



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
AMBIENTAL – AGUA

**PROPUESTA DE MEJORA DE LOS SERVICIOS DE POTABILIZACIÓN Y
TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL MEDIANTE EL USO DE INDICADORES
DEL DESEMPEÑO BASADOS EN LA CALIDAD DEL AGUA**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA:
JOSÉ LUIS LÓPEZ LÓPEZ

TUTOR PRINCIPAL
DRA. ALMA CONCEPCIÓN CHÁVEZ MEJÍA
INSTITUTO DE INGENIERÍA-UNAM

COMITÉ TUTOR
DRA. ANA ELISA SILVA MARTÍNEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA-UNAM

DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA-UNAM

DRA. ALEJANDRA MARTÍN DOMÍNGUEZ,
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

DRA. CLEMENTINA RITA RAMIREZ CORTINA,
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA- AZCAPOTZALCO

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, ENERO DE 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dra. Ana Elisa Silva Martínez

Secretario: Dr. Enrique César Valdez

Vocal 1: Dra. Alejandra Martín Domínguez

Vocal 2: Dra. Clementina Rita Ramírez Cortina

Vocal 3 Dra. Alma Concepción Chávez Mejía

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

TUTORA DE TESIS:

Dra. Chávez Mejía Alma Concepción

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca otorgada durante el período de realización de mis estudios de posgrado.

Especial agradecimiento a la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación por el apoyo otorgado al proyecto SECTEI/260/2019 “Mejoramiento de los Procesos de Potabilización y Tratamiento de Agua Residual y Uso de Tecnologías Descentralizadas en los 21 Proyectos de Regulación como Estrategia Auxiliar para el Aseguramiento Hídrico del Río Magdalena”.

Contenido

Resumen	6
1 INTRODUCCIÓN	8
2 OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo general.....	12
2.2 Objetivos particulares	12
3 ANTECEDENTES	13
3.1 Aspectos relevantes a cerca del río Magdalena.....	13
3.2 Panorama de las plantas potabilizadoras en México	15
3.3 Cobertura de agua potable.....	18
3.4 Programa Delegacional de Desarrollo Urbano (PDDU) para la Alcaldía Magdalena Contreras 2005 20	
3.5 Estado actual de la Planta Potabilizadora “Río Magdalena”	20
3.6 Infraestructura civil.....	27
3.7 Estado actual de la Planta Potabilizadora “Río Magdalena 2”	30
3.8 Estado actual de la Planta de Tratamiento de Agua Residual “Rio Magdalena”	36
4 FUNDAMENTOS	42
4.1 Indicadores para la gestión integrada del agua	42
4.1.1 Metodología sugerida por el IWA	43
4.1.2 Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores (PIGOO)	48
4.2 Índices de calidad del agua.....	57
4.2.1 Índice Canadiense por el Consejo de Ministros Canadiense del Medio Ambiente (CCME).....	59
4.2.2 Índices de Calidad del Agua para Usos Específicos del Agua por Jerry D. Stoner	62
5 METODOLOGÍA	67
5.1 ETAPA 1	69
5.1.1 Revisión y consideraciones al CWQI para el uso en las plantas de tratamiento de estudio....	69
5.1.2 Cálculo del CWQI en temporada de estiaje y lluvia para la PP1	73
5.1.3 Cálculo del CWQI en temporada de estiaje y lluvia para la PP2	78
5.1.4 Cálculo del CWQI en temporada de estiaje y lluvia para la PTAR.....	83
5.2 ETAPA 2	87
5.2.1 Selección de parámetros Tipo I	87

5.2.2 Selección de parámetros Tipo II	89
5.2.3 Cálculo del índice de Stoner para las Plantas Potabilizadoras en temporada de estiaje y lluvia. 98	
5.3 ETAPA 3	99
5.3.1 Propuesta de indicadores de eficiencia basados en la calidad del agua.....	99
5.3.2 Cálculo de los indicadores para las plantas potabilizadoras	103
6 Análisis de resultados	104
6.1 Índice canadiense en temporada de estiaje y lluvia para la PP1	104
6.2 Índice canadiense en temporada de estiaje y lluvia para la PP2	114
6.3 Índice canadiense en temporada de estiaje y lluvia para la PTAR.....	119
6.4 Índice de Stoner en temporada de estiaje y lluvia para la PP1.....	123
6.5 Índice de Stoner en temporada de estiaje y lluvia para la PP2.....	135
6.6 Índice canadiense vs Índice de Stoner	145
6.7 Indicadores de eficiencia de los procesos y operaciones unitarias	146
6.7.1 Planta Potabilizadora 1 en temporada de estiaje	146
6.7.2 Planta Potabilizadora 1 en temporada de lluvia	149
6.7.3 Planta Potabilizadora 2 en temporada de estiaje	152
6.7.4 Planta Potabilizadora 2 en temporada de lluvia	153
7 CONCLUSIONES	155
8 REFERENCIAS	157
ANEXO A	163
Información solicitada a los organismos operadores del programa PIGOO	163

Resumen

El deterioro de la calidad del agua en el sistema de abastecimiento de una ciudad es producto de varios factores de riesgo como: la migración de contaminantes de origen natural y/o antropogénico en, y hacia las fuentes de abastecimiento y en las barreras (procesos y operaciones unitarias) con las que cuenta el sistema de potabilización así como una infraestructura en general inadecuada (baja eficiencia de remoción de contaminantes, baja eficiencia energética, fallas en el diseño y operación, así como falta de mantenimiento preventivo y correctivo), recursos económicos insuficientes para su operación, y otros factores que influyen en la vigilancia y control de la calidad del agua en el sistema los cuales se deben atender para asegurar la calidad del recurso que reciben los usuarios con base en la normatividad aplicable. Ante la importancia que tienen los servicios de potabilización y tratamiento de agua residual para entregar el recurso hídrico dentro de los límites que establecen la normas: NOM-127-SSA1-1994 (agua de consumo humano), NOM-001-SEMARNAT-1996 (descarga de agua residual en aguas nacionales), NOM-002-SEMARNAT-1996 (descarga de agua residual en alcantarillado municipal) y la NOM-003-SEMARNAT-1997 (agua tratada que se reusa en servicios al público) se propone el uso de indicadores basados en la calidad del agua así como índices de calidad del agua para transformar las cantidades de datos históricos y actuales de calidad en formas simplificadas de expresar el desempeño de las plantas potabilizadoras “Río Magdalena”, “Río Magdalena 2” así como de la planta de tratamiento de agua residual “Magdalena Contreras”, todas ellas ubicadas en la alcaldía Magdalena Contreras de la Ciudad de México.

Los índices de calidad que se ocuparon para este propósito fueron el índice canadiense (útil en agua potable y residual) para la calidad del agua (CWQI) y el índice de Stoner (útil para agua potable). Se realizaron las modificaciones y adaptaciones pertinentes, entre las que destacaron: adaptar los índices a las normas mexicanas vigentes (CWQI y Stoner), proponer valores límite tomando como referencia las normas vigentes y valores ideales diferentes de cero con base en la ingesta diaria admisible (Stoner), finalmente se consideró excluir algunos parámetros e incluir otros con base en la norma mexicana y de los que se cuenta información en la base de datos histórica (Stoner).

Adicionalmente se plantearon indicadores de calidad del agua entre operaciones unitarias, con el objetivo de calcular la eficiencia de remoción de contaminantes de éstas. Los resultados más importantes arrojaron que los parámetros que se identificaron como críticos son los siguientes:

En la PP1, según el índice canadiense son: coliformes fecales, coliformes totales y turbiedad, por otro lado según el índice de Stoner: coliformes totales y aluminio.

En la PP2, según el índice canadiense son: coliformes fecales y coliformes totales, en cambio para el índice de Stoner: aluminio y coliformes totales.

Para la PTAR, según el índice canadiense es únicamente sólidos suspendidos totales.

Además, de acuerdo al índice canadiense la PP1 obtuvo en el 70% de los años evaluados una calificación por lo menos buena, en donde previsiblemente los inconvenientes puntuales se presentan en el proceso de coagulación-floculación (aluminio), así como en la desinfección (coliformes fecales y totales), por otro lado según el índice de Stoner, en el 63% de las fechas evaluadas, se califica el agua como apta para consumo humano, identificando problemas de calidad por exceso de aluminio y presencia de coliformes totales por arriba del norma.

De acuerdo al índice canadiense la PP2 obtuvo en el 100% de los años evaluados una calificación por lo menos buena, con algunos inconvenientes puntuales en el proceso de desinfección, en cambio de acuerdo con el índice de Stoner sólo para el 58% de las fechas evaluadas se alcanza agua apta para consumo humano, debido principalmente a muestras con detección de coliformes totales.

Finalmente se consideró que la aplicación cruzada de los resultados que se obtienen de ambos índices conformó una evaluación integral de las plantas de estudio, por lo que se propone el uso de ambas metodologías de forma simultánea siempre que se tenga a la mano la calidad histórica del agua y se contemplen más estudios de calidad recientes.

1 INTRODUCCIÓN

El deterioro de la calidad del agua en el sistema de abastecimiento de una ciudad es producto de varios factores de riesgo como: la migración de contaminantes de origen natural y/o antropogénico en, y hacia las fuentes de abastecimiento y en las barreras (procesos y operaciones unitarias) con las que cuenta el sistema de potabilización así como una infraestructura en general inadecuada (baja eficiencia de remoción de contaminantes, baja eficiencia energética, fallas en el diseño y operación, así como falta de mantenimiento preventivo y correctivo), recursos económicos insuficientes para su operación, y otros factores que influyen en la vigilancia y control de la calidad del agua en el sistema (OMS, 2018).

En México, según una evaluación realizada por personal de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) a una muestra de plantas de tratamiento se encontró que la mayoría de las plantas en operación corresponden a diseños sobredimensionados en los que, además se observa una excesiva mecanización, instrumentación y automatización, que encarece y complica, tanto la operación y el mantenimiento, como la amortización de las inversiones. Se señala también en esta evaluación, que la existencia generalizada de sistemas de drenaje en los que se combinan aguas negras y de lluvia, entorpece las operaciones de tratamiento durante la época de lluvias, lo mismo que las descargas de sustancias tóxicas del sector industrial sin tratamiento previo (Romero *et al*, 2010).

El agua es un elemento esencial para la vida, ésta cubre el 72% de la superficie de la Tierra por lo que lamentablemente es concebida con un recurso muy abundante, sin embargo la realidad es otra ya que solo el 3% es agua dulce susceptible de ser utilizada para beber y el 97% es agua salada localizada en océanos y mares. Además, del 3% de agua dulce el 95 % se localiza en glaciares y el restante 5% es accesible para el consumo humano (CONAGUA, 2021). De acuerdo con la OMS (2018) “Todas las personas deben disponer de un abastecimiento de agua suficiente, seguro y accesible, ya que esto proporciona beneficios tangibles para la salud”, los estimados del volumen de agua que requiere una persona para propósitos de salud varían considerablemente según clima local y regional, el nivel de actividad y la alimentación, no obstante la cantidad mínima suficiente para cubrir las necesidades de hidratación y de incorporación a los alimentos de la mayoría de las personas bajo la mayor parte de condiciones es de 7.5 litros de agua por persona por día.

