10	5	2,11	98,01
2	1,5	10	10	2,10	98,02
2	1,5	10	15	1,43	98,65
2	1,5	15	5	2,25	97,88
2	1,5	15	10	2,03	98,08
2	1,5	15	15	2,00	98,11
2	3,0	5	5	4,54	95,72
2	3,0	5	10	4,25	95,99
2	3,0	5	15	4,04	96,19
2	3,0	10	5	2,45	97,69
2	3,0	10	10	2,40	97,74
2	3,0	10	15	2,40	97,74

**Tabla AVIII.4.** Combinaciones entre distintos niveles de dosis de floculante y tiempos de floculación y sedimentación (**continuación...**)

<b>Día</b>	<b>Dosis de Floculante [mg/L]</b>	<b>Tiempo de floculación [min]</b>	<b>Tiempo de sedimentación [min]</b>	<b>Turbidez residual [NTU]</b>	<b>Reducción de Turbidez [NTU]</b>
2	3,0	15	5	2,43	97,71
2	3,0	15	10	2,38	97,75
2	3,0	15	15	2,33	97,80

## ANEXO IX

## DEGRADACIÓN DE TENSOACTIVOS ANIÓNICOS MEDIANTE OZONIZACIÓN

- Datos utilizados en el diseño experimental para determinar el tiempo de ozonización del efluente

**Tabla AIX.1.** Condiciones iniciales de las muestras empleadas en los ensayos de tiempo de ozonización

Día	Turbidez inicial [NTU]	pH inicial	DQO inicial [mg/L]	SAAM inicial [mg/L]
1	36,2	8,83	226	0,53
2	524,0	9,10	1 388	1,30
3	91,3	6,85	676	2,80

**Tabla AIX.2.** Resultados obtenidos a partir de los diferentes tiempos de ozonización

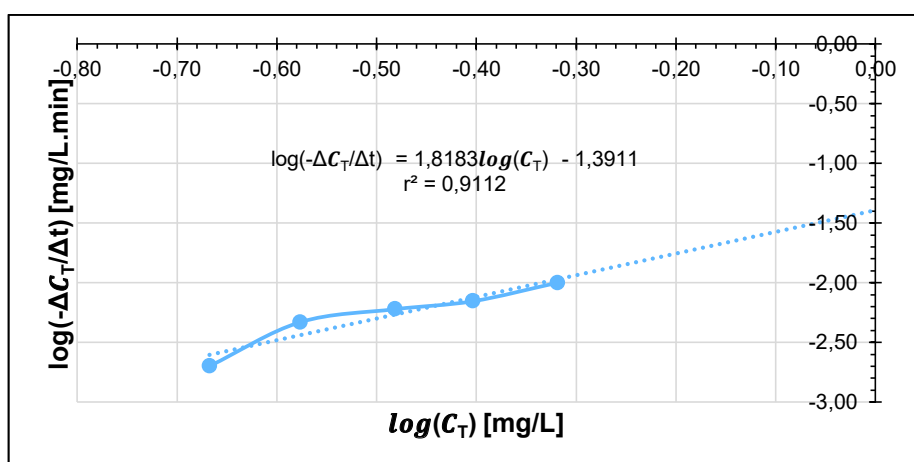
Día	Tiempo de ozonización [min]	SAAM residual [mg/L]	Reducción de SAAM [mg/L]
1	10	0,43	18,87
1	20	0,36	32,08
1	30	0,30	43,40
1	45	0,23	56,60
1	60	0,20	62,26
2	10	0,88	32,31
2	20	0,66	49,23
2	30	0,51	60,77
2	45	0,38	70,77
2	60	0,31	76,15
3	10	1,99	28,93
3	20	1,52	45,71
3	30	1,20	57,14
3	45	0,86	69,29
3	60	0,67	76,07

- **Ejemplo de cálculo para determinar el orden de la reacción de la ozonización de efluentes**

Desde la Tabla AIX.3 hasta la Tabla AIX.6 se presentan los datos experimentales de la disminución de la concentración de tensoactivos en diferentes intervalos de tiempo de ozonización a efluentes previamente clarificados y los valores requeridos en la Ecuación 2.7 para la linealización de cada uno de los casos. En las Figuras comprendidas entre AIX.1 y AIX.4 se pueden visualizar las gráficas de las ecuaciones linealizadas con sus respectivos valores de  $r^2$ , en las cuales, el coeficiente de las abscisas  $\log(\bar{C}_T)$ , representa el orden de la reacción.

**Tabla AIX.3.** Degradación de tensoactivos a diferentes tiempos de ozonización a partir de una concentración inicial de 0,53 mg/L

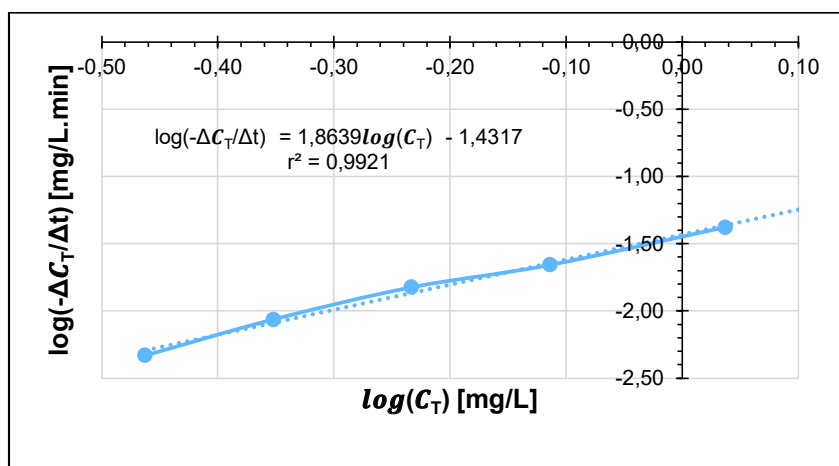
Tiempo [min]	$C_T$ [mg/L]	$\Delta C_T/\Delta t$ [mg/L.min]	$\bar{C}_T$ [mg/L]	$\log(\bar{C}_T)$ [mg/L]	$\log(-\Delta C_T/\Delta t)$ [mg/L.min]
0	0,53	-0,0010	0,48	-0,32	-2,00
10	0,43				
20	0,36	-0,0070	0,40	-0,40	-2,15
30	0,30	-0,0060	0,33	-0,48	-2,22
45	0,23	0,0047	0,27	-0,58	-2,33
60	0,20	0,0020	0,22	-0,67	-2,70



**Figura AIX.1.** Linealización de la degradación de tensoactivos a partir de una concentración inicial de 0,53 mg/L

**Tabla AIX.4.** Degradación de tensoactivos a diferentes tiempos de ozonización a partir de una concentración inicial de 1,30 mg/L

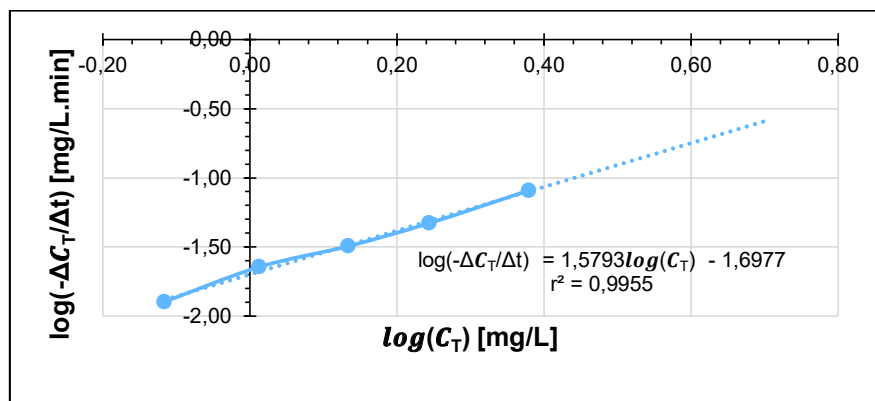
Tiempo [min]	$C_T$ [mg/L]	$\Delta C_T/\Delta t$ [mg/L.min]	$\bar{C}_T$ [mg/L]	$\log(\bar{C}_T)$ [mg/L]	$\log(-\Delta C_T/\Delta t)$ [mg/L.min]
0	1,30	-0,0420	1,09	0,04	-1,38
10	0,88				
20	0,66	-0,0220	0,77	-0,11	-1,66
30	0,51	-0,0150	0,59	-0,23	-1,82
45	0,38	-0,0087	0,45	-0,35	-2,06
60	0,31	0,0047	0,35	-0,46	-2,33



**Figura AIX.2.** Linealización de la degradación de tensoactivos a partir de una concentración inicial de 1,30 mg/L

**Tabla AIX.5.** Degradación de tensoactivos a diferentes tiempos de ozonización a partir de una concentración inicial de 2,80 mg/L

