



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL



---

---

*Desarrollo de Sistema de Soporte de Decisiones para el  
diseño de tratamiento primario en una Planta de  
Tratamiento de Aguas Residuales asistido por web*

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO CIVIL**

PRESENTA:

**EDGAR ESPINOZA BETANCOURT**

DIRECTOR DE TESIS:

**DR. DAURY GARCÍA PULIDO**

**Centro Interamericano de Recursos del Agua**

---

---

Mayo de 2018



Universidad Autónoma del Estado de México

Facultad de Ingeniería

DEPTO. DE EVALUACIÓN PROFESIONAL

No. Oficio: 24/2018

Ciudad Universitaria, Toluca, Méx. a 23 de mayo del 2018

**C. EDGAR ESPINOZA BETANCOURT**  
**PASANTE DE INGENIERÍA CIVIL**  
**PRESENTE.**

En respuesta a su solicitud, a continuación transcribo el tema aprobado por esta Dirección, que propuso el **DR. DAURY GARCÍA PULIDO**, con el fin de que lo desarrolle en la modalidad de **TESIS** le informo que se autoriza la impresión de su trabajo para presentar su Evaluación Profesional.

**"DESARROLLO DE SISTEMA DE SOPORTE DE DECISIONES PARA EL DISEÑO DE TRATAMIENTO PRIMARIO EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES ASISTIDO POR WEB."**

- RESUMEN
- I. INTRODUCCIÓN
  - II. MARCO TEÓRICO
  - III. METODOLOGÍA
  - IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN
  - V. CONCLUSIONES
  - VI. REFERENCIAS Y O FUENTES DE INFORMACIÓN
  - VII. ANEXOS

Ruego a usted tomar nota de que en cumplimiento a lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses, como requisito indispensable para sustentar su Evaluación Profesional.

Así mismo, para la elaboración de la **TESIS** y demás trámites, deberá sujetarse a la reglamentación respectiva de esta Universidad.

**ATENTAMENTE**  
**PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO**

"2018, Año del 190 Aniversario de la Universidad Autónoma del Estado de México".



FACULTAD DE INGENIERÍA  
U. A. E. M.

**DRA. MARÍA DOLORES DURÁN GARCÍA**  
**DIRECTORA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA**

\*\*/Saha.

Cerro de Coatepec S/N  
Ciudad Universitaria; Toluca México  
Tel. (722) 2-14-08-55 / 2-15-13-51



*A mis padres, hermanos, familiares y amigos, quienes siempre me han dado su apoyo incondicional.*

## **Agradecimientos**

A la Facultad de Ingeniería de la UAEMex y a sus profesores, que me otorgaron la oportunidad de formarme y crecer tanto académica como personalmente.

A la Secretaría de Educación Pública, por el apoyo por medio del proyecto 4457/2017CAP.

A los doctores Carlos Roberto Fonseca Ortiz, Daury García Pulido e Iván Gallego Alarcón, por su valioso apoyo y sus consejos para la realización de este trabajo.

A Brandon Cereceda Silva, por su amistad y compañerismo a lo largo de nuestra formación como ingenieros y en el proceso de titulación.

A Emmanuel Segura Quiroz, por transmitirme sus conocimientos en el área de programación.

## Índice

Lista de figuras .....	4
Lista de tablas .....	5
Resumen .....	6
I. Introducción .....	8
1.1 Justificación .....	10
1.2 Hipótesis .....	11
1.3 Objetivo general .....	11
1.4 Objetivos Específicos .....	11
II. Marco Teórico .....	11
2.1 Tratamiento de Aguas Residuales .....	11
2.2 Tratamiento Primario.....	11
2.3 Sedimentación .....	12
2.4 Criterios de diseño .....	14
2.5 Dimensionamiento.....	18
2.6 Zona de sedimentación .....	18
2.7 Zona de entrada .....	21
2.8 Zona de salida.....	25
2.9 Zona de lodos. ....	26
2.10 Sistemas de soporte de decisiones .....	27
III. Metodología.....	28
IV. Resultados y discusión .....	33
4.1 Interpretación de los resultados .....	48
V. Conclusiones.....	50
5.1 Recomendaciones .....	50
VI. Referencias y/o fuentes de información .....	51
VII. Anexos.....	54

## Lista de figuras

Figura 2.1. Modelo de un tanque sedimentador para deposición con floculante. ....	13
Figura 2.3. Dimensiones del tanque sedimentador.....	19
Figura 2.4. Dimensiones de la zona de entrada.....	21
Figura 2.5. Orificios de la pantalla difusora. ....	23
Figura 2.6. Detalle de orificios aboquillados.....	23
Figura 2.7. Zona de entrada (Canaleta con Orificios). ....	24
Figura 2.8. Zona de salida (Canaleta Vertedora).....	25
Figura 2.9. Tolvas para lodos. ....	26
Figura 3.1. Metodología para el desarrollo de una aplicación web para el diseño de una PTAR.....	29
Figura 4.1. Modelo de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. ....	33
Figura 4.2. Modelo conceptual del diseño de tratamiento primario de una PTAR. ....	34
Figura 4.3. Diagrama de interacción del SSD. . ....	35
Figura 4.4. Diagrama UML de clases del SSD.....	36
Figura 4.5. Diagrama UML de secuencia del SSD.....	37
Figura 4.6. Tutorial de uso del SSD .....	38
Figura 4.7. Menú del SSD para elección de fase de diseño.....	38
Figura 4.8. Interfaz de diseño por pasos del SSD.....	39
Figura 4.9. Casillas de entrada y salida de datos. ....	39
Figura 4.10. Botones de información. ....	40
Figura 4.11. Casillas para ingreso de información. ....	40
Figura 4.12. Casillas para validación de criterios.....	41
Figura 4.13 Diálogo de confirmación.....	41
Figura 4.14. Interfaz móvil del SSD.....	42
Figura 4.15. Asistencia del SSD para elección de inputs de diseño.....	45
Figura 4.16. Asistencia del SSD para la determinación y cálculo de inputs de diseño.....	46
Figura 4.17. Asistencia del SSD para la determinación y cálculo de inputs de diseño.....	46
Figura 4.18. Asistencia del SSD para la determinación de inputs de diseño. ....	46
Figura 4.19. Reporte de diseño generado por el SSD.....	47

## Lista de tablas

Tabla 1.1 Software existentes para el diseño y simulación de plantas de tratamiento de agua residual. ....	8
Tabla 2.1. Criterios de diseño de sedimentadores primarios . ....	14
Tabla 2.2. Criterios para sedimentadores primarios. ....	15
Tabla 2.3. Criterios para sedimentadores primarios. ....	17
Tabla 2.4. Ejemplos de aplicaciones de sistemas de soporte de decisiones .....	28
Tabla 3.1. Inputs y outputs de los procesos del tratamiento primario de una PTAR. ....	29
Tabla 4.1. Versiones de navegadores web con soporte para <input max> e <input min> .	41
Tabla 4.2. Resultados de los métodos de diseño de tratamiento primario para el caso de estudio.....	43

## Resumen

El vertido cero de efluentes debería ser el objetivo último de las empresas y gobiernos locales, con el fin de evitar el vertido de sustancias contaminantes al medio ambiente acuático (ONU-Agua, 2006). De 2007 a 2015 Conagua reveló cifras acerca del efluente recibido en alcantarillado, así como del aumento en el número total de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en el país, que nos indican una demanda en el desarrollo de este tipo de estructuras. Para su realización se necesitan recursos económicos y además recursos tecnológicos, que optimicen el proceso de diseño.

Existen características comunes en el software comercial disponible para este propósito, que pueden representar ventajas o desventajas para el usuario. Entre sus características en común están la capacidad de diseño, la compatibilidad, la accesibilidad al usuario y los costos de adquisición de licencias para su uso.

El desarrollo de un SSD (Sistema de soporte de decisiones), un sistema de información computarizado que se caracteriza por ser interactivo, flexible y adaptable, que aproveche los beneficios que otorga el acceso web, para el diseño de tratamiento primario en una PTAR, facilitará el acceso y la disposición de criterios de diseño, además de reducir costos en comparación con paquetes comerciales mediante el desarrollo de tecnología propia.

Este sistema produce diseños (a nivel anteproyecto) que se soportan en los criterios derivados de la investigación de diversos autores (CEPIS, 2005; García-Pulido, 1999).

En la metodología del proyecto, se distinguen cuatro etapas asociadas a los objetivos planteados: **Modelo conceptual de los fenómenos:** Construcción de un modelo conceptual que permite identificar el sistema objetivo a través de la identificación de las variables que intervienen en el diseño de tratamiento primario en una PTAR y las relaciones entre ellas.

**Ingeniería de requerimientos** Diseño la arquitectura para la implementación informática a través de la web que nos permite tener la funcionalidad requerida.

**Desarrollo de funciones y scripts:** Implementación de los algoritmos necesarios asociados al diseño de los procesos de tratamiento primario.

**Desarrollo de interfaz y Discusión:** Diseño la interfaz del sistema, priorizando la facilidad de uso y la asistencia al usuario. Aplicación del Sistema de Soporte de Decisiones en un caso de estudio.

Como resultado de la consecución de estos objetivos se obtienen los elementos de interfaz, funcionalidad y bases de datos implementadas en el sistema, mismos que posibilitan la asistencia y la facilidad del uso para el diseño del tratamiento primario en una PTAR por parte del usuario objetivo.

En conclusión, se observan mediante la aplicación del caso de estudio, las mejoras resultantes en el uso del SSD respecto a herramientas tradicionales. También es posible distinguir los objetivos a seguir para el desarrollo posterior del sistema en versiones futuras.

## Abstract

The zero discharge of effluents should be the ultimate goal of both companies and local governments, in order to avoid the discharge of polluting substances into the aquatic environment (UN-Water, 2006). From 2007 to 2015, Conagua revealed figures about the effluent received in sewerage, as well as the increase in the total number of wastewater treatment plants (WWTP) in the country, which indicates a demand in the development of this type of structures. In order to satisfy that demand, economic and technological resources are needed, with the goal of optimizing the design process.

There are common features in commercial software available for this purpose, which may represent advantages or disadvantages for the user. Among its common characteristics are the design capacity, compatibility, accessibility to the user and the acquisition costs of licenses for its use.

The development of a DSS (Decision Support System), a computerized information system that is interactive, flexible and adaptable, that takes advantage of the benefits granted by web access, can be applied for the design of primary treatment in a WWTP and will facilitate access and layout of design criteria, in addition to reducing costs compared to commercial packages through the development of in-house technology.

This system produces designs (at a preliminary level) that are supported by the criteria derived from the research of various authors (CEPIS, 2005, García-Pulido, 1999).

In the methodology of the project, four stages associated with the objectives are distinguished: **Conceptual model of the phenomena:** Construction of a conceptual model that allows to identify the objective system through the identification of the variables that intervene in the design of primary treatment in a WWTP and the relationships between them.

**Requirements engineering:** Architecture design for the computer web implementation that allows us to have the required functionality.

**Development of functions and scripts:** Implementation of the necessary algorithms associated with the design of the primary treatment processes.

**Interface development and Discussion:** Design of the system interface, prioritizing ease of use and user assistance. Application of the Decision Support System in a case study.

As a result of achieving these objectives, the elements of interface, functionality and databases implemented in the system are obtained, which enables both the assistance and ease of use for the design of the primary treatment in a WWTP by the target user.

In conclusion, the resulting improvements in the use of the DSS compared to traditional tools are observed through the application of the case study. It is also possible to distinguish the goals to be achieved by further development of the system in future versions.

## I. Introducción

En el contexto del suministro de agua, el vertido cero de efluentes debería ser el objetivo último de las empresas y las municipalidades. El vertido cero de efluentes implica el reciclado del agua y la recuperación de todos los residuos, evitando el vertido de sustancias contaminantes al medio ambiente acuático (ONU-Agua, 2006).

En caso de que el vertido cero no resulte ni técnica ni económicamente factible, existen diversas prácticas intermedias que se pueden aplicar para reducir el impacto sobre la calidad del agua. La selección de tecnologías óptimas para el tratamiento de las aguas residuales es una de estas prácticas (ONU-Agua, 2006).

Actualmente, existe una amplia variedad de herramientas informáticas que asisten a los ingenieros en el diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales (Tabla 1.1). Estos paquetes comparten ciertas características y requerimientos entre sí. La mayoría ofrece una gran variedad de procesos de tratamiento al usuario para construir su modelo. Sin embargo, los modelos que se emplean en estos programas pueden alcanzar un alto grado de complejidad.

**Tabla 1.1 Software existentes para el diseño y simulación de plantas de tratamiento de agua residual. (Sánchez *et al*; 2015)**

Simulador	Creador	Origen
ASIM	EAWAG	Suiza
DESASS	Calagua group- UPV	España
BIOWIN	Envirosim Associates L.d	Canadá
EFOR	DHI.Inc	Dinamarca
GPS-X	Hydromantis Inc.	Canadá
SIMBA	IFAK-System Gmbh	Alemania
STOAT	WRc Group	Reino Unido
WEST	Hemmis N.V	Bélgica
EDAR 1.0	CEIT-Cadagua	España
AQUASIM	EAWAG	Suiza

Es posible encontrar desventajas en común en los paquetes comerciales. Por un lado, los altos costos de adquisición, que van desde los \$1,800 hasta los \$8,000 USD (Envirosim, 2018), pueden llegar a ser limitantes en países en desarrollo. Por otro lado, la mayoría de las opciones disponibles requieren conocimientos avanzados para su manejo, además que pueden presentar una limitada accesibilidad al requerir la instalación de un archivo ejecutable, que en algunos casos solo es compatible con ciertos sistemas operativos.

Una alternativa propuesta en este trabajo a estos paquetes comerciales es un sistema de soporte de decisiones (SSD), enfocado a aumentar la accesibilidad, a través de la implementación de un diseño asistido por Web (DAW). Este sistema, además, considera la facilidad de uso, al ofrecer alternativas en función de criterios de diseño.

Para su construcción, se considera la combinación de las dos metodologías principales de desarrollo de software (tradicionales y ágiles). Ambas ofrecen ventajas que se adoptan como parte de una metodología híbrida de desarrollo de software.

La primera, conocida como metodología de desarrollo tradicional, se basa en la rigurosa estructura de planeación y documentación de todos los procesos que se realizan. Estas características permiten que otros programadores puedan continuar un proyecto inconcluso o que se pueda ampliar o rediseñar el proyecto existente más fácilmente. Algunos ejemplos de Metodologías Tradicionales son: el RUP (Rational Unified Process; IBM, 2011) y el OMT (Object Modeling Technique; Rumbaugh et al., 1990).

La segunda metodología es el desarrollo ágil de software. Esta metodología reduce los requerimientos de documentación a un mínimo. Los cambios en el proyecto se realizan directamente con el cliente o usuario y se procura la continua evolución del proyecto y la implementación de cambios de forma rápida. Ejemplos de esta metodología incluyen (Jiménez-Hernández et al., 2012): la programación XP (eXtreme Programming), Scrum. Para Dyba y Dingsøyr (2016), también puede incluirse a ASD (Adaptive Software Development) como una metodología de este tipo.

En una metodología híbrida de desarrollo, que combina principios de las dos metodologías anteriores, los requerimientos de documentación se hacen más flexibles respecto a los de la metodología tradicional, pero se mantiene una estructura razonable que permite que los cambios futuros en el software o en el personal sean más sencillos. Además, minimiza los errores en el software que se podrían producir al utilizar una metodología ágil.

## 1.1 Justificación

Ante el reto de una gestión integrada del agua y de garantizar el acceso a este recurso como un derecho humano, los distintos sectores sociales no pueden permanecer indiferentes en un país en desarrollo como México, donde el uso intensivo del agua se lleva a cabo en la zona con menor disponibilidad. Las zonas norte, centro y noroeste cuentan con menos de un tercio del agua renovable del país, pero en ellas se concentran más de las tres cuartas partes de la población (Cañez-Cota, 2015). Es consecuencia de eso que en México alrededor de 12 millones de habitantes padezcan una situación de crisis hídrica (CEMDA, 2006).

Con el objeto de preservar la calidad del agua, se construyen plantas que realizan su tratamiento antes de la descarga a los ríos y cuerpos de agua. De acuerdo con CONAGUA (2016), se recolectan en alcantarillado 1.81 millones de toneladas de DBO<sub>5</sub> al año, de los cuales se remueve solo 46.4%. Al 2015, las 2,477 plantas municipales de tratamiento en operación en el país solo trataron 120.9 metros cúbicos por segundo, es decir, el 57.0% de los 212 metros cúbicos por segundo de aguas residuales municipales recolectados en el alcantarillado (CONAGUA, 2016). Cifras como estas indican que es necesaria la construcción de un mayor número de plantas de tratamiento en México.