Según el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos (UNESCO, 2019) el consumo de agua ha aumentado 1% anualmente en todo el mundo desde los años 80 del siglo pasado, impulsado por una combinación de aumento de la población, desarrollo socioeconómico y cambio

en los modelos de consumo. Se espera que la demanda mundial de agua siga aumentando a un ritmo parecido hasta 2050, lo que representa un incremento del 20 al 30% por encima del nivel actual de uso del agua, debido principalmente al aumento de la demanda en los sectores industrial y doméstico. Por ejemplo en México en 1950 el país contaba con 25.8 millones de habitantes con una disponibilidad de agua renovable per cápita de 49,411 L/d, en 2014 la población ascendió a 118.4 millones y se registró una disponibilidad de 10,236 L/d y para el año 2030 se pronostica que la población será de 127.7 millones de habitantes con una disponibilidad per cápita de 8,912 L/d es decir, 1,324 L/d menos con respecto a la reportada para el año 2014, una reducción de casi el 13% (SEMARNAT & CONAGUA, 2014).

En términos de cobertura, esta reportado hasta el año 2020 que el 96.1% de la población nacional en viviendas particulares tiene acceso a suministro de agua entubada y desinfectada en su domicilio dejando un 3.9% (4.9 millones de habitantes a nivel nacional) que carecen del servicio de agua potable en los términos mencionados (CONAGUA, 2021). Es importante señalar el avance que se ha presentado para cubrir a más personas del recurso hídrico siendo que incluso es un derecho constitucional (Artículo 4, párr. VI de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos) tomando en cuenta que la disponibilidad del agua per cápita va en decremento.

Debido a que la disponibilidad del agua en México presenta una tendencia decreciente, se requiere la participación de los tres órdenes de gobierno, de la sociedad y de los prestadores de servicios para generar un uso sostenible del agua en las diferentes actividades cotidianas y productivas integrando las acciones necesarias para el cumplimiento de los objetivos de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible y sus 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), entre los que destaca el sexto relativo a “Asegurar el agua y saneamiento para todos, para un mundo sostenible”. Para enfrentar este reto, la actual administración federal (2018-2024) en México tiene plasmada su política en materia de agua en el Programa Nacional Hídrico que busca atender las necesidades hidráulicas actuales y las que se anticipan.

El programa plantea cinco objetivos prioritarios, los tres primeros están orientados a los usuarios del recurso, mientras que los últimos dos se enfocan al entorno habilitador, (Figura 1.1).



Figura 1.1 Problemas y objetivos prioritarios de acuerdo al Plan Nacional Hídrico 2019-2024. Fuente: SEMARNAT y CONAGUA, 2020.

Bajo esta misma línea base, el Gobierno de la Ciudad de México cuenta con el Programa Estratégico para Garantizar el Derecho al Agua 2020-2024 que tiene como objetivos centrales “Que toda la población cuente con agua suficiente todos los días, aunque no sea con suministro continuo” (CDMX, 2020). Para ello, cuentan con cuatro líneas de acción:

- 1 Macromedición y telemetría
- 2 Mejora de la distribución de agua potable
- 3 Recuperación y mejora de fuentes de abastecimiento
- 4 Mejora de la calidad del agua.**

La cuarta línea de acción es fundamental en la alineación de los objetivos de este proyecto para con la Ciudad de México, en donde se plantea la mejora de la operación y eficiencia de las plantas potabilizadoras con la finalidad de garantizar que el agua efluente sea apta para su consumo y uso en las actividades diarias de la población (CDMX, 2020).

Finalmente, en la alcaldía Magdalena Contreras dentro de su “Programa Provisional de Gobierno 2019-2020” se incluyeron algunas estrategias para garantizar el

derecho al agua, para las cuales a través de la evaluación de sus dos plantas potabilizadoras que plantea este proyecto se da parte a conseguir los objetivos particulares de esta Alcaldía.

En el programa se manifiesta interés en la preservación del río Magdalena a través de acciones indirectas como la correcta captación, conducción y disposición del agua residual generada en la Alcaldía para que no llegue de forma directa al río Magdalena; por lo tanto es necesario que la PTAR disponible para este propósito se encuentre operando a su capacidad de diseño de forma eficiente.

En esta investigación se propone la evaluación de la calidad del agua de dos plantas potabilizadoras y una planta de tratamiento de agua residual localizadas en la alcaldía Magdalena Contreras de la Ciudad de México mediante la adaptación de dos índices de calidad del agua en donde se identifiquen los parámetros críticos con base en la normatividad aplicable así como los procesos y operaciones unitarias para los que se requiere prioridad en su mejora, así mismo se plantean indicadores del desempeño basados en la calidad del agua entre las barreras de tratamiento presentes en las plantas potabilizadoras.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Elaborar una propuesta de mejora de los servicios de potabilización y tratamiento de agua residual mediante la revisión y cálculo de indicadores del desempeño e índices de calidad del agua para garantizar el cumplimiento de la normatividad vigente.

2.2 Objetivos particulares

- Establecer la situación actual de operación de los procesos y operaciones unitarias para dos plantas potabilizadoras (PP's) y una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) ubicadas en la alcaldía Magdalena Contreras mediante visitas y entrevista con los operadores y así interpretar en conjunto los resultados de los indicadores e índices.
- Identificar métodos de evaluación de la calidad del agua basados en el cálculo de índices mediante la búsqueda y revisión de dos metodologías para calificar el agua producida en las PP's y PTAR.
- Proponer indicadores del desempeño con base en la información de calidad del agua disponible histórica y actual para establecer los procesos y operaciones unitarias que presenten baja eficiencia hacia la remoción de ciertos contaminantes en el agua.
- Realizar una propuesta de mejora de los procesos, operaciones unitarias y de la filosofía de operación de las PP's y PTAR basado en los indicadores e índices que hayan obtenido un resultado desfavorable para que la calidad del agua efluente de las plantas de estudio pueda cumplir los requerimientos de calidad según la normatividad aplicable.

3 ANTECEDENTES

3.1 Aspectos relevantes a cerca del río Magdalena

La microcuenca del Río Magdalena se ubica al sur poniente de la Ciudad de México, en ella nace el río Magdalena que constituye uno de los principales aportes de agua superficial de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). Este río nace en la sierra de las Cruces en la alcaldía Cuajimalpa a 3700 msnm (González, *et al*, 2010). Recorre 14.8 km por áreas boscosas comenzando con un relieve montañoso y desciende hasta adentrarse en la zona urbana a 2400 msnm (Nápoles, 2021) en la alcaldía Magdalena Contreras y allí recorre 13.4 km más de descenso hasta desembocar en Río Churubusco de la alcaldía Coyoacán que está completamente entubado e incorporado a la red de drenaje que fluye por debajo de la vialidad homónima, en la Ciudad de México (Figura 3.1).

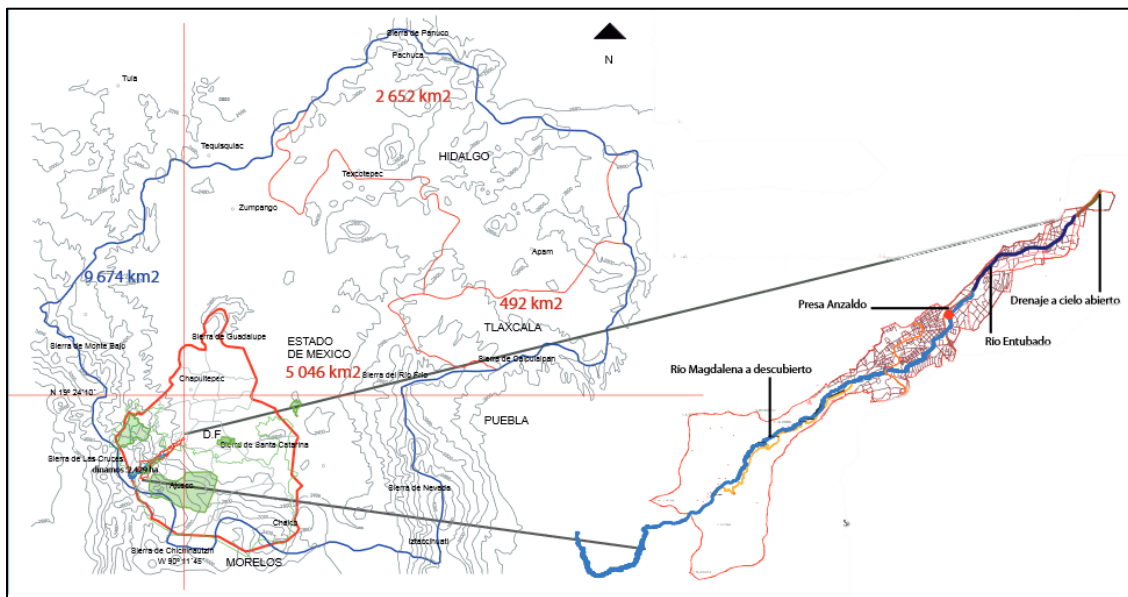


Figura 3.1. Ubicación de la cuenca del río Magdalena, límites estatales (rojo) dentro del área de la cuenca de México (azul). Fuente: SMA-CDMX, 2008.

El hecho de que el 52.5% del río se encuentre en área natural y 47.5% en área urbana (González, *et al*, 2010) implica dos formas muy distintas de relación con el entorno ya que, en las áreas no urbanizadas se presenta un clima semifrío con precipitaciones anuales de 1500 mm y una vegetación predominante de bosque de coníferas (Nápoles, 2021), además en esta área el río se alimenta de manantiales y escurrimientos de excelente calidad (González, *et al*, 2010) mientras que en las áreas urbanizadas, se transforma en un sitio de descargas de agua residual y

residuos sólidos urbanos (RSU), por mencionar lo más notable, lo que contribuye a origen heterogéneo de sus afluentes.

El río Magdalena tiene un flujo permanente que alcanza un promedio de $1 \text{ m}^3/\text{s}$, con picos en temporada de lluvias, de hasta $20 \text{ m}^3/\text{s}$ (SMA-CDMX, 2012) pero sólo el 40% del caudal promedio se aprovecha para abastecimiento a través de las plantas potabilizadoras (Figura 3.2) “Río Magdalena” (210 L/s) y “Río Magdalena 2” (200 L/s) (CONAGUA, 2018), mientras que el resto se mantiene en el sistema. El aprovechamiento del río Magdalena constituye una fuente potencial para cubrir la demanda hídrica de la población de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) ($72.5 \text{ m}^3/\text{s}$), que actualmente se basa en acuíferos ($52.2 \text{ m}^3/\text{s} = 72\%$) y de sistemas superficiales ($1.45 \text{ m}^3/\text{s} = 2\%$). De acuerdo con la Secretaría del Medio Ambiente de la CDMX, río arriba, el agua se encuentra limpia sin embargo, en sus partes media y baja existe contaminación severa debido a las descargas de aguas residuales y el vertimiento de RSU lo largo de su extensión. Otro problema es la pérdida de humedad en las zonas altas de las cuencas y los asentamientos irregulares en el suelo de conservación (SMA-CDMX, 2012).

