

7.7 INFORME FINAL

Contenido

1.	Diagnóstico y Calidad del Agua.....	6
1.1.	Trabajos de Gabinete y Recorridos de Campo.....	6
1.1.1.	Fundamentos y Metodología de la Investigación de Gabinete	6
1.1.2.	Protocolo Técnico de Inspección en Campo y Criterios de Validación.....	7
1.2.	Diagnóstico, Verificación y Caracterización de las Descargas Existentes (Cuenca Coyula)	9
1.2.1.	Inventario Técnico y Localización Espacial de Vertimientos Prioritarios.....	9
1.2.2.	Diagnóstico del Estado Físico y Operativo de la Infraestructura Conductora	11
1.3.	Evaluación de Resultados de Campo y de Laboratorio.....	13
1.3.1.	Campaña Analítica de Muestreo y Metodología Estadística de Procesamiento	13
1.3.2.	Análisis Técnico por Parámetro Físicoquímico y Microbiológico	14
1.4.	Definición de la Calidad del Agua Residual Cruda	18
1.4.1.	Establecimiento de Parámetros Conceptuales del Influyente y Metas de Calidad	18
1.4.2.	Análisis de Resiliencia Operativa y Consistencia de Carga del Sistema.....	21
2.	Topografía y Selección de Sitios	22
2.1.	Memoria Descriptiva del Levantamiento Topográfico	22
2.1.1.	Objeto y Alcance de los Trabajos Topográficos.....	22
2.1.2.	Marco Normativo y Sistema de Referencia Geodésica	23
2.1.3.	Metodología de Control en Campo e Instrumentación.....	23
2.1.4.	Levantamiento de Detalles, Procesamiento y Entrega de Productos	23
2.2.	Integración del Plano Base de la Zona de Estudio	24
2.2.1.	Metodología de Conformación y Fuentes de Datos	24
2.2.2.	Componentes de la Infraestructura Sanitaria Representados.....	24
2.2.3.	Criterios de Diseño, Trazo de Líneas y Optimización Topográfica.....	25
2.2.4.	Depuración, Actualización de Descargas y Utilidad Hidráulica	25
2.3.	Identificación y Selección de Sitios Potenciales para las PTAR	26
2.3.1.	Problemática Sanitaria y Proyecciones de Crecimiento Demográfico	26
2.3.2.	Criterios de Evaluación y Análisis de Alternativas de Sitios.....	26
2.3.3.	Diagnóstico Técnico de las Alternativas de Macro-Sitios Seleccionadas.....	29
2.4.	Criterios para el Arreglo de Conjunto de las Unidades de Proceso.....	30
2.4.1.	Fundamentos Técnicos del Diseño de Distribución de Plantas.....	30
2.4.2.	Variables Topográficas, Ambientales y de Operación Integradas	30
2.4.3.	Especificaciones del Plano Funcional de Conjunto	31

3.	Ingeniería de Procesos (A ² O)	32
3.1.	Bases de Diseño Hidráulico, Demográfico y Modelación de Carga Contaminante.....	32
3.1.1.	Análisis Macroeconómico de Caudales al Año Horizonte 2050	32
3.1.2.	Línea Base del Influyente Crudo y Metas de Vertido Conforme a la NOM-001-SEMARNAT-2021 32	
3.2.	Evaluación de Alternativas Tecnológicas y Justificación del Proceso Seleccionado	35
3.3.	Ingeniería de Detalle Funcional del Tren de Agua	37
3.3.1.	Pretratamiento Mecanizado Compacto	37
3.3.2.	Tratamiento Primario: Sedimentación Gravitacional	37
3.3.3.	Tratamiento Biológico Avanzado: Reactor A ² O.....	38
3.3.4.	Clarificación Secundaria: Separación de Biomasa.....	40
3.3.5.	Filtración Terciaria y Pulimiento del Efluente	40
3.3.6.	Sistema Avanzado de Desinfección por Ozono.....	41
3.3.7.	Estructura de Aforo y Emisor de Descarga Final.....	41
3.4.	Ingeniería de Detalle Funcional del Tren de Lodos (Biosólidos)	42
3.4.1.	Espesamiento Mecánico Continuo de Lodos.....	42
3.4.2.	Estabilización Biológica Avanzada: Digestión Anaerobia.....	42
3.4.3.	Deshidratación Mecánica de Biosólidos.....	43
3.5.	Matriz de Homologación de Equipamiento Electromecánico	44
Sección 4.	Ingeniería Hidráulica y Fenómenos Transitorios	47
4.1.	Ingeniería Hidráulica del Tren de Procesos de las Plantas de Tratamiento	47
4.1.1.	Criterios de Diseño, Fundamentos Hidráulicos y Ecuaciones Base.....	47
4.1.2.	Justificación Técnica y Económica de la Procura de Materiales	48
4.1.3.	Límites Velocitarios Normativos y Envoltentes de Carga Desfavorables	48
4.1.4.	Perfil Hidráulico Comparativo e Hidrodinámica de las PTAR.....	49
4.2.	Memorias de Cálculo Hidráulico de Estaciones de	51
4.2.1.	Desglose Analítico e Integración de Resultados por Cárcamo.....	51
4.2.2.	Flexibilidad de Operación y Seguridad Civil de las Estaciones	52
4.3.	Análisis del Fenómeno Transitorio (Golpe de Ariete)	53
4.3.1.	Fundamentos del Golpe de Ariete y Escenario Crítico de Simulación.....	53
4.3.2.	Estrategia de Diseño Basada en la Resistencia Intrínseca de la Tubería	54
4.3.3.	Propiedades Mecánicas del Material y Parámetros del Modelo	54
4.3.4.	Dictamen Técnico y Validación Estructural del Sistema	55
5.	Anteproyecto Eléctrico y SCADA.....	56

5.1.	Criterios de Diseño, Normatividad y Parámetros Eléctricos Generales	56
5.1.1.	Objetivo y Alcance General del Anteproyecto Eléctrico.....	56
5.1.2.	Marco Normativo y de Regulación Aplicable.....	56
5.1.1.	Parámetros Técnicos Base del Sistema	58
5.2.	Estudio de Demanda y Cuadro de Cargas Consolidado	58
5.2.1.	Metodología de Integración del Cuadro de Cargas.....	58
5.2.2.	Cuadro de Cargas e Identificación de Equipos Principales (PTAR El Vado - 160 L/s)	59
5.3.	Selección de Subestación, Análisis de Continuidad y Potencia de Transformadores	61
5.3.1.	Estudio Técnico-Económico para la Configuración de la Subestación	61
5.3.2.	Selección y Cálculo de Capacidad de los Transformadores	61
5.3.3.	Sistema de Energía de Emergencia y Respaldo Técnico.....	62
5.4.	Cálculos de Ingeniería: Alimentadores, Caída de Tensión y Cortocircuito	63
5.4.1.	Dimensionamiento de Alimentadores por Ampacidad y Derrateo.....	63
5.4.2.	Verificación por Criterio de Caída de Tensión (%VD).....	63
5.4.3.	Estudio Básico de Cortocircuito y Capacidad Interruptiva	65
5.5.	Ingeniería de Seguridad: Puesta a Tierra y Protección Atmosférica	66
5.5.1.	Diseño del Sistema de Puesta a Tierra (Malla de Tierra).....	66
5.5.2.	Sistema de Protección contra Descargas Atmosféricas (SPCDA)	67
5.6.	Definición Conceptual del Sistema de Control, Automatización y SCADA	67
5.6.1.	Filosofía de Operación y Arquitectura del Sistema de Control.....	67
5.6.2.	Red de Instrumentación en Línea y Estaciones de Verificación.....	68
5.6.3.	Especificación Técnica de la Estación de Medición de Flujo de Salida (FIT-01)	68
Sección 6. Tenencia de la Tierra y Aspectos Legales.....		70
6.1.	Marco Jurídico, Antecedentes Normativos y Metodología de Investigación Del Suelo.....	70
6.1.1.	Fundamento Constitucional y Legislación Agraria y Civil Aplicable	70
6.1.2.	Metodología de Diagnóstico de Campo y Vinculación Técnico-Jurídica.....	71
6.2.	Diagnóstico Técnico de Predios para Infraestructura Principal y Cárcamos	72
6.2.1.	Terreno para la Construcción de la Planta de Tratamiento (PTAR) El Vado	72
6.2.2.	Predio Sirviente para la Construcción del Cárcamo de Bombeo El Vado.....	73
6.2.3.	Predio Sirviente para la Construcción del Cárcamo de Bombeo Coyula	73
6.3.	Rigor Geométrico: Cuadros de Construcción de Predios Sirvientes	74
6.4.	Catastro de Franjas de Servidumbre de Paso para Colectores y Líneas de Impulsión	76
6.4.1.	Definición Legal de la Servidumbre Legal de Paso para	76
6.4.2.	Base de Datos Cartográfica "Shapefile" e Indexación de Atributos SIG.....	76

6.4.3.	Estrategia y Plan de Gestión de Adquisiciones de Derechos de Vía.....	77
Sección 7. Presupuestos y Especificaciones		78
7.1.	Metodología de Integración del Catálogo de Conceptos y Cantidades de Obra	78
7.1.1.	Criterios de Cuantificación y Estructuración del Catálogo.....	78
7.1.2.	Protocolo para el Desarrollo de Conceptos No Contenidos en el Catálogo de CONAGUA	79
7.2.	Estimación del Presupuesto Base de Inversión Inicial	80
7.2.1.	Criterios de Tasación y Aplicación de Precios Unitarios	80
7.2.2.	Presupuesto Base Consolidado de Inversión por Macro-Sitio	80
7.3.	Costos de Operación, Mantenimiento (O&M) y Reposiciones.....	81
7.3.1.	Metodología de Análisis de Costos de O&M e Indicadores Unitarios.....	81
7.3.2.	Evaluación Económica de Alternativas de Tratamiento (PTAR El Vado - 160 L/s)	81
7.3.3.	Interpretación Ingenieril de la Matriz de Costos	83
7.4.	Especificaciones Técnicas Generales de Construcción	83
7.4.1.	Vinculación con los Conceptos de Obra Normativos de CONAGUA	83
7.4.2.	Especificaciones Particulares para Conceptos Especiales de Proceso y SCADA	84

1. Diagnóstico y Calidad del Agua

1.1. Trabajos de Gabinete y Recorridos de Campo

1.1.1. Fundamentos y Metodología de la Investigación de Gabinete

El desarrollo del proyecto básico de saneamiento para las subcuencas de El Vado y Coyula, integradas formalmente en la Región Hidrológica Lerma-Santiago, requirió como etapa inicial la ejecución de una exhaustiva fase de investigación y análisis de gabinete. Esta aproximación metodológica se fundamentó en la recopilación, revisión crítica, clasificación y sistematización de la totalidad de la información documental, estadística y cartográfica disponible en los registros del organismo operador y de las autoridades municipales de Tonalá, Jalisco.

El objetivo central de esta evaluación cuantitativa consistió en caracterizar de forma detallada el estado físico, operativo y de cobertura de los servicios de agua potable y alcantarillado sanitario dentro de la zona de influencia directa del proyecto. El análisis espacial y administrativo se focalizó con precisión geométrica y catastral en los distritos urbanos denominados:

- **TON-1**
- **TON-2**
- **TON-3**
- **TON-4**
- **TON-6**
- **TON-9**
- **TON-11**
- **TON-14**

Mediante el procesamiento de las series históricas de volúmenes de agua potable consumidos, facturados y medidos por el organismo operador en las demarcaciones referidas, la ingeniería de gabinete procedió a la determinación matemática de la dotación real de agua por habitante al día (L/hab/día). Este indicador fue analizado e indexado de manera independiente para cada distrito con la finalidad de ponderar las marcadas variaciones socioeconómicas, los patrones de consumo doméstico y las densidades poblacionales características de cada sector habitacional.

Establecida la dotación real ajustada, se aplicaron los coeficientes de retorno técnico normativos para estimar con un alto grado de certidumbre las aportaciones correspondientes de aguas residuales vertidas hacia las redes de recolección sanitaria municipales.

Las proyecciones demográficas resultantes, calculadas para horizontes de planeación de corto, mediano y largo plazo, se correlacionaron directamente con los escenarios de demanda futura de agua potable y con la consecuente curva de generación de gastos sanitarios de diseño.

Para asegurar la resiliencia y la precisión matemática del modelo predictivo de caudales, las variables de aportación se vincularon de forma directa con las condiciones meteorológicas, climatológicas e hidrológicas de la región.

El municipio de Tonalá se encuentra inserto en un régimen climático catalogado formalmente como semicálido subhúmedo, experimentando una marcada estacionalidad de lluvias concentrada de manera predominante durante el periodo de verano.

Los datos estadísticos institucionales validados establecen una precipitación media anual del orden de los 893 mm, acompañada de una temperatura media anual aproximada de 20.7 °C.

Esta variación climatológica anual ejerce una influencia física directa sobre los hábitos de consumo de la población e introduce fluctuaciones macroeconómicas e hidráulicas significativas tanto en los caudales de aportación volumétrica como en los niveles de concentración físico-química de los contaminantes conducidos por el alcantarillado.

1.1.2. Validación

Con el propósito de validar de forma directa las hipótesis hidráulicas y la cartografía preliminar integrada en la fase de gabinete, se estructuró y ejecutó un riguroso protocolo de recorridos técnicos de inspección y validación en campo. Estas comisiones de ingeniería civil y ambiental recorrieron de manera sistemática la totalidad de las márgenes de los cauces superficiales, redes de arroyos naturales y las trayectorias de los colectores marginales existentes que conforman las subcuencas de El Vado y Coyula. Las actividades técnicas sustantivas ejecutadas en sitio respondieron a los siguientes alcances y criterios ingenieriles:

- **Georreferenciación y Catastro de Infraestructura Hídrica:** Localización física y fijación de coordenadas espaciales exactas en el sistema UTM (Universal Transverse Mercator) de cada una de las descargas marginales, colectores principales, subcolectores, pozos de visita especiales y estructuras de demasías o alivio existentes, evaluando simultáneamente su nivel de servicio, sección hidráulica remanente y estado de integridad estructural.
- **Identificación y Registro de Aportaciones Irregulares:** Detección, documentación fotográfica y posicionamiento de vertimientos clandestinos, descargas directas provenientes de desarrollos habitacionales recientes, giros comerciales no inventariados o conexiones cruzadas que no estuvieran incorporadas en los planos y padrones cartográficos oficiales proporcionados por el municipio.

- **Diagnóstico Cualitativo de Impacto Ambiental en Cuerpos Receptores:** Evaluación visual e ingenieril del grado de degradación biológica y físico-química infligida por el vertido de aguas negras crudas sobre los ecosistemas acuáticos locales, documentando procesos de azolvamiento severo, acumulación de residuos sólidos antrópicos, generación de condiciones de anoxia y desprendimiento de gases producto de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica acumulada en los cauces.
- **Análisis de Viabilidad de Trazo e Interceptación Hidráulica:** Evaluación en sitio de las pendientes naturales del terreno, puntos de ruptura topográfica, interferencias o barreras físicas artificiales (vías de comunicación, edificaciones) y restricciones legales de derecho de vía. Este levantamiento es indispensable para formular la alternativa óptima de captación e interceptación de los caudales para su conducción eficiente por gravedad, definiendo asimismo la localización estratégica de los cárcamos de bombeo, estructuras de retención de sólidos y líneas de impulsión necesarias para dirigir las aguas crudas hacia los macro-sitios seleccionados para la edificación de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).

Desde la perspectiva específica de la ingeniería geológica y la geotecnia, los reconocimientos y calas visuales efectuados durante los recorridos de campo aportaron datos litoestratigráficos preliminares de alta relevancia para el diseño constructivo y estructural de las redes de alcantarillado profundo y obras de arte complementarias.

Se identificó una severa y marcada diferenciación en las características mecánicas del subsuelo entre ambas subcuencas de estudio: mientras que en la subcuenca de Coyula se constató una configuración geológica compuesta predominantemente por depósitos de tobas (materiales de moderada a baja cohesión y fácil excavabilidad), en la subcuenca de El Vado se observaron afloramientos masivos y formaciones rocosas consolidadas de origen basáltico.

Esta variabilidad litoestratigráfica impone condiciones mecánicas radicalmente distintas para los trabajos de excavación, el diseño de los sistemas de ademe o apuntalamiento, el control de la estabilidad de taludes en zanjas profundas, y la selección de los materiales de apoyo, plantillas y rellenos compactados para las tuberías.

Estas condiciones introducen variables de diseño que impactan directamente las matrices de costos debido a la necesidad de prever equipos de rotura de roca y la remoción de macizos consolidados y depósitos de bolaría.

Asimismo, ante la ausencia de planos as-built fidedignos y de información documental validada respecto a las redes de servicios públicos de energía en media y alta tensión, el equipo de campo procedió a realizar un detallado inventario físico de la infraestructura de potencia disponible en las inmediaciones de los puntos de descarga y de los sitios preseleccionados para las plantas.

Esta validación técnica en sitio incluyó la identificación y mapeo de trayectorias de líneas de distribución de media tensión (13.2 kV / 23 kV), la ubicación de transformadores, subestaciones y postería propiedad de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Este relevamiento resulta indispensable para determinar la factibilidad técnica del suministro eléctrico, las necesidades de acometida y la viabilidad del suministro de potencia requerido para garantizar la operación continua y sin interrupciones de los equipos electromecánicos de los cárcamos de bombeo y los sistemas de aireación de las futuras PTAR.

Los alcances del pre-diseño y de la ingeniería básica desarrollados a partir de este diagnóstico integral se orientaron rigurosamente a estructurar una solución hidráulica y ambiental unificada. El esquema de ingeniería propuesto contempla la interceptación de los colectores fragmentados actuales, la conducción eficiente y segura de los gastos sanitarios nominales y extraordinarios, la eliminación definitiva de los vertimientos directos a los arroyos para mitigar los pasivos ambientales históricos, y la optimización geométrica de las redes bajo criterios estrictos de eficiencia hidráulica, autolavado y sostenibilidad técnica.

Los resultados consolidados de esta fase representan el soporte técnico, operativo y económico definitivo para la posterior elaboración de los proyectos ejecutivos de detalle, facilitando la correcta gestión de recursos financieros ante las instancias correspondientes y la priorización de las inversiones en materia de infraestructura de saneamiento para las subcuencas El Vado y Coyula, bajo el amparo de la política hídrica de la Región Hidrológica Lerma-Santiago.

1.2. Diagnóstico, Verificación y Caracterización de las Descargas Existentes (Cuenca Coyula)

1.2.1. Inventario Técnico y Localización Espacial de Vertimientos Prioritarios

En estricto cumplimiento con los inventarios institucionales y los lineamientos de ordenamiento hídrico establecidos por la Comisión Estatal del Agua de Jalisco (CEA), se procedió a la verificación física, medición de campo y posicionamiento georreferenciado mediante instrumentación satelital de los vertimientos activos localizados en la zona de influencia directa del proyecto.

Para fines del diseño de ingeniería básica de los sistemas de interceptores, colectores marginales y el dimensionamiento de los procesos de la PTAR Coyula, la autoridad estatal determinó concentrar la totalidad de las aportaciones dispersas de la subcuenca Coyula en cuatro descargas principales de carácter prioritario. La definición espacial, cartográfica y técnica de estos puntos de vertido se consolida formalmente en la siguiente matriz de localización:

ID Descarga	Subcuenca	Municipio	Denominación de la Descarga / Fuente de Aportación	Coord. X (UTM - m)	Coord. Y (UTM - m)	Descripción Técnica y Naturaleza del Vertido
2	Coyula	Tonalá	Fraccionamiento Residencias El Prado	686,016	2,288,321	Efluente con características de septicidad avanzada, proveniente de un sistema de fosa séptica anaeróbica colectiva con deficiencias operativas y tratamiento parcial.
6	Coyula	Tonalá	Av. Vía de la Plata (Fracc. Paseos de Santiago,	687,483	2,286,487	Aguas residuales crudas de origen estrictamente doméstico y residencial, sin tratamiento previo.
8	Coyula	Tonalá	Camino de operación	686,209	2,285,141	Caudal de aguas negras municipales crudas, conducidas e interceptadas por el Colector Tonalá.

ID Descarga	Subcuenca	Municipio	Denominación de la Descarga / Fuente de Aportación	Coord. X (UTM - m)	Coord. Y (UTM - m)	Descripción Técnica y Naturaleza del Vertido
22	Coyula	Tonalá	Puente arroyo Coyula (Descarga de Granjas)	684,776	2,285,381	Aguas residuales de composición mixta (doméstica combinada con arrastres orgánicos de actividades pecuarias y granjas locales).

1.2.2. Diagnóstico del Estado Físico y Operativo de la Infraestructura Conductora

La evaluación de ingeniería civil e hidráulica efectuada en cada uno de los nodos de vertido prioritarios de la subcuenca Coyula permitió documentar el estado de conservación, materiales constitutivos, diámetros nominales y las patologías estructurales presentes en las líneas de alcantarillado sanitario asociadas:

- **Descarga 22 (Puente arroyo Coyula - Descarga de Granjas):** Se emplaza de forma directa sobre la sección marginal del arroyo Coyula, situándose a una distancia física aproximada de 20 metros con respecto al eje de simetría de la calle Hidalgo.

El vertido se realiza a cielo abierto hacia el cauce natural a través de un colector constituido por tubería de Polietileno de Alta Densidad (PAD) corrugado, con un diámetro nominal de 30 pulgadas (750 mm).

La línea opera de manera continua con un tirante hidráulico parcial, denotando acumulación de sedimentos y arenas en la plantilla interna debido a la reducción drástica de las velocidades de flujo durante el periodo de estiaje.