Dentro del diseño de una PTAR, es necesario implementar un tratamiento primario enfocado en la reducción de sólidos en suspensión, el acondicionamiento de las aguas residuales para su descarga en los receptores o para pasar a un tratamiento secundario a través de una neutralización o una homogeneización (Ramalho, 1990). En esta fase de tratamiento es posible remover el 60% de los sólidos presentes (Metcalf & Eddy, 2003).

Ante la creciente demanda de plantas de tratamiento, se vuelve necesaria la disposición de herramientas accesibles, tanto técnica como económicamente, para los profesionales de la ingeniería. En este sentido, el presente trabajo está enmarcado en el proyecto UAEM-CA-253 “Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales asistido por computadora con mejoramiento de procesos unitarios”.

Este proyecto tiene la finalidad de desarrollar un Sistema de Soporte de Decisiones (SSD) orientado al diseño del tratamiento primario de una PTAR. Se enfoca el sistema al aumento de la accesibilidad, reduciendo la complejidad del proceso de diseño de estas estructuras de tratamiento. A través de la implementación de un Diseño Asistido por Web (DAW) se evitan los problemas asociados a la instalación de un paquete informático de escritorio y se fomenta el desarrollo de tecnología propia para disminuir los costos asociados a la adquisición de paquetes comerciales.

## 1.2 Hipótesis

El desarrollo de un Sistema de Soporte de Decisiones con acceso desde la web, para la asistencia en el diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales durante la etapa de tratamiento primario, facilitará el acceso y la disposición de criterios de diseño, y permitirá reducir costos derivados de la adquisición de paquetes informáticos comerciales.

### 1.3 Objetivo general

Desarrollar un Sistema de Soporte de Decisiones para la asistencia en el diseño del tratamiento primario de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales a través de la web.

### 1.4 Objetivos Específicos

- Construir el modelo conceptual de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, en la fase de tratamiento primario, identificando las variables y la interrelación existente entre las mismas.
- Diseñar la arquitectura y el funcionamiento del Sistema de Soporte de Decisiones, siguiendo la ingeniería de requerimientos a través de la fase de mapeo y estrategias de alcance.
- Desarrollar las funciones y scripts necesarias asociadas al diseño de los procesos de tratamiento primario.
- Diseñar la interfaz del Sistema de Soporte de Decisiones para tener acceso por medio de web.
- Aplicar el Sistema de Soporte de Decisiones en un caso de estudio, considerando una población de 5,462 usuarios y una descarga de 6.64 litros por segundo (asociado a una localidad promedio del Estado de México)

## II. Marco Teórico

### 2.1 Tratamiento de Aguas Residuales

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2018), define al tratamiento de aguas residuales como *«una combinación de procesos y operaciones físicas, químicas y biológicas para eliminar sólidos, materia orgánica y, a veces, nutrientes del agua residual. Los términos generales utilizados para describir diferentes grados de tratamiento, con el fin de aumentar el nivel de tratamiento, son preliminares, primarios, secundarios y terciarios y / o avanzados»*.

### 2.2 Tratamiento Primario

En el tratamiento primario, se remueven sólidos que pueden dañar el equipo, tales como objetos grandes, trapos y arenas. En este tratamiento, se usa una operación física para eliminar los materiales flotantes y sedimentables que se encuentran en las aguas residuales. Para el tratamiento secundario, se utilizan procesos biológicos y químicos para eliminar la mayor parte de la materia orgánica. En el tratamiento avanzado, se usan combinaciones adicionales de operaciones unitarias y procesos para eliminar los sólidos suspendidos residuales y otros constituyentes que no se reducen significativamente por el tratamiento secundario convencional (Metcalf & Eddy, 2003).

En un sistema de tratamiento de aguas residuales, la fase de tratamiento primario cumple la función específica de recibir las aguas residuales crudas, antes del tratamiento biológico, para realizar la remoción de sólidos suspendidos. Su operación y mantenimiento adecuados, sin percibir la acumulación excesiva de desechos, permite obtener agua residual libre de sólidos sedimentables, apta para un tratamiento biológico posterior (CONAGUA, 2015).

### **2.3 Sedimentación**

Existen diversos procesos que pueden utilizarse en esta fase de tratamiento, siendo la sedimentación el más simple y de mayor utilización. Este proceso se puede producir en diversos puntos del tren de tratamiento y, en algunos casos, puede ser el único tratamiento que reciben las aguas residuales (Ramalho, 1990).

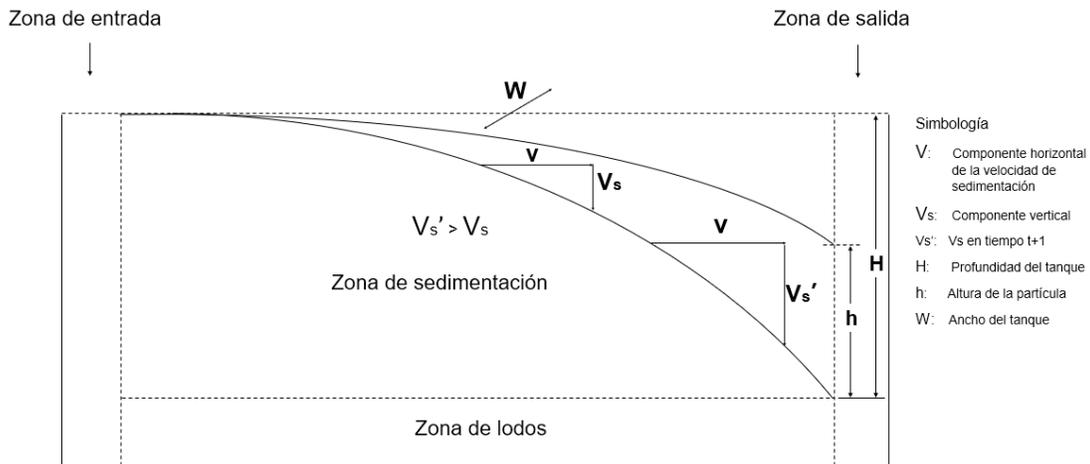
La remoción de sólidos por sedimentación se logra mediante el efecto de la fuerza de gravedad y la diferencia entre los pesos específicos de las partículas y del agua. En este proceso, además de la depuración antes mencionada, también se producen los lodos, los cuales presentan una concentración que facilita su tratamiento y manejo (Metcalf y Eddy, 1991).

Dependiendo de las características de los sólidos en suspensión, se pueden distinguir tres tipos de sedimentación: discreta, con floculación y por zonas (Ramalho, 1990). En la sedimentación discreta las partículas que se depositan mantienen sus características físicas (tamaño, forma, peso específico). Este fenómeno se presenta, por ejemplo, en los desarenadores. La sedimentación con floculación se caracteriza por cambios en propiedades físicas de las partículas como la densidad, la velocidad de sedimentación y la precipitación; este tipo de sedimentación se presenta en sedimentadores primarios. En la sedimentación por zonas, las partículas forman una capa que sedimenta como una sola masa, fenómeno observable en la sedimentación de lodos activos (Ramalho, 1990).

El concepto de tanque de sedimentación, desarrollado por Camp (1946) a partir de los trabajos de Hazen (1904), sirvió como base para las relaciones desarrolladas por Ramalho (1990) para el diseño de tanques sedimentadores, aplicables a un modelo que consiste en un tanque rectangular.

Este tanque presenta un tipo de sedimentación con floculación, en este sedimentador las partículas presentan coalescencia con las partículas cercanas a ellas, lo que propicia que su diámetro y su velocidad de sedimentación aumenten gradualmente. Esto se refleja en la trayectoria de precipitación para este tipo de tanques que toma la forma de una curva (Figura 2.1), al contrario de la trayectoria para sedimentación de partículas discretas, que es completamente recta.

El tanque sedimentador modelado está compuesto por cuatro zonas (Figura 1), cada una con distintas funciones dentro del proceso de sedimentación.



**Figura 2.1. Modelo de un tanque sedimentador para deposición con floculante. Elaboración propia, adaptado de Ramalho (1990).**

La primera zona es denominada como zona de entrada, en ella se presenta un flujo laminar lo cual permite que las partículas se distribuyan de manera homogénea. La siguiente zona se conoce como zona de sedimentación, el fondo de esta zona es donde se depositan las partículas sedimentadas. La tercera zona es la de salida, que permite el depósito de las aguas residuales para dirigir las a una siguiente fase de tratamiento. La zona de lodos se destina a la acumulación y retiro de los lodos generados (Ramalho, 1991)

La estructura de la zona de entrada usualmente se diseña como una canaleta posicionada transversalmente, ubicada en el extremo inicial del sedimentador. También puede adaptarse para esta zona una pantalla difusora (García-Pulido, 1999). Estas estructuras se incorporan con la función de tener una distribución uniforme del flujo dentro del sedimentador (CEPIS, 2005).

La zona de sedimentación se compone por un canal rectangular con dimensiones y condiciones hidráulicas que propician la sedimentación de las partículas. El flujo en esta zona es de tipo pistón y ocurre en dirección horizontal, además de que la velocidad en todos los puntos es igual (CEPIS, 2005).

En la zona de salida se requiere de una estructura similar a la que se incorpora en la zona de entrada, con el propósito de otorgar uniformidad al flujo para evitar que se produzca arreste de las partículas ya sedimentadas (García-Pulido, 1999).

Existen diversos tipos de estructuras que pueden emplearse para este fin, tales como los vertedores de rebose, los cuales pueden ser lisos o dentados; las canaletas de rebose, que además de ser lisas o dentadas, también pueden ser con orificios. También pueden utilizarse los orificios, de sección circular o cuadrada (Arboleda, 1972).

La zona de lodos se compone de una estructura para depositar los lodos generados, además de equipo de bombeo para su evacuación periódica. Adicionalmente, se emplea equipo de arrastre, generalmente compuesto por tablonces sujetos a cadenas que se desplazan del tanque por el fondo en ambas direcciones y depositan el material en cajas receptoras de lodos, usadas cuando se tienen tanques pequeños, o canales de fondo transversal, para tanques grandes (García-Pulido, 1999).

## 2.4 Criterios de diseño

La Tabla 2.1 (Romero, 1999; CONAGUA, 2015) contiene criterios propuestos por diversos autores para el diseño de sedimentadores primarios. Como puede observarse, varios de estos criterios difieren entre ellos, además de que algunos autores no proveen criterios para todas las variables de diseño.

**Tabla 2.1. Criterios de diseño de sedimentadores primarios (Romero, 1999; CONAGUA, 2015).**

Referencias	Carga Superficial [m/d]	Tiempo de retención [h]	Profundidad [m]	Carga sobre el vertedor [L/s · m]
Metcalf & Eddy, Inc	32 – 48	1.5 – 2.5	3 – 5	1.4 – 5.8
Normas de los diez estados	41	---	> 2.1	< 2.2
Manual de diseño naval	49	---	3	< 14
Ejército Estados Unidos de América	12 – 41	2.5	2.5 – 4.5	0.7 – 1.7
Steel y McGhee	24 – 60	1 – 2	1 – 5	---
Fair et al.	---	2	3	---
Sundstrom y Klei	---	1 – 4	---	---
USEPA	24 – 49	---	3 – 5	---
Tchobanoglous y Schroeder	30 – 60	---	3 – 5	---
IWPC	30 - 45	2	> 1.5	1.2 – 5.2

Organismos como CONAGUA (2015) y CEPIS (2005), han elaborado métodos para el diseño de sedimentadores que incluyen criterios más completos, con rangos sugeridos para la mayoría de las variables requeridas, así como recomendaciones generales para el diseño de este tipo de estructuras para tratamiento primario.

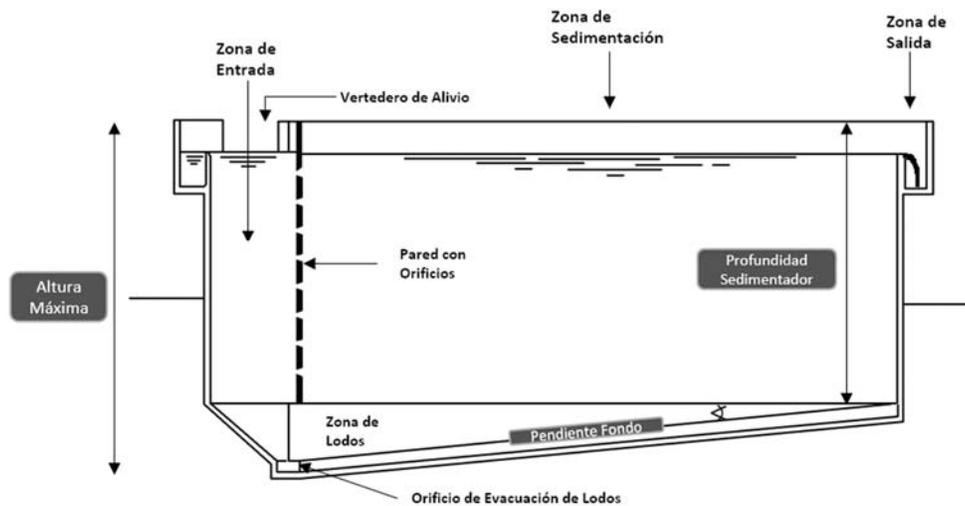
CEPIS (2005) propone un método de diseño para un sedimentador rectangular (Figura 2.2), apropiado para la remoción de partículas inferiores a 0.2 mm y superiores a 0.05 mm, con los criterios de diseño mostrados en la tabla 2.2.

**Tabla 2.2. Criterios para sedimentadores primarios. Elaboración propia adaptado de CEPIS, 2005.**

Variable	Criterio
Periodo de operación	24 hrs/día
Tiempo de retención	2 - 6 hrs.
Carga superficial	2 – 10 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> · día
Profundidad del sedimentador	1.5 - 2.5 m.
Relación largo-ancho	3 - 6
Relación largo-profundidad	5 - 20
Pendiente del fondo de la unidad	5 – 10 %
Velocidad en los orificios	≤ 0.15 m/s.
Angulo de aboquillado de los orificios	15%
Caudal por metro lineal de recolección en zona de salida	≤ 3 litros/seg.
Distancia entre la pantalla difusora y la entrada	0.7 – 1.00 m.

Como parte de este método de dimensionamiento, CEPIS (2005) también hace las siguientes sugerencias generales para el diseño de sedimentadores primarios:

- El periodo de diseño es de 8 a 16 años, obedeciendo a criterios económicos y técnicos.
- Se debe considerar un mínimo de dos unidades en paralelo para efectos de mantenimiento.
- Se debe ubicar la descarga de lodos en el primer tercio del tanque, ya que 80% del volumen de lodos se deposita en esa zona.
- Se debe determinar experimentalmente el volumen máximo de lodos que se va a producir.



**Figura 2.2. Sedimentador primario rectangular. Elaboración propia adaptado de CEPIS (2005).**

Por su parte, CONAGUA (2015) propone los criterios de diseño que incluyen las especificaciones de la tabla 2.3. Estos criterios incluyen rangos para las dimensiones del tanque y velocidades apropiadas para que se realice el proceso de sedimentación de manera adecuada. Además, hace las siguientes recomendaciones generales para el diseño y mantenimiento de las unidades de sedimentación:

- Si se tiene un ancho mayor a 6 metros, es preferible usar equipo de limpieza múltiple con varias tolvas de lodos.
- En aguas frías la carga superficial debe reducirse, ya que el aumento en la viscosidad del agua provoca un retardo en el asentamiento de las partículas y, por lo tanto, una reducción en la eficiencia del sedimentador.
- Para la zona de entrada, propone el uso de estructuras como vertedores, orificios sumergidos y válvulas de compuerta o pantallas perforadas.
- La tolva de lodos deberá estar ubicada en el centro del tanque.
- Usar tuberías de lodos con tramos cortos y con pozos de inspección en cada cambio de dirección.
- Para tanques de lodos de extracción manual, debe proveerse un almacenamiento suficiente para asegurar que no se produzca un aumento de sólidos suspendidos en otros tanques durante el proceso de extracción de un tanque de servicio.

La extracción de los lodos en este tipo de tanques deberá realizarse en periodos de flujo mínimo. Deberá dejarse el tanque fuera de servicio al menos una hora antes de realizar la extracción para permitir su sedimentación.