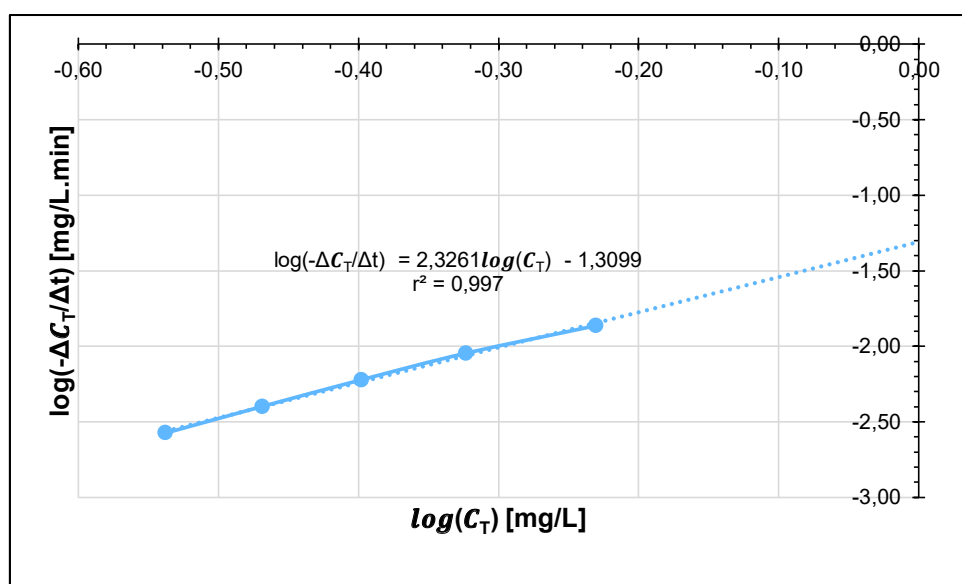
Tiempo [min]	$C_T$ [mg/L]	$\Delta C_T/\Delta t$ [mg/L.min]	$\bar{C}_T$ [mg/L]	$\log(\bar{C}_T)$ [mg/L]	$\log(-\Delta C_T/\Delta t)$ [mg/L.min]
0	2,80	-0,0810	2,40	0,38	-1,09
10	1,99				
20	1,52	-0,0470	1,76	0,24	-1,33
30	1,20	-0,0320	1,36	0,13	-1,49
45	0,86	-0,0227	1,03	0,01	-1,64
60	0,67	-0,0127	0,77	-0,12	-1,90



**Figura AIX.3.** Linealización de la degradación de tensoactivos a partir de una concentración inicial de 2,80 mg/L

**Tabla AIX.6** Degradación de tensoactivos a diferentes tiempos de ozonización a partir de una concentración inicial de 0,66 mg/L

Tiempo [min]	$C_T$ [mg/L]	$\Delta C_T/\Delta t$ [mg/L.min]	$\bar{C}_T$ [mg/L]	$\log(\bar{C}_T)$ [mg/L]	$\log(-\Delta C_T/\Delta t)$ [mg/L.min]
0	0,66	-0,0137	0,59	-0,23	-1,86
10	0,52				
20	0,43	-0,0090	0,48	-0,32	-2,05
30	0,37	-0,0060	0,40	-0,40	-2,22
45	0,31	0,0040	0,34	-0,47	-2,40
60	0,27	0,0027	0,29	-0,54	-2,57



**Figura AIX.4** Linealización de la degradación de tensoactivos a partir de una concentración inicial de 0,66 mg/L

## ANEXO X

### EJEMPLO DE CÁLCULO DEL DISEÑO DE LOS TANQUES Y EQUIPOS PRINCIPALES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Para el cálculo de las dimensiones de los tanques se consideró el tratamiento de 3 m<sup>3</sup> de efluente cada dos horas de trabajo, de acuerdo al caudal del hotel y el espacio disponible para la construcción de la PTAR.

- **Cálculo de las dimensiones del tanque homogenizador y del diseño del agitador**

Al utilizar la Ecuación 3.2 y los datos de las Tablas 3.1 y 3.2 a una velocidad de agitación de 40 rpm se comprobó que el valor del número de Reynolds sea mayor a 1 000.

$$Re = \frac{0,075^2 \text{ m}^2 * \frac{40}{\text{min}} * \frac{1\ 000 \text{ kg}}{\text{m}^3}}{\frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} * \frac{0,001 \text{ kg}}{\text{m} * \text{s}}}$$

$$Re = 3\ 750$$

Con base en los datos de la Tabla 3.3 se calculó el coeficiente de arrastre para la relación  $L_P/b_P$  de la paleta de la prueba de jarras.

$$\frac{L_P}{b_P} = \frac{0,75 \text{ m}}{0,25 \text{ m}}$$

$$\frac{L_P}{b_P} = 3$$

$$\frac{4 - 3}{4 - 2} = \frac{1,19 - C_D}{1,19 - 1,15}$$

$$C_D = 1,17$$

Con los resultados obtenidos hasta el momento, se pudo calcular la potencia disipada por unidad de volumen con la Ecuación 3.1 (Arboleda, 2000, p. 108).

$$P' = \frac{1,17 * 0,075 \text{ m} * 0,025 \text{ m} * \frac{1\ 000 \text{ kg}}{\text{m}^3} * \left[ \frac{2\pi * \frac{0,075 \text{ m}}{2} * \frac{40}{\text{min}}}{\frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}} * (1 - 0,25) \right]^3}{2 * 0,5 \text{ L} * \frac{1 \text{ m}^3}{1\ 000 \text{ L}}}$$

$$P' = 3,59 \frac{\text{kg} * \text{m}^2}{\text{s}^3 * \text{m}^3}$$

Con el resultado de la potencia disipada por unidad de volumen se calculó el gradiente de velocidad para la prueba de jarras con la Ecuación 3.3 (Arboleda, 2000, p. 125).

$$G = \sqrt{\frac{\frac{3,59 \text{ kg} * \text{m}^2}{\text{s}^3 * \text{m}^3}}{\frac{0,001 \text{ kg}}{\text{m} * \text{s}}}}$$

$$G = 59,89 \text{ s}^{-1}$$

Este gradiente de velocidad se conservó para el diseño del tanque homogenizador, el cual tendría un volumen de operación de 3 m<sup>3</sup> y un diámetro de 1,5 m por motivos del espacio disponible para la construcción de la PTAR. El nivel de altura del líquido en el tanque se calculó considerando un recipiente cilíndrico como se muestra a continuación:

$$h = \frac{4 * 3 \text{ m}^3}{\pi * 1,5^2 \text{ m}^2}$$

$$h = 1,69 \text{ m}$$

La altura total del tanque se calculó tomando en cuenta un margen de seguridad del 20% para evitar derrames (Saravacos y Kostaropoulos, 2002, p. 5).

$$H_H = 1,69 \text{ m} + 0,2 * 1,69 \text{ m}$$



$$H_H = 2,01 \text{ m}$$

La longitud de la paleta del taque homogenizador y las demás dimensiones se calcularon sobre la base de los criterios detallados desde la Ecuación 3.4 hasta la Ecuación 3.8 (Arboleda, 2000, p. 123).

$$\frac{D_H}{L_{PH}} = 3$$

$$L_{PH} = \frac{1,5 \text{ m}}{3,0}$$

$$L_{PH} = 0,5 \text{ m}$$

$$b_{PH} = \frac{0,5 \text{ m}}{8,0} * \frac{100 \text{ cm}}{1,0 \text{ m}}$$

$$b_{PH} = 6,25 \text{ cm}$$

$$W_H = \frac{0,50 \text{ m}}{10}$$

$$W_H = 0,05 \text{ m}$$

$$h_i = 1,10 * 0,50 \text{ m}$$

$$h_i = 0,55 \text{ m}$$

Una vez obtenidas las dimensiones se procedió a calcular la potencia del agitador de modo que se conserve el mismo gradiente de velocidad de la prueba de jarras. Según la Tabla 3.3, el coeficiente de arrastre cambió de valor ya que las dimensiones de la paleta en este caso son diferentes (Silva, 2015, p. 128).

$$\frac{L_{PH}}{b_{PH}} = \frac{0,5 \text{ m}}{0,0625 \text{ m}}$$

$$\frac{L_{PH}}{b_{PH}} = 8$$

$$\frac{10 - 8}{10 - 4} = \frac{1,29 - C_D}{1,29 - 1,19}$$

$$C_D = 1,26$$

La potencia por unidad de volumen de la prueba de jarras deberá conservarse para que el gradiente de velocidad no varíe. Las dimensiones del agitador y el volumen del líquido son datos conocidos, por lo que se despejó el número de revoluciones por minuto a las cuales se deberá trabajar para conservar las condiciones de agitación similares a la prueba de jarras, mediante la Ecuación 3.1.

$$P' = 3,59 \frac{kg * m^2}{s^3 * m^3}$$

$$3,59 \frac{kg * m^2}{s^3 * m^3} = \frac{1,26 * 0,5 m * 0,0625 m * \frac{1\ 000\ kg}{m^3} * \left[ \frac{2\pi * \frac{0,5\ m}{2} * \frac{n}{min}}{\frac{60\ s}{1\ min}} * (1 - 0,25) \right]^3}{2 * 3\ m^3}$$

$$n = 41,65\ rpm$$

Se comprobó que el número de Reynolds en el tanque agitado sea mayor a 1 000 con la Ecuación 3.2.

$$Re = \frac{0,5^2\ m^2 * \frac{42}{min} * \frac{1\ 000\ kg}{m^3}}{\frac{60\ s}{1\ min} * \frac{0,001\ kg}{m * s}}$$

$$Re = 175\ 000$$

También se calculó la potencia unitaria disipada en hp para elegir el agitador del homogenizador.