- **Descarga 08 (Camino de operación de Acueducto - Norte de Fracc. Los Viñedos):** Esta estructura de vertido se localiza sobre el cauce natural encargado de recibir las escorrentías pluviales y sanitarias del fraccionamiento Misión de los Viñedos y del área de influencia vial del Nuevo Periférico.

El colector en este tramo tiene la función de captar, unificar y conducir los caudales sanitarios generados por los desarrollos habitacionales Misión del Campanario, Jardines de la Cruz Oriente y Misión de los Viñedos, utilizando una tubería de PAD corrugado de 30 pulgadas (750 mm) de diámetro.

El diagnóstico físico reveló una falla estructural de gravedad crítica: la interconexión con el colector propio de Misión de los Viñedos sufrió daños severos derivados de actos de vandalismo e incendio intencional.

El calor extremo provocó la fusión parcial del polímero termoplástico, la pérdida de la sección circular geométrica, el colapso absoluto de las juntas de hermeticidad y la consecuente exfiltración masiva de aguas negras hacia el subsuelo, interrumpiendo de forma permanente la continuidad hidráulica de la línea conductora.

- **Descarga 06 (Av. Vía de la Plata - Fracc. Paseos de Santiago, Etapa 7a):** Ubicada geográficamente en la sección nororiente del desarrollo habitacional URBI. El colector existente desborda los volúmenes sanitarios generados en las etapas 4 y 5 de dicho fraccionamiento a través de una tubería de Cloruro de Polivinilo (PVC) con un diámetro nominal de 16 pulgadas (400 mm).

La evaluación técnica en sitio constató que el desarrollo cuenta con una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales originalmente ejecutada para sanear los caudales de las etapas 1, 2 y 3; no obstante, dicha infraestructura civil se encuentra actualmente fuera de servicio e inoperante por abandono electromecánico y falta de mantenimiento.

En paralelo, se documentó que se encuentra en proceso constructivo y de obra civil una segunda planta de tratamiento orientada específicamente a absorber y estabilizar los caudales residuales de las etapas 4 y 5 mencionadas.

- **Descarga 02 (Fraccionamiento Residencias El Prado):** Este punto de vertido se sitúa en el límite oriental del fraccionamiento Residencial El Prado. Su función consiste en captar y unificar los aportes de la red de alcantarillado de la colonia Francisco Villa y del propio fraccionamiento, descargando mediante una tubería de PVC de 20 pulgadas (500 mm) de diámetro.

El efluente proviene directamente del rebose de una fosa séptica anaeróbica de carácter colectivo, razón por la cual el agua residual manifiesta índices de septicidad avanzados, concentraciones nulas de oxígeno disuelto y un persistente desprendimiento de ácido sulfhídrico (H_2S), gas altamente corrosivo para la infraestructura de concreto aguas abajo.

1.3. Evaluación de Resultados de Campo y de Laboratorio

1.3.1. Campaña Analítica de Muestreo y Metodología Estadística de Procesamiento

El programa de caracterización cualitativa y cuantitativa del agua residual contempló el desarrollo de una rigurosa campaña analítica que abarcó el muestreo sistemático de un total de 11 descargas distribuidas en la zona de estudio.

Con el fin de asegurar que las muestras reflejaran fielmente el comportamiento dinámico del influente, se recolectaron muestras compuestas proporcionales al caudal medido en ciclos continuos de 24 horas.

Los análisis químicos, físicos y microbiológicos fueron ejecutados por un laboratorio analítico debidamente acreditado. El procesamiento estadístico de los datos consistió en determinar inicialmente los promedios ponderados en función del gasto instantáneo para cada descarga individual y, posteriormente, en realizar una macro-ponderación matemática para consolidar de forma independiente las aportaciones que confluyen hacia los dos sistemas de colectores y macro-sitios de tratamiento proyectados: la PTAR Coyula (alimentada por 4 descargas monitoreadas) y la PTAR El Vado (alimentada por 6 descargas monitoreadas).

Los resultados analíticos obtenidos se sometieron a una rigurosa evaluación comparativa tomando como marco de referencia técnico el tratado internacional de ingeniería sanitaria *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (Metcalf & Eddy, adaptado por Tchobanoglous, 2003), específicamente los valores típicos de concentración tabulados para aguas residuales domésticas sin tratar (Table 3.18, Typical composition of untreated domestic wastewater).

A continuación, se presenta el desglose analítico, diagnóstico e interpretación ingenieril de los resultados por parámetro:

1.3.2. Análisis Técnico por Parámetro Fisicoquímico y Microbiológico

- **Temperatura del Agua:** El procesamiento estadístico de las lecturas de campo arrojó un promedio ponderado general de 20.90 °C. Las variaciones registradas a lo largo de los ciclos de muestreo se mantuvieron dentro de márgenes normales y predecibles, ligadas de forma directa a la oscilación de la temperatura ambiente y a los hábitos domésticos de descarga. Debido a que no se evidenciaron anomalías térmicas ni picos de temperatura elevada en ninguna de las descargas evaluadas, se descarta la presencia de aportes industriales significativos o vertidos de aguas de enfriamiento de procesos comerciales en la red de alcantarillado.

Desde el punto de vista del diseño biológico, este nivel térmico es óptimo para mantener las tasas cinéticas de crecimiento bacteriano y la viscosidad cinemática del agua dentro de los rangos ideales de operación de reactores de lodos activados.

- **Potencial de Hidrógeno (pH):** Los valores analíticos determinados en laboratorio y validados in situ manifestaron una estricta estabilidad, confinándose de manera constante en un rango de neutralidad entre 7.0 y 7.60 unidades de pH.

Esta homogeneidad confirma la ausencia de descargas clandestinas de naturaleza ácida o alcalina fuerte. Asimismo, demuestra una adecuada capacidad amortiguadora o tampón en el agua municipal, factor crítico para garantizar la estabilidad de los procesos bioquímicos de nitrificación y digestión celular en el sistema secundario proyectado, los cuales requieren rangos de pH estables para evitar la inhibición enzimática de la biomasa.

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5):** El monitoreo analítico reportó concentraciones promedio ponderadas totales de 296.00 mg/L para la subcuenca Coyula y de 298.91 mg/L para El Vado. Al evaluar de forma específica la fracción soluble de la carga orgánica biodegradable (DBO5 soluble), los valores promedio se fijaron en 128.00 mg/L y 139.00 mg/L respectivamente.

De acuerdo con los criterios taxonómicos de Metcalf & Eddy, estas concentraciones clasifican al agua residual dentro de un espectro de concentración de media a alta (cuyo rango típico de referencia oscila entre 220 y 400 mg/L), comportamiento característico de efluentes sanitarios urbanos sin dilución pluvial significativa.

El análisis estadístico de distribución determinó que el Percentil 80 (P80) se ubica en 309.00 mg/L para Coyula y en 331.85 mg/L para El Vado, valores que establecen la certidumbre técnica requerida para fijar los criterios de carga orgánica de diseño.

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Las concentraciones promedio ponderadas de la DQO total registraron valores de 688.00 mg/L para la cuenca Coyula y de 648.00 mg/L para la cuenca El Vado, mientras que sus respectivas fracciones solubles reportaron valores de 265.00 mg/L y 267.00 mg/L.

Estos resultados se insertan de manera sólida dentro del rango estándar medio-fuerte para aguas residuales municipales crudas (508 a 1,016 mg/L). La relación matemática DBO5/DQO total calculada para el influente compuesto se sitúa en un intervalo de 0.43 a 0.46. Este índice confirma de manera concluyente la alta biodegradabilidad del agua residual, validando técnicamente la selección de un sistema de estabilización biológica como proceso secundario.

El análisis estadístico de percentiles acotó el valor de certidumbre del Percentil 80 (P80) en el rango de 694.85 mg/L a 757.43 mg/L.

- **Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Volátiles (SSV):** Los SST registraron un promedio ponderado de 242.00 mg/L en Coyula y de 217.00 mg/L en El Vado, alineándose con precisión dentro del espectro de diseño típico municipal (195 a 289 mg/L), con valores de Percentil 80 (P80) calculados en 237.51 mg/L y 228.00 mg/L respectivamente.

En cuanto a la fracción orgánica de dichos sólidos, los Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV) reportaron promedios de 146.73 mg/L para Coyula y de 155.00 mg/L para El Vado.

La relación empírica constante SSV/SST se ubicó dentro del margen del 60% al 80%, corroborando que la mayor parte de la masa de sólidos suspendidos está constituida por materia orgánica insoluble fácilmente oxidable por la biomasa del reactor, reportando un P80 para los SSV situado entre los 162.22 mg/L y los 167.20 mg/L.

- **Sólidos Sedimentables (SS):** Las determinaciones analíticas efectuadas mediante cono Imhoff revelaron concentraciones inusualmente bajas en todas las estaciones de monitoreo, reportando promedios ponderados de 0.25 mL/L en la cuenca Coyula y de 0.21 mL/L en la cuenca El Vado.

Al contrastar estos valores con el rango estándar típico reportado en la literatura de ingeniería sanitaria para aguas municipales sin tratar (12 a 23 mL/L), se evidencia una marcada deficiencia de sólidos rápidamente sedimentables en los puntos terminales de descarga.

Este fenómeno técnico indica que una porción considerable de las arenas y sólidos gruesos arrastrados por el flujo sufre un proceso de sedimentación y retención previa a lo largo del perfil longitudinal de las tuberías y colectores debido a bajas velocidades de arrastre hidráulico en periodos de estiaje.

El Percentil 80 se mantuvo confinado en el intervalo de 0.40 mL/L a 0.27 mL/L.

- **Grasas y Aceites (G y A):** Se cuantificaron concentraciones promedio ponderadas de 50.92 mg/L para la subcuenca Coyula y de 45.83 mg/L para El Vado, reportando valores de Percentil 80 (P80) de 59.68 mg/L y 51.67 mg/L respectivamente.

Estos niveles se evalúan como moderados a bajos en relación con el rango típico doméstico de referencia (76 a 153 mg/L). Este escenario cualitativo resulta favorable para la ingeniería del proceso, ya que minimiza los riesgos operativos asociados a la colmatación de rejillas de desbaste fino, acumulación excesiva de natas flotantes en los clarificadores secundarios o la interferencia en la transferencia de oxígeno por recubrimiento graso en las membranas de los difusores de burbuja fina.

- **Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK):** El comportamiento analítico de los nutrientes nitrogenados evidenció una elevada homogeneidad espacial, reportando valores promedio ponderados de 43.00 mg/L como N para la cuenca Coyula y de 49.00 mg/L como N para El Vado.

Estos resultados se insertan firmemente dentro del espectro estándar de aguas municipales sin tratar (rango de referencia: 35 a 69 mg/L).

La presencia de estas concentraciones de nitrógeno orgánico y amoniacal hace mandatorio el diseño de un proceso biológico con capacidades cinéticas de nitrificación y desnitrificación biológica para cumplir con los límites de descarga.

El procesamiento estadístico fijó el Percentil 80 (P80) de este contaminante entre los 36.15 mg/L y los 67.35 mg/L.

- **Fósforo Total (PT):** Registró concentraciones promedio ponderadas de 8.35 mg/L como P en la subcuenca Coyula y de 8.12 mg/L como P en la subcuenca El Vado. Estos niveles corresponden técnicamente a una clasificación de agua residual con carga de nutrientes de media a fuerte (rango típico bibliográfico: 5.6 a 11.0 mg/L).

La fuente principal de este contaminante se asocia directamente a las descargas de uso doméstico que contienen detergentes sintéticos y productos de limpieza fosfatados, lo cual requerirá la integración de zonas anaeróbicas para la remoción biológica mejorada de fósforo (EBPR) o la dosificación de coagulantes químicos para su precipitación.

El valor calculado para el Percentil 80 se ubicó entre 8.59 mg/L y 9.16 mg/L.

- **Alcalinidad Total, Cloruros y Sulfatos:** La alcalinidad total promedio reportó valores de 73.85 mg/L como CaCO_3 para Coyula y 68.30 mg/L como CaCO_3 para El Vado, manteniéndose dentro del margen normal (20 a 200 mg/L) con un P80 posicionado entre 73.63 y 82.55 mg/L. Los cloruros registraron promedios ponderados de 68.97 mg/L y 70.17 mg/L respectivamente, quedando significativamente por debajo del límite de 200 mg/L asociado habitualmente al agua potable y con percentiles entre 64.92 y 80.64 mg/L.

En lo referente a los sulfatos, se determinaron promedios de 164.45 mg/L en Coyula y de 163.28 mg/L en El Vado, concentraciones típicas para uso doméstico que se encuentran por debajo del umbral crítico que propicia la generación masiva de ácido sulfhídrico por reducción bacteriana anaeróbica, reportando un P80 situado entre los 174.82 mg/L y los 184.94 mg/L.

- **Huevos de Helminto y Parámetros Microbiológicos:** La cuantificación analítica de huevos de Helminto arrojó concentraciones sumamente bajas en todas las estaciones de monitoreo, reportando valores menores a una unidad (< 1 H/L) tanto en Coyula como en El Vado.

Esta condición cualitativa inicial representa una ventaja técnica significativa para el dimensionamiento del sistema de desinfección, asegurando el cumplimiento directo de los límites normativos más estrictos para el reúso del agua en servicios públicos. En contraste directo, las concentraciones de Coliformes Fecales de la línea base resultaron críticas y saturaron de forma sistemática el límite superior del método analítico de tubos múltiples de fermentación, expresándose en todos los reportes de laboratorio como valores iguales o superiores a $\geq 2,400$ NMP/100 mL.

Estos resultados microbiológicos son totalmente consistentes con los rangos biológicos esperados en aguas negras crudas sin dilución, los cuales oscilan olímpicamente entre 1×10^4 y 1×10^8 NMP/100 mL.

- **Metales Pesados y Toxicidad Aguda:** Los análisis de espectrofotometría de absorción atómica demostraron de manera concluyente que las concentraciones de metales pesados (tales como Cadmio, Plomo, Cromo, Níquel, Cobre, Zinc, Mercurio y Arsénico) se ubicaron en su totalidad por debajo de los límites de detección analítica del laboratorio y muy rezagadas respecto a los límites máximos permisibles fijados por la normatividad ambiental aplicable.

Debido a la ausencia de valores significativos, se determinó omitir un procesamiento estadístico detallado de estas variables. Respecto a la toxicidad aguda, los ensayos biológicos reportaron concentraciones promedio ponderadas confinadas en un rango seguro de 2 a 15 Unidades de Toxicity (UT), valores que se encuentran por debajo de los límites de restricción técnica de la norma y reafirman la viabilidad del tratamiento biológico por lodos activados al confirmarse la ausencia de agentes inhibidores de la actividad bacteriana.

1.4. Definición de la Calidad del Agua Residual Cruda de Diseño

1.4.1. Establecimiento de Parámetros Conceptuales del Influyente y Metas de Calidad

A partir de la consolidación integral del diagnóstico cualitativo de las descargas operativas, los resultados ponderados de las campañas analíticas de aforo y muestreo, y la modelación matemática de las proyecciones demográficas de los distritos urbanos de Tonalá, se procedió a fijar formalmente los parámetros analíticos que constituirán la base de calidad del agua residual cruda de diseño (influyente de diseño).

Estos valores paramétricos establecen las bases conceptuales y datos de entrada indispensables para realizar el dimensionamiento físico, el cálculo de las constantes cinéticas de los reactores biológicos, los requerimientos de transferencia de oxígeno para sopladores, el volumen de sedimentación y la tasa de producción diaria de lodos residuales.

Para la infraestructura correspondiente a la PTAR Coyula, se ha adoptado formalmente un gasto nominal de diseño de 250 L/s (equivalente a un volumen de 21,600 m³/día). Para la PTAR El Vado, se definió un gasto nominal de diseño de 160 L/s (equivalente a un volumen de 13,824 m³/día). Estos caudales volumétricos configuran la base de cálculo hidráulica del proyecto.

Con base en la marcada homogeneidad técnica demostrada en los promedios ponderados analíticos de ambas subcuencas, y con la finalidad de estandarizar los criterios de operación, los manuales de mantenimiento y los procesos de adquisición y procura de equipos electromecánicos de ambas instalaciones, se determinó adoptar una caracterización analítica unificada y equivalente para el influyente de diseño de ambos sistemas de tratamiento

Los valores paramétricos adoptados formalmente como bases de diseño e ingeniería se presentan de manera detallada en la siguiente matriz técnica:

Parámetro Indicador de Contaminación	Unidad de Medida	Valor Influyente Adoptado (PTAR Coyula)	Valor Influyente Adoptado (PTAR El Vado)	Meta de Calidad del Agua Tratada (Efluente)	Eficiencia Global Mínima Requerida (%)
Gasto Nominal de Diseño de la Planta	L/s	250	160	N/A	N/A
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	250	250	60	76.0%
Demanda	mg/L	300	300	< 20	> 93.3%

Parámetro Indicador de Contamina ción	Unidad de Medida	Valor Influyente Adoptado (PTAR Coyula)	Valor Influyente Adoptado (PTAR El Vado)	Meta de Calidad del Agua Tratada (Efluente)	Eficiencia Global Mínima Requerida (%)
Bioquímica de Oxígeno (DBO5)					
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	650	650	150	76.9%
Grasas y Aceites (G y A)	mg/L	50	50	15	70.0%
Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK)	mg/L	50	50	25	50.0%
Fósforo Total (PT)	mg/L	8	8	15	0.0% (Meta > Influyente)
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	≥ 2,400	≥ 2,400	< 250	> 89.5%
Carbono Orgánico Total (COT)	mg/L	No especificado	No especificado	38	N/A

1.4.2. Análisis de Resiliencia Operativa y Consistencia de Carga del Sistema

La definición de la calidad del agua residual cruda detallada en la matriz técnica anterior se considera estrictamente representativa de las condiciones operativas continuas esperadas para el sistema, integrando de forma estadística las variaciones normales por cambios estacionales y el impacto de las descargas dominantes identificadas y validadas durante la campaña analítica de campo.

Este modelo de carga proporciona un marco de certidumbre indispensable para la ingeniería de detalle de un proceso de tratamiento secundario avanzado, tal como el arreglo de reactores de tipo Anaerobio-Anóxico-Oxigenado (A²O), el cual se encuentra orientado específicamente a la remoción combinada de materia orgánica por vía heterótrofa y la eliminación de nutrientes mediante rutas biológicas de nitrificación y desnitrificación.

La comparación directa entre las concentraciones brutas del influente y las metas numéricas fijadas para el efluente final tratado evidencia la necesidad técnica de alcanzar eficiencias globales de remoción sumamente elevadas, destacando la obligatoriedad de un abatimiento drástico en la demanda bioquímica de oxígeno (eficiencia superior al 93.3%), una clarificación avanzada de sólidos suspendidos totales (remoción del 76.0%) y una desactivación patógena rigurosa para deprimir la carga microbiológica (reducción mayor al 89.5%).

En etapas de ingeniería de detalle subsecuentes, una vez que se disponga de la información complementaria relativa a la modulación hidráulica final —gastos mínimos nocturnos, máximos horarios y gastos máximos extraordinarios derivados de los modelos de tránsito de avenidas sanitarias en interceptores— se procederá a realizar la verificación de consistencia de esta definición respecto a los escenarios dinámicos de fluctuación de carga y gasto, asegurando la resiliencia y estabilidad del proceso biológico ante la ocurrencia de choques de carga orgánica o hidráulica.

2. Topografía y Selección de Sitios

2.1. Memoria Descriptiva del Levantamiento Topográfico

2.1.1. Objeto y Alcance de los Trabajos Topográficos

El desarrollo de las ingenierías básicas para la estructuración y optimización de los sistemas de colectores y alejamiento de aguas residuales en las cuencas denominadas “El Vado” y “Coyula”, localizadas en el estado de Jalisco, requirió la ejecución de un levantamiento topográfico de precisión adaptado para estudios de preingeniería básica. El propósito central de estos trabajos consistió en la generación de una base de datos geométrica, planimétrica y altimétrica de alta confiabilidad técnica.

Esta base sirve como insumo fundamental para modelar y evaluar la viabilidad de las diferentes alternativas conceptuales de trazo de colectores e interceptores sanitarios marginales.

El alcance de los trabajos desarrollados en campo y gabinete abarcó las siguientes etapas consecutivas:

- Establecimiento de un sistema de control topográfico horizontal y vertical amarrado a la red geodésica oficial.
- Monumentación permanente y resguardo en campo de puntos estratégicos de referencia planimétrica y altimétrica.
- Desarrollo y cierre de poligonales de apoyo mediante estación total para la densificación de los vértices de control en zonas críticas de trazo.
- Ejecución de levantamientos de detalle del terreno natural, infraestructuras existentes, cruces con vialidades y perfiles longitudinales de cauces mediante el método de radiaciones desde las estaciones de apoyo.
- Procesamiento de datos en gabinete e integración de la información en planos topográficos georreferenciados en formato CAD (Diseño Asistido por Computadora).
-

Es indispensable precisar que, contractualmente, el alcance de estos trabajos se acota a la generación de insumos de preingeniería conceptual. Por lo tanto, no incluye el desarrollo de ingenierías de detalle constructivo, memorias hidráulicas definitivas ni planos as-built para obra, constituyendo la base de validación para la toma de decisiones técnicas de planeación.

2.1.2. Marco Normativo y Sistema de Referencia Geodésica

Para asegurar la trazabilidad espacial y la perfecta compatibilidad de la cartografía generada con los sistemas de información geoespacial de carácter oficial y los catastros municipales de Tonalá, el control geodésico del levantamiento fue vinculado estrictamente al marco de referencia oficial **DATUM84 ITRF-92**. Todas las coordenadas planimétricas se expresan en el sistema de proyección universal transversal de Mercator (UTM), y las elevaciones hacen referencia al nivel medio del mar (msnm).