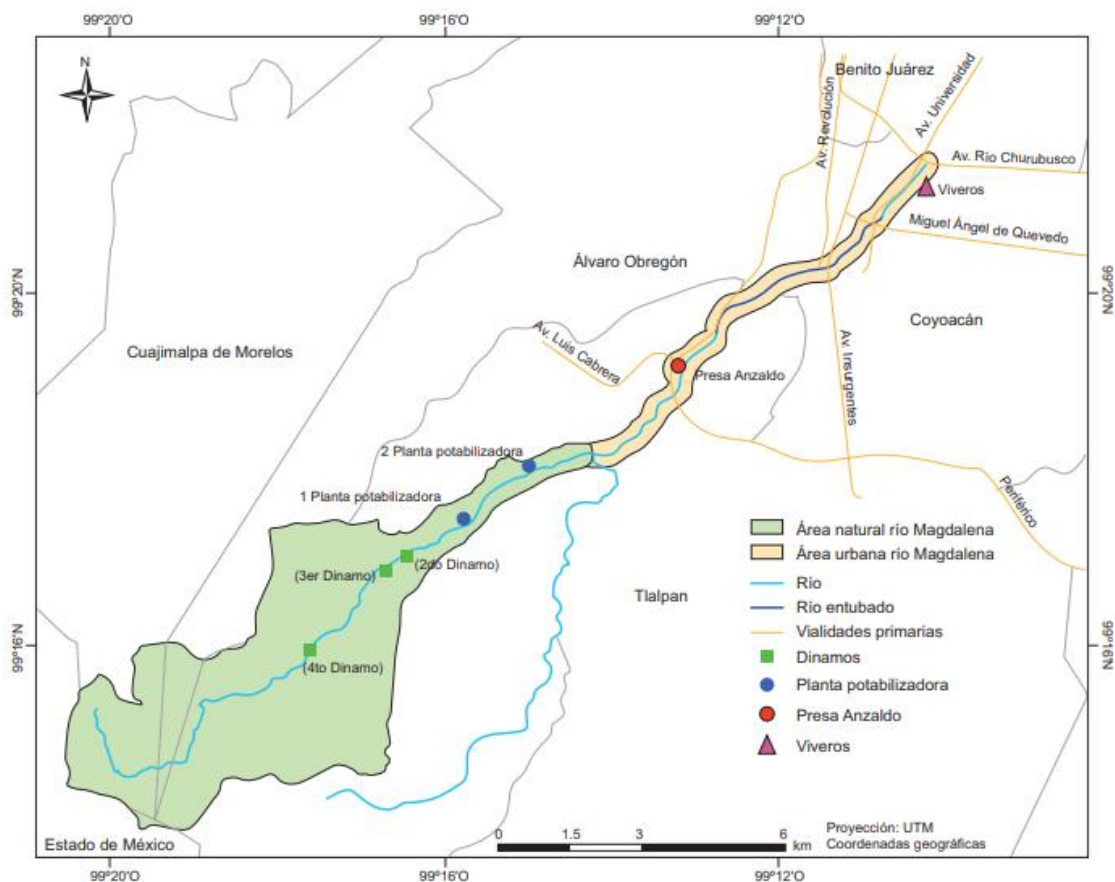


Figura 3.2. Delimitación del Río Magdalena y ubicación de zonas de relevancia en el entorno del río. Fuente: (Perló, 2016).

3.2 Panorama de las plantas potabilizadoras en México

México ha logrado importantes avances en la potabilización del agua con la que abastece a sus habitantes, cumpliendo así con el objetivo de incrementar y mejorar los servicios de agua potable y por añadidura, garantizando el Derecho Humano al Agua, decretado como mandato constitucional el 8 de febrero de 2012 a través de una reforma al párrafo sexto de artículo 4to constitucional (CONAGUA, 2017).

El avance en infraestructura en plantas potabilizadoras (Tabla 3.1) muestra un total de 984 en operación, con una capacidad conjunta de tratamiento de 147,767.2 L/s y un caudal potabilizado de 111,120.6 L/s, correspondientes al 75.2% de capacidad instalada, 2% menos respecto del año anterior (2020).

Tabla 3.1 Registro de plantas en operación para los años 2014-2021. Fuente: CONAGUA, 2021.

Año	Unidades en operación	Capacidad instalada (L/s)	Caudal potabilizado (L/s)
2014	779	138,045.29	96,274.75
2015	874	140,739.17	97,895.64
2016	908	140,332.06	101,412.80
2017	932	145,560.88	100,108.18
2018	965	144,835.0	110,252.2
2019	979	151,266.9	115,636.5
2020	997	152,682.6	117,617.9
2021	984	147,767.2	111,120.6

Se observa que en el ejercicio 2021 hubo una disminución respecto de año anterior en el número total de plantas (13 plantas menos), caudal total instalado (4,915.4 menos) y el caudal potabilizado (6,497.3 menos) lo cual se debe a que las plantas que existen actualmente enfrentan un problema financiero y/o cumplieron su vida útil, quedando algunas en un estatus de rehabilitación, motivo por el cual se vio disminuido el número de plantas en operación en el año 2021 (CONAGUA, 2021).

De acuerdo con el Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación (2021), los estados con mayor capacidad instalada en potabilización son el Estado de México (26,447 L/s), Jalisco (18,035 L/s), Tamaulipas (15,381 L/s) y Nuevo León (15,346 L/s). Sin embargo, si se considera sólo el caudal potabilizado destacan el Estado de México (18,089 L/s) Jalisco (17,455 L/s), Tamaulipas (12,751 L/s) y Sinaloa (9,804.84 L/s). Con base en los datos anteriores se establece que los estados de Jalisco y Tamaulipas trabajan

más cerca de su capacidad instalada (96.7 y 82.9% respectivamente) a diferencia del Estado de México que opera al 68.4% de su capacidad de diseño, ubicada debajo de la media nacional (75%), lo que representa un área de oportunidad para su análisis. De manera simultánea, destaca el hallazgo realizado en el Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación (2021) donde los estados de Nayarit, Quintana Roo y Yucatán no cuentan con plantas de potabilización gestionadas por el gobierno. Cabe mencionar que en el inventario no se incluyen plantas potabilizadoras o purificadoras de los sectores industrial, comercial y de servicios.

Con respecto a los procesos de potabilización más utilizados en México (Tabla 3.2) son ósmosis inversa (39.9%) y clarificación convencional (38.3%). Cabe mencionar que 82.7% del caudal potabilizado proviene de los procesos de clarificación convencional y 13.9% resulta de la filtración directa, por lo que se puede inferir que el 95% de la potabilización en el país se basa en dichos procesos.

Tabla 3.2 Plantas potabilizadoras municipales en operación por tipo de proceso.
Fuente: CONAGUA, 2021.

Proceso	Plantas		Capacidad Instalada		Caudal Potabilizado	
	No.	%	L/s	%	L/s	%
Ablandamiento	8	0.8	468.1	0.3	284.6	0.3
Adsorción	8	0.8	66.6	0.05	66.6	0.1
Clarificación Convencional¹	377	38.3	119,420	80.8	91,916.8	82.7
Clarificación de Patente²	25	2.5	860	0.6	293.4	0.3
Filtración Directa³	110	11.2	22,342	15.1	15,462.3	13.9
Filtración Lenta⁴	7	0.7	556.1	0.4	168.7	0.2
Filtro de Carbón Activado	32	3.3	17.4	0.01	13.2	0.01
Ósmosis Inversa	393	39.9	2,790.7	1.9	1,845.9	1.7
Otro (desaladoras principalmente)	22	2.2	576.2	0.4	399	0.4
Remoción de Hierro-Manganeso	2	0.2	670	0.5	670	0.6
Total Nacional	984	100	147,767.2	100	111,120.6	100

¹El tren de potabilización se integra con adición y mezcla rápida de reactivos químicos, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. ²Puede ser cualquier proceso de clarificación (por ejemplo, Clarificación convencional, Filtración directa y Filtros lentos), el cual haya sido modificado en alguna de sus partes y se considera de fabricación exclusiva por un fabricante. ³El tren de tratamiento se integra generalmente por mezcla rápida de reactivos químicos, filtración y desinfección. En condiciones especiales se prescinde de la adición de reactivos químicos. ⁴El tren se integra con filtración y desinfección, en donde el medio filtrante graduado no

trabaja estratificado y su limpieza es manual, extrayendo la capa más superficial del filtro con la materia retenida (SEMARNAT).

Con respecto a la Ciudad de México (Tabla 3.3) en los últimos 10 años de registro (2012-2021), se ha incrementado el número de plantas en operación (8), mientras que la capacidad instalada incrementó 6.83% (336.5 L/s), el caudal potabilizado incrementó en 12% (469 L/s), por lo que al 2021 se opera al 78.9 % de la capacidad instalada.

Tabla 3.3 Plantas potabilizadoras en operación de la Ciudad de México. Fuente: CONAGUA, 2021.

Año	No. Plantas	Capacidad Instalada (L/s)	Caudal Potabilizado (L/s)	% Operación
2012	39	4,592.5	3,422.0	74.5
2013	42	4,620.5	3,681.0	79.7
2014	43	4,790.5	3,806.0	79.4
2015	47	4,999.0	3,370.0	67.4
2016	47	4,979.0	3,582.0	71.9
2017	48	5,139.0	3,779.0	73.5
2018	48	4,919.0	3,774.0	76.7
2019	48	5,129.0	4,043.0	78.8
2020	47	5,009.0	3,891.0	77.7
2021	47	4,929.0	3,891.0	78.94

Si bien el incremento en la instalación de nuevas plantas potabilizadoras está a la alza, es necesario considerar el o los procesos de selección de la tecnología a emplear en el sitio, además de los aspectos sociales y económicos que permitan establecer la conveniencia y sostenibilidad de la planta para el lugar donde se construye además de asegurar que cumpla los objetivos para los que fue diseñada y no se convierta en un problema, principalmente de mantenimiento, en el futuro (Sánchez, 2017).

En lo que respecta a tratamiento de agua residual (Tabla 3.4) durante el periodo evaluado (2016-2021) se puede observar que el número de plantas incrementó en una unidad recientemente en el año 2021 por lo que la capacidad instalada se mantuvo constante hasta el 2020, mientras que el caudal potabilizado sufrió variaciones (2016-17, incremento del 26.6%, 2017-18 decremento del 15.4%) por lo que al término de este análisis, se opera a menos de la mitad de la capacidad instalada. Lo anterior evidencia la necesidad de tratar más agua residual y garantizar su reúso seguro para que de esta manera también se obtengan soluciones frente al denominado estrés hídrico (relación entre las extracciones de agua y el agua disponible) de la Ciudad de México (Pedrozo, 2022), ya que la Ciudad es el tercer estado de la República con mayor estrés hídrico y es así que la capital podría llegar al “Día Cero” de agua en 2028 (Domínguez, 2021).

Tabla 3.4 Plantas de tratamiento de agua residual en operación de la Ciudad de México. Fuente: CONAGUA, 2021.

Año	No. Plantas	Capacidad Instalada (L/s)	Caudal Potabilizado (L/s)	% Operación
2016	29	5,604.5	2288.7	40.83
2017	29	5,604.5	2897.8	51.70
2018	29	5,604.5	2451.5	43.74
2019	29	5,604.5	2451.5	43.74
2020	29	5,604.5	2436.7	43.68
2021	30	5,583.4	2,483.2	44.47

3.3 Cobertura de agua potable

De acuerdo con cifras del Censo del INEGI en 2020 los trabajos ejecutados por los tres órdenes de gobierno, federal, estatal y municipal permitieron alcanzar una cobertura nacional de agua entubada y desinfectada de 96.1% de viviendas particulares, avance respecto al último registro (2015) que dejó como beneficiados a 7.8 millones de personas para alcanzar la cifra de 120.5 millones con el servicio.