**Tabla 2.3. Criterios para sedimentadores primarios. Elaboración propia adaptado de CONAGUA, 2015.**

<b>Variable</b>	<b>Criterio</b>
Relación longitud: ancho	Entre 3:1 y 5:1
Profundidad de agua	> 2 m.
Longitud del tanque	< 90 m.
Ancho de la unidad	3 – 24 m.
Pendiente zona de lodos	1 – 2%
Tiempo de retención	2 – 3 horas
Velocidad de flujo	< 1.5 m/min.
Velocidad en canales de entrada	> 0.3 m/s
Distancia entre pantalla difusora y entrada	0.6 – 0.9 m.
Sumergencia de la pantalla difusora	46 – 61 cm.
Velocidad de flujo en orificios (zona de entrada)	3 – 9 m/min.
Profundidad tolva de lodos	≤ 3 m.
Pendientes laterales de tolva	Mayores a 1.7/1
Ancho del fondo de tolva	≤ 0.6 m.
Diámetro para tuberías de lodos	≥ 15 cm.
Velocidad de flujo en tuberías de lodos	1.2 m/s
<b>Para tanques con extracción manual de lodos</b>	
Pendiente al piso hacia canal longitudinal	2.5 %
Pendiente hacia el pozo de lodos en la zona de entrada	1 %
Frecuencia de extracción de lodos	No mayor a 8 horas
Grosor de pantalla de retención de espuma	0.3 – 0.6 m.
Distancia entre pantalla de retención y vertedor de salida	0.6 – 1.0 m.

## 2.5 Dimensionamiento

Para realizar el diseño integral de un sedimentador, los métodos de diseño de los diversos autores proponen diferentes maneras de estructurar las cuatro zonas que componen el tanque. Estos métodos utilizan diversas ecuaciones de diseño y rangos para las variables requeridas y condiciones de aceptación para el dimensionamiento resultante del sedimentador.

### 2.6 Zona de sedimentación

En el diseño propuesto por CEPIS (2005), la zona de sedimentación está compuesta por un canal rectangular. Para el cálculo del área superficial  $A_s$  [m<sup>2</sup>] del tanque, se relacionan el gasto de diseño  $Q$  [m<sup>3</sup>/s] y la velocidad de sedimentación  $V_s$  [m/s] de la unidad (Ecuación 1).

$$A_s = \frac{Q}{V_s} \quad (1)$$

La longitud  $L_2$  [m] de la zona de sedimentación [m] se calcula dividiendo el área superficial  $A_s$  obtenida entre un ancho de sedimentador  $B$  [m] propuesto (Ecuación 2).

$$L_2 = \frac{A_s}{B} \quad (2)$$

La distancia  $L_2$  [m] comprendida entre la entrada del tanque y la pantalla difusora debe estar entre 0.7 y 1.0 metros, como lo señala la tabla 2.2.

La longitud  $L$  [m] de la unidad se obtiene como la suma de las longitudes  $L_1$  y  $L_2$  (Ecuación 3).

$$L = L_1 + L_2 \quad (3)$$

Debe verificarse que la relación entre las dimensiones de largo y ancho ( $L/B$ ) esté entre los valores 3 y 6 (Tabla 2.2).

La profundidad  $H$  [m] deberá estar en el rango de 1.5 a 2.5 metros (Tabla 2.2). Se revisa también si el valor de la relación longitud - profundidad ( $L/H$ ) entra en el rango aceptable, que va de 5 a 20 (Tabla 2.2).

García-Pulido (1999) también propone el diseño de una zona de sedimentación de sección rectangular (Figura 2.3), que se calcula para un mínimo de dos módulos, con el fin de tener una unidad siempre disponible en caso de mantenimiento.

Para el cálculo del área superficial  $A_s$  [m] (Ecuación 4), se considera una velocidad de sedimentación  $v_s$  de  $2.8 \cdot 10^{-4}$  m/s (NOM-CCA-031-ECOL, 1993). El área superficial también se calcula para la carga superficial  $C_s$  [m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> · d] (Ecuación 5). Esta carga se propone para un tiempo de retención hidráulico  $t$  [horas] determinado mediante el criterio de la tabla 1.

$$A_s = \frac{Q_D}{v_s} \quad (4)$$

$$A_s = \frac{Q_D \cdot (86,400 \text{ s/d})}{C_s} \quad (5)$$

Será adoptado el valor de área superficial que resulte más grande, lo cual implica un factor de seguridad más alto (García-Pulido).

A partir del gasto de diseño  $Q_D$  y el tiempo de retención  $t$  determinados, se obtiene el volumen  $V$  [m<sup>3</sup>] del sedimentador (Ecuación 6).

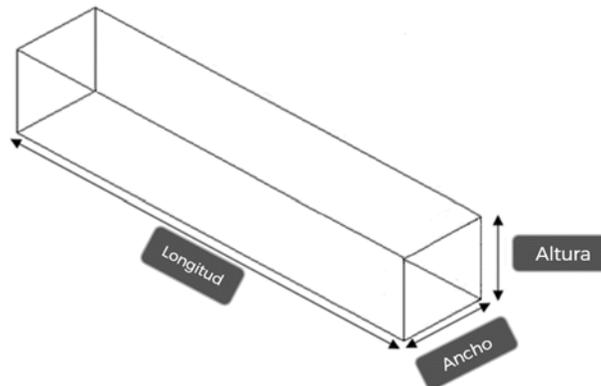
$$V = Q_D \cdot t \quad (6)$$

El tirante medio  $h_{MED}$  [m] se calcula mediante el volumen  $V$  del tanque y su área superficial  $A_s$  (Ecuación 7)

$$h_{MED} = \frac{V}{A_s} \quad (7)$$

La longitud  $L$  [m] se obtiene como la relación entre el área superficial  $A_s$  y el ancho  $a$  del tanque (Ecuación 8).

$$L = \frac{A_s}{a} \quad (8)$$



**Figura 2.3. Dimensiones del tanque sedimentador. Elaboración propia.**

CONAGUA (2015) realiza un diseño más detallado en materia hidráulica, con la obtención de la velocidad de arrastre y la velocidad horizontal a caudal máximo; variables que se comparan para determinar la aceptación del diseño obtenido.

El caudal máximo instantáneo  $Q_{max}$  [m<sup>3</sup>/s] se obtiene con la ecuación 9, mediante el coeficiente  $M$  de Harmon y el caudal medio  $Q_m$  [m<sup>3</sup>/s]

$$Q_{max} = MQ_m \quad (9)$$

El cálculo del área superficial  $A_s$  [ $m^2$ ] (Ecuación 10), requiere del caudal medio  $Q_m$  [ $m^3/s$ ] y la carga superficial  $Ha$  [ $m^3/m^2 \cdot d$ ].

$$A_s = \frac{Q_m}{H_a} \quad (10)$$

El ancho  $W$  [m] del tanque sedimentador se determina usando la ecuación 11, considerando los valores de área superficial  $A_s$  [ $m^2$ ] y de la relación largo – ancho  $S$ .

$$W = \sqrt{\frac{A_s}{S}} \quad (11)$$

La longitud  $L$  [m] del tanque sedimentador equivale a cinco veces el ancho  $W$  [m] del sedimentador (Ecuación 12).

$$L = 5W \quad (12)$$

El volumen  $V$  [ $m^3$ ] del sedimentador, se calcula como un producto del área superficial  $A_s$  [ $m^2$ ] y el tirante hidráulico  $h$  [m] (Ecuación 13).

$$V = A_s h$$

El tiempo de retención hidráulica  $T_{RH}$  [s], es obtenido mediante una relación entre el volumen  $V$  [ $m^3$ ] del sedimentador y el caudal Medio  $Q_m$  [ $m^3/s$ ] (Ecuación 14).

$$T_{RH} = \frac{V}{Q_m} \quad (14)$$

La velocidad de arrastre  $V_s$  [m/s], se determina mediante la fórmula de Camp-Shields (Ecuación 15). Para esta ecuación se requieren la constante de material unigranular  $k$  con un valor de 0.04, la densidad relativa  $s$  de las partículas, la aceleración  $g$  de la gravedad [ $m/s^2$ ], el diámetro de las partículas  $d$  [m] y el factor  $f$  de fricción de Darcy-Weisbach.

$$V_s = \left[ 8 \left( \frac{K(s-1)gd}{f} \right) \right]^{0.5} \quad (15)$$

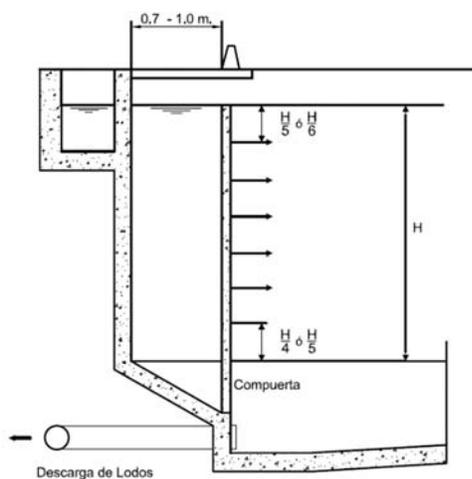
La velocidad horizontal a flujo máximo  $V_L$  [m/s] (Ecuación 16), es calculada como una relación entre el caudal máximo instantáneo  $Q_{máx}$  [ $m^3/s$ ] y el producto del número de tanques  $n$ , el tirante hidráulico  $h$  [m] y el ancho  $W$  [m] del tanque.

$$V_L = \frac{Q_{máx}}{h \cdot W \cdot n} \quad (16)$$

Para que el diseño del tanque rectangular sea aceptable, la velocidad de arrastre para el tipo de partícula considerado debe ser mayor que la velocidad horizontal a gasto máximo (CONAGUA, 2015).

## 2.7 Zona de entrada

Para la zona de entrada del tanque, CEPIS (2005) propone en su diseño una pantalla difusora con orificios (Figura 2.4).



**Figura 2.4. Dimensiones de la zona de entrada. Elaboración propia adaptado de CEPIS (2005).**

Para el dimensionamiento de la pantalla difusora, se retoma la distancia  $L_1$  [m] entre la entrada del sedimentador y la pantalla difusora (Figura 4), propuesta para el diseño de la zona de sedimentación.

La velocidad horizontal  $V_H$  [m/s], se calcula mediante el ancho  $B$  [m] y la profundidad  $H$  [m] del tanque y el gasto de diseño (Ecuación 17).

$$V_H = \frac{100 * Q}{B * H} \quad (17)$$

Se debe guardar la relación de la ecuación 18 entre las velocidades de flujo y las dimensiones de largo y altura (CEPIS, 2005).

$$\frac{L}{H} = \frac{V_H}{V_S} \quad (18)$$

El periodo de retención  $T_0$  [horas] se calcula con la ecuación 19. Este valor deberá entrar en el rango establecido de 2 a 6 horas (Tabla 2.2).

$$T_0 = \frac{V}{Q_m} \quad (19)$$

La altura máxima de la unidad  $H'$  [m] se obtiene con la ecuación 20, considerando la pendiente  $k$  que tendrá el fondo de la unidad, la cual debe tener valores entre 5 y 10% (Tabla 2.2), para facilitar el deslizamiento del sedimento.

$$H' = H + k(H) \quad (20)$$

Para el diseño de la pantalla difusora se asume una velocidad de paso  $V_o$  [m/s] entre los orificios, la cual no debe ser mayor a 0,15 m/s (Tabla 2.2) para no crear perturbaciones dentro de la zona de sedimentación.

El área total de los orificios  $A_o$  [m] se determina como una relación entre el gasto  $Q$  y la velocidad de paso en orificios  $V_o$  (Ecuación 21).

$$A_o = \frac{Q}{V_o} \quad (21)$$

Adoptando un diámetro  $d_o$  [m] y un área  $a_o$  [m] para los orificios, se determina el número de orificios  $n$  mediante una relación entre el área total  $A_o$  y el área  $a_o$  de cada orificio (Ecuación 22).

$$n = \frac{A_o}{a_o} \quad (22)$$

La porción  $h$  [m] de la pantalla difusora que tendrá orificios se determina con la ecuación 23.

$$h = H - 2/5 H \quad (23)$$

El número de columnas  $n_c$  de orificios para la pantalla (Figura 2.5) se calcula a partir del número total de orificios  $n$  y un número de filas  $n_f$  propuesto (Ecuación 24)

$$n_c = \frac{n}{n_f} \quad (24)$$

El espaciamiento  $a_1$  [m] entre filas, se determina con base en la porción total con orificios  $h$  (Ecuación 25).

$$a_1 = \frac{h}{n_f} \quad (25)$$

Con base en el número de columnas y el espaciamiento entre filas, el espaciamiento  $a_2$  [m] entre columnas se calcula con la ecuación 26.

$$a_2 = \frac{B - a_1(n_c - 1)}{2} \quad (26)$$

Los orificios más altos de la pared difusora deben estar a  $1/5$  o  $1/6$  de la altura  $H$  a partir de la superficie del agua y los más bajos entre  $1/4$  ó  $1/5$  de la altura  $H$  a partir de la superficie del fondo (Figuras 2.4 y 2.5). Como parte del proceso constructivo, se deben aboquillar los orificios en un ángulo de  $15^\circ$  en el sentido del flujo como se muestra en la figura 2.6 (CEPIS, 2005).

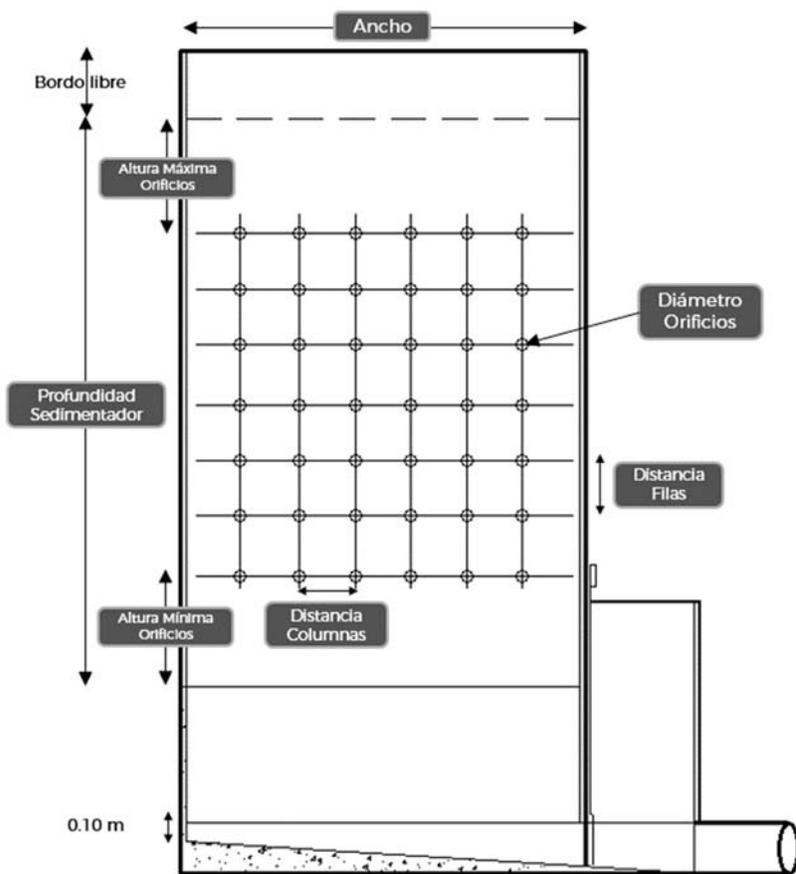


Figura 2.5. Orificios de la pantalla difusora. Elaboración propia adaptado de CEPIS (2005).

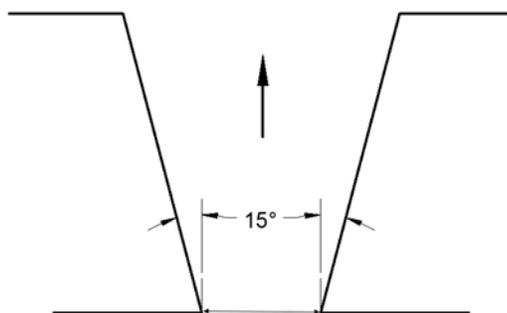


Figura 2.6. Detalle de orificios aboquillados. Elaboración propia adaptado de CEPIS (2005).

También puede considerarse el uso de una canaleta con orificios (Figura 2.7) como zona de entrada. García-Pulido (1999) realiza el diseño de esta estructura partiendo de la pérdida de carga  $\Delta h$  [m] en la entrada de la canaleta. Esta pérdida se obtiene con la ecuación 27 (Gardea, 1999).

$$\Delta h = \frac{Q_M^2 n^2 L}{A_T^2 R_H^{4/3}} \quad (27)$$

El caudal en los orificios de la canaleta se calcula con la ecuación 28 (Gardea, 1999), mediante el diámetro [pulgadas] y área  $A$  [m<sup>2</sup>] de los orificios propuestos, el coeficiente de descarga  $C_d$  para orificios de 0.7 (García-Pulido), la altura  $h$  a la que se colocarán los orificios y la aceleración  $g$  de la gravedad [9.81 m/s<sup>2</sup>].

$$q = C_d A \sqrt{2gh} \quad (28)$$

El número de orificios se calcula por medio de una relación entre el caudal medio  $Q_M$  y el caudal en cada orificio (Ecuación 29).

$$n = \frac{Q_M}{q} \quad (29)$$

La separación de orificios  $w$  se obtiene con la ecuación 30, considerando la longitud de la canaleta  $x$  y el número de orificios  $n$ .

$$w = 1.27 (n) + x(n - 1) \quad (30)$$

Los orificios se ubicarán a una altura de 0.05 m (Figura 2.7).