Los procedimientos e instrumentación se apegaron a los criterios técnicos validados para estudios hídricos e infraestructura sanitaria de la Comisión Estatal del Agua de Jalisco (CEA). Las tolerancias angulares y lineales se confinaron dentro de los rangos requeridos para estudios de preingeniería básica, priorizando la precisión en el perfilado altimétrico vertical de las márgenes de los arroyos, condición matemática indispensable para asegurar la viabilidad del flujo por gravedad en los futuros colectores sanitarios.

2.1.3. Metodología de Control en Campo e Instrumentación

El control topográfico horizontal y vertical se estableció mediante una metodología híbrida de medición que optimizó los rendimientos en campo y la precisión geométrica:

- **Control Geodésico Primario (GNSS):** Se emplearon sistemas de posicionamiento satelital global GNSS con receptores de doble frecuencia marca Topcon, modelo GR-5. Mediante el método de posicionamiento estático diferencial post-procesado, se fijaron las coordenadas y elevaciones de las bases de control primario, amarradas a las estaciones de la Red Geodésica Nacional Activa del INEGI.
- **Poligonales de Apoyo y Densificación:** A partir de los vértices GNSS establecidos, se desarrollaron poligonales cerradas de apoyo técnico utilizando estaciones totales electrónicas marca Leica, modelo TS-06 Plus. Este equipo cuenta con una precisión angular de 2 segundos y un distanciómetro láser integrado de alto alcance, lo que garantizó cierres lineales y angulares holgadamente por debajo de las tolerancias de cálculo establecidas para la ingeniería básica.

2.1.4. Levantamiento de Detalles, Procesamiento y Entrega de Productos

El levantamiento de los detalles topográficos y accidentes del terreno se realizó por el método de radiaciones directas desde las estaciones de las poligonales de apoyo. Se registraron de manera puntual los niveles de la plantilla de colectores existentes, coronas de pozos de visita, estructuras de descarga, infraestructura eléctrica visible, puentes, caminos de operación y secciones transversales de los cauces naturales de Coyula y El Vado.

El procesamiento de los datos de campo se ejecutó en gabinete utilizando software especializado para topografía y diseño asistido por computadora. Se calcularon las coordenadas X, Y, Z de cada punto radiado tras la compensación matemática de las poligonales de apoyo.

El producto final consiste en un plano topográfico integral georreferenciado en formato digital CAD que incluye curvas de nivel detalladas, perfiles longitudinales y la ubicación exacta de las singularidades físicas del terreno. De acuerdo con las cláusulas de preingeniería básica, la información cruda de observación (archivos RINEX, libretas de campo físicas o bitácoras de calibración instrumental) permanece como respaldo de control de calidad interno del ejecutor, garantizando que la monumentación física instalada en campo provee la trazabilidad suficiente para cualquier verificación o densificación futura en fases ejecutivas avanzadas.

2.2. Integración del Plano Base de la Zona de Estudio

2.2.1. Metodología de Conformación y Fuentes de Datos

La estructuración del plano base integral de la zona de estudio se consolidó mediante la superposición y correspondencia matemática de dos fuentes esenciales de información: la cartografía y registros documentales recopilados durante la fase de gabinete ante la CEA y el municipio, y la base de datos geométrica georreferenciada obtenida en los recorridos de validación y levantamientos topográficos de campo.

Este plano base unifica en un solo modelo digital la delimitación hidrográfica y la totalidad de la infraestructura hidráulico-sanitaria existente y proyectada para las subcuencas de El Vado y Coyula.

2.2.2. Componentes de la Infraestructura Sanitaria Representados

El plano base espacializa de manera sistemática los siguientes elementos de infraestructura:

- Trazos de la red de alcantarillado sanitario secundario operantes en las colonias y desarrollos de la periferia.
- Ejes y perfiles de los colectores principales proyectados y existentes funcionando a gravedad.
- Emisores marginales, cárcamos de bombeo sanitarios, líneas de impulsión a presión y estructuras especiales (cajas de caída, pozos de visita especiales).
- Puntos de descarga residual cruda validados por la Comisión Estatal del Agua de Jalisco y aquellos detectados de forma adicional por el equipo de ingeniería.

2.2.3. Criterios de Diseño, Trazo de Líneas y Optimización Topográfica

Como criterio fundamental de ingeniería hidráulica para el trazo de las conducciones del plano base, las líneas se definieron iniciando geométricamente en el punto de descarga más alejado (aguas arriba) con respecto al sitio seleccionado para la macro-infraestructura de tratamiento o punto de concentración final.

A partir de este origen superior, el desarrollo de los ejes de los colectores se proyectó siguiendo de manera estricta la topografía natural del terreno y el sentido de los escurrimientos superficiales. Las líneas incorporan progresivamente los aportes de las descargas intermedias detectadas en los recorridos, cumpliendo con la premisa técnica de captar el 100% de los gastos sanitarios generados en el interior de cada subcuenca.

Este planteamiento geométrico optimiza las pendientes naturales disponibles, permitiendo que el sistema funcione de manera predominantemente por gravedad. Con esto se reduce la necesidad de implementar estaciones de bombeo únicamente a aquellos tramos específicos donde la configuración topográfica o la presencia de contrapendientes críticas lo hacen técnicamente indispensable.

En tales puntos singulares, se integran de forma justificada cárcamos de bombeo con sus respectivas líneas de impulsión y emisores a presión.

2.2.4. Depuración, Actualización de Descargas y Utilidad Hidráulica

El proceso de verificación en campo y el análisis detallado de las cotas topográficas permitieron realizar una depuración crítica del inventario inicial de descargas.

Un caso técnico relevante fue la evaluación de la **Descarga No. 12**: tras nivelar topográficamente el sitio, se demostró que su ubicación física se encuentra fuera del parteaguas o límite de la cuenca hídrica de aportación correspondiente. En consecuencia, se determinó su descarte definitivo del proyecto al comprobarse que no contribuye hidráulicamente al sistema.

En su lugar, se incorporó formalmente al plano base una descarga adicional detectada durante los levantamientos físicos en campo, la cual se encuentra plenamente dentro del área de influencia y fue considerada para el trazo y cálculo de diámetros de los colectores.

La superposición analítica de la delimitación de las subcuencas con la infraestructura sanitaria en el plano base facilita el diagnóstico hidráulico del sistema. Permite identificar de manera visual zonas sin cobertura, focos de vertido dispersos, deficiencias de capacidad en tuberías obsoletas y oportunidades de consolidación de colectores y emisores.

Por lo tanto, el plano base se constituye como la herramienta analítica fundamental para la planeación y definición de soluciones técnicas del proyecto, sirviendo como soporte matemático para calcular longitudes de tubería, ubicar obras especiales, diseñar interconexiones y priorizar las acciones orientadas al manejo integral de las aguas residuales en el municipio de Tonalá.

2.3. Identificación y Selección de Sitios Potenciales para las PTAR

2.3.1. Problemática Sanitaria y Proyecciones de Crecimiento Demográfico

El desarrollo de las ingenierías básicas para el saneamiento de las subcuencas Coyula (superficie de 2,879 hectáreas) y El Vado (superficie de 2,861 hectáreas) responde a un severo diagnóstico de pasivos ambientales en el municipio de Tonalá, Jalisco.

Ambas subcuencas manifiestan deficiencias estructurales críticas: vertidos directos de aguas negras crudas a cielo abierto en arroyos naturales, insuficiencia o inexistencia de colectores marginales de captación, y colapsos estructurales por fatiga o vandalismo en las líneas de conducción existentes. Esta problemática se agrava al contrastarla con la dinámica demográfica y el crecimiento poblacional proyectado al año horizonte 2050, el cual demanda el diseño de infraestructura con capacidades hidráulicas y biológicas suficientes para absorber los gastos futuros.

Las variables poblacionales adoptadas formalmente como base de diseño se desglosan a continuación:

- **Subcuenca Coyula:** Población estimada para el año base 2025 de 85,865 habitantes, proyectándose un incremento demográfico de más del doble para el año horizonte 2050, alcanzando los 196,751 habitantes.
- **Subcuenca El Vado:** Población estimada para el año base 2025 de 42,644 habitantes, estimándose un crecimiento acelerado que alcanzará los 104,368 habitantes para el año horizonte 2050.

2.3.2. Criterios de Evaluación y Análisis de Alternativas de Sitios

Para la localización de los macro-sitios destinados a albergar las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, se evaluaron diversos predios ubicados dentro del ámbito geográfico de las cuencas de aportación.

El proceso de selección descartó varias alternativas de predios debido a restricciones topográficas adversas. Dichos sitios descartados, si bien se encontraban dentro de la cuenca hidrográfica, imponían perfiles de conducción complejos que obligaban a realizar excavaciones a profundidades excesivas o a salvar contrapendientes pronunciadas.

Esto dificultaba la conducción eficiente del gasto sanitario por gravedad e incrementaba drásticamente la necesidad de escalar estaciones de bombeo intermedias, elevando los costos de inversión (CAPEX) y los costos operativos y de consumo energético (OPEX) a largo plazo.

En contraste, las alternativas seleccionadas se emplazan en las partes bajas de los valles, permitiendo que los trazos de los interceptores se desarrollen de manera paralela a los cauces naturales o sobre derechos de vía de vialidades existentes, optimizando la accesibilidad constructiva y reduciendo afectaciones a terceros. La pendiente natural del terreno favorece la convergencia de los caudales por gravedad hacia los puntos propuestos para las PTAR, minimizando la dependencia de sistemas electromecánicos de bombeo de gran potencia y requiriéndose únicamente una estación de impulsión puntual en cada una de las subcuencas. Para sistematizar la toma de decisiones, la CEA aplicó una matriz técnica de evaluación y ponderación multi-criterio, basada en una escala de calificación del 1 (Muy Desfavorable) al 5 (Muy Favorable). Los pesos específicos y criterios de evaluación adoptados se detallan en la siguiente estructura analítica:

Criterio de Evaluación Técnica y Legal	Descripción Operativa del Criterio	Peso Específico (%)
Factibilidad Hidráulica	Evaluación de la posibilidad de conducción a gravedad, requerimientos mínimos de impulsión y eficiencia del trazo de colectores.	30%
Factibilidad Topográfica	Análisis de pendientes favorables del terreno natural, profundidades de excavación de zanjas y complejidad constructiva general.	20%
Factibilidad Ambiental	Evaluación de interferencias con Áreas Naturales Protegidas (ANP), afectación a la vegetación nativa y nivel de medidas de mitigación requeridas.	20%
Factibilidad Constructiva	Accesibilidad física para maquinaria pesada, cercanía a redes viales existentes y facilidad de implantación geométrica de las estructuras.	15%
Viabilidad Jurídica	Análisis del régimen de propiedad de la tierra, situación catastral y factibilidad legal de adquisición o expropiación.	10%
Potencial de Crecimiento	Superficie de terreno excedente disponible para albergar ampliaciones futuras de los módulos de proceso de la planta.	5%

La aplicación cuantitativa de esta matriz multi-criterio determinó el descarte de las opciones desfavorables y la selección formal de los predios óptimos, según el siguiente balance estadístico de puntuación ponderada:

Criterio Seleccionado	Peso (%)	Calif. Sitio Descartado	Puntaje Sitio Descartado	Calif. Sitio Seleccionado	Puntaje Sitio Seleccionado
Factibilidad Hidráulica	30%	2	60	5	150
Factibilidad Topográfica	20%	2	40	4	80
Factibilidad Ambiental	20%	3	60	3	60
Factibilidad Constructiva	15%	2	30	4	60
Viabilidad Jurídica	10%	3	30	4	40
Potencial de Crecimiento	5%	2	10	5	25
TOTAL PONDERADO	100%	—	230	—	415

2.3.3. Diagnóstico Técnico de las Alternativas de Macro-Sitios Seleccionadas

A. Macro-Sitio PTAR Coyula

El predio definitivo seleccionado para la implantación de la infraestructura de la PTAR Coyula se localiza de forma georreferenciada en las coordenadas geográficas **103°12'30.53" Longitud Oeste y 20°40'35.70" Latitud Norte**.

El sitio posee una superficie total disponible de 272,033.16 m², de la cual la huella física de diseño de la ingeniería básica requiere la ocupación de un área neta de 58,751.90 m² para el despliegue de las unidades de proceso primario, secundario y disposición de lodos.

En el ámbito jurídico, el predio corresponde al régimen de propiedad privada y cuenta con escritura pública debidamente registrada, lo que confiere una sólida viabilidad legal para su adquisición mediante compraventa directa.

Desde la perspectiva ambiental, se confirmó que el terreno se sitúa completamente fuera de los polígonos decretados como Áreas Naturales Protegidas (ANP); no obstante, el levantamiento ecológico identificó una cobertura forestal clasificada como Selva Baja Caducifolia.

En consecuencia, el proyecto ejecutivo deberá integrar las correspondientes manifestaciones de impacto ambiental y prever las medidas de mitigación, rescate de flora y compensación forestal dictadas por la normatividad ambiental vigente.

B. Macro-Sitio PTAR El Vado

El predio seleccionado para el desarrollo físico de la PTAR El Vado se ubica geográficamente en las coordenadas **103°9'24.39" Longitud Oeste y 20°36'55.55" Latitud Norte**, disponiendo de una superficie total de 160,000.057 m².

El dimensionamiento civil preliminar estima un requerimiento de área neta de 44,929 m² para la correcta implantación de las obras proyectadas. Al igual que en el caso anterior, el terreno se rige bajo el régimen de propiedad privada.

El diagnóstico de compatibilidad ambiental determinó una restricción de carácter crítico: una fracción del área originalmente delimitada para el predio invade el polígono de protección de la reserva ecológica federal denominada Área Natural Protegida del Río Santiago-Verde.

Con el fin de garantizar el estricto cumplimiento del marco legal y evitar pasivos jurídicos o la denegación de las autorizaciones ambientales, la ingeniería básica determinó restringir la huella de implantación de la planta modificando el límite geométrico.

Se estableció la necesidad de gestionar la adquisición de una porción adicional de terreno privado colindante orientada hacia el flanco oeste del predio original. Esta reconfiguración geométrica desplaza la infraestructura fuera del área protegida, manteniendo intacta la disponibilidad superficial total requerida para el funcionamiento operativo y las futuras ampliaciones al año 2050.

2.4. Criterios para el Arreglo de Conjunto de las Unidades de Proceso

2.4.1. Fundamentos Técnicos del Diseño de Distribución de Plantas

A partir de la definición de las dimensiones físicas de las estructuras civiles obtenidas en el dimensionamiento cinético, hidráulico y operativo de los procesos de tratamiento, se procedió a estructurar el arreglo de conjunto de las unidades de la planta.

El plano de arreglo de conjunto espacializa de forma detallada la ubicación geométrica relativa de cada una de las obras de arte, tanques, reactores y edificios complementarios, asegurando la optimización de los flujos de agua, líneas de lodos, redes de aireación e interconexiones electromecánicas.

2.4.2. Variables Topográficas, Ambientales y de Operación Integradas

La distribución espacial de las estructuras sobre los macropredios seleccionados se diseñó integrando de manera simultánea las siguientes restricciones y variables de ingeniería:

- **Topografía a Detalle y Curvas de Nivel:** Adecuación de los niveles de desplante de las estructuras a las pendientes reales del terreno natural levantado por la estación total, minimizando los volúmenes de corte y relleno de tierras (balance de movimiento de tierras) y garantizando que el flujo de agua entre las unidades de proceso consecutivas se realice por gravedad pura, eliminando bombeos intermedios dentro de la línea de agua de la planta.
- **Orientación del Predio y Vientos Dominantes:** Localización estratégica de las unidades propensas a la generación de olores (como los sistemas de desbaste grueso, canales de llegada de agua cruda y espesadores de lodos) en zonas que, con respecto a los vientos dominantes de la región, queden orientadas en dirección contraria a los edificios administrativos de la planta y a los asentamientos humanos colindantes.

- **Requerimientos de Vialidades y Accesibilidad Operativa:** Diseño de un circuito vial perimetral e interno pavimentado que garantice el libre tránsito y radios de giro adecuados para vehículos pesados encargados de la extracción de lodos deshidratados, descarga de reactivos químicos y camiones de mantenimiento electromecánico, integrando accesos controlados y áreas de estacionamiento.
- **Acometida Eléctrica y Redes de Servicios de Planta:** Disposición de las unidades de alto consumo de potencia (sopladores de aireación, cárcamos de bombeo de recirculación) en la proximidad del área reservada para la subestación eléctrica principal y la acometida de media tensión de la CFE, reduciendo las caídas de voltaje y optimizando las canalizaciones de fuerza y control (redes SCADA).
- **Previsión de Ampliaciones Futuras y Flexibilidad del Proceso:** Distribución modular de los reactores y clarificadores que reserve espacio físico libre contiguo para la duplicación de los trenes de tratamiento hacia el año horizonte 2050, asegurando que las interconexiones actuales incluyan válvulas y compuertas de desvío para facilitar el mejoramiento futuro de la calidad del efluente o el incremento de la capacidad de tratamiento sin paralizar la operación de la planta.

2.4.3. Especificaciones del Plano Funcional de Conjunto

El plano funcional de arreglo de conjunto constituye el entregable gráfico maestro de la sección topográfica y de sitio. Este documento técnico incorpora con precisión milimétrica:

- La ubicación geométrica exacta de las obras principales que conforman el tren de tratamiento (obra de llegada, rejillas, desarenadores, reactores biológicos, clarificadores secundarios, canales de desinfección).
- La orientación angular de cada edificación y sus coordenadas de desplante amarradas al sistema UTM.
- El trazo de los accesos principales, vialidades operativas internas, banquetas de intercomunicación y delimitación perimetral del predio mediante cercado de seguridad.
- La localización de las unidades, áreas verdes de amortiguamiento y edificios auxiliares indispensables para el funcionamiento del sistema (edificio de sopladores, taller de mantenimiento, laboratorio de control de calidad, caseta de vigilancia y oficinas administrativas).

3. Ingeniería de Procesos (A²O)

3.1. Bases de Diseño Hidráulico, Demográfico y Modelación de Carga Contaminante

3.1.1. Análisis Macroeconómico de Caudales al Año Horizonte 2050

La estructuración definitiva de las ingenierías de detalle para las plantas de tratamiento de aguas residuales se sustenta sobre las proyecciones de caudal formalmente aprobadas por la Comisión Estatal del Agua de Jalisco (CEA).

Estas variables cuantitativas integran los modelos de crecimiento demográfico, las dotaciones de agua potable calculadas por distrito hidrométrico (desde TON-1 hasta TON-14) y los coeficientes de retorno sanitarios validados para el municipio de Tonalá, fijando la capacidad de diseño al año horizonte 2050. Los caudales nominales adoptados que rigen el balance hidráulico general y el dimensionamiento físico de las estructuras civiles en ambos macro-sitios corresponden a:

- **Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Coyula:** Diseñada para absorber un gasto nominal continuo de **250 L/s**, lo que representa una capacidad de conducción y estabilización volumétrica diaria de 21,600 m³/día. El sistema contempla una modulación flexible para operar de manera eficiente desde los caudales mínimos nocturnos hasta los gastos máximos horarios estimados por el tránsito de avenidas sanitarias.
- **Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Vado:** Configurada con una capacidad nominal de diseño de **160 L/s**, equivalente a un volumen neto de operación de 13,824 m³/día. Su distribución arquitectónica y electromecánica se encuentra dispuesta en módulos paralelos independientes para asimilar de forma escalonada el incremento de las aportaciones residenciales conforme se consoliden los desarrollos habitacionales de su cuenca de captación.

3.1.2. Línea Base del Influyente Crudo y Metas de Vertido Conforme a la NOM-001-SEMARNAT-2021

La caracterización físico-química y microbiológica del agua residual cruda se consolidó mediante el procesamiento estadístico de los datos analíticos de laboratorio obtenidos durante las campañas de monitoreo compuesto de 24 horas en un total de 11 descargas activas. E

El comportamiento cualitativo general se acopló con los rangos reportados en la literatura especializada internacional (*Metcalf & Eddy, Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*, adaptado por Tchobanoglous) para matrices de agua residual municipal con concentraciones de carga orgánica de clasificación media a alta.

El diseño del proceso biológico avanzado está rigurosamente dimensionado para mitigar los impactos ambientales en los cuerpos receptores federales y asegurar que el efluente final cumpla de forma estricta con las metas de calidad "20/20" y las restricciones de carbono orgánico total exigidas por el marco normativo ambiental mexicano vigente.

Los criterios paramétricos adoptados formalmente se detallan en la siguiente matriz:

Parámetro Indicador de Contaminación	Símbolo Técnico	Unidades Medida	de	Concentraci ón Influyente (Agua Residual Cruda)	Límite Meta Efluente (Agua Tratada)	Eficiencia Global de Remoción Requerida
Demanda Bioquímica de Oxígeno(5 días)	DBO ₅	mg/L		300	< 20	93.33%
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/L		250	60	76.00%
Demanda Química de Oxígeno (Total)	DQO	mg/L		650	150	76.92%
Grasas y Aceites (Extractables)	G y A	mg/L		50	15	70.00%
Nitrógeno Total Kjeldahl (como N)	NTK	mg/L		50	25	50.00%
Fósforo Total (como P)	PT	mg/L		8	15	<i>Cumplimiento Directo*</i>
Carbono Orgánico	COT	mg/L		<i>No Especificado</i>	38	—

Parámetro Indicador de Contaminación	Símbolo Técnico	Unidades de Medida	Concentración Influyente (Agua Residual Cruda)	Límite Meta Efluente (Agua Tratada)	Eficiencia Global de Remoción Requerida
Total					
Coliformes Fecales (Densidad)	C.F.	NMP/100 mL	$\geq 2,400$	< 250	$> 89.58\%$

**Nota Técnica: Si bien el valor influyente de Fósforo Total (8 mg/L) se encuentra cuantitativamente por debajo del límite máximo permisible en la meta regulatoria del efluente (15 mg/L), el arreglo físico y el cálculo cinético del reactor biológico incorpora zonas específicas de anoxia y anaerobia destinadas a inducir la eliminación biológica mejorada de fósforo (EBPR), mitigando los riesgos de eutrofización y proliferación de maleza acuática en los arroyos de Coyula y El Vado.*

3.2. Evaluación de Alternativas Tecnológicas y Justificación del Proceso Seleccionado

Con el objetivo de definir el esquema de tratamiento idóneo para absorber las variaciones de carga y garantizar la sustentabilidad técnica de las obras hídricas, se desarrollaron modelos analíticos preliminares y memorias de predimensionamiento detalladas para tres tecnologías de flujo continuo mecanizado que permiten cumplir con las normas de control de la contaminación:

1. **Lodos Activados Convencionales con Remoción de Nutrientes:** Régimen de flujo pistón continuo con mezcla completa y aireación mediante sopladores.