Tomando como base el año de 1990 y hasta 2020 se tiene un avance del 17.7% de la cobertura nacional de agua potable (Tabla 3.5). A pesar de que se pretende lograr la cobertura del acceso universal a este recurso hídrico vital, al día de hoy hay millones de personas (4.9 millones) en México que no cuentan con el acceso debido o quizá este sea nulo, por lo que representa un área de oportunidad que debe ser cubierta de forma inmediata. El aumento en la cobertura va estrechamente relacionado con el aumento poblacional (44.9 millones en 30 años), por lo que los beneficiados que se muestran para cada lustro son distintos de las personas que aún se consideran sin el servicio, tal como en el periodo 2015 a 2020 en donde los beneficiados fueron 7.8 millones y sin embargo sólo hubo una reducción del 1.8 millones en personas que no tienen el servicio, esto se debe al aumento en la población de 5.8 millones.

Tabla 3.5 Evolución de la cobertura nacional de agua entubada y desinfectada de 1990 a 2020. Fuente: CONAGUA, 2021.

Año	Habitantes (millones)
------------	------------------------------

	Población total en viviendas particulares	Con servicio	Sin servicio	Beneficiados	Cobertura (%)
1990	80.4	63.1	17.4	0	78.4
1995	90.7	76.7	14	13.7	84.6
2000	95.4	83.8	11.6	7	87.8
2005	100	89.2	10.8	5.5	89.2
2010	110.5	100.5	10	11.4	90.9
2015	119.5	112.7	6.7	12.2	94.4
2020	125.3	120.5	4.9	7.8	96.1

Es comparación los estados que destacan por su alto nivel de cobertura son Aguascalientes y Colima con la mayor cobertura (99.3 y 99.1 % respectivamente), el estado de Guerrero con la menor (88.1%) así como 21 estados que rebasan la media nacional de cobertura. En el caso de la Ciudad de México, esta se encuentra en el 98.6 %, 1.9 puntos porcentuales más respecto a 2015 (CONAGUA, 2016) que se ubicó en 96.7%, sin embargo en 2010 se tenía 97.7 %, por lo que en estos últimos 10 años no siempre se ha tenido un incremento sostenido de cobertura alcanzada.

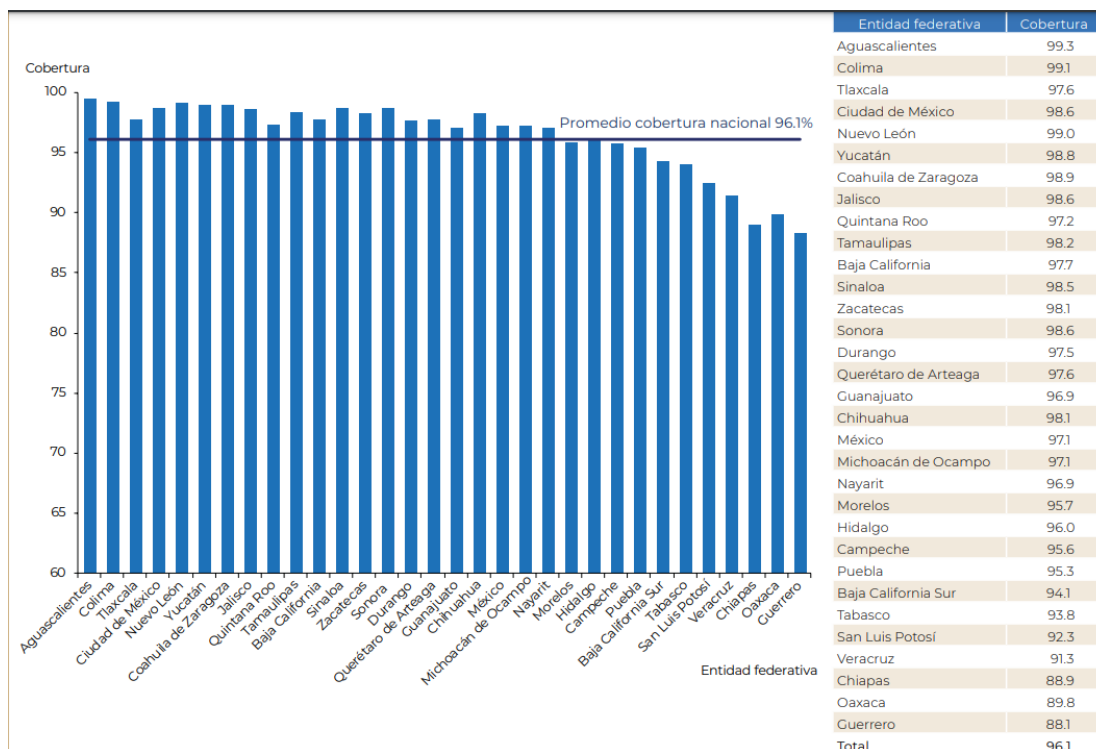


Figura 3.3 Cobertura de agua potable por entidad federativa con corte al 2020.
Fuente: CONAGUA, 2021.

3.4 Programa Delegacional de Desarrollo Urbano (PDDU) para la Alcaldía Magdalena Contreras 2005

Con base en el PDDU vigente (2005-actual) de la alcaldía La Magdalena Contreras (GDF, 2005), las fuentes de abastecimiento de agua potable con que contaba la alcaldía hasta 2005 eran:

- Sistema Lerma Sur, con un gasto total de 200 L/s.
- **Sistema Río Magdalena, que aporta un gasto de 210 L/s.**
- Sistema de Manantiales conformado por: Apapaxtla, El Ocotal, El Sauco, El Potrero, Las Palomas, Las Ventanas, Los Pericos, Malpaso, Ojo de Agua, Rancho Viejo y Tepozanes, que aportan un caudal de 120 L/s.
- Sistema de Pozos: integrado por el Pozo Anzaldo, Pozo Padierna y Pozo Pedregal II, con un aporte de 80 L/s.

Se enfatiza el Sistema Río Magdalena que hasta 2005, el aporte de este se daba a través de la planta potabilizadora “Río Magdalena” siendo el 33.33% del total para toda la alcaldía, es decir que un tercio de las fuentes de abastecimiento provenía del agua que se potabiliza del río Magdalena, sin embargo actualmente se conoce al menos otro aporte de este mismo sistema que es la planta potabilizadora “Río Magdalena 2” con un caudal de 200 L/s conformando en total 410 L/s.

Lo anterior refuerza la importancia de que la planta “Río Magdalena” cuente con un sistema de potabilización adecuado y eficiente, mismo que se puede evaluar de manera continua a través de la verificación de los procesos y operaciones unitarias y en el caso correspondiente, la intervención mediante estrategias de mejora. Su efluente puede cumplir con la NOM-127-SSA1-1994, sin embargo, esto no es indicativo de que los procesos son llevados a cabo de forma adecuada.

Uno de los problemas presentes en la demarcación es la descarga directa de aguas residuales y desechos de origen doméstico en las barrancas (Texcalatlaco y El Carbonero) y hacia corrientes hidrológicas (río Magdalena), así como la mezcla de aguas residuales y pluviales. En la alcaldía, el servicio de drenaje es de tipo combinado, por lo que concentra y encauza tanto aguas residuales como pluviales a través de una red primaria (24 km) y una secundaria (238 km) integrada por 8,000 pozos de visita y 600 coladeras pluviales (GDF, 2005).

3.5 Estado actual de la Planta Potabilizadora “Río Magdalena”

La PP “Río Magdalena” se localiza en los 19°17'19" N y los 99°15'51" W en la alcaldía Magdalena Contreras de la Ciudad de México (Figura 3.4), dentro de una

zona conocida como el “Primer Dínamo”. Actualmente la planta trabaja al 100% de su capacidad, beneficiando a una población aproximada de 180,000 habitantes. Esta comenzó operaciones en 1979, con un caudal instalado de 200 L/s (Campos, 2015).



Figura 3.4 Localización de la planta potabilizadora “Río Magdalena”. A partir de Google Earth, 2021.

A pesar de la búsqueda de referencias para conocer el estado actual de la PP, y su filosofía de operación, no fue posible encontrarlo, por lo cual se procedió a realizar visitas para la obtención de la información. De acuerdo con las visitas realizadas a la planta en los meses de Agosto-Noviembre del 2021 en entrevista con operadores e ingeniera a cargo comentaron que “inicialmente la PP operaba de forma automatizada y contaba con un laboratorio de calidad del agua, pero éste dejó de operar cuando el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) decidió centralizar el control de calidad, aproximadamente después de 1982”. Al respecto de los cambios a lo largo de la historia de la PP la ingeniera Ofelia Márquez comentó “Desde sus inicios, esta PP no ha sufrido modificaciones ni remodelaciones en sus procesos y no han sido instaladas nuevas tecnologías, a pesar de los cambios en la calidad del influente a lo largo del tiempo, por ejemplo, el valor del pH que se ha incrementado de ~6.9 a ~7.8 unidades (lo que afecta procesos como la coagulación y desinfección que son altamente dependientes del pH) o, el incremento en la concentración de materia orgánica debido a la actividad piscícola de la zona, no obstante, recientemente (2018) se han realizado cambios en la infraestructura civil de la PP, como es el caso del levantamiento de una barda perimetral en el área de

captación y cambios en la operación de la planta en términos de la descarga de lodos a un colector periférico y no al río como inicialmente se hacía, ya que primero se debe establecer la posibilidad de aprovechamiento de los lodos según la NOM-004-SEMARNAT-2002 en donde se identifica por tipo y clase o si pasa a disposición final. Asimismo, se han atendido problemas de mantenimiento como reparación de fugas, bombas, sistema de iluminación y aplicación de pintura anticorrosiva; sin embargo, es imperativo atender otros problemas tales como, el abasto de reactivos de cloro en buen estado, el remplazo del material de empaque de los filtros, debido a que en el último cambio se colocaron muchos materiales finos que provocan taponamiento, además se requiere el remplazo de tuberías con antigüedad de más de 40 años ya que éstas vibran con las operaciones de apertura y cierre de válvulas”. Con respecto a la posibilidad de incorporar equipo automatizado en esta PP la ingeniera comentó “se necesitaría la automatización total y no parcial de la planta ya que una automatización parcial no es funcional para las maniobras de operación. También es necesario dar mantenimiento a las tolvas dosificadoras de CaO y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ así como la reparación del montacargas y la planta generadora de energía, el remplazo o mantenimiento de los dosificadores, bombas y motores, así como un mantenimiento general a la planta”. Otro tema que fue cuestionado en la visita fue la disponibilidad de equipos para medición de parámetros en campo como cloro, turbiedad, pH, conductividad, color, temperatura, dureza y alcalinidad debido a que la medición de parámetros en tiempo real dejó de operar hace ~15 años, lo que dificulta la toma de decisiones para la operación de la planta, ya que al no tener registro de estos parámetros básicos se fomenta aún más las acciones empíricas para operarla.

La PP opera por gravedad con un gasto de 210 L/s (10 L/s mayor al gasto de diseño). Cuenta con un sistema de bombeo integrado por 2 bombas dosificadoras de hipoclorito de sodio (NaClO), cuatro bombas de 7 hp integradas a las tolvas para la preparación de coagulantes, dos bombas de 15 hp para retrolavado de filtros (Figura 3.5), dos bombas de 5 hp para dosificación de químicos y dos bombas de 3 hp para servicios propios de la PP tales como, sanitarios, laboratorios, etc. Respecto a la distribución de la PP, ésta cuenta con cuartos de almacenamiento y dosificación de reactivos químicos, sala de operación (no funcional), cuarto de bombas y galería de tubos, oficinas, pasillos, laboratorio, sanitarios y áreas verdes.