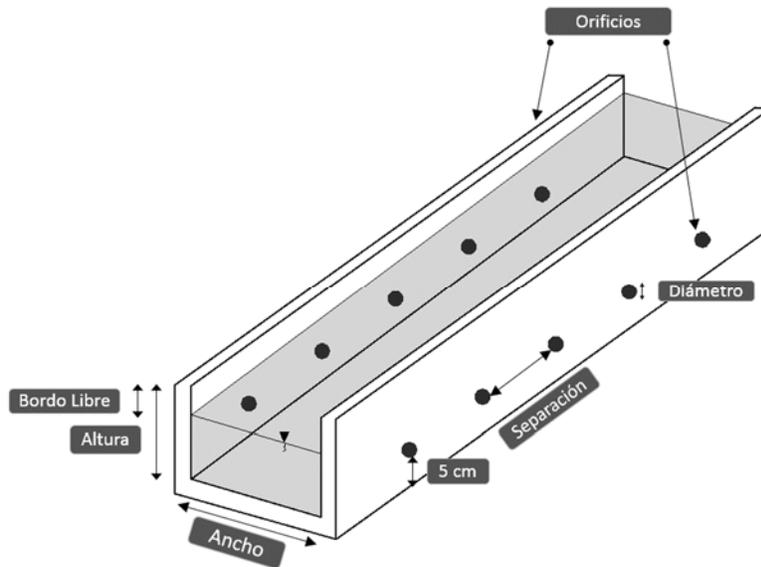


Figura 2.7. Zona de entrada (Canaleta con Orificios). Elaboración propia

## 2.8 Zona de salida.

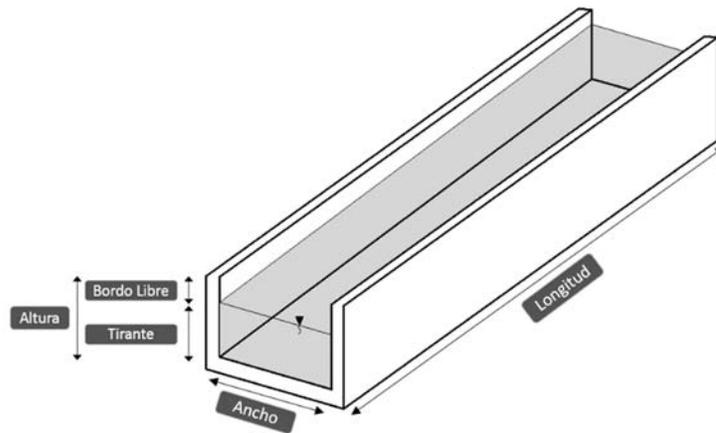
García-Pulido (1999) utiliza en su diseño una canaleta vertedora como estructura para la zona de salida (Figura 2.8). La longitud  $L_V$  [m] de la canaleta se calcula mediante la ecuación 31. La carga de vertido  $C_V$  es determinada con base en el criterio de la tabla 1.

$$L_V = \frac{Q_M \cdot (86,400 \text{ s/d})}{C_V} \quad (31)$$

El tirante  $hc$  [m] (Ecuación 32) de la canaleta se obtiene con la ecuación 32, donde  $Q_M$  es el gasto de diseño,  $g$  la aceleración de la gravedad y  $b$  es un ancho propuesto para la canaleta vertedora.

$$hc = \sqrt[3]{\frac{Q_M^2}{g b^2}} \quad (32)$$

La canaleta deberá tener una altura suficiente para albergar el tirante calculado y el bordo libre que se considere.



**Figura 2.8. Zona de salida (Canaleta Vertedora). Elaboración propia.**

Para el uso de una estructura más simple, como un vertedor de salida, CEPIS (2005) recomienda que la longitud de cresta  $H2$  [m] sea igual al ancho de la unidad. Se obtiene la altura de agua sobre el vertedor con la ecuación 33, mediante el gasto de diseño  $Q$  y el ancho  $B$ .

$$H2 = \left[ \frac{Q}{1.84B} \right]^{2/3} \quad (33)$$

## 2.9 Zona de lodos.

García-Pulido (1999) recomienda el uso de tolvas para la recolección de lodos (Figura 2.9), con un número de tolvas igual al número de unidades de sedimentación. Se determina la carga total  $C_T$  [mg/l] que recibirán mediante la ecuación 34.

$$C_T = \left[ (1 - C_X) + \frac{1}{v_s} \int_0^{C_X} vdc \right] CO \quad (34)$$

Siendo en esta ecuación  $(1 - C_X)$  el coeficiente de remoción, que debe estar en un rango de 50 a 70% (Allende-Abreu, 2000),  $\frac{1}{v_s} \int_0^{C_X} vdc$  es una constante que tendrá un valor de 0.2, típico en aguas residuales municipales (García-Pulido), y  $CO$  es la carga orgánica del efluente a tratar, con un valor de 200 mg/l recomendado por la NOM-CCA-031-ECOL (1993).

El volumen de lodos  $V$  [m<sup>3</sup>] se calcula mediante la ecuación 35. García-Pulido (1999) recomienda un tiempo  $t$  de remoción de los lodos de 2 días, mientras que el peso volumétrico de los lodos  $\gamma$  tiene un valor típico de 1,020 kg/m<sup>3</sup> (NOM-CCA-031-ECOL, 1993).

$$V = \frac{C_T Q_D t}{\gamma} \quad (35)$$

La forma de la tolva se determina proponiendo la dimensión superior  $D_{Sup}$  [m] e inferior  $D_{Inf}$  [m] y usando la ecuación 36 para obtener la altura  $h$  [m].

$$h = \frac{3V}{D_{Sup}^2 + D_{Inf}^2 + \sqrt{D_{Sup}^2 \cdot D_{Inf}^2}} \quad (36)$$

Debido a que se tienen un mínimo de dos unidades de sedimentación, se tendrán también un mínimo de dos tolvas para lodos (CEPIS, 2005).

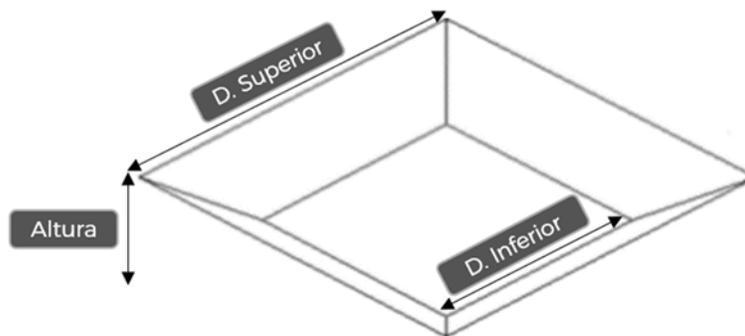


Figura 2.9. Tolvas para lodos. Elaboración propia.

## 2.10 Sistemas de soporte de decisiones

Un sistema de soporte de decisiones (SSD) es un sistema de información computarizado interactivo, flexible y adaptable que utiliza reglas de decisión, modelos y base de modelos junto con una base de datos integral y las propias ideas del tomador de decisiones, que llevan a decisiones específicas e implementables para resolver problemas que no serían susceptibles de modelos de gestión de la ciencia per se. Por lo tanto, un SSD apoya la toma de decisiones complejas y aumenta su efectividad (Janakiraman y Sarukesi, 2006).

Existen tres tipos de problemas que pueden ser resueltos por un SSD, clasificados con base en su grado de estructura (Turban et al., 2005). El primero de ellos se enfoca a decisiones para procesos específicos y es conocido como de decisión estructurada. Los problemas que tienen un mayor grado de libertad e incertidumbre se definen como de decisión no estructurada, ya que solo proveen una parte de la información requerida para la toma de decisión. Los problemas en los que existen componentes estructurados y no estructurados se denominan de decisión semiestructurada (Ruiz et al., 2009).

Los sistemas de soporte de decisiones tienen una serie de componentes teóricos. Gachet (2004) cita los cinco componentes de un SSD definidos por Hättenschwiler (1999):

- Usuarios con roles o funciones distintos dentro del proceso de toma de decisiones (tomadores de decisiones, consejeros, expertos de dominio, expertos en el sistema, recolectores de datos).
- Un contexto de decisión específico y definible.
- Un sistema objetivo que describa la mayoría de las preferencias
- Una base de conocimiento compuesta de fuentes de datos externas, bases de datos de conocimiento, modelos y métodos matemáticos, motores de búsqueda, programas administrativos y de reportes.
- Un ambiente de trabajo para la preparación, análisis y documentación de alternativas de decisión.

Los sistemas de soporte de decisiones tienen diversas aplicaciones para casos de uso específicos. Para Gachet (2004), es claro que los SSD son aplicables en un entorno con fundaciones multidisciplinarias, incluyendo (pero no exclusivamente) la investigación de bases de datos, inteligencia artificial, interacción humano-computadora, métodos de simulación, ingeniería de software y telecomunicaciones.

Algunos ejemplos del uso de los sistemas de soporte de decisiones se enlistan en la tabla 4. Estos incluyen la asistencia o automatización de diversos procesos como parte de las actividades llevadas a cabo en las áreas de investigación, industria y de servicios.

**Tabla 2.4. Ejemplos de aplicaciones de sistemas de soporte de decisiones (Janakiraman y Sarukesi, 2006).**

<b>División</b>	<b>Actividad</b>	<b>Modelos utilizados</b>
<b>Contabilidad</b>	Asignación de fondos	Programación lineal
<b>Inventarios</b>	Cantidad de orden económica y nivel de reorden Simulación de inventario	Inventario
<b>Finanzas</b>	Flujo de efectivo	Simulación
<b>Producción</b>	Secuenciación de empleos Simulación de manufactura	PERT/CPM Simulación
<b>Investigación y Desarrollo</b>	Investigación de productos Asignación de fondos	PERT/CPM y simulación Programación lineal
<b>Control de Calidad</b>	Aseguramiento de la calidad	Control de calidad estadístico
<b>Marketing</b>	Análisis de competencia Determinación de presupuesto para publicidad	Teoría de juegos Programación lineal/ Teoría de juegos
<b>Planeación</b>	Presupuesto Expansión	Programación lineal PERT/CPM y simulación
<b>Mantenimiento</b>	Mantenimiento de equipo	Simulación y modelos estadísticos
<b>Personal</b>	Manejo del trabajo	Teoría de juegos
<b>Compras</b>	Cantidad por adquirir	Programación lineal

### **III. Metodología**

Con el objeto de asistir a los profesionales de la ingeniería, se desarrolla para este proyecto un sistema de soporte de decisiones (SSD) en el diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para la fase de tratamiento primario. Además, con el objeto de facilitar el acceso al sistema, evitando la instalación de un paquete, es implementado bajo un diseño asistido por Web (DAW).

La metodología para el desarrollo del proyecto sigue cuatro etapas que se muestran en la Figura 3.1. La primera etapa consiste tanto en la representación conceptual de los principales elementos que componen una PTAR, como en sus relaciones causales. Para ello, se definen los casos más comunes que se presentan, así como los datos básicos necesarios para el diseño. Es decir, en el caso del proceso de tratamiento primario se identifican las variables de entrada y salida principales.

<p>1</p> <p><b>Modelado Conceptual de los Fenómenos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Identificación de las variables y la manera en que se interrelacionan en una PTAR</li> </ul>	<p>2</p> <p><b>Ingeniería de Requerimientos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Modelo conceptual del sistema</li> <li>Diseño del sistema</li> </ul>	<p>3</p> <p><b>Desarrollo de Funciones y Scripts</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Construcción de algoritmos</li> </ul>	<p>4</p> <p><b>Pruebas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Diseño de interfaz</li> <li>Casos de estudio</li> <li>Discusión</li> </ul>
---	---	---	--

**Figura 3.1. Metodología para el desarrollo de una aplicación web para el diseño de una PTAR. Basado en Fonseca *et al.* (2017)**

La tabla 3.1 representa los principales procesos asociados al tratamiento primario. En ella, es posible observar que, por un lado, los procesos de sedimentación y el dimensionamiento de la zona de entrada requieren el mayor número de variables de entrada, mientras que el cálculo de las zonas de entrada y de salida proporciona mayor número de variables de salida.

**Tabla 3.1. Inputs y outputs de los procesos del tratamiento primario de una PTAR.**

Proceso	Descripción	Características de Implementación	Outputs	Inputs	Fuentes
Sedimentación	Operación mediante la cual se obtiene la clarificación del medio dispersante y la densificación de la parte dispersa. Es una operación obligada en cualquier planta.	Se pueden considerar tres tipos de sedimentación: discreta, con floculación y por zonas.  Se implementan dependiendo de la naturaleza de los sólidos presentes en suspensión.	As	Qd, Vs, Cs, tr	García-Pulido (1999)
			V	Qd, tr	
			H <sub>Med</sub>	V, As	Ramalho (1990)
			L	As, Ancho	Metcalf & Eddy (2003)
Zona de entrada	Tiene la finalidad de ingresar el agua residual de la forma más uniforme posible.	La entrada de residual a estas estructuras se realiza con una canaleta que se encuentra situada transversalmente en el extremo inicial del tanque o con una pantalla difusora.	Δh	Qm, n, L, At, R <sub>H</sub>	García-Pulido (1999)
			m	Q <sub>n</sub> , q <sub>0</sub>	
			Ancho, altura y bordo libre	Δh	Metcalf & Eddy (2003)
			Q	Cd, A, g, h	
			Ø	q	
			N	Qm, q	
			X	W, N	

Zona de lodos	Zona reservada para la retirada de los lodos.	Se componen de tolvas para la acumulación y extracción de los lodos generados.	VI	$C_T$ $Q_d, \tau, \gamma$	García-Pulido (1999)
			Altura, ancho, largo)	$V_L, A_{Sup}, A_{Inf}$	Ramallo (1990) Metcalf & Eddy (2003)
Zona de salida	Análogamente a la zona de entrada, en la zona de salida también se requiere tener un dispositivo de recolección que pueda extraer el agua de forma uniforme, con el fin de evitar que las corrientes de agua puedan arrastrar consigo la materia ya sedimentada.	Se han ideado diferentes tipos de salida, tales como los vertederos de reboso, canaletas de reboso y los orificios.	Lv	$Q_m, C_v$	García-Pulido (1999)
			Posición y dimensiones de la canaleta	Lv	Metcalf & Eddy (2003)
		Las canaletas de reboso se eligen con el propósito de disminuir la carga lineal sobre ellas.	hc	$Q_m, g, b$	Arboleda (1972)

Donde: Área superficial ( $A_s$ ), Caudal de diseño ( $Q_d$ ), Velocidad de Sedimentación ( $V_s$ ), Carga superficial ( $C_s$ ), Tiempo de retención ( $\tau$ ), Volumen del sedimentador ( $V$ ), Tirante medio ( $H_{Med}$ ), Longitud ( $L$ ), Pérdida de carga canaleta ( $\Delta_h$ ), Relación de caudales en orificios ( $m$ ), Caudal en el último orificio ( $q_n$ ), Caudal en el primer orificio ( $q_0$ ), Caudal medio ( $Q_m$ ), Coeficiente Rugosidad Manning ( $n$ ), Área transversal ( $A_T$ ), Radio Hidráulico ( $R_h$ ), Carga en orificios de la canaleta ( $q$ ), Coeficiente de descarga ( $C_d$ ), Área orificios ( $A$ ), Aceleración de la gravedad ( $g$ ), Altura orificios ( $h$ ), Diámetro de orificios ( $\emptyset$ ), Número de orificios ( $N$ ), Separación entre orificios ( $X$ ), Ancho total canaleta ( $W$ ), Volumen de lodos ( $V_L$ ), Carga total ( $C_T$ ), Peso específico lodos ( $\gamma$ ), Longitud de la canaleta ( $L_v$ ), Carga del vertedor ( $C_v$ ), Área superior e inferior ( $A_{Sup}, A_{Inf}$ ), Tirante de la canaleta ( $hc$ ), Ancho de la canaleta ( $b$ ).

El objetivo de la segunda etapa es diseñar la arquitectura y el funcionamiento del SSD. Para ello se pueden seguir dos fases: estrategia de alcance y fase de mapeo (Bagriyanik y Karahoca, 2016)

En la estrategia de alcance se determinan los requerimientos funcionales del usuario, teniendo como criterio principal para el diseño, la facilidad de uso. Es decir, que la aplicación sea amigable con el usuario. Además, se procura que la información requerida para su funcionamiento sea la menor posible.

En esta fase también se determinan los distintos procesos del tratamiento primario ofrecidos al usuario por la aplicación con base en los criterios de selección de procesos para la primera versión del SSD. En primera instancia, los criterios están basados en trenes de procesos de mayor frecuencia de uso y generalización de su uso para mayor variedad de aguas residuales.