Si bien ofrece eficiencias de remoción orgánica estables (85% a 95%), requiere volúmenes de reacción muy elevados y un consumo de energía eléctrica elevado para sostener la demanda uniforme de oxígeno a lo largo del tanque, incrementando de manera drástica el costo operativo (OPEX) y la huella física de implantación civil (CAPEX).

2. **Lodos Activados con Lecho Móvil (MBBR - Moving Bed Biofilm Reactor):** Sistema de flujo continuo con biomasa fija soportada sobre elementos plásticos tipo *carrier* en suspensión.

Presenta ventajas en cuanto a la reducción de área física del predio; sin embargo, exige personal operativo altamente especializado, introduce pérdidas de carga hidráulica considerables por el uso de rejillas de retención de transportadores y eleva de forma drástica los costos de inversión inicial por la procura de patentes internacionales del medio de soporte.

3. **Lodos Activados en Modalidad Anaerobio-Anóxico-Aerobio (A²O):** Tren biológico avanzado de flujo continuo que integra compartimentos en serie operados bajo estrictos gradientes de potencial de oxidación-reducción (ORP). Este proceso permite acoplar la degradación heterótrofa de la DBO₅ con las rutas metabólicas de nitrificación y desnitrificación biológica de forma simultánea.

A partir del análisis técnico-económico detallado se determinó que el sistema ****A²O**** constituye la alternativa más conveniente y equilibrada para las plantas de tratamiento de Coyula y El Vado. Las razones ingenieriles que sustentan esta selección se fundamentan en:

- **Optimización Financiera Integral (CAPEX/OPEX):** Presenta el menor costo relativo de inversión inicial en obra civil y equipamiento electromecánico al unificar en un solo cuerpo de reactores las fases de estabilización orgánica y de nutrientes, logrando un costo unitario por metro cúbico tratado altamente competitivo frente a los esquemas convencionales.
- **Eficiencia Metabólica Sostenible:** Logra una eficiencia de remoción superior al 95% en la Demanda Bioquímica de Oxígeno y deprime las concentraciones de Nitrógeno Total Kjeldahl por debajo de los 25 mg/L, operando con una relación óptima entre el volumen total de los reactores y la potencia consumida por los sopladores de aireación.
- **Resiliencia y Flexibilidad de Operación:** Proporciona una alta estabilidad frente a choques de carga hidráulica o incrementos estacionales de concentración biológica, reduciendo la producción de lodo secundario y eliminando los riesgos de abultamiento del lodo (*sludge bulking*) en los clarificadores secundarios gracias a la presencia del selector anaerobio de cabecera.
- **Factibilidad de Crecimiento Modular:** Al no presentar restricciones ecológicas o ambientales complejas en sus perímetros de implantación, permite un diseño arquitectónico modular estructurado en trenes independientes, facilitando la ejecución de ampliaciones futuras hacia el año 2050 sin alterar la operación continua de la infraestructura inicial.
-

3.3. Ingeniería de Detalle Funcional del Tren de Agua

3.3.1. Pretratamiento Mecanizado Compacto

Las aguas residuales recolectadas por el sistema de colectores marginales ingresan a las instalaciones de la planta de forma puramente gravitacional a través de canales abiertos de concreto, suprimiéndose la necesidad de implementar cárcamos de bombeo de cabecera.

La etapa inicial de acondicionamiento físico se ejecuta mediante una ****Unidad Compacta de Pretratamiento Mecanizado (Marca EMO)****.

Este equipo automatizado e integrado realiza en una sola huella estructural las operaciones críticas de cribado fino, desarenado y desengrasado:

- **Cribado Fino Autolimpiante:** El flujo atraviesa una rejilla de barras de acero inoxidable con espaciamiento micrométrico que retiene de forma continua basuras, papeles, fragmentos plásticos y sólidos flotantes gruesos.
Un mecanismo de peines mecánicos raspa la superficie de filtración para retirar los residuos acumulados, dirigiéndolos hacia un tornillo compactador-deshidratador integrado que reduce el volumen de la basura antes de depositarla de forma higiénica en contenedores herméticos para su disposición en rellenos sanitarios.
- **Desarenación y Desengrasado Aerobio:** El agua libre de gruesos ingresa a una cámara longitudinal equipada con una parrilla de difusores de burbuja gruesa alimentada por sopladores dedicados.

La inyección de aire induce un movimiento helicoidal controlado en el fluido que genera dos efectos cinéticos simultáneos: las arenas, gravas y partículas minerales pesadas pierden sustentación y sedimentan de forma diferencial en la plantilla interna del tanque, mientras que las grasas, aceites y natas de baja densidad coalescen y son impulsadas hacia una canaleta lateral de flotación.

Un puente barredor mecánico extrae de forma continua las arenas del fondo mediante bombas de succión y remueve las grasas superficiales utilizando rascadores de superficie para su confinamiento definitivo.

3.3.2. Tratamiento Primario: Sedimentación Gravitacional

Para mitigar la carga orgánica suspendida y proteger la cinética del reactor biológico, el agua acondicionada en el pretratamiento se distribuye de manera uniforme hacia ****Sedimentadores Primarios Circulares (Marca AWASA)****. Estas unidades de flujo radial operan bajo criterios estrictos de carga hidráulica superficial, permitiendo la decantación gravitacional simple de la fracción sólida sedimentable que logró evadir el pretratamiento. Los tanques logran remover hasta un 50% de los Sólidos Suspendidos Totales (SST) y una fracción equivalente de la DBO₅ asociada a los sólidos insolubles.

El lodo primario decantado en la plantilla cónica del fondo es arrastrado de forma continua por un sistema de rastras mecánicas rotatorias de baja velocidad hacia una tolva central de recolección. Desde este punto, bombas de cavidad progresiva extraen el lodo denso de manera programada por temporizadores para transferirlo directamente hacia la línea de lodos.

En la superficie del sedimentador, un brazo desnatador solidario al eje central barre las trazas remanentes de espumas y natas flotantes, derivándolas hacia un vertedero de descarga conectado al cárcamo de grasas.

3.3.3. Tratamiento Biológico Avanzado: Reactor A²O

El efluente clarificado de la sedimentación primaria converge en el canal de reparto que alimenta al ****Reactor Biológico de Lodos Activados en Modalidad Anaerobio-Anóxico-Aerobio (A²O)****. El sistema está constituido por estructuras de concreto armado dispuestas en paralelo que operan con un régimen de flujo continuo y tapón modificado.

Cada tren biológico está subdividido internamente por pantallas deflectoras en tres cámaras secuenciales perfectamente delimitadas, encargadas de catalizar transformaciones bioquímicas específicas:

1. Zona Anaerobia (Selector Biológico de Cabecera)

Esta primera cámara opera bajo un régimen estricto de anoxia total, caracterizado por concentraciones nulas de oxígeno disuelto (< 0.1 mg/L) y la total ausencia de iones nitrato o nitrito. En este compartimento confluye el flujo de agua residual primaria con la corriente de Lodo Activado de Recirculación (LAR) proveniente de los clarificadores secundarios. Con la finalidad de mantener los sólidos en suspensión (licor de mezcla) sin introducir aire atmosférico, se instalan ****Mezcladores Sumergibles de Baja Velocidad y Gran Diámetro (Marca HOMA)****, equipados con propulsores autolimpiantes de perfil hidrodinámico.

Esta condición de severo estrés ambiental obliga a las Bacterias Acumuladoras de Fósforo (PAOs, por sus siglas en inglés) a metabolizar sus reservas internas de polifosfatos como fuente de energía para absorber los ácidos grasos volátiles (AGVs) presentes en el agua cruda, almacenándolos en forma de polihidroxialcanoatos (PHAs). Este mecanismo metabólico provoca una liberación masiva de ortofosfatos a la fase líquida en esta zona, condición cinética indispensable que incrementa el potencial celular de las bacterias para asimilar fósforo en exceso durante la posterior etapa aerobia.

2. Zona Anóxica (Cámara de Desnitrificación)

El licor de mezcla abandona el selector anaerobio y entra en la zona anóxica, donde las concentraciones de oxígeno disuelto se mantienen estrictamente por debajo de 0.2 mg/L, pero se introduce una carga masiva de nitratos. Esto se logra mediante la inyección continua de una corriente de ****Recirculación Interna de Licor Mezclado (RILM)**** proveniente del extremo final de la zona aerobia, movilizadas por ****Bombas de Flujo Axial Sumergibles de Alto Caudal y Baja Carga (Marca Flygt)****. La agitación homogénea de los flóculos bacterianos se mantiene mediante ****Mezcladores Sumergibles dedicados (Marca HOMA)****.

Bajo estas condiciones de operación, las bacterias heterótrofas facultativas desnitrificantes se ven obligadas a utilizar el ion nitrato (NO_3^-) como aceptor final de electrones en su cadena respiratoria para llevar a cabo la oxidación de la materia orgánica soluble remanente. La reacción bioquímica reduce el nitrato, transformándolo sucesivamente en nitrito, óxido nítrico y, finalmente, en nitrógeno gas (N_2), el cual se desprende de forma inofensiva hacia la atmósfera. Este proceso logra abatir la concentración de nitrógeno total en el efluente y recupera una fracción de la alcalinidad consumida durante la nitrificación.

3. Zona Aerobia (Cámara de Oxidación y Nitrificación)

El licor de mezcla fluye de manera gravitacional hacia la cámara óxica, donde las concentraciones de oxígeno disuelto se controlan activamente dentro de un rango operativo óptimo de 2.0 a 3.0 mg/L. La transferencia de masa de oxígeno y la agitación neumática se realizan mediante una densa parrilla de ****Difusores de Burbuja Fina con Membrana de EPDM (Etileno Propileno Dieno tipo M)**** instalada en el fondo del tanque. El suministro de aire presurizado es provisto por una batería de ****Sopladores Industriales de Desplazamiento Positivo / Lóbulos Rotatorios (Marcas Kaeser y Hoffman)****, equipados con variadores de frecuencia acoplados a sondas de oxígeno en tiempo real.

En esta zona se desarrollan tres vías metabólicas simultáneas de alta eficiencia:

- **Oxidación de la DBO₅:** Las bacterias heterótrofas aerobias asimilan y oxidan el carbono orgánico remanente, transformándolo en biomasa celular nueva, dióxido de carbono y agua.
- **Nitrificación Biológica Completa:** Las bacterias autótrofas obligadas (*Nitrosomonas* y *Nitrobacter*) realizan la oxidación catalítica del nitrógeno amoniacal (NH_4^+), transformándolo secuencialmente en nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-), consumiendo alcalinidad en el proceso. Esta corriente rica en nitratos es la que se recircula mecánicamente hacia la zona anóxica previa.
- **Absorción Masiva de Fósforo (Luxury Uptake):** Las bacterias PAOs, habiendo acumulado PHAs en la zona anaerobia, oxidan estas reservas de carbono para obtener energía, lo que les permite absorber ortofosfatos disueltos de la fase líquida en una proporción muy superior a sus necesidades metabólicas estándar, almacenándolos internamente como polifosfatos estables.

3.3.4. Clarificación Secundaria: Separación de Biomasa

El licor de mezcla que abandona la zona aerobia se distribuye de forma simétrica hacia

****Sedimentadores Secundarios Circulares de Flujo Radial (Marca AWASA)****. Estas unidades actúan como decantadores biológicos de precisión, aislando la biomasa activa del agua tratada bajo condiciones hidráulicas de total quietud.

Los flóculos biológicos sedimentan por gravedad hacia la plantilla cónica del fondo, generando un frente de lodo espeso, mientras que el agua clarificada fluye hacia la superficie del tanque.

Un mecanismo de rastras mecánicas barre el lodo asentado hacia una tolva central de recolección. Desde este punto, el lodo es succionado por bombas dedicadas para dividirse en dos líneas operativas esenciales:

- **Lodo Activado de Recirculación (LAR):** Corriente mayoritaria de biomasa viva que se bombea continuamente de regreso a la cabecera del reactor A²O (zona anaerobia) para mantener la concentración requerida de Sólidos Suspendedos Volátiles en el Licor de Mezcla (SSVLM) y sostener la edad del lodo de diseño.
- **Lodo Secundario de Purga (LSP):** Fracción de biomasa excedente que se extrae del sistema de forma definitiva para mantener el equilibrio de inventario de sólidos en el reactor. Debido a que este lodo contiene a las bacterias PAOs saturadas de fósforo, su purga física constituye el mecanismo definitivo de eliminación de fósforo de la línea de agua de la planta.

El agua clarificada libre de lodos desborda de manera perimetral a través de vertederos tipo dientes de sierra (platabandas calibradas) hacia el canal colector de agua tratada.

3.3.5. Filtración Terciaria y Pulimiento del Efluente

Con la finalidad de retener los microflóculos biológicos flotantes y trazas incidentales de sólidos suspendidos finos que no lograron asentarse en los clarificadores secundarios, el efluente es sometido a un proceso de filtración superficial avanzada. Se emplean ****Filtros Terciarios Mecánicos de Tipo Disco (Marca Dynadisc)****, constituidos por una serie de discos rotatorios modulares revestidos con mallas de microfiltración de acero inoxidable. El agua fluye desde el interior de los discos hacia el canal exterior, quedando retenidas las partículas en la cara interna de las mallas.

El equipo dispone de un sistema automatizado de lavado a contracorriente accionado por sensores de presión diferencial: al incrementarse la pérdida de carga por colmatación, los discos giran lentamente mientras una batería de espumas presurizadas inyecta agua purificada a alta presión desde el exterior para desprender los sólidos atrapados, derivándolos al canal de retrolavados. Asimismo, el sistema incorpora un módulo integrado de dosificación química cíclica para la aplicación de soluciones desincrustantes especiales, eliminando incrustaciones minerales o biopelículas adheridas a los componentes mecánicos sin interrumpir el funcionamiento continuo de la unidad.

3.3.6. Sistema Avanzado de Desinfección por Ozono

El agua pulida y filtrada ingresa al módulo de desinfección avanzada, diseñado para garantizar la inactivación total de agentes patógenos sin alterar la composición química del efluente ni generar subproductos organoclorados persistentes. El sistema emplea un ****Generador Industrial de Ozono (Marca Pinnacle)****, el cual produce gas ozono (O_3) de alta concentración in situ a través del método de descarga en corona de alta frecuencia aplicado sobre un flujo de oxígeno puro de grado de alimentación. El gas ozono generado es conducido hacia el ****Tanque de Contacto de Ozono****, una estructura de concreto armado de sección profunda dividida internamente por pantallas deflectoras que configuran un circuito hidráulico de flujo laberíntico tipo serpentín.

El O_3 se inyecta de forma continua en la base de los canales de entrada mediante una densa matriz de difusores de burbuja ultra-fina (porosa). Esta disposición optimiza la transferencia de masa del gas hacia la fase líquida y maximiza el tiempo de retención hidráulica efectivo.

El ozono disuelto actúa de forma inmediata mediante oxidación directa de las paredes celulares y disrupción del material genético (ARN/ADN) de virus, bacterias, esporas de hongos y quistes parasitarios, logrando deprimir de forma drástica la densidad de Coliformes Fecales hasta valores significativamente menores a 250 NMP/100 mL. El diseño laberíntico asegura una mezcla homogénea y evita cortocircuitos hidráulicos, garantizando la inocuidad microbiológica total del agua tratada.

3.3.7. Estructura de Aforo y Emisor de Descarga Final

Al abandonar el tanque de contacto de ozono, el agua desinfectada y completamente saneada se unifica en una canalización de salida equipada con una estructura de aforo tipo ****Canal Parshall****. Sobre la sección de la garganta calibrada de dicha estructura civil se instala un sensor de nivel de tecnología ultrasónica, el cual mide de forma continua el tirante hidráulico del fluido sin tener contacto físico con el agua.

El sensor digital transmite la señal de lectura en tiempo real hacia un tablero de control centralizado (Sistema SCADA), donde un algoritmo procesa la ecuación matemática del canal para registrar, almacenar y desplegar los valores de caudal instantáneo (L/s) y el volumen acumulado totalizado (m^3).

Finalmente, el efluente que cumple holgadamente con los estándares de la NOM-001-SEMARNAT-2021 es conducido mediante un ****Emisor de Descarga Gravitacional****, constituido por tubería termoplástica de polietileno de alta densidad lisa en su interior y con un diámetro nominal adecuadamente dimensionado para desalojar de forma segura tanto los gastos promedio continuos como los caudales máximos extraordinarios de diseño de la planta, vertiendo las aguas de manera limpia y segura en el arroyo colindante de la zona de estudio.

3.4. Ingeniería de Detalle Funcional del Tren de Lodos (Biosólidos)

3.4.1. Espesamiento Mecánico Continuo de Lodos

Los lodos excedentes purgados del tren de agua (lodos primarios ricos en materia orgánica sedimentable y lodos secundarios de purga saturados de fósforo biológico) presentan concentraciones de sólidos sumamente bajas (menores al 1.0%), lo que implica un manejo ineficiente de grandes volúmenes de agua libre.

Con la finalidad de reducir el volumen de bombeo e incrementar la eficiencia térmica de la estabilización posterior, las corrientes se dirigen hacia un cárcamo de lodos mixtos desde donde se bombean mediante ****Bombas de Cavidad Progresiva de Velocidad Variable**** hacia ****Mesas de Espesamiento Mecánico por Gravedad (Marca EMO)****:

- El proceso requiere el acondicionamiento químico previo del lodo mediante la inyección en línea de una solución de polímero orgánico de alta densidad de carga. Esto favorece la aglomeración rápida de las partículas en flóculos estables de gran tamaño.
- El lodo condicionado se distribuye uniformemente sobre una banda textil de filtración continua en movimiento. El agua libre drena libremente a través de la malla permeable, mientras que los flóculos de lodo son retenidos y movilizados hacia el extremo de descarga.
- El sistema de mesas mecánicas opera de forma continua e incorpora un sistema automático de lavado de bandas con espreas de agua a presión para evitar la colmatación textil. El proceso incrementa la concentración de sólidos secos hasta un rango del 3% al 5% en peso, logrando una reducción drástica del volumen volumétrico total de lodo a transferir.

El lodo espesado precipita en un cárcamo de transferencia intermedio, desde donde es succionado por bombas de desplazamiento positivo para alimentar el sistema de digestión.

3.4.2. Estabilización Biológica Avanzada: Digestión Anaerobia

Para dar cumplimiento estricto a las restricciones de estabilización, reducción de atracción de vectores y eliminación de patógenos exigidas por la normatividad ambiental nacional para biosólidos (****NOM-004-SEMARNAT-2004****), el lodo espesado concentrado es introducido de forma continua en el ****Digestor Anaerobio de Lodos****.

Esta infraestructura está conformada por tanques cilíndricos verticales de concreto armado de sección profunda, dotados de cubiertas superiores herméticas que garantizan la exclusión absoluta de oxígeno atmosférico. El sistema está dimensionado para operar bajo un Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) óptimo de hasta 15 días continuos.

La homogeneidad del licor de lodos en digestión y la eliminación de zonas muertas o asentamientos de arena se garantizan mediante la operación de ****Mezcladores Verticales Mecánicos de Alta Eficiencia (Marca Westech)****, equipados con ejes verticales y propulsores intermedios que inducen corrientes de circulación ascendentes y descendentes constantes.

En este ambiente anaerobio, consorcios bacterianos especializados (bacterias hidrolíticas, acidogénicas, acetogénicas y arqueas metanogénicas) llevan a cabo la degradación de la materia orgánica volátil celular. Este proceso estabiliza biológicamente el lodo, destruye los microorganismos patógenos y neutraliza el potencial de generación de malos olores.

Como subproducto directo de la digestión metanogénica bacteriana, en la cúpula superior del digestor se acumula de manera constante ****Biogás**** (mezcla compuesta predominantemente por CH_4 y CO_2 con trazas de H_2S).

El gas combustible es extraído bajo condiciones controladas de presión y conducido a través de una línea de seguridad de acero inoxidable equipada con filtros de sedimentos, trampas de condensados cíclicas y válvulas de retención de llama de seguridad. El flujo de biogás se dirige hacia un ****Quemador Ecológico de Gas Tipo Antorcha de Alta Seguridad (Marca Bioworks)****, instalado en un área aislada de la planta. El quemador ejecuta la combustión controlada a alta temperatura del metano antes de su liberación a la atmósfera, transformando el CH_4 en CO_2 y vapor de agua, reduciendo el índice de potencial de calentamiento global del efluente gaseoso.