$$P'' = \frac{3,59 \frac{kg * m^2}{s^3 * m^3}}{\frac{9,81\ m}{s^2}} * 3\ m^3 * \frac{1\ hp}{75\ kg * m / s}$$

$$P'' = 0,0148\ hp$$

- **Cálculo de las dimensiones del tanque coagulador-floculador y del diseño del agitador**

El cálculo de la potencia disipada por unidad de volumen y del gradiente de velocidad de la prueba de jarras para un volumen de 0,5 L se realiza al igual que en el tanque de homogenización. La sección del coagulador-floculador se consideró cuadrangular de lado igual a 1,5 m; a partir del volumen de operación asumido se determinó la altura nominal del tanque (Romero, 2006, p. 100).

$$h = \frac{3 \text{ m}^3}{1,5 \text{ m} * 1,5 \text{ m}}$$

$$h = 1,30 \text{ m}$$

La altura total del tanque se calculó con un margen de seguridad del 20% para evitar derrames (Saravacos y Kostaropoulos, 2002, p. 5).

$$H_F = 1,30 \text{ m} + 0,2 * 1,30 \text{ m}$$

$$H_F = 1,56 \text{ m}$$

Debido a que en el tanque floculador se agregarán soluciones de sustancias reguladoras de pH, de coagulante y de floculante; se decidió aumentar la altura total del tanque a 2 m.

$$H_F = 2,0 \text{ m}$$

Se asumió el área total de las paletas como el 20 % de la sección transversal del tanque para evitar la formación de vórtices. La longitud de los agitadores no suele ser menor a 0,6 m y la distancia del extremo de la paleta al borde de la superficie y al fondo del tanque es usualmente 0,3 m (Silva, 2015, p. 136). Para calcular el área y la longitud de las paletas del agitador se utilizó la Ecuación 3.12 y la Ecuación 3.13.

$$A_{TF} = 1,5 \text{ m} * 1,3 \text{ m}$$

$$A_{TF} = 1,95 \text{ m}^2$$

$$A_{PF} = \frac{20}{100} * 1,95 \text{ m}^2$$

$$A_{PF} = 0,39 \text{ m}^2$$

$$L_{PF} = 1,3 \text{ m} - 2 * (0,3 \text{ m})$$

$$L_{PF} = 0,7 \text{ m}$$

Para calcular el ancho de cada paleta del agitador se consideró un número total de seis paletas y se utilizó la Ecuación 3.14

$$A_{PF} = L_{PF} * b_{PF} * N_{PF}$$

$$b_{PF} = \frac{0,39 \text{ m}^2}{0,70 \text{ m} * 6}$$

$$b_{PF} = 0,10 \text{ m}$$

Se asumió que la distancia entre cada paleta y la distancia entre la pared y la paleta más cercana a ella serán iguales; además, que el ancho de los deflectores sería igual a los deflectores del tanque homogenizador (0,05 m). Por lo tanto, la distancia que existirá entre cada paleta se calculó con base a la Ecuación AX.1.

$$c = \frac{B_F - 6b_{PF} - 2W_F}{8} \quad [\text{AX. 1}]$$

Donde:

c: Distancia entre cada travesaño, o paleta, del agitador (m)

$W_F$ : Ancho de los deflectores del floculador (m)

$$c = \frac{1,5 \text{ m} - 6 * 0,1 \text{ m} - 2 * 0,05 \text{ m}}{8}$$

$$c = 0,1 \text{ m}$$

Con las dimensiones de una paleta del agitador se puede determinar el coeficiente de arrastre con la Tabla 3.3.

$$\frac{L_{PF}}{b_{PF}} = \frac{0,7 \text{ m}}{0,1 \text{ m}}$$

$$\frac{L_{PF}}{b_{PF}} = 7$$

$$\frac{10 - 7}{10 - 4} = \frac{1,29 - C_D}{1,29 - 1,19}$$

$$C_D = 1,24$$

El radio total del agitador de seis travesaños se obtuvo sobre la base de la Figura 3.2 y de acuerdo a los resultados de los valores de las demás dimensiones analizadas.

$$R_T = 3 * b_p + 3 * c$$

$$R_T = 3 * 0,1 \text{ m} + 3 * 0,1 \text{ m}$$

$$R_T = 0,6 \text{ m}$$

El cálculo de la distancia desde la parte media de cada uno de los travesaños o paletas del agitador hasta el eje del mismo se realizó sobre la base de las dimensiones previamente calculadas y basándose en la Figura 3.3.

$$R_1 = R_T - 0,5 * b_p$$

$$R_1 = 0,6 \text{ m} - 0,5 * 0,1 \text{ m}$$

$$R_1 = 0,55 \text{ m}$$

$$R_2 = R_T - b_p - c - 0,5 * b_p$$

$$R_2 = 0,6 \text{ m} - 0,1 \text{ m} - 0,1 \text{ m} - 0,5 * 0,1 \text{ m}$$

$$R_2 = 0,35 \text{ m}$$

$$R_3 = c + 0,5 * b_p$$

$$R_3 = 0,1 + 0,5 * 0,1 \text{ m}$$

$$R_3 = 0,15 \text{ m}$$

El cálculo del número de revoluciones por minuto a partir de la potencia disipada por unidad de volumen necesaria para conservar el gradiente de velocidad de  $60 \text{ s}^{-1}$  para un agitador de seis paletas se obtuvo de acuerdo a la Ecuación 3.15 (Silva, 2015, p. 128).

$$3,59 \frac{\text{kg} * \text{m}^2}{\text{s}^3 * \text{m}^3} = \frac{1,24 * \frac{1\,000 \text{ kg}}{\text{m}^3} * 0,7 \text{ m} * 0,1 \text{ m} \left[ \frac{2\pi * n * (1 - 0,25)}{60 \text{ s}} \right]^3 * (0,55^3 + 0,35^3 + 0,15^3) \text{ m}^3}{3 \text{ m}^3}$$

$$n = 10,65 \text{ rpm}$$

- **Cálculo de las dimensiones del sedimentador secundario**

La profundidad se asumió de 1 m de longitud y se verificó que cumpliera la relación sugerida en el diseño de un sedimentador de acuerdo a la Ecuación 3.16 (SEDAPAR, 2017, p. 1). De acuerdo a la profundidad establecida se seleccionó la menor longitud del sedimentador sugerida por las limitaciones del espacio.

$$\frac{L_s}{H_s} = \frac{5,0 \text{ m}}{1,0 \text{ m}}$$

$$\frac{L_s}{H_s} = 5,0$$

Se verificó que la relación de estas dimensiones cumpla con los criterios de diseño establecidos en la Ecuación 3.17 (Arboleda, 2000, p. 250).

$$\frac{L_s}{B_s} = \frac{5,0 \text{ m}}{1,5 \text{ m}}$$

$$\frac{L_s}{B_s} = 3,33$$

Se calculó el caudal de diseño con la Ecuación 3.18, se asumió una velocidad promedio de sedimentación de los flóculos de hidróxido de aluminio de 0,07 (Pérez, 2009, p. 109).

$$Q_d = \frac{7,5 \text{ m}^2 * \frac{0,07 \text{ cm}}{\text{s}}}{\frac{100 \text{ cm}}{\text{m}}}$$

$$Q_d = 0,00525 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Ejemplo de cálculo del tiempo de residencia según la Ecuación 3.19.

$$t_r = \frac{7,5 \text{ m}^2 * 1 \text{ m}}{\frac{60\text{s}}{\text{min}} * 0,00525 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}$$

$$t_r = 23,81 \text{ min}$$

Ejemplo de cálculo de la velocidad horizontal promedio del agua en el sedimentador secundario de acuerdo a la Ecuación 3.20.

$$v_h = \frac{\frac{100 \text{ cm}}{\text{m}} * 0,00525 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{1,5 \text{ m} * 1 \text{ m}}$$

$$v_h = 0,35 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

Se conservó el gradiente de velocidad del tanque coagulador-floculador en agitación lenta y se consideró una velocidad de entrada al sedimentador de 15 cm/s (Arboleda, 2000, p. 252); se calculó el diámetro de los orificios del tabique difusor con la Ecuación 3.21.

$$60\text{s}^{-1} = \sqrt{\frac{0,03 * \frac{15\text{cm}^3}{\text{s}^3}}{0,01 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} * 2d}}$$

$$d = 1,4 \text{ cm}$$

A continuación se presenta el cálculo del número de orificios del tabique con los criterios considerados desde la Ecuación 3.22 hasta la Ecuación 3.24.

$$a_o = \frac{\pi}{4} * \left( 1,4 \text{ cm} * \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right)^2$$

$$a_o = 1,54 E - 4 \text{ m}^2$$

$$A_o = \frac{\frac{100 \text{ cm}}{\text{m}} * 0,00525 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{15 \frac{\text{cm}}{\text{s}}}$$

$$A_o = 0,035 \text{ m}^2$$

$$n_o = \frac{0,035 \text{ m}^2}{1,54 E - 4 \text{ m}^2}$$

$$n_o = 228$$

Se asumió un número de columnas igual a 19 y un número de filas igual a 12 para distribuir uniformemente los 228 orificios en una zona del tabique difusor de 1,5 m de ancho por 0,6 m de largo (CEPIS, 2005, p. 20).