Figura 3.5 Fotografía del sistema de bombeo de la planta potabilizadora Río Magdalena (2021)

El caudal es captado río arriba a ~250 m de la PP en la denominada “obra de captación”. En el Diagrama de Flujo de Proceso (Figura 3.6), se observa un pretratamiento a base de rejillas metálicas que impiden el paso de sólidos grandes al proceso y un desarenador de concreto. Posteriormente, el influente pasa por el desarenador (cuya limpieza, de acuerdo con los operadores se efectúa cada 15 días en temporada de lluvia y de 1.5 a 2 meses en temporada de estiaje).

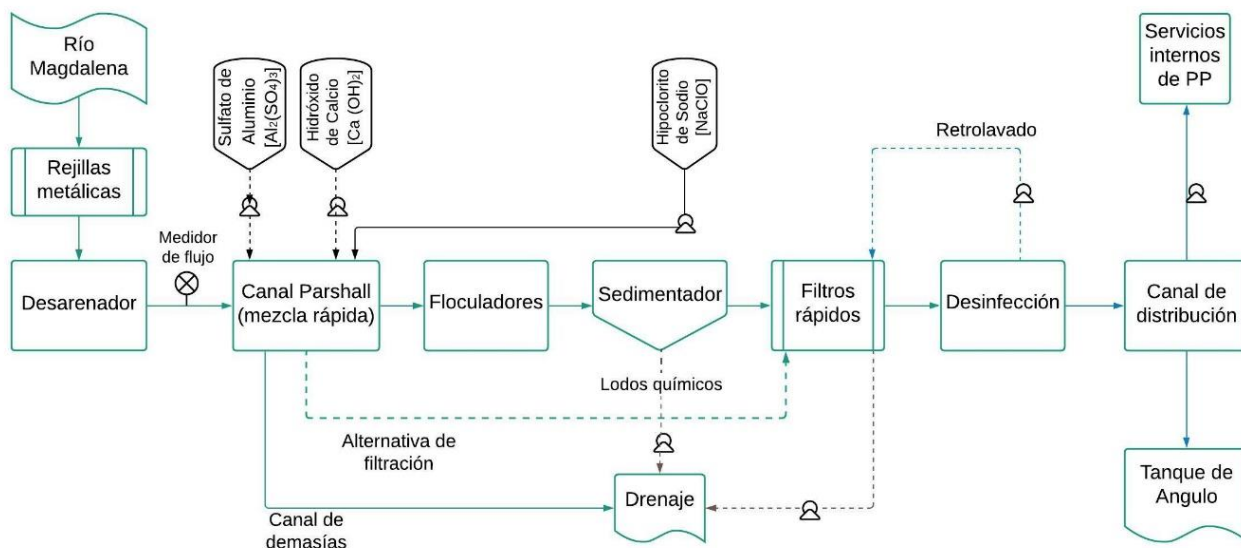


Figura 3.6 Esquema del tren de potabilización de la planta “Río Magdalena” (elaboración propia)

De acuerdo con la entrevista a los operadores “durante la temporada de lluvia el desarenador se azolva al 100% por lo cual se hace necesaria su limpieza y entonces el caudal es desviado a la planta a través de la obra de captación auxiliar. La limpieza del desarenador se realiza manualmente con agua del mismo río y, tanto los lodos desazolvados como el agua de limpieza gastada, son devueltos al caudal del río aguas abajo de la obra de captación”.

El caudal captado es encofrado antes de su ingreso a la PP y cuantificado con un medidor tipo Venturi que es revisado cada ocho días; posteriormente se conduce hacia un canal Parshall (Figura 3.7) por una tubería subterránea de acero al carbón de 16” de diámetro. El canal Parshall opera a su capacidad máxima y cuenta con un canal de demasías conectado a la red de drenaje. En el canal Parshall se realiza una oxidación (precloración) con hipoclorito de sodio (NaClO) que consume un total aproximado de 500 a 600 L/día. Se procura mantener una concentración de cloro total de 1.5 mg/L en todo el proceso y cloro residual de 1.2 mg/L como efluente de la planta para el cumplimiento de la NOM-127-SSA1-1994. El abasto de NaClO es realizado por el SACMEX cada ocho días.



Figura 3.7 Canal Parshall, punto de dosificación de NaClO , Ca(OH)_2 y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

Cercano al punto de dosificación de hipoclorito de sodio (NaClO), se realiza la dosificación de hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) (cal hidratada) como medio floculante o sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) granulado cuando el agua presenta color o turbiedad. Cabe destacar que la estimación de dichas dosificaciones se basa en la experiencia de los operadores usando el criterio de observación de la turbiedad y coloración del agua (métodos empíricos). La preparación de los coagulantes se realiza en 2 tolvas (Figura 3.8) destinadas para cada reactivo, en proporción de dos toneladas de sulfato de aluminio por 1.5 toneladas de CaO (cal viva).



Figura 3.8 Tolvas dosificadoras.

El caudal de salida del canal Parshall es conducido a dos unidades gemelas de floculación, cada una de éstas con dos cámaras y dos agitadores de paletas. Posteriormente, el caudal es transferido por una canaleta lateral hacia dos cámaras de sedimentación (Figura 3.9). Los sedimentadores cuentan con módulos tubulares y los sólidos sedimentados son purgados, de acuerdo con los operadores, cada 2 horas durante ~1 minuto y drenados a un colector de lodos conectado al drenaje.



Figura 3.9 Cámaras de sedimentación.

El agua clarificada es enviada y distribuida equitativamente a un tren de 4 filtros rápidos abiertos (Figura 3.10) de flujo descendente. Al cuestionar a la ingeniería a cargo sobre las dimensiones de los filtros indicó lo siguiente “tienen 4 m de profundidad y 1.20 m de empaque grava-arena-antracita soportada en un falso fondo y un tiempo de retención hidráulico (TRH) de aproximadamente 15 minutos. Los filtros se retrolavan cada 24 horas a contraflujo mediante una tubería de aspersores de 2” de diámetro, empleando agua del caudal potabilizado” (efluente de la planta).



Figura 3.10 Filtros rápidos abiertos a la atmósfera.

El agua del retrolavado de los filtros se envía al colector de lodos que conecta con el drenaje de la ciudad, mientras que el agua filtrada es drenada por gravedad hacia un canal de distribución llamado “vitrina” (Figura 3.11) donde tiempo atrás se realizaba una desinfección (postcloración) con NaClO, pero actualmente solo en condiciones extraordinarias se llega a ocupar. El efluente filtrado fluye en la “vitrina” a través de un vertedor, donde finalmente es entubado y conducido 2 km río abajo de la planta, hacia una estación de re-bombeo y almacenamiento llamada “Tanque de Angulo”, que a su vez distribuye 100 L/s a otra estación llamada “Tanque Reynaco” y 110 L/s al “Tanque La Mesita”, de acuerdo con la ingeniería a cargo.



Figura 4.11 Vitrina del efluente de la planta; de lado derecho se ubica la salida de los filtros rápidos y el punto de dosificación de cloro cuando así se requiere, y de lado izquierdo el efluente de la planta.

Cuando la planta se encuentra fuera de operación por mantenimiento, el proceso de potabilización del agua es casi nulo, pues solamente incluye el pretratamiento que consiste en el cribado grueso a través de las rejillas metálicas y la sedimentación primaria a través del desarenador de concreto. “Las labores de mantenimiento tienen una duración aproximada de dos semanas”, según comentaron los operadores en turno.

3.6 Infraestructura civil

La planta (Figura 3.12) cuenta con caseta de vigilancia, oficinas, sanitarios y regaderas, caseta para subestación eléctrica, caseta para centro de control de motores, cuarto de control de válvulas automáticas, caseta para preparación de químicos y laboratorio (actualmente no habilitado) para monitorear la calidad del agua en la planta.

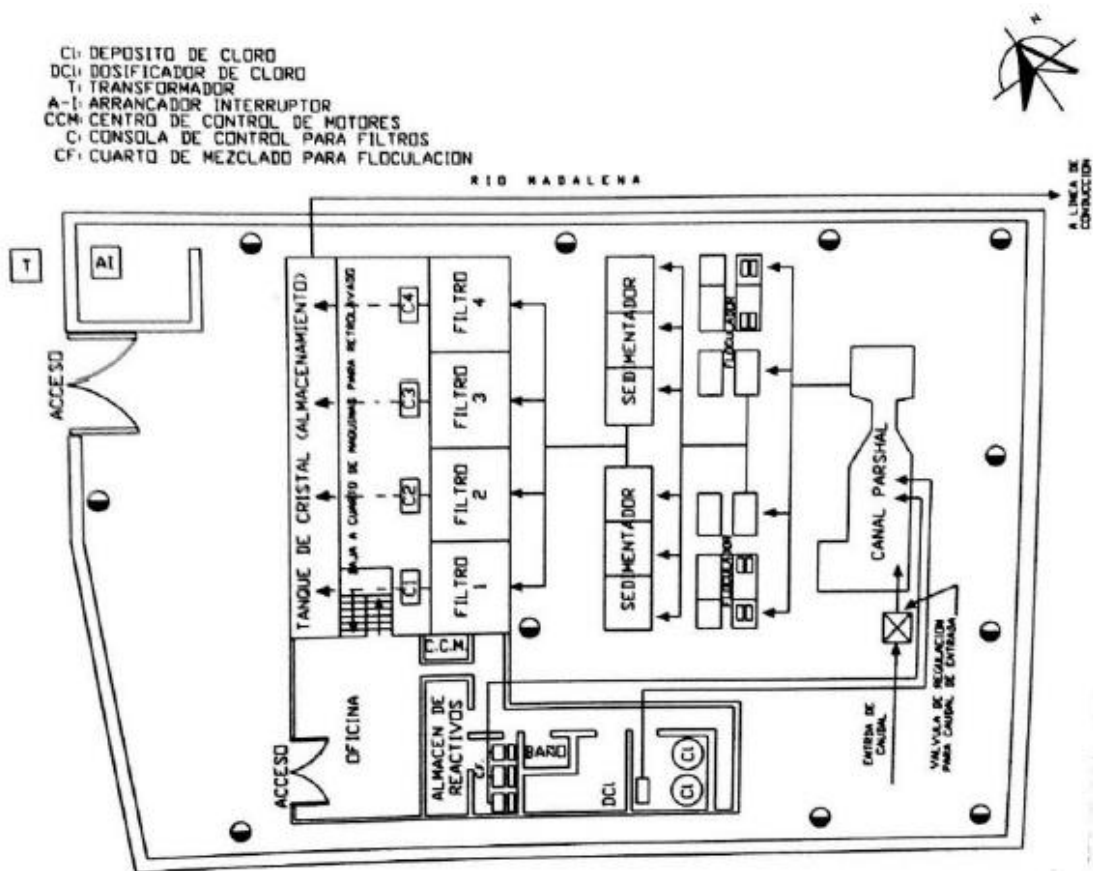


Figura 3.12 Dibujo de la vista en planta de la potabilizadora Río Magdalena.
Fuente: Organismo operador de la planta.

La extensión aproximada de las instalaciones de la PP es de 2,538 m². Este cálculo se realizó a través del dibujo del polígono en Google Maps (Figura 3.13).