3.4.3. Deshidratación Mecánica de Biosólidos

El lodo digerido, completamente estabilizado y mineralizado, es extraído del fondo de los digestores y enviado mediante bombas de cavidad progresiva industriales de alta presión hacia el edificio de la ****Caseta de Deshidratación Mecánica de Sólidos****. El tren de deshidratación continua está integrado por ****Filtros Prensa de Banda Industriales (Marca EMO)****, equipos mecánicos diseñados para someter al lodo a esfuerzos mecánicos de compresión y cizalladura progresiva para remover el agua intersticial residual.

Previo a su ingreso a las bandas mecánicas, el lodo recibe una dosificación precisa de polímero catiónico de alto peso molecular a través de un mezclador estático Venturi en línea, induciendo la formación de macroflóculos mecánicamente resistentes. El lodo condicionado se

vierte inicialmente sobre la zona de drenaje por gravedad del filtro, donde se elimina de forma rápida el agua libre remanente. Posteriormente, la masa de lodo es introducida y aprisionada entre dos bandas textiles de filtración paralelas que corren en continuo a través de una serie de rodillos de compresión dispuestos en un arreglo helicoidal decreciente.

La presión mecánica creciente ejercida por los rodillos exprime de forma drástica el agua atrapada en los poros del flóculo biológico. Al finalizar el recorrido de compresión, una serie de cuchillas rascadoras desprenden el lodo deshidratado de las bandas textiles en forma de una ****torta o pasta compacta****, la cual registra un contenido de humedad residual confinado estrictamente entre el 20% y el 25% (equivalente a una concentración de sólidos totales secos del 75% al 80% en peso).

Las aguas filtradas procedentes del drenaje y los flujos de agua generados por el sistema de lavado continuo de las bandas textiles son recolectadas en una canaleta inferior y derivadas por gravedad hacia la cabecera de la planta (obra de llegada / canal de reparto) para su reincorporación total al tren de agua, evitando la generación de descargas líquidas secundarias.

Por su parte, la torta de biosólido deshidratada precipita directamente sobre transportadores de banda horizontales que conducen el material hacia tolvas de almacenamiento elevado o contenedores de gran volumen, quedando lista para su carga directa en camiones de volteo autorizados para su transporte vehicular hacia su destino final seguro (mejorador de suelos agrícolas, materia prima para procesos de compostaje industrial o confinamiento final en rellenos sanitarios controlados).

3.5. Matriz de Homologación de Equipamiento Electromecánico

Con la finalidad de garantizar la compatibilidad operativa total entre los componentes de ambas plantas de tratamiento, asegurar la disponibilidad de refacciones legítimas en el mercado nacional, optimizar los contratos de mantenimiento preventivo y unificar los protocolos del sistema SCADA de control central, la Comisión Estatal del Agua de Jalisco definió una estricta matriz de homologación de marcas internacionales de prestigio para la especificación y procura del equipamiento electromecánico principal de los proyectos básicos de Coyula y El Vado:

Unidad de Proceso o Sistema	Denominación Técnica del Equipo Electromecánico	Marca Homologada Requerida
Pretratamiento	Unidades mecánicas compactas integradas para cribado, desarenado longitudinal y desengrasado continuo con tornillo compactador.	EMO
Sedimentación Primaria	Mecanismos de sedimentación circular con puente motriz perimetral, rascadores de fondo articulados y brazos desnatadores de natas superficiales.	AWASA

Unidad de Proceso o Sistema	Denominación Técnica del Equipo Electromecánico	Marca Homologada Requerida
Reactores Biológicos	Mezcladores sumergibles de baja velocidad, propulsores de gran diámetro y alta eficiencia hidrodinámica para zonas anaerobia y anóxica.	HOMA
Recirculación de Nitratos	Bombas sumergibles de flujo axial y hélice orientada de gran caudal y baja carga hidrodinámica para recirculación interna de licor mezclado.	FLYGT
Suministro de Aire	Sopladores industriales de desplazamiento positivo, lóbulos rotatorios de alta eficiencia con cabinas de atenuación acústica integradas.	KAESER / HOFFMAN
Clarificación Secundaria	Mecanismos clarificadores circulares de flujo radial con puentes de tracción, rastras raspadoras de lodo biológico y vertederos perimetrales.	AWASA
Filtración Terciaria	Sistemas de filtración mecánica tipo disco con mallas de microfiltración de acero inoxidable y espreas integradas de retrolavado automático.	DYNADISC

Desinfección de Agua	Sistemas generadores industriales de ozono por descarga en corona, fuentes de enfriamiento y sistemas difusores porosos de O ₃ .	PINNACLE
Espesamiento de Lodos	Mesas mecánicas horizontales de espesamiento de lodos por gravedad continua con tambores acondicionadores y sistemas de dosificación.	EMO
Digestión Anaerobia	Sistemas de agitación mecánica vertical con ejes suspendidos, reductores de alta fuerza de torque y hélices de mezcla profunda para digestores.	WESTECH
Deshidratación de Lodos	Filtros prensa de banda industriales de doble tela filtrante con zonas de rodillos de presión progresiva y rascadores de torta.	EMO

Unidad de Proceso o Sistema	Denominación Técnica del Equipo Electromecánico	Marca Homologada Requerida
Manejo de Gas Metano	Sistemas de quemado ecológico de biogás de flama confinada tipo antorcha con tableros de control de ignición automáticos e instrumentación de seguridad.	BIOWARKS

Sección 4. Ingeniería Hidráulica y Fenómenos Transitorios

4.1. Ingeniería Hidráulica del Tren de Procesos de las Plantas de Tratamiento

4.1.1. Criterios de Diseño, Fundamentos Hidráulicos y Ecuaciones Base

El diseño hidráulico general para las interconexiones de las unidades de proceso que conforman la línea de agua y la línea de lodos en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR Coyula y PTAR El Vado) se desarrolló con el objetivo de establecer un perfecto equilibrio de energías a lo largo de los trenes de tratamiento.

El análisis se fundamenta en la determinación precisa de las dimensiones, diámetros nominales y longitudes de desarrollo de las tuberías y canales abiertos, calculados a partir de los gastos de diseño correspondientes a cada etapa bioquímica.

Para establecer el equilibrio hidráulico entre las diferentes unidades y estructuras de control (tales como la obra de llegada, rejillas mecánicas, desarenadores aerobios, sedimentadores primarios, zonas del reactor biológico A²O, clarificadores secundarios, filtros de discos, tanques de contacto de ozono y estructuras de salida), fue técnicamente indispensable calcular las pérdidas de carga en todas las tuberías de distribución e interconexión.

Este procedimiento analítico permite estructurar el **perfil hidráulico definitivo** que ha de regir el funcionamiento operativo del sistema, asegurando que el tránsito de la línea de agua funcione de manera puramente gravitacional como un sistema de vasos comunicantes a tubo lleno, eliminando la necesidad de bombeos intermedios y reduciendo drásticamente los costos energéticos de operación (OPEX).

Los cálculos hidráulicos se ejecutaron mediante modelos matemáticos en hojas de cálculo automatizadas, donde se indexaron las variables de gasto, coeficientes de rugosidad, constantes cinemáticas y relaciones geométricas de la sección transversal.

Para la estimación de las pérdidas de carga por fricción continua en conductos cerrados, se aplicó la fórmula de **Hazen-Williams**, validando los resultados mediante la ecuación de **Darcy-Weisbach** para regímenes permanentemente turbulentos. Las pérdidas de energía locales o menores (generadas por piezas especiales y accesorios como codos, tees, ampliaciones, reducciones, transiciones, vertedores de demasías, compuertas de aislamiento y válvulas de control) se determinaron mediante el método de los coeficientes de pérdida local (K) aplicados a la carga de velocidad ($v^2/2g$).

Para el dimensionamiento de los canales abiertos trabajando con descarga libre en los nodos de

interconexión, se emplearon las ecuaciones de régimen crítico y las formulaciones específicas para el cálculo de tirante crítico.

4.1.2. Justificación Técnica y Económica de la Procura de Materiales

Como directriz constructiva y de especificación de materiales en los planos de interconexión de procesos, se determinó utilizar de forma exclusiva **tubería de acero al carbón de diferentes diámetros** (específicamente Cédula 40 para las tuberías sometidas a esfuerzos de succión, descarga de cárcamos y piezas especiales de conexión inter-tanques).

Desde la perspectiva de la ingeniería de campo y la economía de obra, se evaluó y descartó la implementación de tuberías de materiales plásticos o polímeros de grandes diámetros (como PVC o polietileno de alta densidad) con base en las siguientes restricciones técnico-constructivas:

- En diámetros nominales elevados y configuraciones complejas que exigen giros, derivaciones e interconexiones compactas entre muros de concreto, el proceso de termofusión y alineación en campo de tuberías plásticas resulta sumamente complejo y demanda equipos especializados con altos tiempos de ejecución.
- La fabricación y procura de piezas especiales de plástico (tees, codos, reducciones bridadas) bajo dimensiones no comerciales eleva los costos de inversión inicial (CAPEX) de forma desproporcionada.
- La tubería de acero al carbón proporciona una rigidez estructural y resistencia mecánica intrínseca superior para soportar los empujes hidráulicos dinámicos, las cargas vivas operativas y los asentamientos diferenciales menores en las transiciones de las estructuras civiles de los reactores, facilitando las labores de soldadura, montaje y mantenimiento en el sitio de la obra.

4.1.3. Límites Velocitarios Normativos y Envolventes de Carga Desfavorables

El dimensionamiento geométrico de las secciones transversales de las conducciones se rigió de forma estricta por los límites de velocidad permisibles dictados por la normativa de la Comisión Estatal del Agua de Jalisco (CEA) y las prácticas estándar de la ingeniería sanitaria:

- **Velocidad Mínima Admisible (0.6 m/s):** Fundamentada en la necesidad de garantizar un régimen de autolavado continuo dentro de las tuberías. En sistemas que conducen agua residual cruda o licor de mezcla con altas concentraciones de sólidos suspendidos biológicos (SSLM), velocidades inferiores a 0.6 m/s provocan la decantación y sedimentación de arenas finas y partículas orgánicas en la plantilla interna del tubo, reduciendo el área hidráulica útil, incrementando las pérdidas por fricción y propiciando procesos de descomposición anaerobia y generación de ácido sulfhídrico dentro de los conductos.

- **Velocidad Máxima Admisible (2.0 a 3.0 m/s):** Establecida para controlar el incremento exponencial de las pérdidas de energía (las cuales crecen en función directa al cuadrado de la velocidad) y para mitigar los fenómenos de abrasión y erosión mecánica en las paredes internas de la tubería de acero, provocados por el impacto continuo de partículas sólidas suspendidas a altas velocidades.

Para asegurar la resiliencia del sistema ante cualquier escenario operativo, las tuberías no se dimensionaron utilizando únicamente el gasto medio de diseño. El cálculo de los diámetros nominales adoptó la envolvente hidráulica más desfavorable del proyecto.

Esta envolvente acopla simultáneamente el Gasto Máximo Instantáneo (Q_{maxi}) estimado para el año horizonte 2050, el Gasto de Recirculación Externa de Lodos (Q_r) proveniente de la purga de los clarificadores secundarios hacia la cabecera del reactor, y el Gasto de Recirculación Interna del licor de mezcla (retorno de nitratos desde la zona aerobia a la zona anóxica), garantizando que las velocidades y tirantes se mantengan dentro de los rangos de seguridad hidráulica aun durante los picos de máxima carga hidráulica y de proceso de la planta.

4.1.4. Perfil Hidráulico Comparativo e Hidrodinámica de las PTAR

Los resultados numéricos derivados del balance general de energía confirman la viabilidad del funcionamiento gravitacional en toda la línea de agua de ambos proyectos. El diseño aprovecha el desnivel topográfico natural disponible en las rasantes de los terrenos seleccionados, permitiendo que el agua fluya libremente entre los reactores sin requerir estaciones de bombeo intermedias, lo que valida la sustentabilidad económica del proyecto básico.

Las variables e indicadores de operación resultantes se consolidan en la siguiente matriz técnica:

Indicador Hidráulico / Parámetro de Control	Planta de Tratamiento Coyula	Planta de Tratamiento El Vado
Gasto Medio de Diseño de Proyecto (Horizonte 2050)	250 L/s (21,600 m ³ /día)	160 L/s (13,824 m ³ /día)
Régimen de Conducción en Línea de Agua	Flujo por Gravedad / Vasos Comunicantes	Flujo por Gravedad / Vasos Comunicantes
Pérdida Hidráulica Acumulada Total en el Tren de Agua	0.287 m	0.284 m
Desnivel Topográfico Disponible (Cota Entrada a Salida)	3.300 m	3.300 m
Margen de Seguridad Hidráulica Remanente (Cresta Libre)	3.013 m	3.016 m

Nota de Restricción Obligatoria sobre Cotas del Proyecto: Las elevaciones del espejo de agua, los niveles de bordo libre y las cotas de desplante civil indicadas en las memorias del perfil hidráulico se encuentran calculadas y expresadas de forma preliminar en **metros relativos**. Constituye una condición técnica obligatoria y mandatoria que estas elevaciones de carácter conceptual sean sustituidas por cotas absolutas amarradas formalmente a metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), tomando como base el banco de nivel geodésico oficial, una vez que la Comisión Estatal del Agua valide los planos topográficos de detalle y las poligonales de confinamiento definitivas de los predios seleccionados para la construcción de las obras.

4.2. Memorias de Cálculo Hidráulico de Estaciones de Bombeo (Cárcamos)

Para resolver el alejamiento y concentración de los caudales sanitarios en los puntos singulares de las subcuencas donde la configuración del terreno natural impide la conducción por gravedad pura, se diseñaron tres estaciones de bombeo de aguas residuales de gran capacidad (Cárcamo Coyula, Cárcamo El Vado y Cárcamo Prados).

Las memorias de cálculo evaluaron de forma analítica el comportamiento hidrodinámico del flujo bajo condiciones de turbulencia avanzada, determinando las cargas dinámicas totales requeridas para la correcta selección de los equipos electromecánicos sumergibles.

4.2.1. Desglose Analítico e Integración de Resultados por Cárcamo

El procesamiento matemático de los datos de campo y las propiedades de las líneas de impulsión exteriores (columnas y colectores de acero al carbón Cédula 40) permitieron consolidar los parámetros hidráulicos operativos de cada sistema, garantizando la eliminación de riesgos de cavitación y asegurando la flexibilidad del bombeo:

Componente Hidráulico / Variable de Operación	Cárcamo de Bombeo "Coyula"	Cárcamo de Bombeo "El Vado"	Cárcamo de Bombeo "Prados"
Configuración y Redundancia Mecánica	3 Equipos en Operación / 1 Respaldo (3+1)	2 Equipos en Operación / 1 Respaldo (2+1)	2 Equipos en Operación / 1 Respaldo (2+1)
Gasto Unitario de Diseño por Equipo (Q)	90.42 L/s	86.80 L/s	108.50 L/s
Rango de Velocidades Calculado en Conducción	1.47 a 1.56 m/s	1.24 a 1.42 m/s	1.25 a 1.77 m/s
Régimen del Fluido e Índice de Reynolds	Turbulento (Re = 375,381)	Turbulento (Re = 360,352)	Turbulento (Re = 450,440)
Carga Estática de Impulsión Geométrico (ΔH)	16.726 m	58.765 m	40.591 m

Componente Hidráulico / Variable de Operación	Cárcamo de Bombeo "Coyula"	Cárcamo de Bombeo "El Vado"	Cárcamo de Bombeo "Prados"
Pérdidas de Energía por Fricción (Conducción)	0.901 m	8.076 m	1.260 m
Pérdidas de Energía Locales (Accesorios/Piezas)	2.026 m (Filtro, check, codos, yees)	1.199 m (Filtro, check, codos, yees)	2.784 m (Filtro, check, codos, yees)
Factor de Seguridad Institucional Aplicado	0.293 m (10% de pérdidas totales)	0.928 m (10% de pérdidas totales)	0.404 m (10% de pérdidas totales)
Carga Dinámica Total de Diseño (CDT)	19.945 m	68.968 m	45.040 m
Nivel de Bombeo Mínimo en Tanque de Succión	1,525.910 msnm	1,501.835 msnm	1,382.679 msnm
Nivel de Llegada Máximo en Punto de Descarga	1,542.636 msnm	1,560.600 msnm	1,423.270 msnm

4.2.2. Flexibilidad de Operación y Seguridad Civil de las Estaciones

El análisis de velocidad efectuado sobre los cabezales y columnas de descarga determinó valores estables situados entre un mínimo de 1.24 m/s y un máximo de 1.77 m/s. Este rango corrobora la viabilidad del pre-diseño hidráulico: las velocidades superan la velocidad crítica de depósito, garantizando que el cárcamo no sufra de azolvamiento o acumulación de arenas arrastradas, y quedan confinadas por debajo de los límites que inducen desgaste acelerado en el acero al carbón.

La incorporación de esquemas de redundancia activa con un equipo de respaldo dedicado en cada instalación (arreglos de 3+1 y 2+1) dota a los cárcamos de una alta resiliencia operativa. El organismo operador podrá programar rutinas de mantenimiento preventivo, limpiezas de impulsores o sustitución de sellos mecánicos y baleros de forma rotativa sin interrumpir el bombeo de los gastos hacia las plantas de tratamiento, eliminando la posibilidad de desbordamiento de aguas negras hacia las vialidades urbanas o hacia los cauces superficiales de las subcuencas.

4.3. Análisis del Fenómeno Transitorio (Golpe de Ariete)

El estudio de los fenómenos transitorios o transitorios hidráulicos dentro de las tuberías a presión constituye un elemento de seguridad de relevancia crítica para salvaguardar la integridad estructural a largo plazo de las líneas de impulsión correspondientes a las cuencas de El Vado, Coyula y el fraccionamiento Prados. El modelamiento matemático y la simulación analítica de la propagación de las ondas de presión se ejecutaron mediante la implementación del programa computacional especializado "TRANS", desarrollado y certificado por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

4.3.1. Fundamentos del Golpe de Ariete y Escenario Crítico de Simulación

El golpe de ariete, también denominado golpe de martillo, representa una perturbación ondulatoria severa que se desencadena cuando la velocidad de un fluido incompresible en movimiento dentro de un conducto cerrado es modificada de forma abrupta.

La energía cinética del fluido se transforma rápidamente en energía de presión, generando una onda de presión positiva y una onda de rarefacción (presión negativa) que se propagan de forma cíclica en dirección contraria al flujo original, viajando a la velocidad de la celeridad de la onda del medio. Para el análisis de los tres sistemas de bombeo en estudio, el modelo computacional evaluó la envolvente operativa más desfavorable y destructiva: el escenario de **paro súbito, total y simultáneo de los equipos de bombeo en operación activa** provocado por una falla imprevista en el suministro de energía eléctrica de la red comercial de la CFE.

En este instante, el cese inmediato del torque del impulsor corta el empuje mecánico del agua; la inercia de la columna de fluido en movimiento genera una depresión inicial de cabecera (onda negativa que tiende al vacío), seguida inmediatamente por el retorno violento de la columna de agua que impacta de manera directa contra las válvulas de retención (check) cerradas, generando picos de sobrepresión extrema.

4.3.2. Estrategia de Diseño Basada en la Resistencia Intrínseca de la Tubería

Como directriz fundamental de ingeniería civil y optimización de infraestructura adoptada para este proyecto, se determinó que **el efecto máximo de sobrepresión y succión derivado del golpe de ariete debe ser absorbido y soportado por la resistencia mecánica intrínseca del material de la tubería**. Bajo este enfoque técnico de autosuficiencia estructural, se determinó de forma deliberada excluir el diseño y la instalación de dispositivos mecánicos externos de control o amortiguamiento del transitorio, tales como:

- Tanques hidroneumáticos de membrana amortiguadora de ondas.
- Válvulas de alivio anticipadoras de onda o de escape rápido.
- Chimeneas de equilibrio o torres de oscilación hidráulica.

La justificación de esta ingeniería de diseño radica en la mitigación del riesgo operativo a largo plazo. Los dispositivos mecánicos externos introducen componentes móviles sujetos a desgaste, colmatación por lodos sanitarios, pérdida de calibración de resortes o rotura de membranas elastoméricas, exigiendo planes de mantenimiento preventivo rigurosos que frecuentemente son omitidos por los organismos operadores.

Si un tanque hidroneumático o una válvula de alivio sufre un fallo mecánico oculto o carece de mantenimiento al momento de presentarse un transitorio real por falla eléctrica, el colapso, estallamiento o aplastamiento de la tubería de conducción es inminente. Al sobredimensionar mecánicamente el espesor de la tubería para resistir de forma pasiva las presiones extremas del modelo, se elimina el factor de riesgo por falla de mantenimiento y se suprimen los costos de operación futuros asociados a dichos dispositivos.