$$B_T = B_S$$

$$B_T = 1,5 \text{ m}$$

$$H_T = H_S - 2 * \frac{H_S}{5}$$

$$H_T = 1 \text{ m} - 2 * \frac{1 \text{ m}}{5}$$

$$H_T = 0,6 \text{ m}$$

Cálculo del espacio entre columnas de orificios (SEDAPAR, 2017, p. 1).

$$S_c = \frac{B_T - C_o * d}{C_o + 1}$$

$$S_c = \frac{1,5 \text{ m} - 19 * 0,014 \text{ m}}{19 + 1}$$

$$S_c = 0,0617 \text{ m}$$



Cálculo para el ancho de la zona de salida del sedimentador de acuerdo a la Ecuación 3.25 (Arboleda, 2000, p. 257).

$$E_s = \frac{1\,000 \frac{L}{m^3} * 0,00525 \frac{m^3}{s}}{3,3 \frac{L}{s * m}}$$

$$E_s = 1,6 \text{ m}$$

Cálculo de la altura que alcanzará el nivel de agua en el vertedero de la zona de salida según la Ecuación 3.26 (SEDAPAR, 2007, p. 1).

$$H_2 = \left( \frac{0,00525 \frac{m^3}{s}}{1,84 * 1,6 \text{ m}} \right)^{2/3}$$

$$H_2 = 0,015 \text{ m}$$

Cálculo de la velocidad de arrastre en la zona de lodos con la Ecuación 2.27.

$$v_A = \sqrt{\frac{8 * 0,06}{0,03} * \frac{9,81 \text{ m}}{s^2} * (1,05 - 1) * 0,003 \text{ m}}$$

$$v_A = 0,153 \frac{m}{s}$$

Cálculo del caudal de evacuación de los lodos a partir de la Ecuación 3.28.

$$Q_e = \frac{\pi}{4} * (0,3048 \text{ m})^2 * 0,153 \frac{m}{s} * \frac{1\,000 \text{ L}}{m^3}$$

$$Q_e = 11,19 \frac{L}{s}$$

Por cuestiones prácticas al momento de seleccionar la bomba de evacuación de lodos, se aproximó el resultado al entero inmediatamente superior.

$$Q_e = 12 \frac{L}{s}$$

Cálculo del caudal de lodos aproximado a partir de los datos experimentales con la Ecuación 3.29.

$$Q_{lodo} = \frac{136,06 \text{ mL}_{lodo}}{1 L} * \frac{1 L_{lodo}}{1\ 000 \text{ mL}_{lodo}} * \frac{1\ 000 L}{1 \text{ m}^3} * \frac{1,5 \text{ m}^3}{h}$$

$$Q_{lodo} = 204 \frac{L_{lodo}}{h}$$

Cálculo del tiempo de evacuación de lodos acumulados cada dos horas de trabajo según la Ecuación 3.30.

$$t_e = \frac{204 \frac{L_{lodo}}{h} * 2 h}{12 \frac{L_{lodo}}{s}}$$

$$t_e = 34 s$$

Cálculo de las dimensiones de la zona de sedimentación con base a la Figura 3.4.

$$L = 0,7 \text{ m} + 5 \text{ m}$$

$$L = 5,7 \text{ m}$$

$$\text{Tan}(8^\circ) = \frac{H'_s}{\frac{2 * (5,7 \text{ m})}{3}}$$

$$H'_s = 0,53 \text{ m}$$

- **Cálculo para la selección del ozonizador requerido en el sistema de tratamiento**

$$Q(O_3) = \frac{400 \frac{\text{mg}_{O_3}}{L} * \frac{1 \text{ kg}_{O_3}}{10^6 \text{ mg}_{O_3}} * \frac{1\ 000 L}{1 \text{ m}^3} * 3 \text{ m}^3}{1 h}$$

$$Q(O_3) = 1,2 \frac{\text{kg}_{O_3}}{h}$$

Para el cálculo de las dimensiones del tanque de ozonización se consideró inicialmente un diámetro menor a 1 m ya que la altura total del tanque no debe sobrepasar los 4,5 m por el espacio disponible para la planta.

$$3 \text{ m}^3 = \frac{\pi}{4} * (0,93 \text{ m})^2 * h_R$$

$$h_R = 4,42 \text{ m}$$

$$H_R = 4,42 \text{ m} + 0,2 * 4,42 \text{ m}$$

$$H_R = 5,3 \text{ m}$$

$$H_R = 5 * 0,93 \text{ m} + 0,6 \text{ m}$$

$$H_R = 5,25 \text{ m}$$

Sin embargo, se puede observar que la altura total del tanque, la cual considera el margen de seguridad del 20% y los 0,6 m adicionales para evitar el desbordamiento de la espuma en el tanque de ozonización, es de 5,3 m y no se podría instalar en el espacio disponible del hotel (Langlais et al., 2010, p. 413). Por lo tanto se resolvió utilizar dos tanques de ozonización en paralelo, para tratar 1,5 m<sup>3</sup> de efluente en cada uno.

$$1,5 \text{ m}^3 = \frac{\pi}{4} * (0,73 \text{ m})^2 * h_R$$

$$h_R = 3,60 \text{ m}$$

$$H_R = 3,60 \text{ m} + 0,2 * 3,60 \text{ m}$$

$$H_R = 4,32 \text{ m}$$

$$H_R = 5 * 0,73 \text{ m} + 0,6 \text{ m}$$

$$H_R = 4,25 \text{ m}$$

- **Cálculo en el diseño de tanques para almacenamiento de sustancias químicas**

A partir de los cálculos de los balances de masa se pudo determinar el volumen necesario de soluciones a almacenarse para tratar los efluentes durante 12 horas de trabajo. En todos los casos se asumió una densidad de la solución de 1 000 kg/m<sup>3</sup> por tratarse de sustancias diluidas.

- **Cálculo para el dimensionamiento del tanque de almacenamiento de ácido sulfúrico 0,2 N.**

$$V = \frac{72,42 \text{ kg sol}}{2 \text{ h}} * \frac{12 \text{ h}}{1 \text{ d}} * \frac{1 \text{ m}^3 \text{ sol}}{1\,000 \text{ kg sol}}$$

$$V = \frac{0,4352 \text{ m}^3 \text{ sol}}{d}$$

A partir del volumen obtenido se asumió la altura del cilindro para calcular su diámetro y se procuró que tengan valores similares; es decir, que la relación altura/diámetro sea cercana a 1 (Perry et al., 2001, pp. 23-44).

Valor asumido de altura:

$$h_1 = 0,75 \text{ m}$$

Valor calculado del diámetro:

$$d = \sqrt{\frac{0,4352 \text{ m}^3 * 4}{0,75 \text{ m} * \pi}}$$

$$d = 0,86 \text{ m}$$

Valor de la altura con un 20 % de margen de seguridad (Saravacos y Kostaropoulos, 2002, p. 5).