Figura 3.13 Vista aérea de la planta potabilizadora Río Magdalena así como la delimitación del terreno. Elaborado a partir de Google Maps, 2021.

Con base en la información recabada de la planta potabilizadora “Rio magdalena” se destacaron los siguientes aspectos acerca de la situación actual de la misma:

- ✓ La operación actual supera a la de diseño, 210 L/s cuando la capacidad instalada es de 200 L/s, sin embargo, de acuerdo con la ingeniería a cargo al momento de realizar las entrevistas, esto no ha significado alguna afectación en la operación de la planta.
- ✓ Se requiere remodelaciones o cambios totales en infraestructura, equipos auxiliares y operaciones unitarias, debido a que han rebasado su tiempo de vida útil (43 años de operación), además se han presentado cambios relevantes en la calidad del agua del influente (incremento del pH promedio, incremento de la materia orgánica, por mencionar algunos).
- ✓ Debido a la falta de equipo de monitoreo de parámetros de calidad en campo las decisiones respecto a la operación de equipos y dosificación de reactivos para coagulación, floculación y desinfección se llevan a cabo de manera empírica, por lo que incrementa la incertidumbre a cerca de cuan bien se llevan a cabo los procesos.

3.7 Estado actual de la Planta Potabilizadora “Río Magdalena 2”

La planta potabilizadora “Río Magdalena 2” se localiza en los 19°18'00” N y los 99°15'00” W (Figura 3.14) en la alcaldía Magdalena Contreras de la Ciudad de México. Esta potabilizadora comenzó operaciones el 13 de abril de 2009 (CONAGUA, 2009) con un caudal instalado de 200 L/s bajo el esquema de filtración directa, que según el Glosario de la SEMARNAT vigente al 2022 implica *un proceso de clarificación para potabilizar agua superficiales o subterráneas con niveles bajos de turbiedad, color y/o microorganismos. Bajo este esquema, el tren de tratamiento se integra generalmente por mezcla rápida de reactivos químicos, filtración y desinfección y, en condiciones especiales se prescinde de la adición de reactivos químicos.*

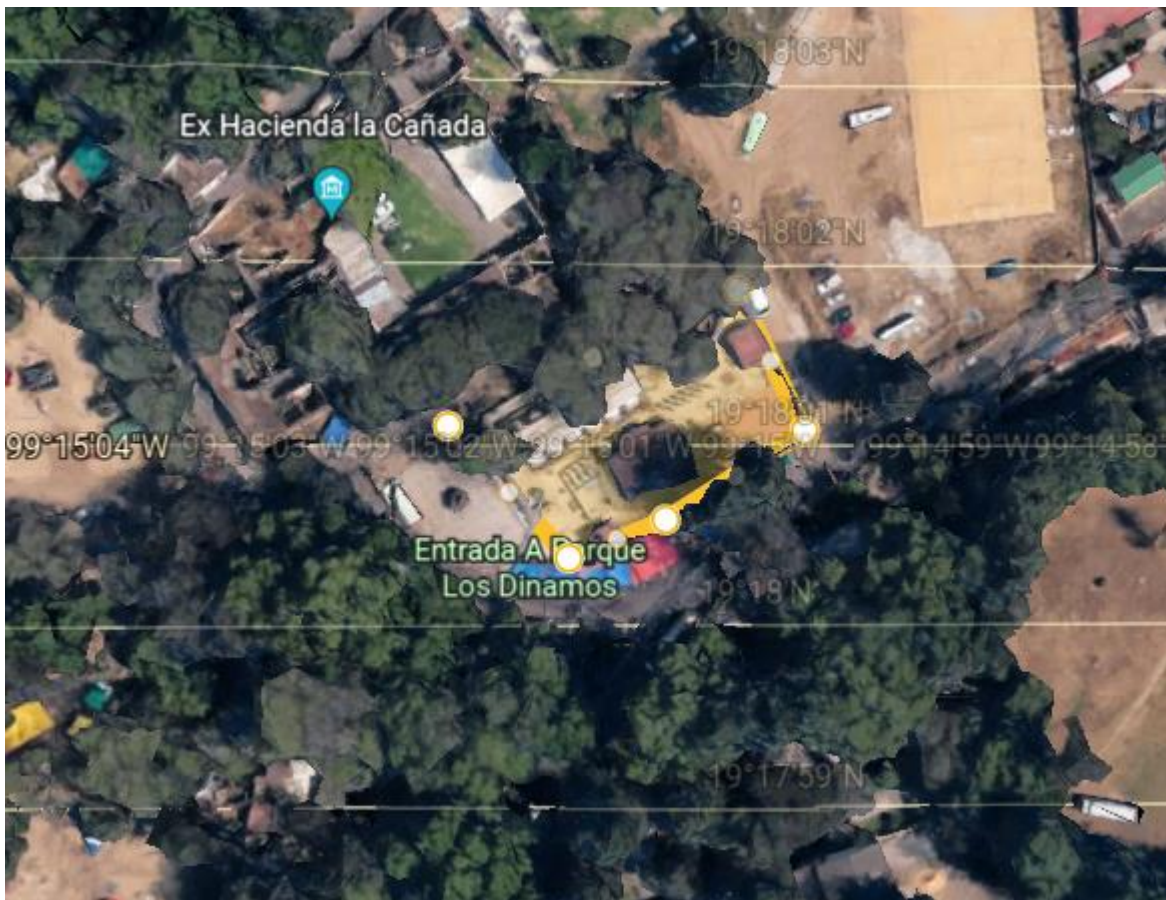


Figura 3.14 Ubicación de la planta potabilizadora “Río Magdalena 2”. Elaborado a partir de Google Earth, 2022.

A pesar de la búsqueda de referencias para conocer el estado actual de la PP2, y su filosofía de operación, no fue posible encontrarlo, por lo cual se procedió a realizar visitas para la obtención de la información. De acuerdo con las visitas

realizadas a la planta en los meses de Agosto-Noviembre del 2021 en entrevista con operadores e ingeniero a cargo comentaron que “esta planta fue diseñada para trabajar de manera automática, sin embargo desde el inicio de su operación, existieron problemas que impiden su funcionamiento automático”. Por ejemplo, la planta cuenta con sensores de luz telemétricos y un Centro de Control de Monitoreo, pero los sistemas de monitoreo y control de niveles no están calibrados; también cuenta con un analizador de cloro y turbiedad en el efluente de la planta que nunca se ha utilizado porque no se ha capacitado al personal de operación. Actualmente la operación de la planta es manual y potabiliza 200 L/s hasta el punto en donde se almacena internamente en la planta, de los cuales solamente 150 L/s son enviados a “Tanque Reynaco” por falta de equipo de bombeo.

La planta ha sufrido serios problemas de vandalismo, lo que hace imperativo reforzar los cinturones de seguridad de la planta y sus procesos, ya que uno de los módulos de sedimentación de alta tasa fue objeto de intento de robo y por lo tanto se afectó la eficacia de este, aunque se desconoce con precisión a que grado ha sido la afectación; también carece de un mantenimiento general. La PP2 opera de manera continua los 365 días del año y solamente deja de operar cuando la turbiedad del agua es muy alta, según método empírico de los operadores, o cuando el “Tanque Reynaco” se encuentra lleno y les indican que detengan la operación de la planta o el bombeo según sea el caso.

El proceso de potabilización inicia con la obra de toma o captación del influente. En los inicios de la PP2 el influente captado era conducido hacia un separador de sólidos (pretratamiento) que tenía una red en el fondo que cuando se saturaba era retirada con ayuda de un polispasto, este separador nunca funcionó debido a que su dimensionamiento era muy pequeño para el caudal de diseño. Entonces, en el año 2010 se realizó una reingeniería que incluyó la instalación y construcción de una compuerta con rejillas metálicas para retener sólidos grandes, acoplada a un canal para la captación del influente, además de la instalación de dos sedimentadores de alta tasa (Figura 3.15).



Figura 3.15 Sedimentador primario de alta tasa.

El caudal captado del Río Magdalena es conducido hacia los sedimentadores de alta tasa donde las partículas sedimentan por colisión con las paredes del sedimentador y los módulos de placas paralelas con los que cuenta el sedimentador (Figura 3.16). Anteriormente (de 2009 a 2020), los lodos de los sedimentadores eran extraídos mediante bombas sumergibles y puestos a disposición; debido a que estos dejaron de funcionar a partir de 2020 (por vandalismo) hay una purga directa al río “aguas abajo” de la obra de toma cada 2 horas durante aproximadamente 15 min.

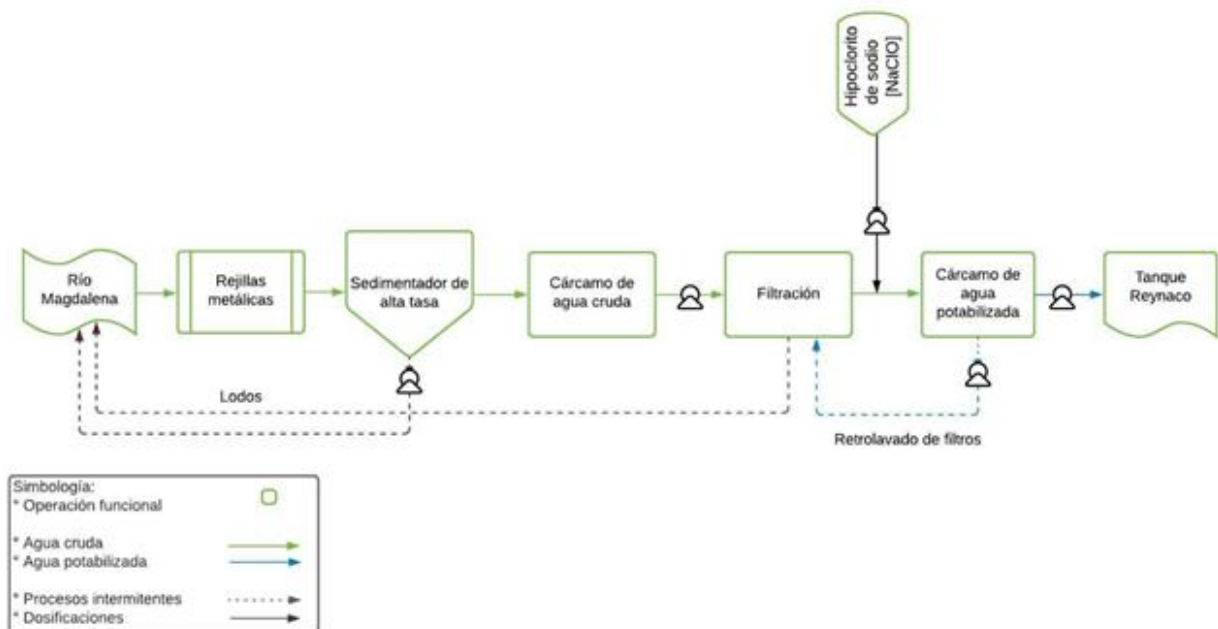


Figura 3.16 Esquema de potabilización para la planta “Rio Magdalena 2”. Elaboración propia.

El efluente de los sedimentadores es conducido por una tubería de acero al carbón de 20” de diámetro hacia un cárcamo de agua cruda (Figura 3.17) con capacidad de ~216 m³ y dimensiones de 4m x 9m x 6 m, aunque la profundidad del cárcamo es de 6 m, el nivel de operación corresponde a 4 m.