En la fase de mapeo se representan las clases de objetos y las relaciones entre ellos mediante diagramas de interacción (Bagriyanik y Karahoca, 2016). En estos, se emplea la terminología que es generalmente usada para describir las clases de requerimiento en el campo de desarrollo de software (Bagriyanik y Karahoca, 2016).

Además, en esta etapa se elaboran diagramas de agregación y secuencia (Bagriyanik y Karahoca, 2016), creados en un lenguaje UML (Unified Modeling Language). Estos diagramas muestran la estructura estática y la relación dinámica, respectivamente, de los elementos de la estructura del SSD.

En la tercera etapa de la metodología son codificados los scripts y procedimientos matemáticos del diseño de cada uno de los procesos considerados en el tren de tratamiento. La mayoría de los cálculos que se realizan requieren relativamente pocos recursos computacionales para su obtención, permitiendo considerar ejecuciones en tiempo real. Por ejemplo, en el proceso de sedimentación, los cálculos de área superficial, volumen del sedimentador, tirante medio y longitud, requieren solo de operaciones sobre las variables mencionadas en la tabla 1. Lo mismo sucede para el dimensionamiento de la zona de entrada y la de salida.

Algunos de los inputs requeridos, tales como coeficientes hidráulicos o datos obtenidos de tablas, son elegidos por el usuario mediante la asistencia de la aplicación, que ofrece criterios o rangos preestablecidos. Lo anterior, requiere la creación de bases de datos que contengan esta información.

Para esta implementación, es posible el uso de JavaScript (JS), que es un lenguaje ligero e interpretado, orientado a objetos con funciones de primera clase, más conocido como el lenguaje de script para páginas web, pero también usado en muchos entornos sin navegador. Es un lenguaje script multi-paradigma, basado en prototipos, dinámico, soporta estilos de programación funcional, orientada a objetos e imperativa (MDN, 2018).

La programación de los scripts en lenguaje JS y las librerías derivadas de este, se realiza dependiendo de las tareas que requiera el proyecto. Cambios de apariencia, lógica en el comportamiento de elementos dinámicos, asignación de variables para inputs y outputs, así como los cálculos requeridos para los mismos, son algunas de las actividades para las cuales se programan scripts.

En esta etapa también se define el tipo de tecnología web sobre la cual estará soportado el proyecto. Para este proyecto se elige JSP (JavaServer Pages Technology), una herramienta que combina HTML (HyperText Markup Language) y XML (eXtensible Markup Language) con tecnologías Java que permiten la creación de contenido web dinámico y multiplataforma, mediante un método altamente escalable (Oracle, 2018).

Para realizar el desarrollo de software, es importante elegir un Entorno de Desarrollo Integrado (IDE), el cual es una aplicación visual que sirve para la construcción de aplicaciones a partir de componentes (Ramos y Lozano, 2000). El IDE que se elija deberá tener las características y herramientas necesarias para el tipo de proyecto a desarrollar. Se opta por el uso de Eclipse, una plataforma de desarrollo de código abierto, la cual proporciona un marco de trabajo para la creación de software de diversos indoles (IBM, 2018). Una de las ventajas que se obtienen al trabajar con

Eclipse, es la gran cantidad de complementos que hay disponibles para esta plataforma, lo cual nos permite adaptar el entorno al tipo de software que se quiere desarrollar.

Además, un servidor de aplicaciones debe ser seleccionado para alojar el proyecto. Se implementa inicialmente en este caso por medio de Glassfish, un servidor de aplicaciones de código abierto que se caracteriza por su ligereza y modularidad (Oracle, 2017). Es posible migrar el proyecto a algún otro servidor mediante el uso de Tomcat, un contenedor de servlets que puede utilizarse en proyectos de gran escala (Apache Software Foundation, 2018), en conjunción con el servidor al que se desea migrar.

En la cuarta etapa se propone el diseño de la interfaz. En primera instancia es considerado el uso de HTML (HyperText Markup Language), el cual es el elemento de construcción más básico de una página web y se usa para crear y representar visualmente una página web. Determina el contenido de la página web, pero no su funcionalidad. Otras tecnologías distintas de HTML son usadas, como CSS (Cascading Style Sheets), que se utiliza para describir la apariencia/presentación de una página web. (MDN, 2018).

Como punto de partida para el diseño de la interfaz del proyecto, se utiliza un framework web, siendo Bootstrap el framework más popular de HTML, CSS y JavaScript para desarrollar proyectos receptivos y móviles en la web (Otto y Thornton, 2018). Este framework contiene componentes comúnmente usados para la creación de aplicaciones web, tales como barras de navegación, botones, etiquetas, cuadros de alerta, etc.

Bootstrap también ofrece plantillas de estilo con arreglos predefinidos para diversos usos. En el caso particular de este proyecto se considera el uso de Offcanvas, que es una plantilla que permite presentar los diversos componentes del proyecto de manera sencilla e intuitiva en un menú deslizante.

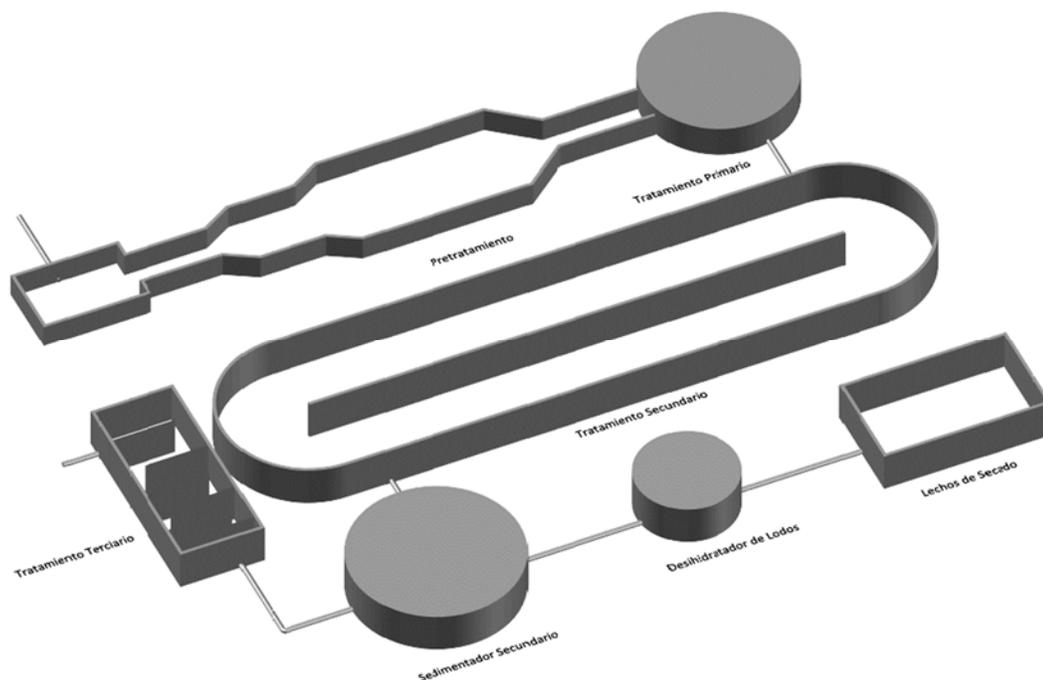
Se programan también funcionalidades adicionales que facilitan el manejo de los datos resultantes por el usuario, mediante funciones basadas en el lenguaje JavaScript. Estas incluyen la opción de exportar los datos de diseño y los esquemas de dimensionamiento a un archivo PDF. Se escogió el formato PDF por ser un formato digital de estándar abierto, el cual permite a los usuarios el acceso e intercambio de los documentos generados independientemente del entorno en el que se trabaje (ISO, 2018).

También se ofrece la opción de almacenar en una base de datos el diseño creado, con perfiles individuales donde el usuario puede almacenar sus diseños para modificarlos en sesiones posteriores. Esta funcionalidad se implementa mediante MySQL, un sistema de base de datos de uso libre que utiliza el estándar SQL, ideal para aplicaciones pequeñas y grandes (w3, 2018). Actualmente, MySQL es considerado como el software de código abierto para manejo de base datos más popular del mundo (DB-Engines, 2018).

Además, se implementa la metodología para un caso de estudio. Por ejemplo, una planta piloto para la comunidad de San Cayetano Morelos, que cuenta con una población de 5,462 usuarios y una descarga de 6.64 litros por segundo. Con ello, será posible discutir y validar los parámetros de diseño obtenidos desde la aplicación con la literatura asociada.

#### IV. Resultados y discusión

Con base en el primer objetivo y la primera etapa de la metodología, se elaboró un modelo conceptual de una planta de tratamiento de aguas residuales (Figura 4.1). En él, se identificaron las relaciones entre las variables involucradas en el diseño de la fase de tratamiento primario (Figura 4.2). Por ejemplo, el caudal medio es una variable que se obtiene en el diseño de zona de sedimentación y subsecuentemente es relevante para determinar las dimensiones de las zonas de entrada y de salida.



**Figura 4.1. Modelo de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. Elaboración Propia.**

A partir de estos modelos, se definió el alcance del sistema informático propuesto como parte de la segunda etapa de la metodología, denominada ingeniería de requerimientos. Se implementó un diseño para el tratamiento primario por medio de tanques de sedimentación de sección rectangular. Para el diseño de los tanques, se ofrecen al usuario dos alternativas para la composición de las estructuras que conforman las zonas de entrada y salida de un tanque sedimentador.

En la primera opción se realiza un diseño compuesto por una pantalla difusora como estructura para la zona de entrada y con un vertedor en la zona de salida. En la segunda alternativa, el sedimentador se diseña con una canaleta con orificios como zona de entrada y una canaleta vertedora para la zona de salida.

En el modelo conceptual del SSD (Figura 4.3) pueden observarse las interacciones que se producen entre los componentes del sistema, como la entrada y salida de datos. Este modelo está compuesto por los elementos funcionales del sistema: el usuario, el servidor en el cual está alojada la aplicación, el entorno Java del sistema, los scripts Js que ejecutan las funciones y la base de datos.

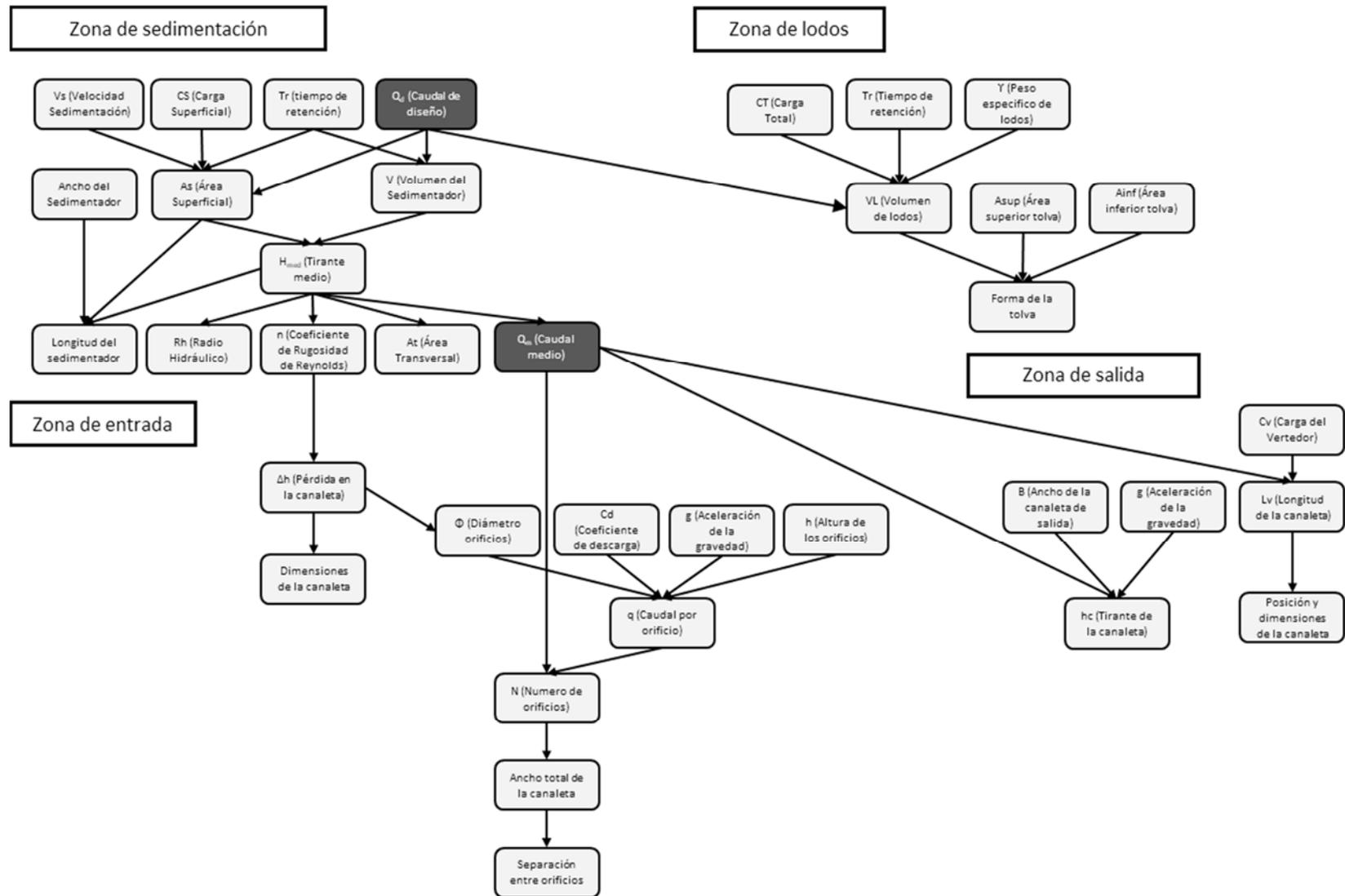
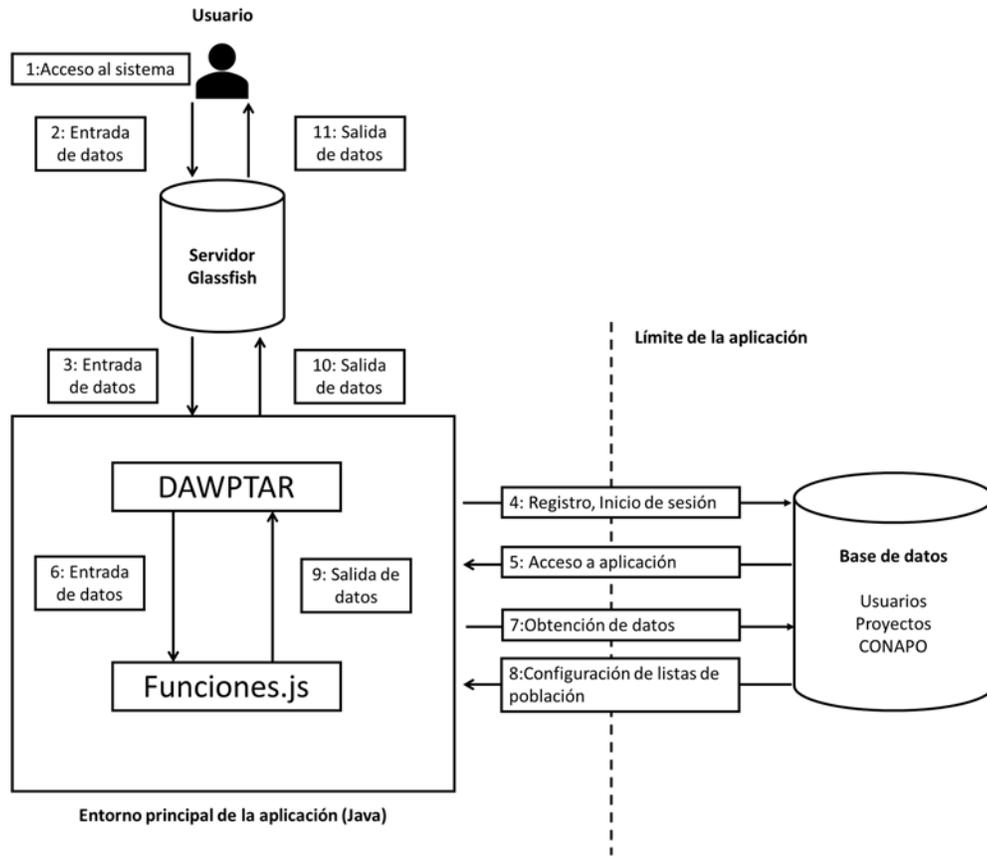


Figura 4.2. Modelo conceptual del diseño de tratamiento primario de una PTAR. Elaboración propia.