$$h = 0,2 * 0,75 \text{ m} + 0,75 \text{ m}$$

$$h = 0,9 \text{ m}$$

$$\frac{d}{h} = \frac{0,86 \text{ m}}{0,90 \text{ m}}$$

$$\frac{d}{h} = 0,96$$

ANEXO XI

DIAGRAMA DE MOODY

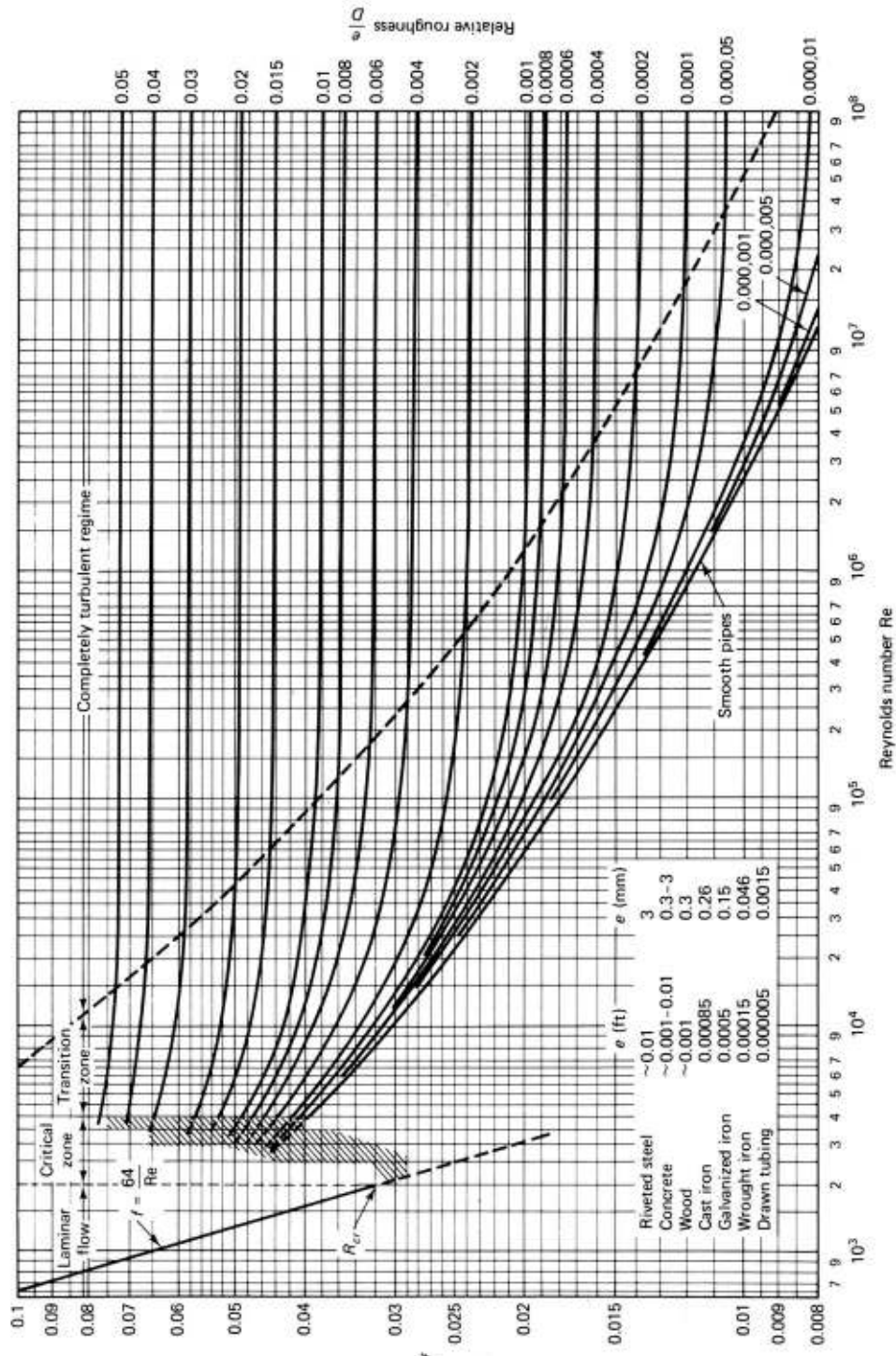


Figura AXI.1. Diagrama de Moody  
(Streeter, 2000, p. 294)

## ANEXO XII

### BALANCE DE MASA DE LA PTAR DEL HOTEL AKROS

Los cálculos del balance de masa se realizaron considerando que se tratarán efluentes cada 2 horas de operación; se decidió utilizar esta cantidad de tiempo como parámetro de diseño por el espacio disponible y el caudal promedio de los efluentes del hotel durante 12 horas de trabajo.

Para efectos prácticos en el desarrollo del balance de materia, se asumió una densidad constante del efluente igual a 1 000 kg/m<sup>3</sup> a lo largo de las etapas de la planta de tratamiento. En todas las etapas de la planta se realizó el balance de masa general que se describe con la Ecuación AXII.1 (Çengel y Boles, 2014, p. 222).

$$E - S + G - C = 0 \quad \text{[AXII. 1]}$$

Donde:

E: La cantidad de materia que entra al sistema (kg)

S: La cantidad de materia que sale del sistema (kg)

G: La cantidad de materia que se genera (kg)

C: La cantidad de materia que se consume (kg)

Al considerar un balance general y al aplicar el principio de conservación de la materia; la masa generada y la masa consumida serían iguales a cero (Çengel y Boles, 2014, p. 230), lo que dio como resultado la Ecuación AXII.2.

$$E = S \quad \text{[AXII. 2]}$$

- **Balance de masa en el tanque homogenizador**

Los efluentes ingresarán a un tanque de homogenización que tendrá como objetivo disminuir las variaciones en el caudal y en las características físico-químicas del agua. En la Figura AXII.1 se observan los flujos involucrados en el sistema.



**Figura AXII.1.** Flujos en el tanque homogenizador

- Corriente  $m_3$ :

La corriente  $m_3$  es la entrada de los efluentes a la planta de tratamiento; resulta del producto entre el caudal promedio, el tiempo de operación y la densidad del efluente.

$$m_3 = \frac{18 \text{ m}^3}{\text{d}} * \frac{1 \text{ d}}{12 \text{ h}} * \frac{1\,000 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3} * 2 \text{ h}$$

$$m_3 = 3\,000 \text{ kg}$$

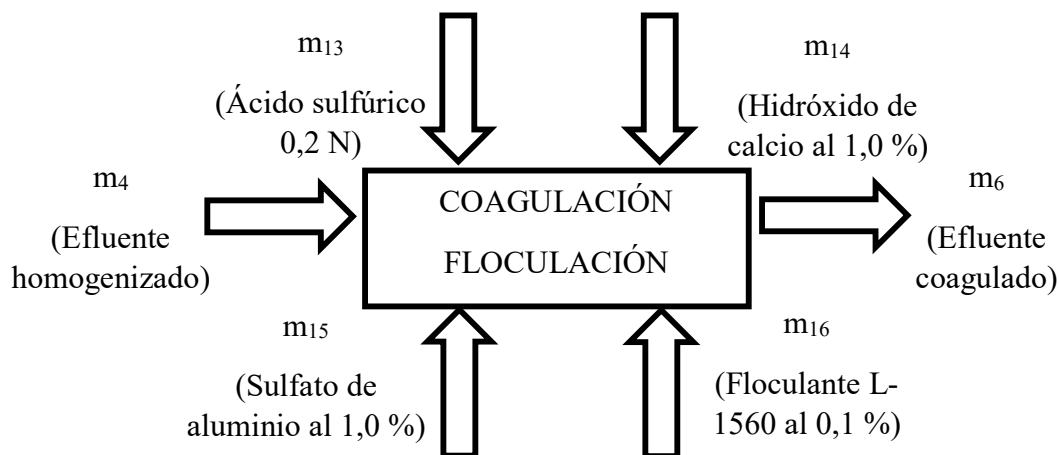
- Corriente  $m_4$ :

Al no existir otra corriente involucrada en el sistema como se observa en la Figura AXII.1, el valor de  $m_4$  será igual a  $m_3$  según la Ecuación AXII.2.

$$m_4 = 3\,000 \text{ kg}$$

- **Balance de masa en el tanque coagulador-floculador**

En la Figura AXII.2 se muestran las corrientes de entrada y salida del sistema de coagulación-floculación. En esta etapa ocurrirá también la regulación de pH previa al tratamiento.



**Figura AXII.2.** Flujos en el tanque coagulador-floculador

- Corriente  $m_{13}$ :

Esta corriente corresponde a la cantidad de solución de ácido sulfúrico 0,2 N que se agregará para regular el pH de  $3 \text{ m}^3$  efluente hasta el valor de 4. Las aguas residuales del hotel presentan variabilidad en sus características físico-químicas a lo largo del día de trabajo, por lo que en los ensayos experimentales se necesitaron diferentes cantidades de solución para cada muestra.

En la práctica se trabajará con un control de pH para regular las necesidades de ácido sulfúrico; sin embargo, para obtener un estimado se consideró un valor promedio de ácido utilizado para tratar 0,5 L de muestra, el cual fue de 12,07 mL. La masa de la corriente se calcula asumiendo una densidad de la solución de 1 g/mL.

$$m_{13} = \frac{12,07 \text{ mL sol}}{0,5 \text{ L}_M} * \frac{1 \text{ g sol}}{1 \text{ mL sol}} * \frac{1 \text{ kg sol}}{1000 \text{ g sol}} * \frac{1000 \text{ L}_M}{1 \text{ m}^3_M} * 3 \text{ m}^3_M$$

$$m_{13} = 72,42 \text{ kg sol}$$

- Corriente  $m_{14}$ :

Corresponde a la cantidad de solución de hidróxido de calcio al 1 % (m/V) que se agregarán a  $3 \text{ m}^3$  de efluente para subir el pH hasta el valor de 9,7. Se calculó como un valor promedio por litro de muestra a partir de los datos experimentales como



en el caso de la solución del ácido sulfúrico ya que con diferentes muestras se requerían de cantidades distintas de solución. El valor promedio fue de 23,07 mL por cada 0,5 L de muestra.

$$m_{14} = \left( \frac{23,07 \text{ mL sol}}{0,5 L_M} * \frac{1 \text{ g Ca(OH)}_2}{100 \text{ mL sol}} + \frac{23,07 \text{ mL sol}}{0,5 L_M} * \frac{99 \text{ g H}_2\text{O}}{100 \text{ mL sol}} \right) * \frac{1 \text{ kg sol}}{1\,000 \text{ g sol}} \\ * \frac{1\,000 L_M}{1 \text{ m}^3_M} * 3 \text{ m}^3_M$$

$$m_{14} = 138,42 \text{ kg sol}$$

- Corriente  $m_{15}$ :

Es la cantidad de solución de coagulante preparada al 1 % (m/V) que se deberá administrar a 3 m<sup>3</sup> de efluente para lograr clarificarlo. Experimentalmente se determinó que sería necesario agregar 0,10 g de coagulante, contenidos en la solución al 1 %, por cada litro de muestra.

$$m_{15} = \left( \frac{0,10 \text{ g coag}}{1 L_M} + \frac{0,10 \text{ g coag}}{1 L_M} * \frac{99 \text{ g H}_2\text{O}}{1 \text{ g coag}} \right) * \frac{1 \text{ kg sol}}{1\,000 \text{ g sol}} * \frac{1\,000 L_M}{1 \text{ m}^3_M} * 3 \text{ m}^3_M$$

$$m_{15} = 30,00 \text{ kg sol}$$

- Corriente  $m_{16}$ :

Es la cantidad de solución de floculante preparada al 0,1 % (m/V) que se deberá administrar a 3 m<sup>3</sup> de efluente para lograr clarificarlo; se tomó como referencia el resultado del Apartado 1.4, en el cual se determinó que será necesario agregar 0,003 g de floculante contenidos en la solución al 0,1 % para cada litro de muestra.