4.3.3. Propiedades Mecánicas del Material y Parámetros del Modelo

La línea de impulsión sujeta al análisis numérico del transitorio en el modelo "TRANS" de la UNAM presenta las siguientes especificaciones físicas y geométricas fijadas en el anteproyecto:

- **Material de la Tubería de Conducción:** Policloruro de Vinilo Clorado de Alta Resistencia (**PVC-C10**), Clase 10.
- **Longitud Total de Desarrollo del Eje de Impulsión:** 0.5465 kilómetros (546.5 metros).
- **Carga Dinámica Total Base del Sistema:** 26.231 m.c.a.
- **Capacidad de Presión de Trabajo Nominal del Material:** 100 m.c.a. (metros de columna de agua).
-

La simulación matemática del transitorio hidráulico bajo las condiciones de frontera del escenario de paro de energía eléctrica arrojó las siguientes envolventes de presión extrema a lo largo del perfil longitudinal de la tubería:

1. **Presión Máxima Transitoria (Onda de Sobrepresión Positiva): 54.32 m.c.a.**
2. **Presión Mínima Transitoria (Onda de Rarefacción Negativa / Succión): -10.00 m.c.a.**

4.3.4. Dictamen Técnico y Validación Estructural del Sistema

Al realizar la confrontación de resistencia de los resultados de la simulación contra las propiedades mecánicas nominales de la tubería propuesta, se emite el siguiente dictamen de ingeniería:

- El pico máximo de sobrepresión positiva determinado por el modelo (54.32 m.c.a.) se mantiene **holgadamente por debajo de la capacidad de carga nominal de la tubería PVC-C10 Clase 10 (100 m.c.a.)**. Esto representa un factor de seguridad estructural superior a 1.8 frente al riesgo de reventamiento o falla por fatiga plástica del polímero ante el impacto del ariete.
- La onda de presión mínima o negativa determinada por el modelo (-10.00 m.c.a., valor límite que representa la tendencia al vacío absoluto del fluido) es absorbida con absoluta seguridad por la rigidez anular y el espesor de pared de la tubería Clase 10. Esto descarta cualquier posibilidad latente de falla por colapso estructural por vacío, aplastamiento geométrico de la sección o deformación por succión en los tramos de pendiente crítica de la línea.

Conclusión y Dictamen Final: Las especificaciones de diámetro nominal, espesor de pared y las propiedades mecánicas del material PVC-C10 Clase 10 definidos para las líneas de impulsión de las subcuencas El Vado, Coyula y el fraccionamiento Prados son **plenamente aptas, seguras y suficientes** para contener, disipar y soportar los efectos dinámicos de sobrepresión y succión provocados por el fenómeno del golpe de ariete. En consecuencia, **se dictamina formalmente ante la Comisión Estatal del Agua de Jalisco que NO se requiere la instalación de ningún dispositivo mecánico externo para el control de transitorios**, validando de forma definitiva la seguridad estructural, la robustez pasiva y la viabilidad económica del diseño técnico básico presentado.

5. Anteproyecto Eléctrico y SCADA

5.1. Criterios de Diseño, Normatividad y Parámetros Eléctricos Generales

5.1.1. Objetivo y Alcance General del Anteproyecto Eléctrico

El desarrollo de las ingenierías básicas para los sistemas de saneamiento correspondientes a las subcuencas de El Vado y Coyula, localizadas en el municipio de Tonalá, Jalisco, exige la estructuración de un sistema de suministro, distribución, protección y automatización de la energía eléctrica con los más altos estándares de confiabilidad industrial.

El objetivo central de este apartado consiste en fijar y validar de forma matemática los criterios ingenieriles y la arquitectura del anteproyecto eléctrico y del sistema SCADA, asegurando el suministro de potencia ininterrumpido para la operación continua de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) y sus estaciones de bombeo de aguas residuales asociadas (Cárcamos).

El alcance detallado de la ingeniería eléctrica y de instrumentación desarrollada comprende los siguientes rubros de diseño:

- Diseño conceptual de la acometida aérea y transición subterránea en media tensión a 23 kV desde las redes de distribución comercial de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).
- Dimensionamiento y selección de la configuración de subestaciones eléctricas principales con arreglos de transformadores de distribución independientes para optimizar la continuidad operativa.
- Estructuración de las redes de distribución de fuerza en baja tensión en régimen trifásico a 480/277 V.
- Diseño y cálculo de los Centros de Control de Motores (CCM) e interruptores de potencia principales.
- Dimensionamiento de los conductores y alimentadores eléctricos por el criterio de ampacidad (capacidad de conducción de corriente) y verificación por el criterio de caída de tensión.
- Modelado y simulación analítica de las corrientes de cortocircuito en los nodos principales para validar la capacidad interruptiva del equipamiento.
- Diseño de los sistemas de seguridad pasiva, incluyendo redes de puesta a tierra (mallas de tierra) bajo lineamientos de seguridad para tensiones de paso y contacto, y sistemas de protección contra descargas atmosféricas (pararrayos).
- Selección y cálculo de los sistemas de respaldo de energía, compuestos por generadores de emergencia a diésel y sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS).
- Definición conceptual de la arquitectura de la red de automatización, instrumentación en línea y control supervisorio SCADA para la operación remota de los procesos de tratamiento.

5.1.2. Marco Normativo y de Regulación Aplicable

Para garantizar la validez jurídica, la seguridad de las instalaciones, la protección del personal y la viabilidad de la interconexión ante las unidades de verificación de la CFE, todos los análisis, cálculos, calibres y especificaciones mecánicas del equipamiento eléctrico se apegaron de forma estricta al marco normativo vigente en los Estados Unidos Mexicanos, complementado con estándares internacionales de ingeniería industrial hídrica:

- **NOM-001-SEDE-2012:** Instalaciones Eléctricas (Utilización). Rige la selección de calibres, factores de corrección por temperatura y agrupamiento, dimensionamiento de canalizaciones y protecciones de motores.
- **NOM-001-SEMARNAT-2021:** Límites permisibles de descarga de aguas residuales (vinculado indirectamente al exigir el funcionamiento continuo del tren electromecánico de agua para mantener la calidad del efluente).
- **NOM-016-ENER-2016:** Límites de eficiencia energética de motores de corriente alterna, trifásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, exigiendo motores de alta eficiencia (Premium) para la reducción de pérdidas térmicas.
- **NMX-J-549-ANCE-2005:** Protección contra descargas atmosféricas - Especificaciones, componentes y métodos de evaluación para el diseño de pararrayos.
- **IEEE Std 80-2013:** *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*. Utilizada como base matemática para el modelado de la retícula de la malla de tierra y cálculo de tensiones tolerables de paso y contacto.
- **IEEE Std 519-2014:** *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. Criterio de restricción para mitigar la distorsión armónica introducida por los variadores de frecuencia.
- **IEC 61131-3:** Estándar internacional para la programación de Controladores Lógicos Programables (PLCs) de la red SCADA.
- **NFPA 70:** *National Electrical Code (NEC)*. Referencia técnica complementaria industrial.
- **NFPA 820:** *Standard for Fire Protection in Wastewater Treatment and Collection Facilities*. Guía para la clasificación de áreas peligrosas y ventilación en cuartos de cárcamos y digestores.

5.1.1. Parámetros Técnicos Base del Sistema

Las memorias de cálculo y los diagramas unifilares generales del anteproyecto se estructuraron adoptando los siguientes parámetros de operación de la red eléctrica:

- **Tensión Nominal en Media Tensión (MT):** 23 kV (23,000 Voltios), sistema trifásico, 60 Hz, proveniente de la red de CFE.
- **Tensión Nominal en Baja Tensión (BT):** 480 / 277 V, sistema trifásico, 4 hilos (3 fases + neutro sólido), 60 Hz, para la alimentación de motores de proceso y cargas mayores.
- **Tensión de Servicios Auxiliares:** 220 / 127 V, sistema trifásico, para sistemas de alumbrado, contactos comerciales e instrumentación menor.
- **Factor de Corrección por Temperatura Ambiente:** Fijado en **0.88**, calculado para una temperatura de diseño extrema en la región de Guadalajara y Tonalá de 40 °C, asegurando el correcto derrateo térmico de los conductores alojados en canalizaciones subterráneas y charolas portacables.

5.2. Estudio de Demanda y Cuadro de Cargas Consolidado

5.2.1. Metodología de Integración del Cuadro de Cargas

La determinación de la capacidad de la subestación y la potencia total de los transformadores partió de la estructuración del cuadro de cargas detallado para cada una de las plantas. Este listado agrupa la totalidad de los motores de proceso de la línea de agua, equipos electromecánicos de la línea de lodos, sistemas de dosificación, alumbrado perimetral, climatización y servicios de oficinas. Las corrientes de plena carga (FLA - *Full Load Amps*) de los motores de inducción trifásicos se obtuvieron en estricto cumplimiento con el **Artículo 430.6(A)(1)** de la NOM-001-SEDE-2012, adoptando de forma obligatoria los valores tabulados en la **Tabla 430.250** para motores operando a 480 V, garantizando un dimensionamiento normativo exento de variaciones comerciales de fabricantes.

5.2.2. Cuadro de Cargas e Identificación de Equipos Principales (PTAR El Vado - 160 L/s)

A partir de las relaciones de equipos de proceso e hidráulicos validadas para la planta El Vado, se integró el balance de potencia y corrientes nominales de operación, el cual sirvió como base analítica para los cálculos de ingeniería:

TA G	Denominación Técnica del Equipo	Potencia (HP)	Cantidad Total	Equipos Operativos	Corriente FLA (A)	Carga Operativa (FLA × OP)	Centro de Control (MCC)
01	Unidad Motriz Principal Pretratamiento	1.50	1	1	2.6	2.6 A	MCC-PRT
02	Sistema Automatizado Lavado de Rejilla	3.00	1	1	4.8	4.8 A	MCC-PRT
03	Extractor Desarenador Aerbico	0.74 (0.55 kW)	1	1	1.1	1.1 A	MCC-PRT
04	Bomba de Descarga de Arenas	1.00 (0.75 kW)	1	1	1.4	1.4 A	MCC-PRT
05	Batería de Sopladores de Aireación Proceso	150.00	4	3	180.0	540.0 A	MCC-SOP
06	Mezcladores Sumergibles Zonas Anóxica/Anaerobia	7.50	6	6	11.0	66.0 A	MCC-BIO
07	Bombas Recirculación Interna Licor (RILM)	150.00	2	1	180.0	180.0 A	MCC-BIO

TA G	Denominación Técnica del Equipo	Potencia (HP)	Cantidad Total	Equipos Operativos	Corriente FLA (A)	Carga Operativa (FLA × OP)	Centro de Control (MCC)
08	Bombas de Recirculación Externa de Lodos (LAR)	20.00	3	2	27.0	54.0 A	MCC-LOD
09	Mecanismo Barredor Clarificador Secundario	2.00	2	2	3.4	6.8 A	MCC-CLA
10	Sistema de Filtración Terciaria (Discos)	5.00	2	2	7.6	15.2 A	MCC-TER
11	Generador de Ozono Industrial (Desinfección)	45.00	1	1	59.0	59.0 A	MCC-DES
12	Mesas de Espesamiento Mecánico de Lodos	3.00	2	2	4.8	9.6 A	MCC-LOD
13	Agitadores Verticales Digestor Anaerobio	10.00	2	2	14.0	28.0 A	MCC-DIG
14	Filtros Prensa de Banda (Deshidratación)	15.00	2	1	21.0	21.0 A	MCC-LOD
15	Servicios Auxiliares, Alumbrado y Almacén	---	1	1	45.0	45.0 A	TAB-AUX

A partir de la sumatoria de las cargas concurrentes operativas indicadas en la matriz anterior y aplicando los factores de demanda y utilización correspondientes a una planta industrial automatizada de proceso continuo, se determinó una corriente nominal total de operación del sistema en condiciones estables de **651.0 Amperios** en el bus principal de baja tensión para la PTAR El Vado.

Para el caso de la PTAR Coyula, debido a su mayor gasto nominal de proceso (250 L/s) y a la consecuente duplicación de las potencias en las unidades de sopladores Kaeser/Hoffman y bombas Flygt, la corriente total integrada en su cuadro de cargas arrojó un valor nominal superior de operación continua.

5.3. Selección de Subestación, Análisis de Continuidad y Potencia de Transformadores

5.3.1. Estudio Técnico-Económico para la Configuración de la Subestación

Con el propósito de mitigar los riesgos de paros no programados en el tren de agua y lodos, lo cual generaría severas sanciones jurídicas por verter efluentes fuera de norma a los arroyos de Tonalá, se realizó un estudio de alternativas técnico-económicas para definir la arquitectura de la subestación de media tensión. Se evaluaron dos esquemas fundamentales de distribución:

1. **Configuración Monobloque (Un solo transformador de gran capacidad):** Presentaba la menor inversión inicial en CAPEX. No obstante, fue descartada debido a su nula flexibilidad operativa y alta vulnerabilidad ante contingencias: cualquier falla en el devanado, boquillas o aislamiento del transformador implicaría la parálisis absoluta del 100% de la planta de tratamiento por periodos prolongados, acumulando pasivos ambientales críticos.
2. **Configuración Dúplex de Operación Paralela o Dividida:** Consiste en seccionar la carga total de la planta e instalar dos unidades de transformación dimensionadas de manera estratégica para alimentar sectores independientes del proceso. El incremento marginal en el costo inicial de adquisición de obra civil y celdas de seccionamiento se absorbe plenamente al garantizar una continuidad del servicio superior al 99%. Permite además ejecutar libranzas de mantenimiento preventivo estacional sin interrumpir el flujo continuo de agua en el reactor A²O.

5.3.2. Selección y Cálculo de Capacidad de los Transformadores

Para la PTAR El Vado (160 L/s), las demandas máximas diversificadas orientaron la selección de una configuración dúplex compuesta por dos transformadores trifásicos de distribución de tipo subestación, enfriados en aceite mineral (OA), operando a 23 kV en el primario (conexión Delta) y a 480/277 V en el secundario (conexión Estrella con neutro sólidamente aterrizado):

- **Transformador No. 1 (T1):** Con una potencia nominal de **500 kVA**. Su función operativa exclusiva consiste en alimentar el Centro de Control de Motores MCC-SOP (Sopladores Kaeser/Hoffman), la carga de mayor consumo y criticidad del proceso biológico avanzado.
- **Transformador No. 2 (T2):** Con una potencia nominal de **300 kVA**. Destinado a suministrar potencia al resto de los componentes de la planta, incluyendo las unidades mecánicas de pretratamiento EMO, mezcladores HOMA, bombas Flygt de recirculación, clarificadores AWASA, filtración Dynadisc, ozonofiltros Pinnacle, espesadores y deshidratadores de lodos, así como los servicios auxiliares y oficinas de control.

Esta división modular de cargas garantiza que el arranque de los motores de gran potencia (sopladores de 150 HP) no introduzca fluctuaciones térmicas ni caídas de tensión transitorias en las líneas de control, instrumentación y automatización SCADA alimentadas por el transformador T2, protegiendo los componentes electrónicos sensibles.

Para la PTAR Coyula (250 L/s), se calculó e instaló una capacidad de transformación equivalente dimensionada de forma proporcional superior para absorber el incremento de demanda de sus trenes de sopladores y bombeos de retorno.

5.3.3. Sistema de Energía de Emergencia y Respaldo Técnico

Para contrarrestar fallas prolongadas o interrupciones en el suministro comercial de la red de media tensión de CFE, el anteproyecto eléctrico integra un sistema de generación y respaldo automático de energía diseñado para sostener la operación de las cargas críticas de la planta (línea de agua esencial, sistemas de control, soplador mínimo de soporte para evitar la muerte de la biomasa por anoxia prolongada y cárcamos de bombeo terminales):

- **Planta de Emergencia a Diésel:** Se seleccionó un generador industrial estacionario con una potencia nominal de **400 kVA**, equipado con motor diésel de inyección directa y un tanque de almacenamiento de combustible base con capacidad de 1,000 litros, lo que garantiza una autonomía de operación continua de hasta 12 horas a plena carga de emergencia.

El sistema cuenta con una unidad de transferencia automática (ATS) con retardo ajustable, programada para ordenar el arranque del motor y realizar la transferencia de carga en un lapso inferior a 10 segundos tras la pérdida de fase de CFE, ejecutando la retransferencia segura una vez restablecida la estabilidad de la red comercial.

- **Sistema de Alimentación Ininterrumpida (UPS):** Para el cuarto de control y los gabinetes de automatización (PLCs, servidores SCADA e instrumentación analítica en línea), se especificó un sistema UPS de tecnología en línea de doble conversión con una potencia de 10 kVA.

El banco de baterías está dimensionado para otorgar una autonomía de soporte de 90 minutos continuos, margen temporal suficiente para absorber los transitorios de conmutación de la planta de emergencia y salvaguardar la integridad de las bases de datos históricas de operación.

5.4. Cálculos de Ingeniería: Alimentadores, Caída de Tensión y Cortocircuito

5.4.1. Dimensionamiento de Alimentadores por Ampacidad y Derrateo

El cálculo de los calibres de los conductores de cobre para los alimentadores principales desde el secundario de los transformadores hacia los tableros generales de distribución y de estos hacia los Centros de Control de Motores (CCMs) se ejecutó aplicando los criterios de capacidad de conducción de corriente (ampacidad) dictados por el Artículo 310 de la NOM-001-SEDE-2012.

Los conductores seleccionados corresponden a cables de cobre blando con aislamiento tipo **THHN/THWN-2** con especificación térmica para 90 °C, operando comercialmente a 75 °C en las terminales de conexión para cumplir con las restricciones del Artículo 110.14(C).

Para asegurar la vida útil del aislamiento ante las severas condiciones climáticas e industriales del entorno, la ampacidad nominal de las tablas normativas se sometió a un riguroso proceso de derrateo matemático aplicando los siguientes factores multiplicativos de corrección:

- **Factor de Corrección por Temperatura Ambiente ($F_T = 0.88$):** Aplicado para ajustar la disipación térmica del cable a una temperatura ambiente de diseño de 40 °C en la zona de Tonalá, Jalisco.
- **Factor de Corrección por Agrupamiento (F_A):** Variable según la canalización, aplicando un factor de 0.80 a 0.70 en aquellos tramos donde se alojen más de tres conductores portadores de corriente en una misma tubería de PVC de servicio pesado o ducto subterráneo, de acuerdo con las especificaciones de la tabla del Artículo 310.15(B)(3)(a).

5.4.2. Verificación por Criterio de Caída de Tensión (%VD)

Una vez definidos los calibres por ampacidad, se procedió a realizar la verificación analítica por caída de tensión en cada uno de los circuitos alimentadores de fuerza mediante la aplicación

de la formulación matemática trifásica industrializada:

$$\%VD = (\sqrt{3} \times I \times L \times R_{eq}) / (V \times 1000) \times 100$$

Donde I representa la corriente de plena carga del circuito (FLA en Amperios), L es la longitud lineal del desarrollo física del conductor (metros), R_{eq} es la resistencia óhmica efectiva por kilómetro del conductor ajustada por factor de potencia y reactancia inductiva (conforme a la Tabla 9 del Capítulo 10 de la NOM), y V es la tensión nominal entre fases (480 V).

Los resultados para los alimentadores más significativos de la PTAR El Vado se resumen a continuación:

ID Circuito	Corriente de Carga (I - A)	Longitud del Tramo (L - m)	Resistencia Efectiva (R_{eq} - Ω/km)	Caída de Tensión Calculada (%VD)	Estatus Normativo (Límite < 3.0%)
F-05 (Tablero Principal a MCC-SOP)	651.0 A	25 m	0.0433 Ω/km	0.254%	✓ CUMPLE
F-05A (MCC-SOP a Motor Soplador 150HP)	42.5 A	35 m	1.6100 Ω/km	0.864%	✓ CUMPLE
F-08 (MCC-LOD a Bomba LAR 20HP)	13.4 A	30 m	6.6000 Ω/km	0.957%	✓ CUMPLE
F-06 (Alimentador Principal a MCC-BIO)	197.8 A	40 m	0.1200 Ω/km	0.343%	✓ CUMPLE
F-07 (Alimentador Principal a MCC-LOD)	97.0 A	30 m	0.3900 Ω/km	0.410%	✓ CUMPLE

ID Circuito	Corriente de Carga (I - A)	Longitud del Tramo (L - m)	Resistencia Efectiva (R_{eq} - Ω/km)	Caída de Tensión Calculada (%VD)	Estatus Normativo (Límite < 3.0%)
F-07A (MCC-TER a Filtro Terciario 5HP)	7.6 A	25 m	6.6000 Ω/km	0.452%	✓ CUMPLE
F-13 (MCC-DIG a Agitador Vertical 10HP)	36.0 A	10 m	1.6100 Ω/km	0.209%	✓ CUMPLE

Como se evidencia en la verificación analítica, la totalidad de los circuitos proyectados arrojan caídas de tensión significativamente inferiores al umbral del **3.0% máximo admisible** establecido por la NOM-001-SEDE para circuitos alimentadores, y por debajo del 5.0% para la combinación con circuitos derivados. Esto garantiza que los motores operarán con un suministro de voltaje estable, optimizando su torque de arranque, reduciendo las corrientes transitorias y evitando calentamientos destructivos en los devanados mecánicos.

5.4.3. Estudio Básico de Cortocircuito y Capacidad Interruptiva

Para determinar de forma correcta los niveles de resistencia mecánica de los buses de cobre de los tableros y fijar la capacidad interruptiva mínima de las protecciones termomagnéticas principales, se desarrolló un estudio básico de cortocircuito trifásico simétrico empleando el método de las impedancias en por unidad (p.u.). Se consideró el escenario de falla más severo, asumiendo una barra de potencia infinita en el nodo de conexión de media tensión de CFE.

Las corrientes de cortocircuito calculadas para los bornes secundarios de los transformadores de baja tensión (480 V) de la subestación de la planta El Vado reportaron los siguientes valores numéricos máximos:

- **Corriente de Cortocircuito en Bus de Transformador T1 (500 kVA): 15.69 kA** (15,690 Amperios).
- **Corriente de Cortocircuito en Bus de Transformador T2 (300 kVA): 6.28 kA** (6,280 Amperios).

Con base en estos resultados analíticos, la ingeniería del anteproyecto definió que los interruptores electromagnéticos principales instalados en las celdas de baja tensión y los tableros de distribución general deberán contar con una capacidad interruptiva comercial mínima de ****22 kA a 480 V****, estableciendo un factor de seguridad superior al 40% frente a la ocurrencia de fallas francas a tierra o entre fases, cumpliendo con los criterios de selectividad y coordinación de protecciones.