**Figura 4.3. Diagrama de interacción del SSD. Elaboración propia.**

La base de datos del sistema contiene componentes adoptados como la base de datos de poblaciones y caudales de CONAPO (2017). También contiene la base de usuarios, la cual almacena los perfiles creados mediante un e-mail y que están protegidos por contraseña. Esta base de usuarios se complementa con la base de proyectos, donde el usuario puede almacenar los diseños que ha creado asociándolos a su perfil para acceder a ellos posteriormente, para su consulta o modificación.

A partir del modelo del SSD, se identificaron los atributos y métodos de los objetos vinculados al sistema, que se representan mediante un diagrama UML (Unified Modeling Language) de clases (Figura 4.4). Las funciones desarrolladas específicamente para el diseño de la fase de tratamiento primario (etapa 3 de metodología) se almacenan en los elementos denotados como “js” (derivado del lenguaje de programación asociado) contenidos en la carpeta “res” [Anexo 1].

La elaboración de funciones y scripts de cálculo se realizó a partir del proceso de desarrollo, descrito en la tercera etapa de la metodología del proyecto, programando en cada función las ecuaciones necesarias para el cálculo de las variables, así como los rangos aceptables para cada una de ellas. También se utilizaron scripts para la presentación de las etapas de diseño y para realizar la importación del diseño a un archivo.

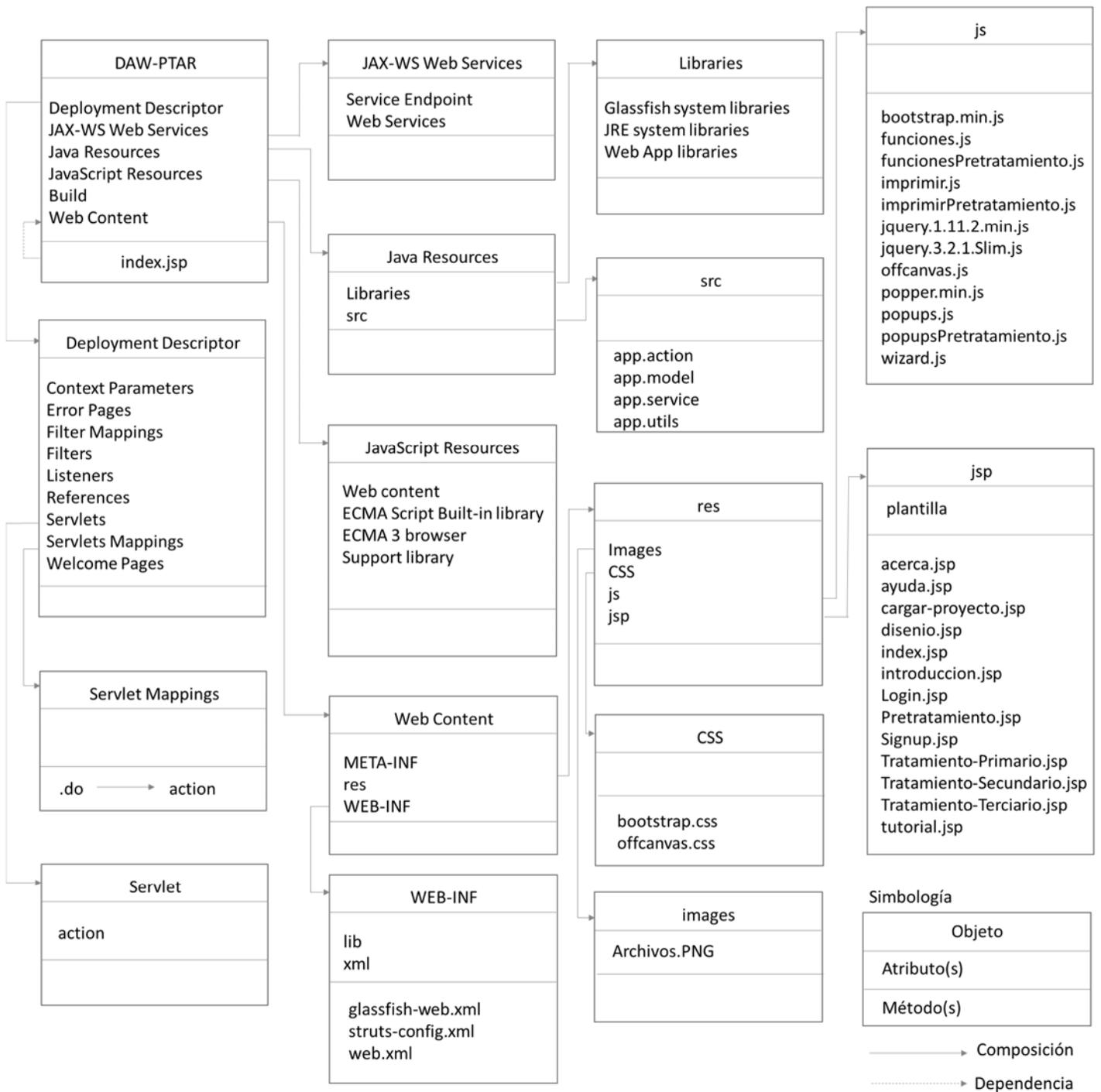


Figura 4.4. Diagrama UML de clases del SSD. Elaboración propia

En total fueron desarrolladas 206 funciones en lenguaje JavaScript. De estas, 98 funciones se programaron para la alternativa de diseño compuesta por pantalla difusora y vertedor de salida y 108 para el diseño con canaleta con orificios y canaleta vertedora. Para la funcionalidad adicional del SSD, se crearon 4 funciones para realizar el diseño de impresión y 2 funciones para el diseño por pasos. De manera adicional, se importaron 114 librerías para el desarrollo en Eclipse: 74 para servidor, 24 librerías Java, 16 librerías para JavaScript, además de las librerías para la base de datos. [Anexo 2].

La secuencia de ejecución de los objetos (Figura 4.5) se muestra a través de un diagrama UML, en el cual puede observarse la interacción constante entre `primario.jsp` y `funciones.js`, debido a que estos componentes proporcionan en cada paso de diseño las variables de entrada y salida, así como su validación con los criterios de diseño mencionados en el marco teórico (Tablas 2.2 y 2.3).

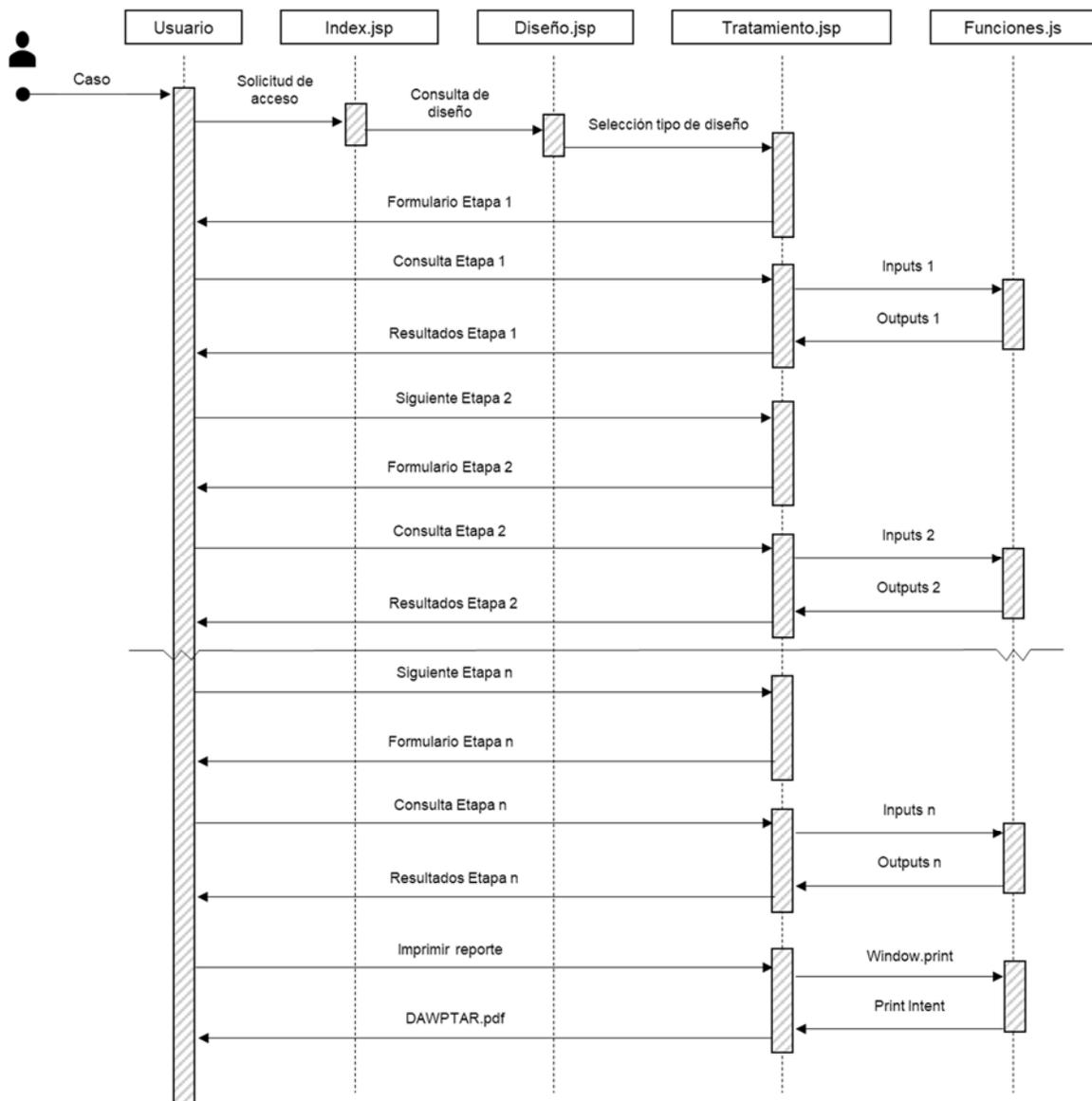


Figura 4.5. Diagrama UML de secuencia del SSD. Elaboración propia.

El diseño de la interfaz se realizó siguiendo el proceso descrito en la etapa 4 de metodología, con el objetivo primordial de hacer el SSD simple de entender y utilizar para cualquier usuario. La información se presenta de forma intuitiva y breve mediante elementos comúnmente usados en software, como son botones de información y casillas para formularios, de manera que a los usuarios les resulten familiares.

Para atender a usuarios menos experimentados, se incluye un tutorial breve (Figura 4.6). En este, se presentan al usuario ejemplos animados de la operación del sistema y descripciones de los elementos que componen la interfaz.



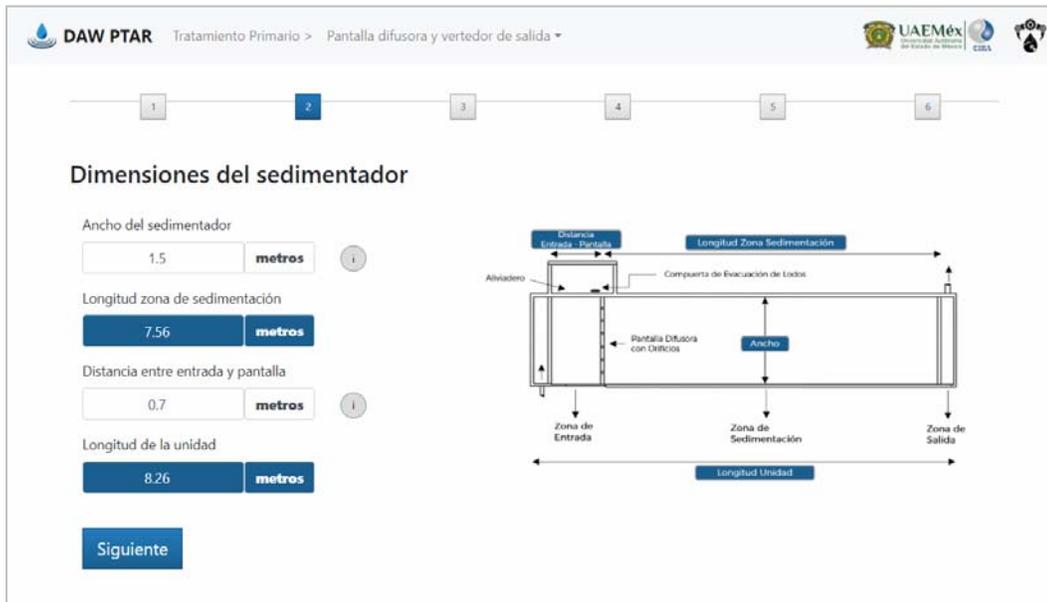
**Figura 4.6. Tutorial de uso del SSD**

Los tipos de diseño se presentan en un menú principal con información breve acerca de cada uno de ellos, con la intención de facilitar la elección por parte del usuario (Figura 4.7). La interfaz de diseño se implementó mediante un diseño por pasos (Figura 4.8), en el cual el usuario ingresa los datos requeridos para cada etapa de diseño, revisa los criterios establecidos, valida la información en los casos que sea requerido y finalmente, accede a la siguiente etapa de diseño.



**Figura 4.7. Menú del SSD para elección de fase de diseño.**

El diseño por pasos permite al usuario identificar rápidamente las variables en cada etapa, apoyado además por los diagramas mostrados, que destacan las dimensiones del tanque que se están diseñando en cada paso (Figura 4.8). Esta separación por pasos también es conveniente para acceder de manera rápida a cada una de las etapas, a través del menú superior, en caso de que el usuario requiera realizar alguna modificación posterior.



**Figura 4.8. Interfaz de diseño por pasos del SSD.**

Las casillas de la interfaz tienen una apariencia distinta según su función (Figura 4.9). Las casillas de color blanco, con una leyenda indicando la acción a realizar, se destinan para el ingreso de información, mientras que las casillas que se usan para la salida de datos se muestran en color azul. Esto permite al usuario identificar de manera intuitiva los datos de diseño que debe ingresar y los datos de salida que obtiene a partir de ellos.

Los criterios de diseño son presentados al usuario por medio de botones de información (Figura 4.10), los cuales al presionarlos muestran en un cuadro de texto la información relevante para la elección de la variable, así como la fuente de la que se obtuvo el criterio en caso de que el usuario desee consultarla.



**Figura 4.9. Casillas de entrada y salida de datos.**

## Zona de lodos

Carga orgánica

200

mg/l

Coefficiente de remoción

Completar

%

Se recomiendan porcentajes de remoción entre 50% y 70%.

Allende-Abreu, I. 2000. Diseño Hidráulico de Plantas de tratamiento para Aguas Residuales. ISPJAE.

i

**Figura 4.10. Botones de información.**

Las casillas para ingreso de información (Figura 4.11) cuentan con elementos adicionales para asistir la decisión del usuario. Se incorporan botones que aumentan o disminuyen el valor ingresado en intervalos que van desde el valor mínimo recomendado hasta el máximo. Mediante el uso de los atributos de HTML5 `<input max>` e `<input min>`, las casillas tienen también la funcionalidad de mostrar un mensaje al usuario en caso de que los valores ingresados estén fuera del rango que señalan los criterios.

## Área superficial

Caudal medio

0.01

+

-

m<sup>3</sup>/s

Número de unidades

1

+

-

unidades

i

Por favor, selecciona un valor mayor que 2.

Caudal de diseño

0.01

m<sup>3</sup>/s

## Área superficial

Caudal medio

0.01

+

-

m<sup>3</sup>/s

Número de unidades

4

+

-

unidades

i

Caudal de diseño

0.005

m<sup>3</sup>/s

Se consideran mínimo dos unidades de sedimentación para fines de mantenimiento.

**Figura 4.11. Casillas para ingreso de información.**

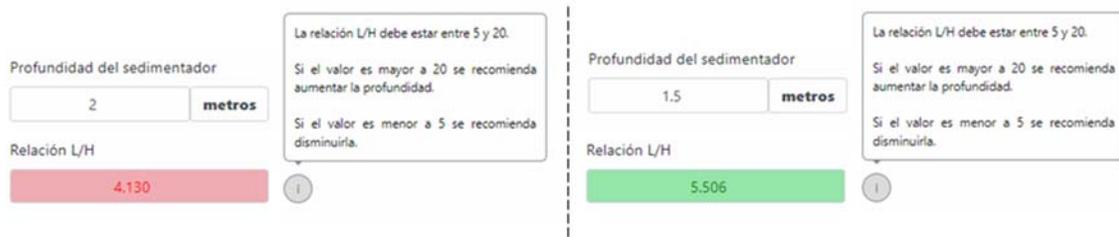
La funcionalidad de las casillas está sujeta al soporte de HTML5 del navegador web en el que se accede a la aplicación. Versiones recientes de los navegadores web más comúnmente utilizados ofrecen soporte completo para estas características (Tabla 4.1).