$$m_{16} = \left( \frac{0,003 \text{ g floc}}{1 L_M} + \frac{0,003 \text{ g floc}}{1 L_M} * \frac{99,9 \text{ g H}_2\text{O}}{0,1 \text{ g floc}} \right) * \frac{1 \text{ kg sol}}{1\,000 \text{ g sol}} * \frac{1\,000 L_M}{1 \text{ m}^3_M} * 3 \text{ m}^3_M$$

$$m_{16} = 9,00 \text{ kg sol}$$

- Corriente  $m_6$ :

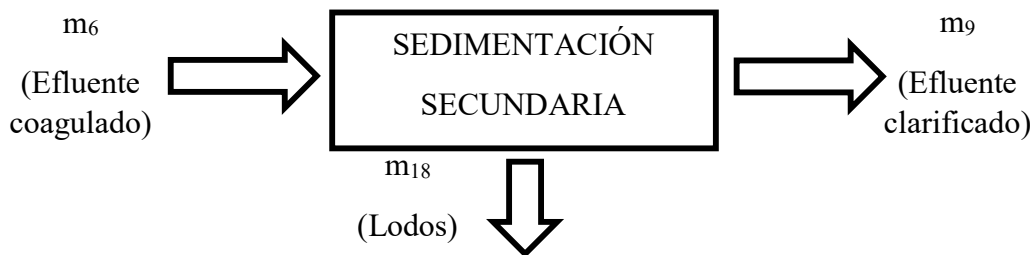
Es la suma de todas las corrientes de entrada al tanque coagulador-floculador

$$m_6 = (3\,000 + 72,42 + 138,42 + 30,00 + 9,00) \text{ kg sol}$$

$$m_6 = 3\,249,84 \text{ kg sol}$$

- **Balance de masa en el sedimentador secundario**

En la Figura AXII.3 se muestran las corrientes de entrada y salida a la sedimentación secundaria.



**Figura AXII.3.** Flujos en el sedimentador secundario

- Corriente  $m_{18}$ :

El cálculo de los lodos que sedimentarán a partir de  $3 \text{ m}^3$  de efluente tratado se realizó sobre la base de la cantidad de precipitados obtenidos en los ensayos experimentales. Se tomó un valor promedio de diferentes muestras, el cual fue de  $136,06 \pm 45 \text{ mL}$  de precipitados por litro y se asumió la densidad del lodo igual a  $1,05 \text{ g/mL}$ , que es la densidad de una partícula floculenta de hidróxido de aluminio (Pérez, 2009, p. 124).

$$m_{18} = \frac{136,06 \text{ mL lodo}}{1 L_M} * \frac{1,05 \text{ g lodo}}{1 \text{ mL lodo}} * \frac{1 \text{ kg lodo}}{1\,000 \text{ g lodo}} * \frac{1\,000 L_M}{1 \text{ m}^3_M} * 3 \text{ m}^3_M$$

$$m_{18} = 428,40 \text{ kg lodo}$$

- Corriente  $m_9$ :

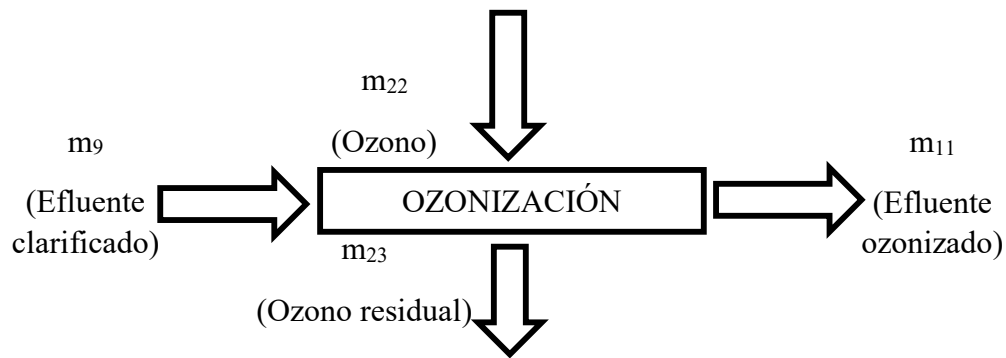
Es la diferencia entre la cantidad de efluente que entra al sedimentador y la cantidad de lodos que precipitan.

$$m_9 = 3\,249,84 \text{ kg} - 428,40 \text{ kg}$$

$$m_9 = 2\,821,44 \text{ kg}$$

- **Balance de masa en la etapa de ozonización**

En la Figura AXII.4 se muestran las corrientes de entrada y salida durante la etapa de ozonización del efluente.



**Figura AXII.4.** Flujos en el ozonizador

- Corriente  $m_{22}$ :

Es la cantidad de ozono que debe ingresar al sistema para finalizar el tratamiento de aproximadamente  $3 \text{ m}^3$  de agua previamente clarificada. Experimentalmente se determinó que serían necesarios  $400 \text{ mg}$  de ozono por hora y por cada litro de muestra. En el Anexo AX se mostró que se requerirán de  $1,2 \text{ kgO}_3/\text{h}$  para tratar  $3 \text{ m}^3$  de efluente.

$$m_{22} = 1,2 \text{ kg}$$

- Corriente  $m_{23}$ :

Esta corriente representa el ozono residual, el cual fue determinado sobre la base de datos bibliográficos en los que se detalla que el  $90 \%$  del ozono entra en contacto con el agua y reacciona con la materia orgánica (Langlais et al., 2010, p. 391).

$$m_{23} = 1,2 \text{ kg} - 0,9 * 1,2 \text{ kg}$$

$$m_{23} = 0,12 \text{ kg}$$

- Corriente  $m_{11}$ :

Es la cantidad final de efluente tratado y listo para su disposición final.

$$m_{11} = 2\,821,44 \text{ kg} + 1,2 \text{ kg} - 0,12 \text{ kg}$$

$$m_{11} = 2\,822,52 \text{ kg}$$

- **Reutilización del efluente tratado**

Las aguas tratadas se utilizarán para abastecer los inodoros del hotel. Después de cumplir con esta función serán vertidas en el sistema de alcantarillado como aguas negras, las cuales no son normadas en la Ordenanza Municipal No. 138 (Secretaría de Ambiente, 2018).

## ANEXO XIII

### EJEMPLO DE CÁLCULO DEL BALANCE DE ENERGÍA EN EL SISTEMA DE TUBERÍAS

El balance de energía se realizó en todas las líneas de la tubería con la Ecuación 3.38. Esto sirvió para determinar las especificaciones de las bombas y tuberías necesarias para el funcionamiento de la PTAR. Los caudales que circulan por las tuberías se relacionan con el balance de masa descrito en el Anexo AXII.

Las velocidades recomendadas para flujos de líquidos en tuberías y bombas se encuentran en la Tabla AXIII.1.

**Tabla AXIII.1.** Velocidades límite recomendadas para fluidos en tuberías y bombas

Fluido	Flujo	Velocidad [m/s]
Líquidos poco viscosos	Flujo por gravedad	0,15 – 0,30
	Ingreso a la bomba	0,30 – 0,90
	Salida de la bomba	1,20 – 3,00
	Línea de conducción	1,20 – 2,40
Líquidos viscosos	Entrada a la bomba	0,06 – 0,15
	Salida de la bomba	0,15 – 0,60

(Martín, Salcedo y Font, 2011, p. 28).

- **Línea tanque de coagulación-sedimentador secundario**

La línea contiene los flóculos de hidróxido de aluminio formados, por lo tanto se utilizará una bomba centrífuga de impulsor abierto. Las constantes de los accesorios que se utilizarán en la planta de tratamiento de efluentes líquidos del hotel AKROS se presentan en la Tabla AXIII.2

**Tabla AXIII.2.** Accesorios en la planta de tratamiento de efluentes líquidos

Accesorios	Ki
Válvula de bola (completamente abierta)	0,05
Válvula de retención	2,50
Válvula de compuerta (completamente abierta)	0,19
Válvula de globo (completamente abierta)	10,00
Tee estándar	1,80
Codo de 90°	0,90
Pérdidas a la entrada	1,00
Pérdidas a la salida	1,00

(Streeter, 2000, p. 300)

Para poder calcular la altura de la bomba se aplicó la Ecuación de Bernoulli (3.39), se determinaron cada uno de sus parámetros tanto en las líneas de succión como en las de descarga comenzando por el número de Reynolds.

$$Re_S = \frac{1\,000 \frac{kg}{m^3} * 0,06 \frac{m}{s} * 0,32 m}{0,001 \frac{kg}{m \cdot s}}$$

$$Re_S = 19\,387,09$$

$$Re_D = \frac{1\,000 \frac{kg}{m^3} * 0,15 \frac{m}{s} * 0,20 m}{0,001 \frac{kg}{m \cdot s}}$$

$$Re_D = 30\,653,69$$

Cálculo de las pérdidas por fricción en las zonas de succión y descarga.

$$hf_S = \frac{0,0255 * 1,0 m}{0,32 m} * \frac{0,06^2 \frac{m^2}{s^2}}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}}$$

$$hf_S = 1,45E - 5 m$$

$$hf_D = \frac{0,0243 * 4,5 m}{0,20 m} * \frac{0,15^2 \frac{m^2}{s^2}}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}}$$

$$hf_D = 5,81E - 4 m$$

Cálculo de las pérdidas por accesorios en las zonas de succión y descarga.