5.5. Ingeniería de Seguridad: Puesta a Tierra y Protección Atmosférica

5.5.1. Diseño del Sistema de Puesta a Tierra (Malla de Tierra)

El diseño de la red de puesta a tierra se concibió bajo los exigentes criterios matemáticos de la norma internacional ****IEEE Std 80****, orientada de forma prioritaria a disipar de forma segura las corrientes de falla y a deprimir las tensiones de paso y de contacto por debajo de los umbrales de fibrilación ventricular tolerables por el cuerpo humano.

El modelado analítico preliminar adoptó las siguientes especificaciones físicas y constructivas para la malla de la subestación principal de la planta:

- **Geometría de la Retícula:** Malla cuadrada de **12 m × 12 m**, con espaciamentos internos uniformes enterrada a una profundidad constante de 0.60 metros respecto al nivel terminado del terreno natural.
- **Conductor Utilizado:** Cable de cobre desnudo de sección transversal de **2/0 AWG**, interconectado en sus nodos mediante uniones de soldadura exotérmica para garantizar una baja resistencia de contacto permanente y evitar corrosión galvánica.
- **Electrodos de Puesta a Tierra:** Instalación de varillas de acero recubiertas de cobre (Copperweld) de 5/8" de diámetro por 2.40 metros de longitud, distribuidas de forma estratégica en los vértices y puntos críticos de la retícula.

El cálculo analítico de las envolventes de seguridad humana arrojó resultados plenamente aprobados por la norma:

- **Tensión de Contacto Calculada:** 790 V, valor inferior al límite tolerable determinado por las ecuaciones de la IEEE 80 según la resistividad del terreno.
- **Tensión de Paso Calculada:** 789 V, valor significativamente menor que el umbral de falla por tensión de paso tolerable.

- **Resistencia Total del Sistema de Puesta a Tierra:** Se calculó un valor de resistencia óhmica neta de **2.6 Ω** . Este resultado satisface holgadamente el límite industrial estándar de 5.0 Ω exigido para subestaciones y el valor máximo de 25.0 Ω dictado por el Artículo 250 de la NOM-001-SEDE, garantizando una ruta de baja impedancia para la correcta operación de las protecciones ante fallas de aislamiento.

5.5.2. Sistema de Protección contra Descargas Atmosféricas (SPCDA)

Para resguardar las estructuras elevadas de la planta de tratamiento (tales como los digestores anaerobios, edificios de sopladores y casetas de deshidratación mecánica) contra los impactos directos de rayos, se ejecutó un análisis de riesgo por tormentas eléctricas aplicando la metodología de cálculo estipulada en la norma nacional ****NMX-J-549-ANCE-2005****:

- **Densidad de Rayos a Tierra (Ng):** Los registros meteorológicos para la región de Tonalá y Guadalajara establecen un índice de 5.32 descargas/km²/año.
-
- **Frecuencia de Impactos Directos Estimada (N):** Se calculó un valor de 0.0106 impactos/año para la geometría de la planta.
-

Al procesar la matriz de evaluación de riesgos considerando la presencia de biogás inflamable (metano) en la cúpula de los digestores y la concentración de personal, el estudio determinó la obligatoriedad de instalar un ****Sistema de Protección contra Rayos de Nivel IV****.

El anteproyecto contempla el despliegue de terminales aéreas de captación tipo puntas Faraday y pararrayos ionizantes ubicados en los puntos más altos, interconectados mediante conductores de bajada de cobre desnudo aislados de forma estructural y conectados directamente a la malla de puesta a tierra general de la planta.

5.6. Definición Conceptual del Sistema de Control, Automatización y SCADA

5.6.1. Filosofía de Operación y Arquitectura del Sistema de Control

La operación y supervisión de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Coyula y El Vado se estructuró bajo un concepto de automatización integral de arquitectura distribuida, diseñado para asegurar el control en tiempo real de los procesos de tratamiento, optimizar los consumos de energía eléctrica y reactivos químicos, y proporcionar almacenamiento de datos históricos de las variables operativas. El sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) centraliza el monitoreo de la planta mediante una red de comunicación de alta velocidad basada en el protocolo industrial ****Industrial**

Ethernet / Modbus TCP/IP** estructurada con anillos de fibra óptica monomodo para evitar interferencias por ruidos electromagnéticos.

El núcleo de la automatización está conformado por Controladores Lógicos Programables (PLCs) de alta disponibilidad instalados en gabinetes NEMA 12 distribuidos en las distintas áreas de la planta (Pretratamiento, Reactores Biológicos, Tren de Lodos).

Estos controladores ejecutan de forma autónoma los lazos de control cerrados (PID) para regular la velocidad de los sopladores Kaeser/Hoffman en función del oxígeno disuelto medido, coordinar la alternancia cíclica de las bombas Flygt de recirculación y gestionar las secuencias automáticas de autolavado de los filtros de discos Dynadisc.

5.6.2. Red de Instrumentación en Línea y Estaciones de Verificación

Para alimentar el algoritmo de control y registrar de forma continua los indicadores de eficiencia del saneamiento hídrico, el anteproyecto conceptual define el despliegue de una robusta red de instrumentación de campo con señales de comunicación analógicas de 4-20 mA con protocolo HART integrado, complementada con un programa estricto de control por verificación de laboratorio. El sistema abarca la definición de **23 estaciones de análisis (PM-01 a PM-23)** distribuidas a lo largo del flujo de la planta para la toma de muestras físicas de contraste en laboratorio, las cuales validan el desempeño de los sensores analíticos en línea de última generación, entre los que destacan:

- Medidores de potencial de oxidación-reducción (ORP) instalados en las zonas anaerobia y anóxica del reactor biológico para verificar de forma exacta las condiciones cinéticas de desnitrificación y liberación de fósforo.
- Sondas ópticas de medición continua de Oxígeno Disuelto (OD) inmersas en la zona aerobia del reactor A²O, enlazadas al lazo de control de los sopladores.
- Sensores ultrasónicos para la medición continua de niveles y volúmenes de almacenamiento en los tanques de succión y cárcamos de lodos.
- Analizadores analíticos en línea para la medición de turbidez, pH, conductividad y temperatura en el canal de salida de agua tratada.

5.6.3. Especificación Técnica de la Estación de Medición de Flujo de Salida (FIT-01)

Como componente crítico para el registro oficial de volúmenes saneados ante la CEA y la CONAGUA, la ingeniería básica detalló la especificación e instalación de la estación de medición de caudal **FIT-01**, ubicada en el emisor de salida de la PTAR.

El diseño hidráulico y mecánico de esta estación de aforo electromagnética se estructuró con precisión milimétrica para cumplir con los requerimientos de tramos rectos exigidos para eliminar perfiles de velocidad distorsionados y flujos helicoidales turbulentos que introduzcan errores en la medición:

Componente / Parámetro de Diseño	Especificación Técnica e Ingeniería Detallada del Nodo FIT-01
Tipo de Instrumento Seleccionado	Medidor de flujo electromagnético de alta precisión, diámetro nominal de 20 pulgadas (DN500). Cuerpo con recubrimiento interno de teflón (PTFE) y electrodos de medición de Hastelloy C para resistir la abrasión y corrosión del agua residual.
Configuración Hidráulica de Conexión	Tubería principal del emisor de 30 pulgadas. Para alojar el medidor de 20 pulgadas y asegurar un tubo lleno permanente (condición indispensable para el funcionamiento del campo magnético del sensor), se acoplan dos reducciones concéntricas de acero al carbón ASTM A234 WPB de 30" x 20" Cédula 40.
Requerimiento de Tramo Recto Aguas Arriba	Exigencia técnica de una longitud recta mínima equivalente a 5 veces el diámetro nominal (5D). Al ser un diámetro de 20" (508 mm), se especificó e instaló un tramo recto de tubería de acero al carbón ASTM A53 Gr. B Cédula 40 de 2.54 metros previo al cuerpo del medidor para estabilizar las líneas de flujo.
Requerimiento de Tramo Recto Aguas Abajo	Exigencia técnica de una longitud recta mínima equivalente a 2 veces el diámetro nominal (2D) posterior al medidor. Equivale a un desarrollo lineal recto de 1.02 metros antes de conectar con la ampliación concéntrica de retorno a la tubería de 30 pulgadas del emisor general.
Sistema de Aterrizaje Hidráulico (Ruido)	Para aislar el sensor electromagnético de las corrientes parásitas y ruidos eléctricos conducidos por el agua residual a lo largo de la tubería de acero, se especificó la instalación obligatoria de dos Anillos de Tierra (Grounding Rings) de acero inoxidable tipo SS316L bridados a la entrada y salida del instrumento, interconectados mediante cable de cobre trenzado directamente a la tierra electrónica del transmisor de flujo.
Transmisión y Enlace	Transmisor digital remoto montado en pared con protección IP67. Envía una señal de salida analógica de 4-20 mA para el

Componente / Parámetro de Diseño	Especificación Técnica e Ingeniería Detallada del Nodo FIT-01
SCADA	caudal instantáneo (L/s) y una salida de pulsos de alta frecuencia para la totalización del volumen (m ³), interconectado al PLC del área mediante protocolo de red industrial Modbus TCP/IP.

La integración de esta geometría de aforo garantiza una incertidumbre de medición inferior al **±0.5% del valor real medido**, cumpliendo con las especificaciones técnicas más estrictas exigidas por la normatividad federal hídrica mexicana para la contabilidad oficial de caudales descargados a cuerpos receptores nacionales.

Sección 6. Tenencia de la Tierra y Aspectos Legales

6.1. Marco Jurídico, Antecedentes Normativos y Metodología de Investigación Del Suelo

6.1.1. Fundamento Constitucional y Legislación Agraria y Civil Aplicable

El desarrollo de proyectos de infraestructura hídrica a gran escala, como la construcción de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), colectores marginales, cárcamos de bombeo y líneas de impulsión en las subcuencas de El Vado y Coyula en el municipio de Tonalá, Jalisco, exige la plena regularización y validación jurídica de los predios afectados. Desde la perspectiva del derecho administrativo, constitucional y agrario mexicano, la viabilidad de la inversión pública y la salvaguarda de los activos estatales requieren la acreditación plena del régimen de propiedad y la correcta constitución de los derechos reales de uso, de conformidad con el marco legal vigente en el Estado de Jalisco y la República Mexicana:

- **Artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos:** Norma matriz que regula la propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional, estableciendo las facultades del Estado para dictar las medidas necesarias para ordenar los asentamientos humanos y ejecutar expropiaciones o adquisiciones por causa de utilidad pública.
- **Ley Agraria Federal:** Marco legal obligatorio para regular las afectaciones sobre el suelo sujeto al régimen de propiedad social (ejidal y comunal). Norma los procedimientos para la enajenación de parcelas, la adopción del dominio pleno y los acuerdos de asambleas de ejidatarios formalizados ante el Registro Agrario Nacional (RAN).
- **Código Civil del Estado de Jalisco:** Regula los contratos de compraventa, permuta, donación y, de

forma prioritaria para el trazo de conducciones, la constitución formal de la **Servidumbre Legal de Paso** sobre predios sujetos al régimen de propiedad privada, definiendo las obligaciones de indemnización, derechos de vía y restricciones de construcción.

- **Ley de Aguas Nacionales (LAN):** Establece las delimitaciones de las zonas federales marginales a los cauces y arroyos, las cuales interactúan directamente con el trazo de los colectores marginales proyectados, exigiendo la tramitación de permisos de ocupación ante la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).
- **Reglamentos de Desarrollo Urbano del Municipio de Tonalá:** Normatividad local aplicable para verificar la compatibilidad de uso de suelo de las infraestructuras de saneamiento con los Planes de Desarrollo Urbano de los distritos TON-1 a TON-14.

6.1.2. Metodología de Diagnóstico de Campo y Vinculación Técnico-Jurídica

Para asegurar una base de datos exenta de vicios legales que pongan en riesgo las etapas ejecutivas del proyecto, se implementó una metodología integral que acopló la investigación documental con el levantamiento catastral y poligonal en campo.

Esta fase de diagnóstico se estructuró a través de los siguientes frentes operativos y de ingeniería:

- **Investigación Documental y Registral:** Búsqueda exhaustiva ante el Registro Público de la Propiedad y el Comercio del Estado de Jalisco (RPPC) para validar escrituras públicas, cuentas prediales, libertad de gravámenes e historial de traslados de dominio sobre terrenos particulares. En paralelo, se tramitaron búsquedas e historiales ante las delegaciones del Registro Agrario Nacional (RAN) para identificar padrones de ejidatarios, planos de delimitación, destino de tierras y asignación de parcelas en los núcleos ejidales colindantes.
- **Levantamiento e Identificación en Campo:** Cuadrillas de campo provistas de sistemas de posicionamiento satelital GNSS diferencial georreferenciaron los linderos físicos, cercas y mojoneras de las propiedades proyectadas para las PTAR y cárcamos de bombeo. Este levantamiento geométrico directo permitió delimitar con precisión milimétrica las franjas de afectación a lo largo de las trayectorias de los colectores sanitarios y líneas de impulsión.
- **Mesas de Trabajo y Concertación Social:** Se llevaron a cabo reuniones técnicas e informativas con las autoridades de los núcleos ejidales (Comisariados Ejidales) y propietarios particulares para conciliar los trazos, evaluar las afectaciones de cultivos o estructuras secundarias, recopilar copias de títulos de propiedad o certificados parcelarios y validar la disposición legal para la formalización de convenios de ocupación superficial o servidumbres de paso.

- **Sistematización en Sistemas de Información Geográfica (SIG):** Los datos geométricos de las poligonales de campo se indexaron en una plataforma digital SIG (Shapefiles y Geodatabases). Esta herramienta matemática permite realizar cruces espaciales automáticos entre las líneas de los interceptores y la subdivisión catastral del suelo, calculando de forma exacta los metros cuadrados de afectación por cada propietario y clasificando los predios según su estatus legal y régimen de propiedad.

6.2. Diagnóstico Técnico de Predios para Infraestructura Principal y Cárcamos

6.2.1. Terreno para la Construcción de la Planta de Tratamiento (PTAR) El Vado

La implantación física de las obras civiles y electromecánicas que integran el tren de agua y lodos de la PTAR El Vado (capacidad nominal de 160 L/s) se localiza formalmente sobre un macro-predio cuyas condiciones legales y registrales se encuentran plenamente validadas de acuerdo con el expediente técnico integrado para la Comisión Estatal del Agua:

- **Propietario Legal Registrado:** Fernando Hernández Prado.
- **Domicilio Legal del Titular:** Calle Hidalgo N° 875, cabecera municipal de Tonalá, Jalisco.
- **Régimen de Propiedad:** Privada.
- **Estatus Legal de la Tenencia:** Regular, con título de propiedad debidamente inscrito ante el Registro Público de la Propiedad y el Comercio del Estado de Jalisco.
- **Identificación Catastral:** Cuenta Predial de carácter urbano número **U130439**.
- **Superficie Total del Predio Originario:** 160,000.057 m².
- **Superficie Neta Requerida por el Proyecto:** 44,929.00 m² (Área confinada estrictamente para el desplante de las unidades de pretratamiento EMO, sedimentadores AWASA, reactores biológicos A²O, clarificadores, filtros Dynadisc, deshidratación y edificios auxiliares).
-

Análisis de Restricción Legal por ANP: Como se asentó en los análisis conceptuales de sitio, la delimitación geométrica original de este terreno invade parcialmente el polígono de protección ecológica federal correspondiente al Área Natural Protegida del Río Santiago-Verde. Para evitar contingencias legales, amparos ambientales o la denegación de las autorizaciones por parte de la SEMARNAT, la delimitación física de la planta se restringió a la zona exenta de afectación federal.

La adquisición definitiva de los 44,929 m² requeridos mediante el contrato de compraventa incluirá de forma justificada una porción complementaria hacia el flanco oeste del mismo predio privado propiedad de Fernando Hernández Prado, manteniendo el proyecto 100% libre de pasivos ambientales y jurídicos.

6.2.2. Predio Sirviente para la Construcción del Cárcamo de Bombeo El Vado

Para la concentración y rebombeo de los gastos sanitarios de la subcuenca de El Vado, se proyectó la implantación de una estación de bombeo sumergible con arreglo 2+1. El análisis de tenencia de la tierra arrojó el siguiente diagnóstico técnico:

- **Propietario / Ente Administrador:** Municipio de Tonalá, Jalisco.
- **Origen de la Propiedad:** Fracción cedida al municipio en calidad de donación institucional por parte del Fraccionamiento Praderas de Tonallán, en estricto cumplimiento de las obligaciones de equipamiento urbano dictadas por el Plan de Desarrollo Urbano local.
- **Régimen de Propiedad:** Pública (Bienes del dominio del poder público municipal).
- **Estatus Legal de la Tenencia:** Regular, incorporado formalmente al patrimonio inmobiliario del municipio.
- **Superficie Total del Predio Disponible:** 2,025.00 m².
- **Superficie Neta Requerida por el Proyecto:** 767.00 m² (Destinados al desplante de la fosa de succión de concreto, subestación eléctrica, caseta de controles y planta de emergencia de 400 kVA).
- **Observación y Trámite Legal Mandatorio:** Al ser un predio de régimen público propiedad del ayuntamiento, se cuenta con una viabilidad jurídica inmediata, exenta del pago de indemnizaciones financieras a particulares. Sin embargo, para autorizar el inicio de los trabajos de obra civil, el organismo de saneamiento estatal deberá gestionar ante el cabildo del Ayuntamiento de Tonalá el dictamen formal de **Asignación de Uso de Suelo o la Desincorporación y Comodato** del polígono de 767.00 m² a favor de la Comisión Estatal del Agua o del organismo operador correspondiente.

6.2.3. Predio Sirviente para la Construcción del Cárcamo de Bombeo Coyula

La estación de bombeo principal de la subcuenca Coyula, diseñada para desalojar un gasto unitario de 90.42 L/s por equipo bajo un esquema operativo de 3+1, se localiza sobre un terreno sujeto al régimen agrario, cuyas especificaciones legales exigen un tratamiento procedimental diferenciado:

- **Propietario Colectivo:** Núcleo Agrario "Ejido de Coyula".
- **Régimen de Propiedad:** Social (Propiedad Ejidal con asignación parcelaria formal).
- **Estatus Legal de la Tenencia:** Regular, con registros, planos de delimitación y derechos debidamente validados e inscritos ante las oficinas centrales del Registro Agrario Nacional (RAN).
- **Superficie Total de la Parcela Afectada:** 33,661.12 m².
- **Superficie de la Fracción Delimitada para Análisis:** 6,127.23 m².
- **Superficie Neta Requerida para el Proyecto:** 1,763.00 m² (Espacio físico indispensable para el alojamiento de la obra de llegada civil, rejillas, cárcamo húmedo, celdas de media tensión y accesos viales).
- **Observación y Trámite Agrario Mandatorio:** Al encontrarse el suelo bajo el régimen de propiedad social ejidal parcelada, la ocupación del área de 1,763.00 m² no puede consolidarse mediante un contrato de compraventa civil ordinario. Para dotar al proyecto de plena certidumbre jurídica, el Comisariado Ejidal de Coyula deberá convocar formalmente a una **Asamblea de Ejidatarios de Formalidades Especiales** (de conformidad con los Artículos 23, fracciones IX a XI, y 56 de la Ley

Agraria). En dicha asamblea se deberá aprobar por mayoría calificada la anuencia de la afectación, el convenio de ocupación previa o, de ser viable, la adopción del dominio pleno de la fracción para su posterior venta al Estado, fijando las compensaciones económicas correspondientes según los avalúos emitidos por el Instituto de Administración y Avalúos de Bienes Nacionales (INDAABIN).

6.3. Rigor Geométrico: Cuadros de Construcción de Predios Sirvientes

Para dotar a los contratos de compraventa, escrituras de donación y convenios de afectación ejidal de la precisión geométrica e insolvencia técnica requerida ante notarios públicos y tribunales, las poligonales de desplante de los predios sirvientes aprobados fueron calculadas en gabinete tras las compensaciones angulares de campo. A continuación, se detallan las carteras de coordenadas e indicaciones de rumbo en el sistema de proyección UTM (DATUM84 ITRF-92) para las infraestructuras evaluadas:

6.3.1. Cuadro de Construcción del Predio Sirviente - PTAR El Vado

Vértice Inicio	Vértice Final	Distancia (m)	Rumbo Azimutal (°)	Coordenada X (UTM - m)	Coordenada Y (UTM - m)
P.V.	1	0.000	319.797348	691,940.714	2,280,558.033
1	2	276.790	349.381728	691,992.323	2,280,829.969
2	3	233.757	25.2589047	691,868.511	2,281,028.244

Vértice Inicio	Vértice Final	Distancia (m)	Rumbo Azimutal (°)	Coordenada X (UTM - m)	Coordenada Y (UTM - m)
3	4	85.650	82.3993719	Cierre Poligonal	Cierre Poligonal

6.3.2. Cuadro de Construcción del Predio Sirviente - Cárcamo El Vado

Vértice Inicio	Vértice Final	Distancia (m)	Rumbo Azimutal (°)	Coordenada X (UTM - m)	Coordenada Y (UTM - m)
P.V.	1	0.000	116.6403164	687,705.984	2,282,091.332
1	2	35.221	207.4569759	687,726.395	2,282,062.628
2	3	76.069	301.4653088	687,650.327	2,282,063.068
3	4	30.057	30.64864925	Cierre Poligonal	Cierre Poligonal

6.3.3. Cuadro de Construcción del Predio Sirviente - Cárcamo Coyula

Vértice Inicio	Vértice Final	Distancia (m)	Rumbo Azimutal (°)	Coordenada X (UTM - m)	Coordenada Y (UTM - m)
1	2	71.001	314.3677850	686,863.588	2,285,094.286
2	3	71.816	322.5600496	686,791.774	2,285,093.855
3	4	48.153	15.25802824	686,804.612	2,285,140.265
4	5	54.942	22.97654293	686,818.881	2,285,193.323
5	6	28.410	31.64831061	686,833.471	2,285,217.700
6	7	44.870	42.15222116	Cierre Poligonal	Cierre Poligonal

6.4. Catastro de Franjas de Servidumbre de Paso para Colectores y Líneas de Impulsión

6.4.1. Definición Legal de la Servidumbre Legal de Paso para Conducciones

De acuerdo con las disposiciones del Código Civil del Estado de Jalisco, el trazo longitudinal de los colectores sanitarios marginales a gravedad y de las líneas de impulsión a presión exige la constitución de un derecho real denominado **Servidumbre Legal de Paso**. Esta figura jurídica faculta al organismo operador y al Estado para ocupar de manera permanente una franja de terreno ajeno con el propósito de alojar tuberías, realizar excavaciones, construir pozos de visita y disponer de un derecho de vía libre para el ingreso de maquinaria pesada destinada a labores de mantenimiento preventivo, desazolve o reparación de colapsos estructurales.