**Tabla 4.1. Versiones de navegadores web con soporte para <input max> e <input min> (W3, 2018).**

Navegador	Chrome	Internet Explorer/ Edge	Firefox	Safari	Opera
Versión	5.0	10.0	16.0	5.1	10.6

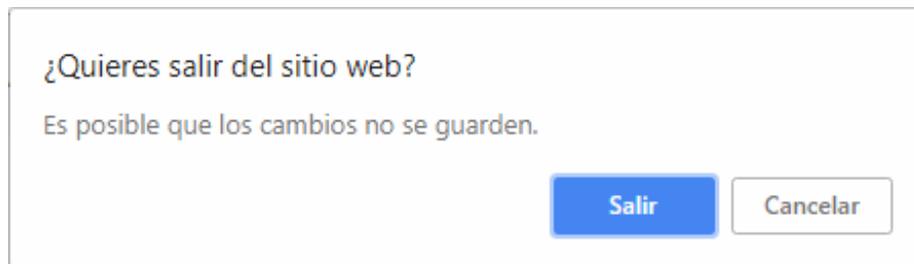
Las casillas de validación (Figura 4.12), se utilizan en criterios de mayor relevancia para el correcto funcionamiento del diseño realizado. Estas casillas cambian su apariencia para reflejar el resultado de la validación; se muestran en color verde en caso de que el valor obtenido este dentro del rango recomendado, o en color rojo en caso contrario.

Esta funcionalidad permite reducir la incertidumbre del usuario, ya que se limita el ingreso de información mediante los elementos de la interfaz, a los rangos establecidos por los criterios de diseño, además de que se reflejan los resultados del diseño respecto a los criterios de aceptación.



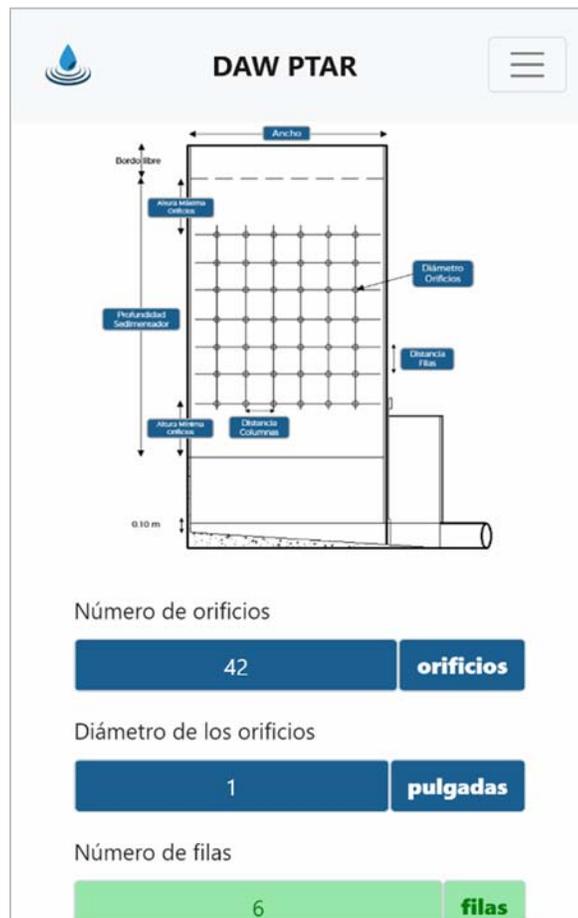
**Figura 4.12. Casillas para validación de criterios.**

Para evitar que el usuario abandone la aplicación accidentalmente, se implementan cuadros de dialogo (Figura 4.13) que le indican al usuario que está por salir de la sección de diseño y que su progreso podría perderse. Estos diálogos requieren de la confirmación del usuario para salir o refrescar la página.



**Figura 4.13 Diálogo de confirmación.**

En el diseño de todos los elementos de la interfaz, se consideró una implementación compatible con dispositivos móviles (Figura 4.14). Estos dispositivos pueden ser accesibles para la mayoría de los usuarios, además del beneficio añadido que ofrece su portabilidad en comparación con una computadora tradicional. Para este fin, resultó adecuada la elección del framework web Bootstrap, que permite una adaptación de los elementos de la interfaz para dispositivos con distintos tamaños de pantalla y sistemas operativos.



**Figura 4.14. Interfaz móvil del SSD.**

Finalmente, se definió un caso de estudio, en el cual se realizó el diseño de un sedimentador para tratamiento primario para la comunidad de San Cayetano Morelos, que cuenta con una población de 5,462 usuarios y una descarga de 6.64 litros por segundo. En la tabla 4.2 se comparan los resultados obtenidos con otros diseños similares elaborados.

**Tabla 4.2. Resultados de los métodos de diseño de tratamiento primario para el caso de estudio.**

ZONA DEL SEDIMENTADOR	INPUTS	CEPIS (2005)	García (1999)	DAWPTAR		OUTPUTS	CEPIS (2005)	García (1999)	DAWPTAR	
				Opción 1	Opción 2				Opción 1	Opción 2
Zona de sedimentación	Número de unidades	2	2	2	2	Área superficial (m <sup>2</sup> )	11.85	11.34	11.85	11.85
	Población	5,462	4,571	5,462	5,462	Volumen del sedimentador (m <sup>3</sup> )	-	17.15	-	23.90
	Caudal de diseño (m <sup>3</sup> /s)	0.0033	0.003175	0.0033	0.0333					
	Velocidad de sedimentación (m/s)	2.8×10 <sup>-4</sup>	2.8×10 <sup>-4</sup>	2.8×10 <sup>-4</sup>	2.8×10 <sup>-4</sup>	Tirante medio (m)	-	1.50	-	2.02
	Carga superficial (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> -d)	-	60	-	60	Longitud (m)	6.6	7.50	6.6	7.90
	Tiempo de retención (t)	1.2	1.5	1.2	2	Velocidad horizontal (cm/seg)	0.133	-	0.133	-
	Profundidad	-	1.5	-	2.02	Altura (m)	1.38	1.50	1.38	2.02
	Pendiente del Fondo	10%	-	10%	-	Distancia entre pantalla difusora y entrada (m)	0.7	-	0.7	-
	Área superficial (m <sup>2</sup> )	11.85	11.34	11.85	11.85	Relación L/B	3.313	-	3.313	5.268
	Ancho tanque (m)	2	1.5	2	1.5					
Zona de entrada	Caudal de diseño (m <sup>3</sup> /s)	0.0033	0.003175	0.0033	0.0333	Pérdida de carga en la canaleta (m)	-	2.7 × 10 <sup>-4</sup>	-	2.2 × 10 <sup>-4</sup>
	Número de orificios	44	8	44	8					
	Longitud de la canaleta (m)	-	1.5	-	1.5	Área total de los orificios (m <sup>2</sup> )	0.022	-	0.022	-
	Ancho de la canaleta (m)	-	0.2	-	0.2					
	Altura de la canaleta (m)	-	0.3	-	0.2	Diámetro de orificios (pulgadas)	1"	1 ½"	1"	1"
	Bordo libre (m)	-	0.1	-	0.1					
	Coefficiente de Descarga C <sub>d</sub>	-	0.7	-	0.7	Número de orificios canaleta	-	8	-	8
	Área de los orificios (m <sup>2</sup> )	-	0.00012	-	-					
	Carga en orificios de la canaleta (q)	-	0.00017	-	-	Número de orificios pantalla	44	-	44	-
	Caudal de diseño (m <sup>3</sup> /s)	0.0033	0.003175	0.0033	0.0333					

Zona de entrada	Carga en orificios de la canaleta (q)	-	0.00017	-		Separación entre orificios (m)	-	0.4	-	0.41
	Espaciamento entre columnas (m)	0.06	-	0.06		Espaciamento entre columnas (m)	0.06	-	0.06	-
	n Manning	-	0.014	-	0.012					
Zona de salida	Caudal de diseño (m³/s)	0.0033	0.003175	0.0033	0.0033	Longitud de la canaleta (m)	-	3.6	-	3.82
	Carga de vertido (m³/m-d)	-	150	-	150					
	Longitud de la canaleta (m)	-	3.6	-	3.82	Tirante de la canaleta (m)	-	0.047	-	0.047
	Caudal de diseño (m³/s)	0.0033	0.003175	0.0033	0.0033					
	g (m/s²)	9.81	9.81	9.81	9.81					
	Altura de la canaleta (m)	-	0.2	-	0.2	Altura de agua sobre vertedero (m)	0.009	-	-	0.009
	Ancho de la canaleta (m)	-	0.2	-	0.2					
	Bordo libre (m)	.	-	-	0.1					
Zona de lodos	(1-Cx)	-	0.7	-	0.7	Carga total (mg/l)	-	180	-	180
	$\frac{1}{vs} \int_0^{Cx} vdc$	-	0.2	-	0.2					
	Carga orgánica (mg/l)	-	200	-	200					
	Caudal de diseño (m³/s)	0.0033	0.003175	0.0033	0.0033	Volumen de lodos (m³)	-	0.097	-	0.101
	T (días)	-	2	-	2					
	Peso volumétrico lodos $\gamma$ (kg/m³)	-	1020	-	1020	Numero de tolvas	-	2	-	2
	Volumen de lodos (m³)	-	0.097	-	0.101	Altura de la tolva (m)	-	0.2	-	0.2
	D <sub>Sup</sub> (m)	-	1.5	-	1.5					
D <sub>Inf</sub> (m)	-	0.9	-	0.9						

La comparación realizada entre el método de diseño de CEPIS (2005) y el primer método ofrecido por el SSD, da como resultado diseños que no tienen variaciones entre sus variables, debido a los criterios de verificación que establece este diseño, que limitan las dimensiones del tanque de manera proporcional, permitiendo obtener un dimensionamiento adecuado para el proceso de sedimentación.

En la comparación entre el segundo método de diseño del SSD y el diseño propuesto por García-Pulido (1999), resultan variaciones mínimas entre ellos, en su mayoría menores a 6%. Las variaciones más considerables son producto de la implementación de criterios de CEPIS (2005) para mantener una relación proporcional entre las dimensiones del tanque, criterios que no se implementan en el diseño original.

Durante el proceso de diseño, puede notarse el aporte del sistema para elegir los inputs requeridos, mediante la funcionalidad implementada para la interfaz, que orienta al usuario para determinar qué valores son adecuados para las distintas variables de diseño.

Por ejemplo, para determinar la longitud de la zona de sedimentación, se indica al usuario el valor que puede elegirse que permite cumplir el criterio de relación largo-ancho establecido por CEPIS (2005), mediante el cambio de apariencia de las casillas de verificación (Figura 4.15).



**Figura 4.15. Asistencia del SSD para elección de inputs de diseño.**

Otro ejemplo de la asistencia que ofrece el sistema es la interfaz para determinar el coeficiente de rugosidad de Manning. Se muestra el usuario un menú de selección (Figura 4.16) que permite elegir entre diversos materiales de uso común para la construcción de canaletas y determina automáticamente su coeficiente de rugosidad. También ofrece la opción de ingresar valores determinados por el usuario.

Material: Acero

- Acero
- Concreto pulido
- Concreto sin acabado
- Ladrillo
- Otro (Introduce el coeficiente "n" en la casilla)

Coeficiente Manning: 0.012

**Figura 4.16. Asistencia del SSD para la determinación y cálculo de inputs de diseño.**

Para la determinación del diámetro de los orificios de la canaleta, se asiste al usuario al ofrecer un menú (Figura 4.17) con diámetros comerciales de tubería, lo que facilita al usuario realizar una elección adecuada para fines constructivos.

Orificios en la canaleta

Diámetro de los orificios: Elige pulgadas

- 1/2"
- 3/4"
- 1"
- 1 1/4"
- 1 1/2"
- 2"
- 2 1/2"

**Figura 4.17. Asistencia del SSD para la determinación y cálculo de inputs de diseño.**

Además, para todos los demás inputs se ha limitado el ingreso a los rangos definidos por los criterios considerados, por lo que el usuario tendrá claro para cada variable de diseño los límites de los valores que pueden usarse. En caso de ingresar un valor fuera del rango la casilla se mostrará en color rojo (Figura 4.18).

Volumen del sedimentador

Tiempo de retención: 3 horas

Se recomiendan valores de 1.5 a 2.5 horas.  
Metcalf & Eddy, 1991. Wastewater engineering, treatment, disposal and reuse, McGraw-Hill. Singapore. 1334 p.

**Figura 4.18. Asistencia del SSD para la determinación de inputs de diseño.**

La revisión del diseño final puede realizarse de una manera más sencilla mediante el reporte generado por el sistema (Figura 4.19), el cual incluye todos los outputs que se obtuvieron, así como los diagramas donde se resaltan las variables diseñadas en cada zona del tanque sedimentador. Una vez que el usuario ha revisado los resultados del diseño puede proceder a guardar o imprimir el reporte, o bien regresar a la interfaz de diseño para realizar alguna corrección.

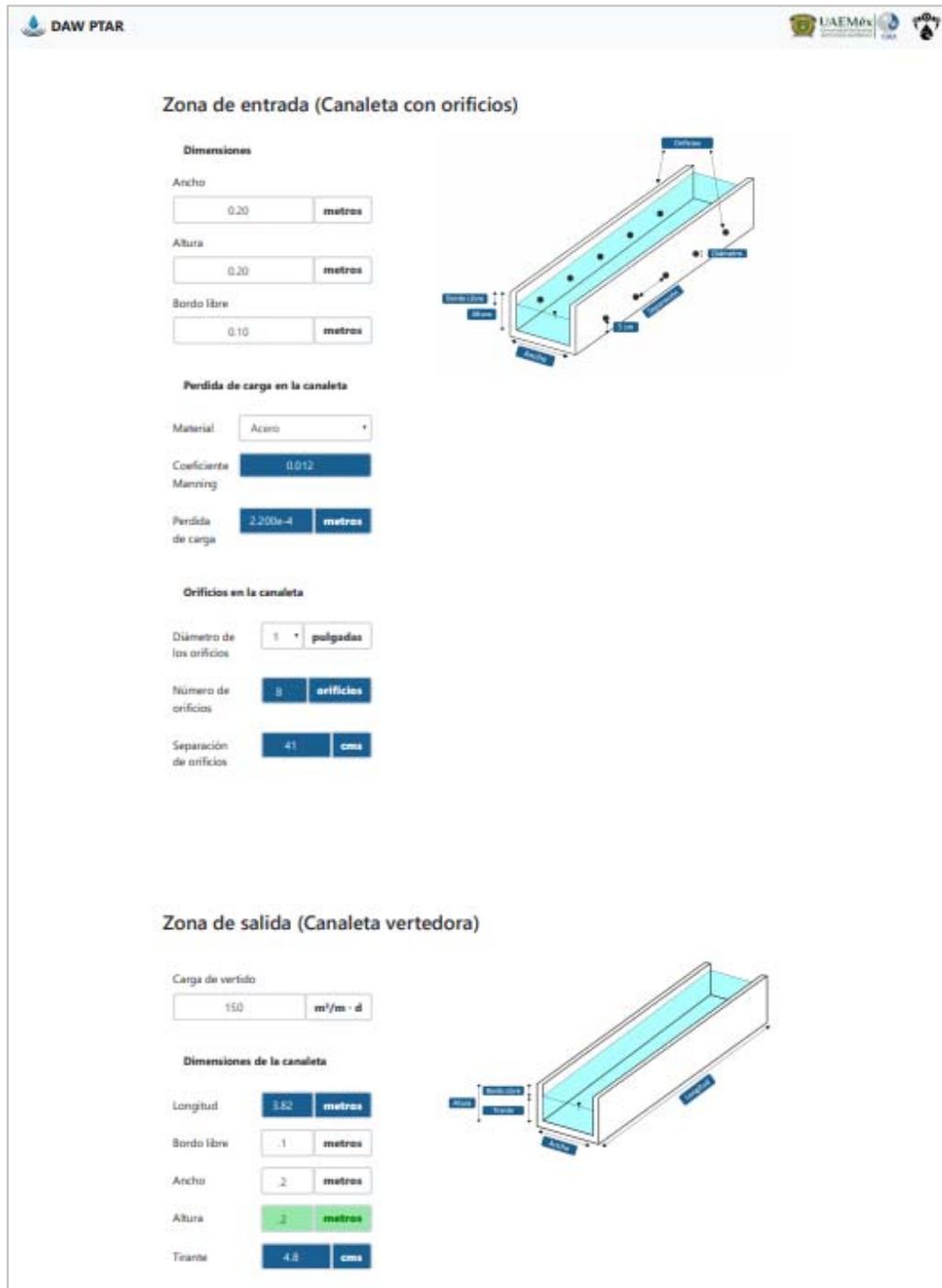


Figura 4.19. Reporte de diseño generado por el SSD.

#### 4.1 Interpretación de los resultados

El sistema de soporte de decisiones que se desarrolló tuvo un alcance que fue determinado por la complejidad e interoperabilidad que se logró en sus elementos constitutivos. El primer elemento, el usuario objetivo, se definió como un usuario con conocimientos de ingeniería, pero sin experiencia en el área de diseño de sistemas de tratamiento, con la finalidad de que el sistema resultante fuera accesible para la mayoría de los usuarios. El contexto de decisión, segundo elemento del SSD, fue determinado por el usuario objetivo y por el modelo conceptual construido del tratamiento primario, donde se identificaron las relaciones que existen entre las variables requeridas para el diseño.