Figura 3.17 Cárcamo de agua cruda.

La planta contaba con un medidor de flujo en el influente que dejó de funcionar en el año 2017. A finales del 2018, como parte de un proyecto ejecutivo del Rio Magdalena 2 se instaló un sensor para medición de presión y flujo en la línea de entrada al cárcamo de agua cruda, pero el personal de la planta no tiene acceso a los datos. El cárcamo cuenta con 3 bombas de transferencia de 50 hp y capacidad de envío de 107 L/s para enviar el agua cruda hacia el tren de filtración. La filosofía de operación de las bombas consiste en accionar una sola bomba mientras las otras dos permanecen en *stand by*. Cabe mencionar que dichas bombas no han recibido mantenimiento desde el año 2013.

En la línea de descarga de las bombas de transferencia se adecuaron dos puntos de dosificación de hidróxido de calcio (NaOH) y sulfato de aluminio (Al₂(SO₄)₃) como floculantes, pero dicha operación nunca se realizó debido a que no era funcional lo que se pretendía realizar, pues para llevar a cabo un proceso de floculación se requiere del diseño y construcción de unidades de floculación-sedimentación con sus debidos tiempos de retención. No obstante, tales puntos de dosificación sirven como puntos de muestreo.

El agua cruda es bombeada hacia un tren de filtración (Figura 3.18) integrado por 12 filtros de alta presión con lecho de antracita (10cm)-arena (35 cm)-gravilla-grava,

de los cuales solamente funcionan 10 y operan 8, quedando 2 en *stand by*. Los filtros trabajan a una presión máxima de 2 kgf. La presión de operación de los filtros va de 1.5 a 2 kgf, cuando se sobre pasa esta presión, o bien, cuando el agua es muy turbia, se procede al retrolavado. Este se realiza una vez por turno con agua potabilizada tomada del cárcamo de desinfección y el agua de retrolavado es enviada al río. Adicionalmente, se pueden realizar enjuagues superficiales cuando los retrolavados no se consideran altamente necesarios.



Figura 3.18 Tren de filtros a presión con operación en paralelo.

Los filtros cuentan con cinco válvulas para abrir y cerrar entradas y salidas de agua para retrolavado, enjuague y filtración, pero debido a que la planta opera de forma manual cuando está diseñada para operar automáticamente, los actuadores de los filtros se bloquean causando problemas. Posteriormente, el agua filtrada es conducida por una tubería de 16" (Figura 3.19) donde se realiza la desinfección con hipoclorito de sodio hacia un cárcamo de desinfección de 2 m de profundidad y aproximadamente 72 m³. El dosificador de cloro suministra una concentración de 2 mg/L, consumiendo una cantidad de 700 a 800 litros por semana.



Figura 3.19 Punto de dosificación de hipoclorito de sodio.

El efluente potabilizado es enviado al “Tanque Reynaco” que a su vez abastece al “Tanque la Mesita” y a ocho colonias de la Alcaldía Magdalena Contreras (Ampliación Lomas de San Bernabé, El Ermitaño, Huayatla, La Carbonera, Lomas de San Bernabé, Ocotál, Pueblo Nuevo Alto y Tierra Unida). Cabe mencionar que los servicios internos de la planta son abastecidos de la red de agua potable y no de la propia potabilizadora.

En el cárcamo de agua efluente se encuentran tres bombas de 100 hp que dan un flujo individual de 50 L/s para abastecer a “Tanque Reynaco” y tres bombas más de 125 hp que actualmente se encuentran fuera de operación por descompostura de la flecha. Las tres bombas de 100 hp son suficientes para enviar 150 L/s. Sin embargo, la planta trata 200 L/s de los cuales 50 L/s no pueden ser transferidos por falta de equipo de bombeo. Además, la bomba sumergible que se utilizaba para bombear el agua de retrolavado desde el cárcamo de agua potabilizada a los filtros, también está descompuesta, debido a esto se tuvo que hacer una adaptación con una bomba seca para llevar a cabo la operación. Sin embargo, es necesario contar con un equipo de bombeo auxiliar para alternar el funcionamiento de la bomba de retrolavado.

Con base en la información recabada de la planta potabilizadora Rio Magdalena 2 se destacaron los siguientes aspectos acerca de la situación actual de la misma:

- ✓ La planta se diseñó para tener una operación automática, pero debido a problemas en sensores, controladores y medidores de nivel se ha operado de forma manual, lo que afecta en la eficiencia de las operaciones unitarias, ya que se toman en cuenta criterios empíricos.

- ✓ Se utilizan cuatro bombas para el envío del efluente a los Tanques de distribución final del agua, pero debido a que una de ellas se encuentra descompuesta, sólo se envían 150 L/s de los 200 L/s que trata la planta.

3.8 Estado actual de la Planta de Tratamiento de Agua Residual “Río Magdalena”

La planta de tratamiento de agua residual “Magdalena Contreras” se localiza en los 19°18’10” N y los 99°14’22” W en la alcaldía Magdalena Contreras de la Ciudad de México (Figura 3.20). Esta PTAR inició operaciones en 2013 con el objetivo de disminuir el uso de agua potable para el riego de áreas verdes, además de destinar parte del agua tratada a sanitarios de panteones, mercados públicos, campos de fútbol; hacia el riego de proyectos productivos de comuneros y ejidatarios, así como atender incendios (Crónica, 2013). La capacidad de la PTAR es de 50 L/s, suministrados por el Río Eslava y un colector marginal.



Figura 3.20 Localización de la PTAR “Magdalena Contreras”. Elaborado a partir de Google Maps, 2021.

El proceso de tratamiento (Figura 3.21) inicia con la captación del influente que llega a la PTAR por medio de una alcantarilla de concreto ubicada en los límites de batería de la planta. El agua residual captada es sometida a un pretratamiento constituido por dos módulos de rejillas automáticas para cribado grueso y fino.

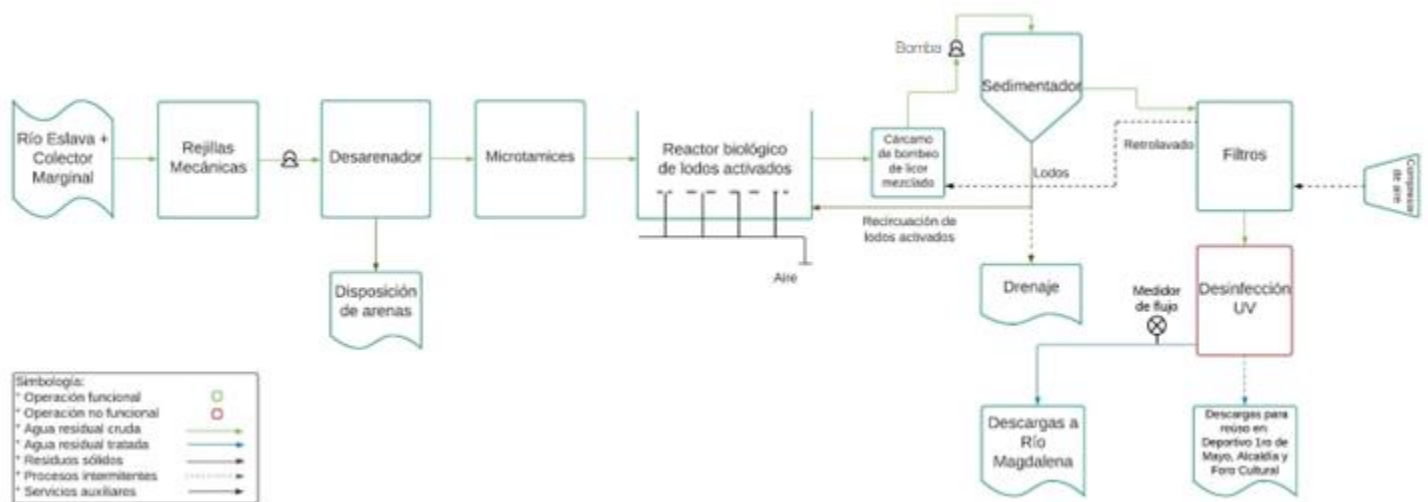


Figura 3.21 Esquema de tratamiento de agua residual en la PTAR “Río Magdalena”.

El agua proveniente del sistema de cribado es conducida a un cárcamo de bombeo de aproximadamente 75m³ constituido por tres bombas (Figura 3.22) de 10hp sumergibles con capacidad individual de 50 L/s operando alternadamente, pues un solo equipo de bombeo es suficiente para transferir a la siguiente etapa el caudal de operación de la PTAR.



Figura 3.22 Cárcamo de bombeo influente.

El agua es bombeada hacia un par de desarenadores cuyo fin es eliminar arcillas, grasas y aceites. La arena es depositada en contenedores de plástico que son recolectados por personal del SACMEX aproximadamente cada mes y medio.

El agua proveniente de los desarenadores es conducida a dos unidades de microtamizadores rotatorios (Figura 3.23) de 50 micrómetros de malla cuya función es eliminar sólidos finos de hasta esas dimensiones ($50\ \mu\text{m}$).



Figura 3.23 Microtamizadores rotatorios.

Posteriormente el caudal es dividido e ingresado al reactor de lodos activados (Figura 3.24) conformado por dos tanques de aireación con un TRH de 8 horas y en donde se monitorean *in situ* los sólidos suspendidos volátiles, el oxígeno disuelto y el índice volumétrico de lodos. El proceso de lodos activados requiere del suministro constante de aire, por lo que se cuenta con tres sopladores como un servicio auxiliar. En el reactor, la aireación se distribuye de manera ascendente por medio de platos tipo cilindro.



Figura 3.24 En la imagen de lado izquierdo se muestra el tanque de aeración, en la derecha el cobertizo en donde se encuentran los sopladores.

El licor mezclado es enviado a un cárcamo conformado por tres unidades de bombeo operando alternadamente, desde donde es bombeado hacia dos sedimentadores secundarios elevados (Figura 3.25) Esta disposición de las unidades de proceso permite que la recirculación de lodos activados ocurra por gravedad. Aproximadamente el 45% de la biomasa es recirculada al reactor biológico y el resto es purgado al drenaje.



Figura 3.25 Sedimentadores secundarios elevados en una instalación civil de primer piso por arriba del tanque de aeración.

El efluente clarificado es distribuido en 4 filtros (Figura 3.26) de flujo descendente de arena-sílica autolimpiables que emplean aire comprimido para su limpieza. El efluente filtrado es enviado al proceso de desinfección con lámparas ultravioleta el cual tiene aproximadamente 3 años fuera de operación y desde entonces no se ha implementado alguna alternativa para desinfección. El flujo que pasa por el canal de radiación ultravioleta está acoplado a una pequeña canaleta Parshall que conduce a un cárcamo de agua tratada desde donde fluye por gravedad hacia cinco posibles destinos. En este cárcamo de agua tratada, se encuentra una toma afuera de los límites de batería de la planta llamada “garza”, cuya finalidad es el abastecimiento a pipas para el reúso de agua en beneficio de la alcaldía. Sin embargo, debido a que la PTAR carece de sistemas de medición de flujo, el abastecimiento a pipas es limitado e intermitente. Otra de las descargas de agua tratada se encuentra 300 metros río abajo de la PP Rio Magdalena 2. Un tercer destino corresponde a una descarga intermitente que se realiza por gravedad a la altura del foro cultural y de la cual el SACMEX tiene planos de su trayectoria desde la PTAR hasta las tres tomas que la integran. Una cuarta descarga se realiza al río Magdalena cerca de los límites de batería de la PTAR y a la altura de la llegada del influente. Finalmente, la quinta descarga la compone el abastecimiento intermitente para el riego del deportivo 1º de mayo, ubicado a un costado de la PTAR.