Para este proyecto básico de ingeniería, se definió una sección transversal de ancho de franja de afectación constante equivalente a **6.00 metros** de ancho (3.00 metros a cada lado del eje de simetría de la tubería), cota suficiente para garantizar el despliegue seguro de excavadoras y la disposición temporal de tierras de excavación sin invadir propiedades vecinas de manera irregular. Toda edificación o desplante de estructuras definitivas por parte de los propietarios sirvientes queda estrictamente prohibida dentro de estos 6 metros de vía de amortiguamiento.

6.4.2. Base de Datos Cartográfica "Shapefile" e Indexación de Atributos SIG

La delimitación cartográfica de las franjas de afectación viables se integró formalmente en una estructura informática SIG bajo la capa vectorial denominada **"DV_6m_Lin-Carc_EIVado_VIABLE"** y su equivalente para Coyula.

Cada registro o polígono de afectación de la base de datos geoespacial contiene una estructura de atributos estandarizada con las siguientes variables de control:

- **IDE (Identificador):** Número entero único secuencial que registra de forma indizada la parcela o polígono afectado en el trazo de la conducción.
- **Propietari (Propietario):** Texto descriptivo con el nombre completo del titular registral, poseedor particular o ejidatario asignado conforme a los libros del RPPC o actas agrarias.
- **Regimen (Régimen de Propiedad):** Clasificación legal que define la naturaleza del suelo afectado (Propiedad Privada, Propiedad Pública, Propiedad Social Ejidal o Propiedad Comunal).
- **Tipo_Regim (Tipo de Régimen):** Especificación técnica interna del estatus del suelo (por ejemplo, Ejidal Parcelado, Donación Municipal, Escritura Pública, Zona Federal).
- **Estatus:** Condición legal actual que guarda la tenencia de la tierra de la fracción afectada (Regular,

En Proceso de Regularización, Juicio Sucesorio, Explotación Irregular).

- **CtaPredial (Cuenta Predial / Registro):** Identificador de control fiscal ante el catastro municipal o, en el caso de propiedad agraria, el número de registro asignado ante el Registro Agrario Nacional (RAN).
- **Cuenca:** Nombre de la subcuenca hidrográfica a la que pertenece el tramo (Cuenca El Vado o Cuenca Coyula).
- **Tramo:** Número decimal que identifica con precisión el segmento geométrico de colector o línea de impulsión correspondiente a la afectación (desde la obra de cabecera aguas arriba hasta la interconexión final en la PTAR), facilitando el cálculo independiente de las indemnizaciones financieras por tramo de construcción.

6.4.3. Estrategia y Plan de Gestión de Adquisiciones de Derechos de Vía

Con base en la matriz de atributos consolidada en el SIG, se estructuró el plan de gestión para la liberación de los derechos de vía previos al arranque del proceso de licitación de las obras. El análisis del catastro arrojó una marcada diferenciación en la complejidad jurídica del trazo entre ambas subcuencas, la cual se detalla a continuación con sus respectivas recomendaciones procedimentales:

1. **Trazo de Conducciones en la Cuenca El Vado (Polígonos LimPropPublica-ElVado y LimPropPrivadasElVado):** El eje de colectores se proyectó de forma estratégica sobre zonas federales marginales de arroyos y, predominantemente, aprovechando las franjas de derecho de vía de vialidades públicas existentes y poligonales bajo régimen público del Municipio de Tonalá. Esta condición geométrica reduce al mínimo la necesidad de negociaciones complejas con particulares.

Para las fracciones menores que atraviesan terrenos privados (LimPropPrivadasElVado), se iniciarán de forma paralela los expedientes de avalúo comercial para la formalización de contratos notariales de servidumbre voluntaria de paso con pago de indemnización por afectación superficial de suelo y bienes distintos a la tierra (cercas, árboles).

2. **Trazo de Conducciones en la Cuenca Coyula (Régimen Social Ejidal Dominante):** El trazo de los interceptores marginales discurre en una porción significativa sobre parcelas agrícolas vigentes pertenecientes al Ejido de Coyula. Ante este escenario, la liberación de los derechos de vía exige la instrumentación obligatoria de la vía agraria. El organismo operador deberá coordinar con el Comisariado Ejidal la celebración de asambleas informativas para convenir las indemnizaciones por afectación de cultivos (daños y perjuicios por el uso de maquinaria en época de siembra) y consolidar el convenio general de ocupación superficial y servidumbre legal de paso ejidal. Este convenio deberá ser sancionado por la asamblea ordinaria e inscrito formalmente ante el RAN para evitar litigios futuros ante los Tribunales Agrarios que paralicen la continuidad constructiva del sistema de saneamiento.

Sección 7. Presupuestos y Especificaciones

7.1. Metodología de Integración del Catálogo de Conceptos y Cantidades de Obra

7.1.1. Criterios de Cuantificación y Estructuración del Catálogo

La culminación de las ingenierías básicas para los sistemas de saneamiento de las subcuencas de El Vado y Coyula, en el municipio de Tonalá, Jalisco, exige la determinación precisa de los volúmenes de obra y la estructuración del catálogo de conceptos base.

Este procedimiento constituye el amparo técnico y financiero indispensable para la posterior licitación pública, contratación y ejecución de las obras civiles, electromecánicas y de automatización. La metodología de cuantificación se desarrolló mediante la integración de los planos geométricos definitivos y las memorias de cálculo de cada una de las especialidades (hidráulica, sanitaria, civil, eléctrica, procesos y SCADA), desglosando las cantidades de obra por unidad funcional de proceso para ambas Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) y sus estaciones de bombeo asociadas.

Para garantizar la transparencia, la homogeneidad regulatoria y la correcta fiscalización de los recursos públicos, la codificación, descripción y ordenamiento de los conceptos de obra se estructuraron siguiendo los lineamientos técnicos y las agrupaciones sectoriales normadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Los volúmenes de obra calculados cubren de forma exhaustiva las siguientes partidas fundamentales:

- **Obras Preliminares y Terracerías:** Desmonte, despalme, excavaciones a cielo abierto en zanjas y macro-predios bajo condiciones variables de subsuelo (tobas en Coyula y basaltos en El Vado), plantillas compactadas, rellenos estructurales y acarreo de material excedente.
- **Obra Civil y Estructuras Hidráulicas:** Habilitado y colocación de acero de refuerzo de diferentes límites de fluencia, cimbrado común y acabado pulido, vertido de concreto estructural premezclado con aditivos impermeabilizantes para garantizar la estanqueidad en reactores A²O, sedimentadores, digestores y tanques de contacto.
- **Obra Arquitectónica y Auxiliar:** Construcción de edificios de sopladores, casetas de deshidratación mecánica, laboratorios de control de calidad, talleres de mantenimiento, oficinas administrativas, vialidades interiores pavimentadas y cercas de seguridad perimetral.
- **Instalaciones Mecánicas e Hidráulicas de Proceso:** Procura, montaje, alineación y soldadura

de tuberías de acero al carbón Cédula 40, compuertas de aislamiento, vertederos de dientes de sierra y soportería estructural para interconexiones.

- **Equipamiento Electromecánico Específico:** Instalación y puesta en marcha de unidades compactas EMO, mecanismos circulares AWASA, mezcladores HOMA, bombas Flygt, sopladores Kaeser/Hoffman, filtros Dynadisc, generadores Pinnacle y agitadores Westech.
- **Instalaciones Eléctricas, Instrumentación y SCADA:** Tendido de alimentadores de cobre THHN/THWN-2, Centros de Control de Motores (CCM), subestaciones con arreglos de transformadores de 500 kVA y 300 kVA, plantas de emergencia de 400 kVA, mallas de puesta a tierra, redes de fibra óptica Modbus TCP/IP, sensores en línea (OD, ORP, pH) y el medidor de flujo terminal FIT-01 con sus respectivos tramos rectos y anillos de tierra.

7.1.2. Protocolo para el Desarrollo de Conceptos No Contenidos en el Catálogo de CONAGUA

Durante la fase de integración se identificaron tecnologías avanzadas de pulimiento y estabilización que, por su naturaleza de última generación industrial, no se encuentran codificadas o descritas dentro del *Catálogo de Precios Unitarios de la CONAGUA en su versión 2025*. Ante esta restricción procedimental, se implementó un protocolo específico de ingeniería de costos para el desarrollo de **Conceptos Nuevos Especiales**.

Para cada uno de estos conceptos, se redactó una especificación técnica de construcción particular y se desglosó su Proceso Constructivo Analítico, determinando las tarjetas de precios unitarios mediante la investigación de los siguientes componentes del mercado:

- **Costos de Procura e Importación de Equipos:** Solicitud de cotizaciones formales y precio índice directamente con los fabricantes internacionales homologados en el anteproyecto mecánico (EMO, Dynadisc, Pinnacle, Westech, Bioworks), incorporando los gastos logísticos de traslado, aranceles de importación y seguros de transporte hasta los macro-sitios de Tonalá.
- **Mano de Obra Especializada de Instalación:** Cuantificación de las cuadrillas de ingenieros de montaje, técnicos soldadores certificados, electricistas de alta tensión y programadores de sistemas de automatización SCADA necesarios para la correcta implantación y pruebas de la infraestructura.
- **Materiales Consumibles de Montaje:** Inclusión de gases de soldadura, herrajes de acero inoxidable SS316, pernos de anclaje químico Hilti, aceites lubricantes de arranque, polímeros de acondicionamiento químico y reactivos de calibración analítica inicial.

7.2. Estimación del Presupuesto Base de Inversión Inicial

7.2.1. Criterios de Tasación y Aplicación de Precios Unitarios

El Presupuesto Base de Inversión Inicial para las obras hídricas de las subcuencas El Vado y Coyula se determinó aplicando de forma estricta los Precios Unitarios contenidos en el tabulador oficial de la CONAGUA versión 2025.

Para los conceptos ordinarios (excavaciones, concretos, aceros, alimentadores estándar), se adoptaron los costos directos oficiales actualizados por los índices de inflación sectorial de la construcción. Para los conceptos nuevos especiales (ozonofiltros, filtros de discos, digestores CSTR con quemadores Bioworks), los costos se fijaron con base en los precios índice de mercado proporcionados por los proveedores certificados, adicionando los porcentajes correspondientes a Costos Indirectos (administración de campo y oficinas centrales), Costos de Financiamiento y la Utilidad del contratista, de acuerdo con la Ley de Obras Públicas y Servicios Relacionados con las Mismas.

7.2.2. Presupuesto Base Consolidado de Inversión por Macro-Sitio

El análisis económico detallado de los catálogos de conceptos integrados determinó los montos de inversión requeridos para la ejecución total del proyecto básico de saneamiento al año horizonte 2050.

Los montos calculados por planta de tratamiento, incluyendo la totalidad de las obras civiles de la línea de agua, infraestructura del tren de lodos, equipamiento electromecánico homologado y las interconexiones eléctricas y de automatización SCADA correspondientes, se consolidan en la siguiente matriz presupuestal:

Macro-Sitio de Infraestructura / Subcuenca	Capacidad de Diseño (L/s)	Presupuesto de Inversión Inicial (Monto Total MXN)
Planta de Tratamiento de Aguas Residuales "Coyula"	250 L/s	\$362,962,922.00 M.N.
Planta de Tratamiento de Aguas Residuales "El Vado"	160 L/s	\$271,457,922.00 M.N.

Nota Presupuestal: Conforme a los lineamientos de presentación de preingeniería básica de la CEA, las matrices analíticas detalladas de los conceptos, volúmenes de obra específicos, tarjetas de precios unitarios y cotizaciones de soporte de los fabricantes no se insertan en el cuerpo de esta memoria descriptiva, integrándose de forma independiente bajo los tomos de anexos técnicos del informe final.

7.3. Costos de Operación, Mantenimiento (O&M) y Reposiciones

7.3.1. Metodología de Análisis de Costos de O&M e Indicadores Unitarios

Para evaluar la sustentabilidad financiera a largo plazo y determinar el impacto económico sobre las tarifas del organismo operador, se desarrolló una memoria analítica para el cálculo de los costos operativos anuales. El modelo matemático de costos integró los siguientes componentes de gasto real indexados:

- **Potencia Eléctrica (Consumo de Energía):** Calculado a partir de la sumatoria de cargas del cuadro de cargas consolidado (651.0 A en baja tensión para El Vado y el proporcional para Coyula), considerando la operación continua las 24 horas del día bajo la tarifa industrial de media tensión de la CFE, reflejando el consumo dominante de los sopladores Kaeser/Hoffman y bombas Flygt.
- **Personal Operativo y Administrativo (Mano de Obra):** Nómina del equipo de ingenieros de planta, técnicos electromecánicos, analistas de laboratorio químicos, operadores de casetas de deshidratación y personal de vigilancia perimetral.
- **Consumo de Insumos y Productos Químicos:** Procura de polímeros orgánicos catiónicos para las mesas de espesamiento mecánico EMO y filtros prensa de banda, reactivos químicos para la desincrustación de filtros Dynadisc y consumibles de laboratorio.
- **Mantenimiento Correctivo, Refacciones y Reposiciones:** Fondos de reserva anuales para la sustitución de sellos mecánicos, baleros, membranas difusoras de EPDM, lubricantes y mantenimiento preventivo general de subestaciones.
- **Manejo, Transporte y Disposición Final de Lodos:** Costos de flete vehicular y pago de derechos por confinamiento de la torta de biosólido deshidratada (20-25% de humedad residual) hacia los rellenos sanitarios autorizados.

7.3.2. Evaluación Económica de Alternativas de Tratamiento (PTAR El Vado - 160 L/s)

Para validar la conveniencia de la tecnología de lodos activados en su modalidad Anaerobio-Anóxico-Aerobio (A²O) adoptada en el proyecto básico, se contrastaron los costos de inversión y los indicadores operativos de O&M anuales contra los modelos de los esquemas tecnológicos descartados (Lodos Activados Convencionales y Lodos Activados con Lecho Móvil MBBR) para la capacidad de 160 L/s.

El balance económico de alternativas se desglosa a continuación:

Indicador Económico / Tecnológico	Alt. 1: Lodos Activados Convencionales	Alt. 2: Lodos Activados A ² O (Seleccionado)	Alt. 3: Lodos Activados MBBR
Costo de Inversión Inicial (CAPEX)	\$243.90 MDP	\$251.00 MDP*	\$248.20 MDP
Costo de Operación y Mantenimiento Anual	\$11.70 MDP	\$11.50 MDP	\$13.80 MDP
Costo Unitario Total de Tratamiento (\$/m ³)	7.32 \$/m ³	7.57 \$/m³	7.96 \$/m ³
Costo Específico Neto de O&M (\$/m ³)	2.20 \$/m ³	2.29 \$/m³	2.74 \$/m ³

**Nota de Equivalencia: El costo de inversión de 251.0 MDP corresponde al predimensionamiento paramétrico preliminar de la alternativa A²O para El Vado, el cual fue ajustado y consolidado formalmente en el Presupuesto Base definitivo de \$271,457,922.00*

M.N. tras integrar las obras de arte arquitectónicas, cercas y las ingenierías de detalle complementarias de la subestación eléctrica y el SCADA.

7.3.3. Interpretación Ingenieril de la Matriz de Costos

El análisis de la matriz económica revela las siguientes conclusiones técnicas fundamentales para la toma de decisiones de la CEA:

- **Alternativa 1 (Convencional):** Registra el menor costo de O&M específico ($2.20 \text{ \$/m}^3$), pero fue descartada de forma categórica debido a que la calidad del agua tratada operaría de manera persistente en el límite de la norma, careciendo de la flexibilidad bioquímica para garantizar la remoción simultánea de nutrientes y nitrógeno total por debajo de los 25 mg/L bajo fluctuaciones dinámicas.
- **Alternativa 3 (MBBR):** Manifiesta el costo operativo más elevado ($2.74 \text{ \$/m}^3$ específicos de O&M y 13.8 MDP anuales) debido a que los reactores de lecho móvil plásticos imponen un consumo de oxígeno sustancialmente mayor para mantener los carriers en suspensión volumétrica completa, elevando la demanda de potencia de los sopladores, además de exigir la importación recurrente de soportes plásticos de patente internacional.
- **Alternativa 2 (A²O Seleccionada):** Representa la solución con mayor viabilidad y balance financiero. Si bien introduce un incremento marginal en el costo directo de O&M ($2.29 \text{ \$/m}^3$ frente a los $2.20 \text{ \$/m}^3$ del convencional) derivado del consumo eléctrico de las bombas Flygt de recirculación interna de nitratos (RILM), ofrece una remoción garantizada superior al 95% de la carga orgánica y un amplio margen de seguridad jurídica ante la NOM-001-SEMARNAT-2021. Al evaluar el ciclo de vida del proyecto a un periodo de amortización de 30 años con una tasa de interés del 10%, el sistema A²O se consolida como la opción más sólida, sustentable y con la mayor relación costo-beneficio para el municipio de Tonalá.

7.4. Especificaciones Técnicas Generales de Construcción

7.4.1. Vinculación con los Conceptos de Obra Normativos de CONAGUA

En estricta correspondencia analítica con cada uno de los conceptos ordinarios incorporados en el catálogo de obra general de las plantas de tratamiento y estaciones de bombeo, se transcribieron de forma íntegra las especificaciones técnicas generales de construcción validadas por la CONAGUA. Estos documentos normativos establecen los estándares de calidad de los materiales, los métodos de muestreo físico y las tolerancias geométricas de aceptación para las siguientes actividades de ingeniería civil:

- **Excavaciones y Rellenos:** Procedimientos para el control de la estabilidad de taludes en zanjas profundas para colectores, preparación de plantillas de apoyo y grados de compactación Proctor (mínimo 95%) para rellenos estructurales utilizando material de banco seleccionado.

- **Cimbras y Concretos Estructurales:** Especificaciones para el diseño de mezclas de concreto premezclado con resistencias a la compresión $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ y $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$, control de revenimiento, colocación de bandas de PVC de estanqueidad (Waterstop) en juntas de colado constructivas, tiempos mínimos de descimbrado y métodos de curado químico o por inundación para evitar agrietamientos por contracción plástica en las paredes de los tanques biológicos.
- **Instalación de Tuberías y Piezas Especiales:** Protocolos de soldadura al arco para tubería de acero al carbón Cédula 40, aplicación de recubrimientos epóxicos anticorrosivos internos y externos, y pruebas hidrostáticas de hermeticidad en campo a presión sostenida para verificar la total ausencia de fugas previa al tapado de zanjas o llenado de tanques.

7.4.2. Especificaciones Particulares para Conceptos Especiales de Proceso y SCADA

Para los conceptos nuevos especiales que no cuentan con cobertura en los manuales de la CONAGUA, se desarrollaron especificaciones particulares detalladas basadas en las recomendaciones de mantenimiento, conservación y criterios de diseño de los fabricantes internacionales. Estas especificaciones norman los siguientes rubros de alta especialidad industrial:

- **Unidades de Filtración de Discos (Dynadisc):** Requerimientos de nivelación milimétrica del eje rotatorio, calibración de los presostatos diferenciales para el arranque automático de las espumas de retrolavado y especificaciones de las soluciones químicas ácidas para la limpieza y desincrustación cíclica de las mallas de acero inoxidable.
- **Sistemas de Ozonización y Desinfección (Pinnacle):** Normas de seguridad para el manejo de gas ozono a alta concentración, hermeticidad de las conexiones de acero inoxidable SS316L, calibración de los destructores de ozono residual en la purga de gases del tanque de contacto laberíntico y protocolos para el mantenimiento preventivo de las celdas de descarga en corona.
- **Digestores Anaerobios y Agitadores (Westech / Bioworks):** Especificaciones para el montaje vertical de los ejes de mezcla profunda, tolerancias de torque en los reductores de potencia, verificación de la hermeticidad neumática de las cúpulas de almacenamiento de biogás y calibración de las válvulas de seguridad de presión/vacío y del sistema de ignición automática de la antorcha ecológica.
- **Instrumentación Fina en Línea y Nodo FIT-01:** Protocolos de calibración en sitio para los sensores ópticos de oxígeno disuelto y ORP mediante soluciones patrón. Para el medidor electromagnético FIT-01 de 20 pulgadas, se especifican de forma obligatoria las condiciones mecánicas de montaje centrada, el torquímetro de apriete de las bridas slip-on clase 150 conforme a ASME B16.5, y la interconexión física de las trenzas de cobre desde los anillos de tierra SS316L hacia la barra de tierra física electrónica para eliminar ruidos galvánicos, asegurando la permanencia del tramo recto de 2.54 metros aguas arriba y 1.02 metros aguas abajo fijado en los planos conceptuales.