El tercer elemento, el sistema informático, fue desarrollado para ofrecer al usuario la funcionalidad necesaria para realizar el diseño de las estructuras de tratamiento definidas, siendo accesible por medio de la web para facilitar su uso. Las bases de conocimiento, cuarto elemento del SSD, fue compuesto de las distintas bases que contienen información útil para la asistencia de la decisión del usuario. El último elemento, la interfaz o el ambiente de trabajo, se diseñó para cumplir la función de dar acceso al usuario a todas las herramientas disponibles en el sistema y facilitar el uso de estas.

El modelo conceptual, realizado como parte del primer objetivo del proyecto, es un elemento que puede expandirse para implementar cambios en el alcance del SSD en versiones futuras. Mediante esta expansión, podrían abarcarse un mayor número de opciones de diseño de tratamiento primario, que sean adecuadas para aplicaciones más diversas, además de incluir el diseño de tratamientos secundarios y avanzados, con lo que se completaría el diseño integral de una planta de tratamiento.

En la elaboración del modelo conceptual del sistema informático, realizada en la segunda etapa de metodología, es posible observar la importancia de las bases de datos. Las bases de usuarios y de proyectos permiten hacer el seguimiento de la actividad que han realizado los usuarios en el sistema, para determinar las necesidades futuras (características a mejorar, expansiones del sistema, etc.) e inmediatas (almacenamiento y recursos computacionales requeridos para dar servicio a los usuarios).

La implementación de los criterios de diseño, considerada para la versión actual del sistema, muestra la limitación de requerir una acción de consulta por parte del usuario. Tomando como base el sistema creado, es posible la implementación de algoritmos más avanzados, que hagan recomendaciones en tiempo real de acuerdo con los datos que el usuario ingrese en el sistema, lo cual requiere una mejora y aumento de las funciones y scripts desarrollados como parte del tercer objetivo.

Este tipo de algoritmos también podrían ser utilizados para tomar decisiones por el usuario, de manera automatizada, si estas se consideran de vital importancia para el diseño. Cualquier cambio en este tipo de funcionalidad debe ser sujeto a un análisis previo, para determinar si su implementación no tiene un impacto negativo en el proceso de diseño, limitando de manera excesiva la libertad de decisión del usuario.

Con base en el caso de estudio presentado, se observa que el SSD desarrollado permite al usuario realizar el diseño del tratamiento primario de una PTAR de manera más sencilla respecto a métodos de diseño tradicionales, debido a que proporciona la información requerida para las distintas etapas de diseño de manera intuitiva y ofrece asistencia para la toma de decisiones respecto a los criterios presentados, además de reducir la incertidumbre del usuario.

También, se asiste en el manejo de proyectos, al ofrecer al usuario la posibilidad de crear un perfil de usuario en donde puede guardar los proyectos creados en la base de datos del sistema y editarlos posteriormente.

Para el caso de estudio se encontró que los diseños realizados por el sistema de soporte de decisiones mostraban resultados en su mayoría similares a los de la literatura asociada, ya que sus métodos de diseño se componen por rangos y criterios basados en los propuestos por estos autores. La mayoría de las diferencias observadas se deben a las variaciones en las poblaciones y las descargas de efluente que se consideraron por los autores para sus diseños.

La diferencia más notable respecto a métodos de diseño tradicionales es un menor tiempo necesario para la realización del diseño mediante el SSD, lo que es posible debido a la disponibilidad de los criterios en la interfaz del sistema, así como la asistencia que se ofrece para determinar si se cumple con ellos o si debe realizarse alguna modificación.

También se observa que el acceso al SSD, que puede realizarse de manera inmediata y remota desde el navegador web de cualquier equipo de cómputo, es una mejora respecto a implementaciones que requieren de la instalación de un paquete, disponible solamente para algunos sistemas operativos y para equipos de cómputo tradicionales.

El acceso limitado a equipos de cómputo tradicionales también implica una menor accesibilidad en lugares remotos, como puede ser un sitio de obra, donde el espacio para trabajar con estos equipos es inadecuado. Además, la conexión a internet muchas veces no está disponible en estos sitios, por lo que un sistema que permita el acceso mediante equipos con conexión móvil resulta más accesible.

Las posibilidades que existen para la creación de software hacen del desarrollo de tecnología propia una alternativa que puede convertirse en una ventaja competitiva, tanto para instituciones públicas como privadas. Por un lado, pueden evitarse los costos de adquisición de paquetes comerciales, el cual resulta más elevado en comparación con el costo de desarrollo de herramientas propias, sobre todo si se considera que las licencias para el uso de software comercial deben renovarse anualmente en algunos casos.

## **V. Conclusiones**

Es posible implementar cambios en el alcance del SSD en versiones futuras. Mediante esta expansión, podrían abarcarse un mayor número de opciones de diseño.

Se sugiere realizar un seguimiento de la actividad que han realizado los usuarios en el sistema, con el fin de determinar las mejoras posibles. Puede realizarse también un estudio de uso, en el cual se evalúe el grado de satisfacción de los usuarios con el funcionamiento de los distintos elementos del sistema con los que interactúan.

El SSD desarrollado permite al usuario realizar el diseño de manera más sencilla y rápida respecto a métodos de diseño tradicionales. Se observaron mejoras en accesibilidad del SSD respecto a implementaciones tradicionales (Compatibilidad, conexión, portabilidad).

Las posibilidades que existen para la creación de software hacen del desarrollo de tecnología propia una alternativa que puede convertirse en una ventaja competitiva, tanto para instituciones públicas como privadas.

Es posible mediante la implementación del SSD una reducción en los costos de adquisición de paquetes comerciales (licencias para el uso de software comercial deben renovarse anualmente en algunos casos). La flexibilidad que otorga el desarrollo de tecnología propia permite desarrollar herramientas que se adapten a las necesidades específicas que se tengan y modificar o expandir su funcionalidad según sea conveniente.

### **5.1 Recomendaciones**

Atendiendo a las preferencias de los usuarios, se recomienda analizar la percepción que estos tienen de la presente implementación del ambiente de trabajo para la decisión. Esto es posible mediante la realización de un estudio de uso, en el cual se evalúe el grado de satisfacción de los usuarios con el funcionamiento de los distintos elementos del sistema con los que interactúan. Con base en los resultados obtenidos, es posible que los componentes de la interfaz sean susceptibles de ser mejorados o ampliados, con el objeto de aumentar la asistencia a la decisión que proporciona el sistema y mejorar la facilidad de uso de este para los usuarios.

Para versiones futuras del sistema, puede considerarse la inclusión de sistemas de tratamiento como las lagunas de estabilización, que son el método más simple de tratamiento de aguas residuales que existe (USON, 2018). Este tipo de sistemas pueden ser aplicados en comunidades rurales al ser una técnica de bajo costo, ya que solo están constituidos por excavaciones poco profundas cercadas por taludes de tierra.

Para dar atención a un mayor número de usuarios, puede expandirse el sistema para ofrecer bases de datos de poblaciones y caudales de otros países, a través de la cooperación con organismos internacionales que proporcionen esta información. Esta implementación es posible gracias al sistema base, al cual podría añadirse estas bases de datos de manera relativamente sencilla. También es posible expandir el sistema para realizar diseño de sistemas de tratamiento que estén basados en estándares internacionales, haciendo posible el uso del sistema por usuarios que requieran de diseños que están sujetos a estos estándares, además de dar al sistema la validez adicional que representa un estándar internacional.

## VI. Referencias y/o fuentes de información

- Arboleda-Valencia, J., 1972. Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente., Perú, 558 p.
- Bagriyanik, S.; Karahoca, A., 2016. Automated COSMIC Function Point Measurement Using a Requirements Engineering Ontology, *Information and Software Technology* 72, pp. 189-203.
- Camp, T., 1946. Sedimentation and the design of settling tanks, *Transactions of the American Society of Civil Engineers* 111, pp. 895-936.
- Cañez-Cota, A. 2015. La gestión integrada de recursos hídricos en la política federal del agua: propuesta para la nueva Ley General de Aguas en México, *Gestión y Análisis de Políticas Públicas* 13, ISSN: 1134-6035, disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=281538241005>
- CEMDA (2006) El agua en México, Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, México, 93 p.
- CEPIS (2005) Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores, OPS, Perú, 34 p.
- CONAGUA (2012) Atlas del agua en México, SEMARNAT, México, 133 p.
- CONAGUA (2015) Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Pretratamiento y Tratamiento Primario, SEMARNAT, México, 74 p.
- CONAPO. Proyecciones de la Población 2010-2050 [consultado el 19 de diciembre de 2017], disponible en [http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones\\_Datos](http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones_Datos)
- DB-Engines. Database Management Systems Ranking [consultado el 19 de marzo de 2018], disponible en <https://db-engines.com/en/ranking>
- Dybå, T.; Dingsøy, T., 2008. Empirical studies of agile software development: A systematic review, *Information and Software Technology* 50, pp. 834-858.
- Envirosim. BioWin Perpetual License [consultado el 19 de marzo de 2018], disponible en <https://envirosim.com/shop#!/BioWin-Perpetual-License/p/5986606/category=22742026>
- FAO. Conventional wastewater treatment processes [consultado el 19 de marzo de 2018], disponible en <http://www.fao.org/docrep/t0551e/t0551e05.htm>
- Fonseca, C.; Hidalgo, V.; Díaz-Delgado, C.; Vilchis-Francés, A.; Gallego, I., 2017. Design of optimal tank size for rainwater harvesting systems through use of a web application and geo-referenced rainfall patterns, *Journal of Cleaner Production* 145, pp. 323-335.
- Gachet, A., 2004. Building Model Driven Decision Support Systems with Dicodess. vdf Hochschulverlag AG., Suiza, 258 p.
- García-Pulido, D., 1999. Planta experimental de tratamiento de aguas residuales por medios biológicos, Tesis para el grado de maestría, UAEM, México, 233 p.

- Gardea, H., 1999. Hidráulica de canales. UNAM., México, 217 p.
- Haettenschwiler, P., 1999. Neues anwenderfreundliches Konzept der Entscheidungsunterstützung. Gutes Entscheiden in Wirtschaft, Politik und Gesellschaft. vdf Hochschulverlag AG., Suiza, pp. 189-208.
- Hazen, A. 1904. On Sedimentation, Transactions of the American Society of Civil Engineers 53, pp. 45-71.
- IBM Developer Works. Iniciándose en la plataforma Eclipse [consultado el 19 de marzo de 2018], disponible en <https://www.ibm.com/developerworks/ssa/library/os-ecov/index.html>
- IBM. Rational Unified Process [consultado el 19 de marzo de 2018], disponible en [https://www.ibm.com/developerworks/rational/library/content/03July/1000/1251/1251\\_bestpractices\\_TP026B.pdf](https://www.ibm.com/developerworks/rational/library/content/03July/1000/1251/1251_bestpractices_TP026B.pdf)
- ISO. Document management -- Portable document format -- Part 1: PDF 1.7 [consultado el 19 de marzo de 2018], disponible en <https://www.iso.org/standard/51502.html>
- Janakiraman, V.S., Sarukesi, K., 2006. Decision Support System, 6a edición, Prentice-Hall, NewDeli, 223 p.
- Jiménez-Hernández, E.; Orantes-Jiménez, S., 2012. Metodologías híbridas para desarrollo de software: una opción factible para México, Revista Digital Universitaria [en línea] 13(1) [Consultada: 2 de enero de 2012]. disponible en <http://www.revista.unam.mx/vol.13/num1/art16/index.html>
- Metcalf & Eddy, 2003. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, McGraw-Hill., EE. UU. 2048 p.
- Mozilla Developer Network. HTML [consultado el 19 de marzo de 2018], disponible en <https://developer.mozilla.org/es/docs/Web/HTML>
- Mozilla Developer Network. JavaScript [consultado el 19 de marzo de 2018], disponible en <https://developer.mozilla.org/es/docs/Web/JavaScript>
- Oracle (2017) GlassFish Server Open Source Edition Release Notes, The GlassFish project, EE. UU, 16p.
- Oracle. JavaServer Pages[tm] Technology - JavaServer Pages White Paper [consultado el 19 de marzo de 2018], disponible en <http://www.oracle.com/technetwork/java/jspguide-wp-140824.html>
- Otto, M.; Thornton, J., Bootstrap [consultado el 19 de marzo de 2018], disponible en <https://github.com/twbs/bootstrap>
- Ramalho, R., 1990. Tratamiento de aguas residuales. Reverté., España, 705 p.
- Ramos-Salavert, I.; Lozano-Pérez, M., 2000. Ingeniería del software y bases de datos: tendencias actuales, Universidad de Castilla-La Mancha., España, 245 p.
- Romero-Rojas, J., 1999. Tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización. Alfaomega., México, 284 p.
- Ruiz, A.; Hernández, L.; Giraldo, W., 2009. Aplicación de los sistemas de soporte a la decisión (DSS) en el comercio electrónico, Revista Ingeniería e Investigación 29 (2), pp 94-99.

Rumbaugh, J.; Blaha, M.; Premerlani, W.; Eddy, F.; Lorensen, W., 1990. Object-Oriented Modeling and Design. Prentice Hall., EE. UU, 512 p.

Sánchez-Ramírez, J.; Mejía-Fajardo, A.; Amorocho-Cruz, C., 2015. Software de Ingeniería Especializado en el Diseño y Simulación de Plantas de Tratamiento de Agua Residual: Revisión. Revista Ingeniería y Región 13(1), pp 57-71.

The Apache Software Foundation. Apache Tomcat [consultado el 19 de marzo de 2018], disponible en <http://tomcat.apache.org/>

Turban, E.; Aronson, J.; Liang, T. P., 2005. Decision Support Systems and Intelligent Systems. Prentice Hall., EE. UU, 936 p.

UN Water (2006) El agua, una responsabilidad compartida, UNESCO, Francia, 584 p.

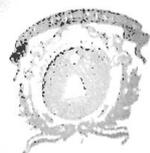
USON. Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Comunidades. [consultado el 19 de marzo de 2018], disponible en <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/19117/capitulo4.pdf>

W3Schools. HTML <input> max Attribute [consultado el 19 de marzo de 2018], disponible en [https://www.w3schools.com/tags/att\\_input\\_max.asp](https://www.w3schools.com/tags/att_input_max.asp)

W3Schools. PHP MySQL Database [consultado el 20 de marzo de 2018], disponible en [https://www.w3schools.com/php/php\\_mysql\\_intro.asp](https://www.w3schools.com/php/php_mysql_intro.asp)

## **VII. Anexos**

Se incluyen en CD, junto con los archivos de implementación informática.



Toluca, México a 23 de mayo de 2018.

Espacio Académico, Subdirector Académico, Coordinador de Programa  
Presente

**Carta de autorización para publicación en el RI**

**Declaración de autoría original, libre de embargo, susceptible de ser depositado en el Repositorio Institucional y solicitud de evaluación de grado.**

Quien firma al calce, declaro bajo protesta de decir verdad que soy el(la) autor(a) de la obra (tipo de obra) Trabajo Escrito titulada (título de la obra) Desarrollo de Sistema de Soporte de Decisiones para el diseño de tratamiento primario en una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales asistido por web.

y estoy de acuerdo con la totalidad de su contenido, manifiesto mi conformidad y mi autorización para que se publique en Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma del Estado de México, con fines académicos y culturales en formato de acceso abierto, en los términos del Reglamento de Acceso Abierto, la Normatividad vigente emitida por la Institución y las legislaciones aplicables en la materia.

Así mismo, declaro que responderé de la autoría y originalidad de la obra de mérito y del ejercicio pacífico de los derechos que autorizo en este acto, manifiesto que no existe otra persona física o moral a la que pertenezca; por lo cual libero de toda responsabilidad a la Universidad Autónoma del Estado de México de cualquier demanda o reclamación que llegara a formular alguna persona física o moral que se considere con derecho sobre la obra, asumiendo todas las consecuencias legales y económicas a que hubiera lugar.

De igual forma permito que la Oficina de Conocimiento Abierto perteneciente a esta Máxima Casa de Estudios, realice lo propio para el almacenamiento, preservación y difusión de la obra, con fines académicos y culturales en formato de acceso abierto y sin fines de lucro.

Firmo de conformidad y bajo protesta de decir verdad

Nombre y firma: Edgar Espinoza Betancourt  
No. de cuenta: 0712433

Conozco y acepto los términos de privacidad de la Universidad Autónoma del Estado de México  
[http://web.uaemex.mx/avisos/Aviso\\_Privacidad.pdf](http://web.uaemex.mx/avisos/Aviso_Privacidad.pdf)