$$h_{S_{acc}} = (1 + 1 + 1,8 + 0,05) * \frac{0,06^2 \frac{m^2}{s^2}}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}}$$

$$h_{S_{acc}} = 6,97E - 4 \text{ m}$$

$$h_{D_{acc}} = (1 + 1 + 2,5 + 1,8 + 2 * 0,9 + 2 * 0,05) * \frac{0,15^2 \frac{m^2}{s^2}}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}}$$

$$h_{D_{acc}} = 9,29E - 3 \text{ m}$$

Total de pérdidas por fricción y por accesorios en las líneas de succión y descarga.

$$h_{f_{SD}} = (1,45E - 5 \text{ m}) + (6,97E - 4 \text{ m}) + (5,81E - 4 \text{ m}) + (9,29E - 3 \text{ m})$$

$$h_{f_{SD}} = 0,01 \text{ m}$$

Cálculo de la altura de la bomba con la Ecuación 3.38.

$$H_B = \frac{72954 \frac{N}{m^2} - 72954 \frac{N}{m^2}}{9810 \frac{N}{m^3}} + \frac{0,15^2 \frac{m^2}{s^2} - 0,06^2 \frac{m^2}{s^2}}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} + 1,50 \text{ m} - 1,20 \text{ m} + 0,01 \text{ m}$$

$$H_B = 0,31 \text{ m}$$

Cálculo de la potencia de la bomba en hp.

$$P_{bomba} = \frac{Q_i * \gamma_i * H_B}{746}$$

Cálculo de la altura dinámica total de la bomba.

$$TDH = (1,5 \text{ m} + 9,29E - 3 \text{ m} + 5,81E - 4 \text{ m}) * 9810 \frac{N}{m^3}$$

$$TDH = 87,78 \text{ kPa}$$

Cálculo de la carga neta positiva en succión disponible de la bomba.

$$NPSHD = \frac{72\,954 \frac{N}{m^2} - 4\,224,57 \frac{N}{m^2}}{9810 \frac{N}{m^3}} - (1,45E - 5 + 6,97E - 4) m + 1,2 m$$

$$+ \frac{0,06^2 \frac{m^2}{s^2}}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}}$$

$$NPSHD = 8,21 m$$

En la Tabla AXIII.3 se muestran las características de las bombas centrífugas que se deben seleccionar para cada etapa de la PTAR.

**Tabla AXIII.3.** Características de las bombas centrífugas seleccionadas para cada etapa de la PTAR

Línea	Descripción	Caudal [m <sup>3</sup> /h]	Altura [m]	Potencia requerida [hp]	Potencia nominal [hp]
2	PAF-12-D Sumergible	12,00	5,69	0,64	1,50
5	CO-350/03 M Centrífuga	10,80	0,81	0,08	0,50
8	SRI-05-Aut Sumergible	15,27	0,38	0,06	0,50
10	Serie gran caudal RGT-10 Centrífuga	16,80	3,59	0,56	1,00
12	Bomba CPM-130 Centrífuga	2,90	7,16	0,19	0,50
17	PAF-13 Sumergible	43,20	2,10	0,85	2,00

- **Ejemplo de cálculo para especificación de la válvula de la línea coagulator-sedimentador secundario**

$$\Delta P = 2,5 * \frac{\left(\frac{0,15 m}{s}\right)^2}{2} * 1000 \frac{kg}{m^3}$$

$$\Delta P = 28,13 Pa$$

$$K_v = 1,2 * 10,80 \frac{m^3}{h} * \sqrt{\frac{1}{\frac{28,13 Pa}{10^5}}}$$



$$K_v = 777,89$$

En la Tabla AXIII.4 se resumen los resultados de las dimensiones de cada válvula que se utilizará en la PTAR.

**Tabla AXIII.4.** Dimensiones de las válvulas utilizadas en la PTAR

Línea	Tipo	$K_{acc}$	Caudal [m <sup>3</sup> /h]	Caída de presión [Pa]	$K_v$	Diámetro nominal [in]
3	Retención	2,50	12,00	5512,50	61,74	2,0
3	Bola	0,05	12,00	110,25	436,55	2,0
4	Diafragma	0,19	36,00	418,95	671,83	3,0
5	Bola	0,05	10,80	0,09	13751,25	12,0
6	Retención	2,50	10,80	28,13	777,89	8,0
6	Bola	0,05	10,80	0,56	5500,50	8,0
9	Retención	2,50	15,27	11250,00	55,00	2,0
9	Bola	0,05	15,27	225,00	388,85	2,0
10	Bola	0,05	16,80	20,25	1426,06	4,0
11	Retención	2,50	16,80	11250,00	60,50	2,0
11	Bola	0,05	16,80	225,00	427,82	2,0
12	Bola	0,05	2,90	2,25	738,49	3,0
13	Retención	2,50	2,90	1800,00	26,08	1,5
13	Bola	0,05	2,90	36,00	184,62	1,5
14	Globo	10,00	1,66	48984,50	2,86	1,0
15	Globo	10,00	10,79	29427,38	24,03	1,5
16	Globo	10,00	3,24	19602,00	8,84	1,0

## ANEXO XIV

## DIÁMETROS DE TUBERÍA DE PVC

Tabla AXIV.1. Características de tubería de PVC con un diámetro nominal de hasta 6 plg

	Diámetro Nominal		Peso	Diámetro Exterior Promedio		Espesor de Pared Mínimo		Diámetro Interior Promedio
	mm	in		g/m	mm	in	mm	
RDE 9 PVC Presión de Trabajo a 23°C: 500 PSI	21	1/2	218	21,34	0,84	2,37	0,09	16,60
RDE 11 PVC Presión de Trabajo a 23°C: 400 PSI	26	3/4	304	26,67	1,05	2,43	0,09	21,81
RDE 13.5 PVC Presión de Trabajo a 23°C: 315 PSI	21	1/2	157	21,34	0,84	1,58	0,06	18,18
	33	1	364	33,40	1,31	2,46	0,09	28,48
RDE 26 PVC Presión de Trabajo a 23°C: 160 PSI	60	2	655	60,3	2,37	2,31	0,09	55,70
	73	2.1/2	964	73,0	2,87	2,79	0,11	67,45
	88	3	1438	88,9	3,50	3,43	0,13	82,04
	114	4	2376	114,3	4,50	4,39	0,17	105,52
	168	6	4759	168,3	6,62	6,48	0,25	155,32

(PAVCO, 2018)

Tabla AXIV.2. Características de tubería de PVC con un diámetro nominal de hasta 16 plg

NORMA NTC 3722-3 S4										
	in	mm	mm	mm	psi	kN/m <sup>2</sup>	m	mm		kg/m
2902480	8	200	185	1,4	28	4	6	117	227	2,22
2902481	10	250	231	1,7	28	4	6	134	283	3,46
2902482	12	315	291	1,9	28	4	6	187	358	4,72
2902494	14	355	328	2,1	28	4	6	187	401	6,10
2902479	16	400	370	2,3	28	4	6	234	454	7,85

(PAVCO, 2018)

## ANEXO XV

### PRESIÓN DE OPERACIÓN Y DISEÑO DE LOS EQUIPOS PARA EL PFD Y P&ID

La presión de operación de los equipos de la PTAR es igual a la presión hidrostática proveniente del nivel de altura del líquido contenido en los tanques y se calcula según la Ecuación AXV.1 (Sinnott, 2005, p. 424).

$$P_{op} = \rho_{H_2O} * g * h_{H_2O} \quad [AXV. 1]$$

Donde:

$P_{op}$ : Presión de operación en Pa

$\rho_{H_2O}$ : Densidad del efluente en kg/m<sup>3</sup>

$g$ : Aceleración de la gravedad en m/s<sup>2</sup>

$h_{H_2O}$ : Altura del nivel del efluente en el tanque en m

La presión de diseño considera a la presión de operación y a la atmosférica. Se calcula mediante la Ecuación AXV.2 (Sinnott, 2005, p. 426).

$$P_{dis} = P_{op} + P_{atm} \quad [AXV. 2]$$

Donde:

$P_{dis}$ : Presión de diseño (Pa)

$P_{atm}$ : Presión atmosférica (Pa)

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo de las presiones de operación y de diseño del tanque de homogenización, se tomó en cuenta que la presión atmosférica de Quito es igual a 72 954 Pa (EXA, 2019). En la Tabla AXV.1 se resumen los resultados obtenidos para cada una de las operaciones unitarias.

$$P_{op} = 1000 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2} * 1,7 m$$

$$P_{op} = 16\ 677 Pa$$

$$P_{dis} = 16\ 677 Pa + 72\ 954 Pa$$

$$P_{dis} = 89\ 631 Pa$$

**Tabla AXV.1.** Presiones de operación y de diseño de los equipos de la PTAR

<b>Equipo</b>	<b>Presión de operación [Pa]</b>	<b>Presión de diseño [Pa]</b>
Tanque de homogenización	16 677,0	89 631,0
Tanque coagulador-floculador	19 620,0	92 574,0
Sedimentador secundario	15 009,3	87 963,3
Tanque de almacenamiento del efluente clarificado	16 677,0	89 631,0
Reactor de ozonización	39 240,0	112 194,0
Tanque de almacenamiento del efluente tratado	24 525,0	97 479,0
Tanque de ácido sulfúrico 0,2 N	7 357,5	80 311,5
Tanque de hidróxido de calcio 1,0 %	9 810,0	82 764,0
Tanque de sulfato de aluminio 1,0 %	5 886,0	78 840,0
Tanque de polímero catiónico 0,1 %	3 924,0	76 878,0

## ANEXO XVI

### EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL HOTEL AKROS

#### AXIX.1 COSTOS DIRECTOS

- **Tanque de homogenización**

El tanque de homogenización consiste en un recipiente de 3 500 L de capacidad construido de polietileno de alta densidad cuyo costo en el mercado local es de 769,00 USD (WATERSUPPLY EC, 2017). El agitador y los deflectores del tanque estarán hechos de acero al carbón, el cual tiene un valor aproximado de 43,80 USD/m<sup>2</sup> (iCORP, 2018). Los costos de los deflectores y del agitador del tanque de homogenización se presentan en la Tabla AXVI.1.

**Tabla AXVI.1.** Costos de los deflectores y de la paleta de agitación del tanque de homogenización, construidos con acero al carbón

Parte	Área (m <sup>2</sup> )	Cantidad	Costo unitario [USD/m <sup>2</sup> ]	Costo total [USD]
Agitador	0,03	1	43,80	1,31
Deflector	0,09	4	43,80	15,77

(iCORP, 2018)

- **Tanque coagulador – floculador**

El coagulador-floculador de esta planta va soterrado y construido con una capa de 6 cm de espesor de hormigón con dosificación alta en cemento para evitar la corrosión (NRMCA, 2008, p. 1). El precio de la obra civil se calcula de acuerdo con los metros cúbicos de material necesario. El tanque necesitaría un volumen de 0,90 m<sup>3</sup> de hormigón; si la obra civil en este material tiene un costo de 73,36 USD/m<sup>3</sup> (CYPE Ingenieros, 2018), el precio del tanque sería de 66,02 USD. Los deflectores

y el agitador del tanque se construirán en acero al carbón y sus costos de elaboración se resumen en la Tabla AXVI.2.

**Tabla AXVI.2.** Costo de las paletas de agitación del tanque coagulador-floculador

Parte	Área [m <sup>2</sup> ]	Cantidad	Costo unitario [USD/m <sup>2</sup> ]	Costo total [USD]
Agitador	0,07	6	43,80	18,40
Deflector	0,10	4	43,80	17,52

(iCORP, 2018)

- **Sedimentador secundario y tanques de almacenamiento de hormigón**

El sedimentador secundario de la planta de tratamiento de efluentes diseñada para el hotel AKROS es prácticamente un tanque de almacenamiento hecho de hormigón armado. Para calcular los costos sobre la base del volumen de cada tanque se consideraron los costos por obra civil correspondientes al valor total de material de construcción a emplearse.

En la Tabla AXVI.3 se detalla el volumen de hormigón necesario para cada tanque de almacenamiento con un espesor de 4 cm y el costo correspondiente a la obra civil. El precio del hormigón es de 73,36 USD/m<sup>3</sup> (CYPE Ingenieros, 2018).

**Tabla AXVI.3.** Costos del sedimentador secundario y los tanques de almacenamiento obtenidos en función del volumen de hormigón armado necesario

Descripción	Material necesario [m <sup>3</sup> ]	Costo hormigón [USD/m <sup>3</sup> ]	Costo obra civil [USD]
Sedimentador secundario	1,91	73,36	140,12
Tanque de almacenamiento de efluente clarificado	0,68	73,36	49,89
Tanque de almacenamiento de efluente ozonizado	1,04	73,36	76,29

(CYPE Ingenieros, 2018)

- **Reactor de ozonización**

El reactor de ozonización se construirá con tubería de PVC. El costo de adquisición se observa en la Tabla AXVI.4.

**Tabla AXVI.4.** Costo de la tubería de PVC para la construcción de los reactores de ozonización

Diámetro nominal (in)	Diámetro interno [mm]	Costo unitario [USD]	Unidades	Costo total [USD]
30	747	1 136,63	2	2 273,26

(PAVCO, 2018)

- **Bombas y tuberías**

En la Tabla AXVI.5 se presentan los costos de las bombas requeridas para el funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales.

**Tabla AXVI.5.** Costos de adquisición de las bombas para el funcionamiento de la planta de tratamiento de efluentes

Equipo	Código en planta	Costo [USD]
Bombas Sumergibles	P-101 A/B	922,99
	P-104 A/B	1 530,29
	P-105 A/B	1 050,80
Bombas Centrífugas	P-102 A/B	1 187,96
	P-103 A/B	301,52
	P-106 A/B	480,60
<b>COSTO TOTAL</b>		<b>5 474,16</b>

(Bombas Hasa, 2018b)

En la Tabla AXVI.6 se encuentran los precios de las tuberías necesarias para el transporte de los fluidos. El costo de los accesorios y válvulas se consideró como el 75 % del total de las tuberías (Sinnott, 2005, p. 312)

**Tabla AXVI.6.** Costos de adquisición de las tuberías y sus accesorios para el funcionamiento de la planta de tratamiento de efluentes

Diámetro nominal [in]	Material	Costo unitario [USD/m]	Longitud [m]	Costo total [USD]
¼	PVC	9,49	3,5	33,22
¾	PVC	2,04	2,5	5,10
1 ½	PVC	2,95	2,5	7,38
2	PVC	3,90	24,0	93,60
3	PVC	9,73	1,5	14,60
4	PVC	4,85	7,0	33,95
8	PVC	12,93	15,0	193,95
12	PVC	27,93	1,8	50,27
Costo de tubería				563,17
Costo de accesorios				422,38
<b>COSTO TOTAL</b>				<b>985,55</b>

(Plastigama, 2018; PAVCO, 2018)

- **Generador de ozono y destructor térmico de ozono**

En la Tabla AXVI.7 y en la Tabla AXVI.8 se observan los rubros a cancelar por la importación del generador de ozono y del destructor térmico de ozono.

**Tabla AXVI.7.** Costo del generador de ozono

Rubro	Costo [USD]
Valor FOB	2 500,00
FLETE	500,00
Valor CFR	3 000,00
Seguro (0,80 % CFR)	24,00
Valor CIF	3 024,00
Valor AD-VALOREM (20 % CIF)	604,80
FODINFA (0,5 % CIF)	15,12
Valor Ex Aduana	3 643,92
Valor ICE	0,00
IVA (12 %)	437,27
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>4 081,19</b>

(Simon Chen Fujian, 2017)



**Tabla AXVI.8.** Costo del destructor térmico de ozono

<b>Rubro</b>	<b>Costo [USD]</b>
Valor FOB	600,00
FLETE	924,83
Valor CFR	1 524,83
Seguro (0,80 % CFR)	12,20
Valor CIF	1 537,02
Valor AD-VALOREM (20 % CIF)	307,40
FODINFA (0,5 % CIF)	7,69
Valor Ex Aduana	1 852,11
Valor ICE	0,00
IVA (12 %)	222,25
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>2 074,37</b>

(SPARTAN, 2017)

- **Tanques de almacenamiento de sustancias químicas**

Los tanques de almacenamiento de sustancias químicas estarán hechos de polietileno de alta densidad y sus costos de acuerdo a sus capacidades se especifican en la Tabla AXVI.9.

**Tabla AXVI.9.** Costos de adquisición de los tanques de polietileno para almacenamiento de sustancias químicas

<b>Tanque</b>	<b>Capacidad [L]</b>	<b>Costo [USD]</b>
Ácido Sulfúrico 0,2 N	151,4	20,00
Hidróxido de calcio 1,0 %	1 100,0	210,00
Sulfato de aluminio 1,0 %	250,0	61,14
Polímero catiónico 0,1 %	151,4	20,00
	<b>TOTAL</b>	<b>311,14</b>

(WATERSUPPLY EC, 2017)

El cálculo para la estimación las cantidades de hidróxido de calcio y agua que se utilizarán para el tratamiento de 3 m<sup>3</sup> de efluente, se detalla a continuación:

$$m_{Ca(OH)_2} = \left( \frac{23,07 \text{ mL sol}}{0,5 L_M} * \frac{1 \text{ g Ca(OH)}_2}{100 \text{ mL sol}} \right) * \frac{1 \text{ kg Ca(OH)}_2}{1000 \text{ g Ca(OH)}_2} * \frac{1000 L_M}{1 m^3_M} * 3 m^3_M$$

$$m_{Ca(OH)_2} = 1,38 \text{ kg Ca(OH)}_2$$

$$m_{H_2O} = \left( \frac{23,07 \text{ mL sol}}{0,5 L_M} * \frac{99 \text{ g H}_2O}{100 \text{ mL sol}} \right) * \frac{1 \text{ kg H}_2O}{1000 \text{ g H}_2O} * \frac{1 m^3 H_2O}{1000 \text{ kg H}_2O} \frac{1000 L_M}{1 m^3_M} * 3 m^3_M$$

$$m_{H_2O} = 0,137 m^3 H_2O$$

Los resultados de las cantidades de sustancias químicas y agua potable necesarias para el tratamiento de 3 m<sup>3</sup> de efluentes se presentan en la Tabla 5.3