Figura 3.26 Filtros de flujo descendente con cama constituida por arena-sílica.

Durante las visitas técnicas a la PTAR por parte del personal del Instituto de Ingeniería, se mencionó que existen problemas sociales y financieros con las descargas del agua tratada y el abastecimiento a pipas, además de la última visita

(febrero 2022) se encontraron problemas por falta de agua en el influente de la planta, dejando su operación actual muy por debajo de la capacidad instalada.

La extensión aproximada (Figura 3.27) de las instalaciones de la PTAR es de 1252 m². Este cálculo se realizó a través del dibujo del polígono en Google Maps (2021).

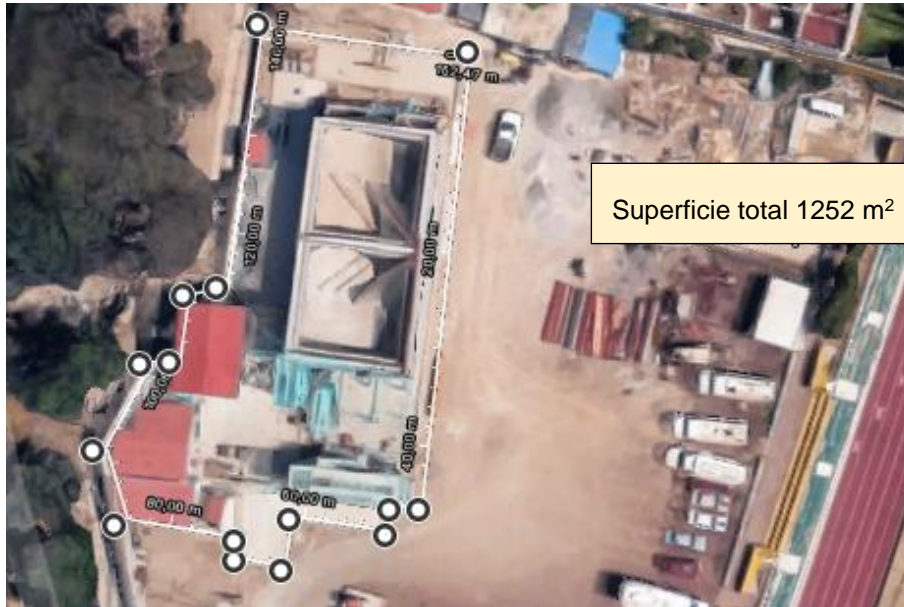


Figura 3.27 Vista aérea de la PTAR Magdalena Contreras, así como la delimitación del terreno.

Con base en la información recabada de la PTAR “Magdalena Contreras” se destacaron los siguientes aspectos acerca de la situación actual de la misma:

- ✓ La planta solo es vigilada y operada los fines de semana debido a falta de personal contratado.
- ✓ Aunque muchos de los mecanismos de la planta funcionan de forma automática, se observaron diversos criterios empíricos para accionar ciertos equipos (sopladores y bombas principalmente).
- ✓ No existe la medición de parámetros de calidad de forma interna, como consecuencia los operadores toman criterios empíricos en la forma de operar la planta.
- ✓ Debido a problemas por falta de agua en temporada de estiaje, y que el colector que les envía agua residual disminuyó el envío de caudal, la planta ha reducido su operación prácticamente a valores mínimos para que el sistema de lodos activados pueda continuar activo y mantenerse funcional.

4 FUNDAMENTOS

4.1 Indicadores para la gestión integrada del agua

La literatura científica recomienda la adopción de indicadores para la evaluación y el seguimiento de los procesos de cambio hacia el desarrollo sustentable (Hezri y Dovers, 2006). Diversos organismos internacionales han encontrado en los indicadores instrumentos de soporte para la difusión de la información, transformando datos científicos y complejos en una expresión simplificada y cuantificada, que permite informar a aquellos que toman decisiones y a la sociedad acerca de las tendencias de cambios y el cumplimiento de los compromisos o de los objetivos en cuestión, por ejemplo para una PP o PTAR cumplir en el efluente la NOM-127-SSA1-1994 y la NOM-001-SEMARNAT-2021 respectivamente con respecto a la calidad del agua. (UN-WWAP, 2003; OECD, 1998).

En lo que respecta al tema del agua, los indicadores relacionados con la gestión de los recursos hídricos han proliferado rápidamente en los últimos 20 años (Dunn y Bakker, 2011), en virtud de la necesidad creciente de aplicar instrumentos para evaluar el proceso de desarrollo de manera integrada (UN-WWAP, 2003).

A principios de la década de los 90, el tema de los indicadores de gestión parecía no despertar demasiado interés, hasta el punto donde la propuesta de la International Water Services Association (IWSA) de incluir el tema indicadores de gestión fue cancelada. Sin embargo, tan sólo tres o cuatro años más tarde, la respuesta a una encuesta realizada por la IWSA a aproximadamente 150 directivos de abastecimientos de varias partes del mundo demostró que los indicadores de gestión y el agua no contabilizada eran los dos temas de interés en el marco de los sistemas de transmisión y distribución de agua (IIAMA, 2007).

Más tarde, la *American Water Works Association Research Foundation* (AWWARF) promovió varios estudios de investigación de los que surgieron contribuciones relevantes para el desarrollo de los indicadores de gestión. Uno de ellos titulado “Evaluación del Comportamiento de los Sistemas de Distribución” (1995), recomendaba la aplicación de los siguientes criterios de comportamiento con base en las necesidades de los usuarios: a) **adecuación**, se refiere a proporcionar una cantidad aceptable de agua a los usuarios contemplando una determinada calidad de servicio relativo a parámetros como presión, caudal, calidad del agua, atención a las quejas de los usuarios, y en general, satisfacción del servicio prestado; b) **dependencia**, el cual mide la capacidad del sistema de distribución para suministrar la cantidad de agua requerida, atendido a las interrupciones del servicio, válvulas e hidrantes no operativos, eficiencia de bombeo, rotura de tuberías, calidad del agua, y finalmente, c) **eficiencia**, que refleja el buen uso de los recursos, y en

particular del agua y la energía, haciendo hincapié en el agua no contabilizada y la eficiencia de bombeo (Tiburcio y Perevochtchikova, 2020).

A partir de dichas experiencias, el Banco Mundial y el Banco Asiático utilizaron los indicadores de gestión. Yepes y Dianderas (1996) publican los primeros indicadores de gestión para los servicios de agua y alcantarillado. Dichos autores los clasifican en: **operacionales**, que incluyen indicadores relativos a consumos de agua, sistema físico, pérdidas de agua y personal, y **financieros**, que incluyen indicadores de eficiencia, endeudamiento, liquidez, rentabilidad y tasa de operación (Tiburcio y Perevochtchikova, 2020).

Por otro lado, y desde finales de la década de los 80, el Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil de Portugal (LNEC) comenzó a elaborar metodologías para el diagnóstico del funcionamiento de sistemas de saneamiento básico por medio de indicadores de gestión (Alegre, 1987, 1988, Alegre y Coelho 1990, 1992). Luego, las tesis doctorales de estos investigadores versaron sobre el uso de indicadores como ayuda a la gestión técnica de los sistemas de distribución, las cuales se recopilaron en forma de libro (Alegre, 1995 y Coelho, 1997). Entre 1992 y 1993 se desarrolló un estudio para la dirección general del medio ambiente sobre indicadores técnicos y socioeconómicos en el campo de los abastecimientos de agua, aguas residuales y residuos sólidos (Universidad Politécnica de Valencia, 2007). En el año 2000 finalmente vio la luz la primera edición de los Indicadores de Gestión de la IWA. A partir de ese momento el sistema de indicadores se ha adaptado y ha sido utilizado extensamente en una gran cantidad de proyectos.

4.1.1 Metodología sugerida por el IWA

La Asociación internacional del Agua (IWA), define a los indicadores como *“Medidas de eficiencia y eficacia de la prestación de los servicios que resultan de la combinación de varias variables. La información proporcionada por un indicador del desempeño es el resultado de una comparación (con un valor objetivo, valores anteriores del mismo indicador o valores del mismo indicador de otros servicios)”*.

De acuerdo con Alegre *et al* (2017), un indicador de desempeño debe de cumplir con los siguientes requisitos:

- ✓ Estar claramente definido y tener un significado conciso.
- ✓ Ser razonablemente alcanzable (cualidad que depende principalmente de las variables relacionadas).
- ✓ Ser auditable.
- ✓ Ser tan universal como sea posible y proporcionar una medida independiente de las condiciones particulares del abastecimiento

- ✓ Ser simple y fácil de entender
- ✓ Ser cuantificable de forma que proporcione una medida objetiva del desempeño del servicio, evitando cualquier evaluación personal o subjetiva
- ✓ Incluir información sobre la calidad de los datos de las variables.

Un sistema de indicadores de desempeño (SID) es el resultado de considerar todas las áreas de interés del sistema y los factores que influyen en un determinado entorno. En el caso de los prestadores de servicios de agua, un sistema completo incluye toda la empresa, las partes interesadas, los usuarios, el medio ambiente y todas las áreas relacionadas que merecen ser monitoreadas con fines de gestión (Alegre *et al*, 2017).

La metodología IWA contiene un total de 170 indicadores de desempeño organizados en los siguientes grupos (Alegre *et al*, 2017):

- ❖ Recursos hídricos (WR)
- ❖ Personal (Pe)
- ❖ Físicos (Ph)
- ❖ Operacionales (Op)
- ❖ Calidad del servicio (QS)
- ❖ Económicos y financieros (Fi)

De acuerdo con esta metodología, para cada caso es necesario adaptar los indicadores según la planta de tratamiento de estudio, la información que se tiene y las metas que se deseen conseguir con la generación de los indicadores, es por ello que es posible elegir libremente los tipos de indicadores que se quiera para la generación del sistema de indicadores y por lo tanto del diagnóstico final de las plantas de estudio.

Indicadores de calidad del servicio

Los indicadores de calidad de servicio están orientados a conocer el alcance de la cobertura de los servicios en el área de influencia de la planta y el desempeño del servicio en términos de cantidad y calidad de agua suministrada.

La Tabla 4.1 detalla los indicadores que la IWA considera para esta categoría, en donde se encuentra un primer subgrupo de cobertura del servicio, que permiten calcular la cobertura que tiene la planta (QS3) en cuestión, y en el caso de plantas potabilizadoras, el porcentaje de la población residente abastecido por la planta.

Tabla 4.1 Indicadores de desempeño de calidad del servicio. Modificado de Alegre, et al, 2017.

Indicadores de calidad del servicio	
ID de cobertura del servicio	
QS1	Cobertura de servicio a viviendas y empresas (%)
	Porcentaje de viviendas y empresas existentes que están conectadas a la red pública
QS2	Cobertura de servicio a edificios (%)
	Porcentaje de edificios conectados a la red pública.
QS3	Cobertura de servicio a la población (%)
	Porcentaje de población residente abastecida por la planta.
QS4	Cobertura de servicio a la población con acometidas (%)
	Porcentaje de población residente abastecida mediante acometidas.
QS5	Cobertura de suministro de la población con fuentes públicas o tomas de agua (%)
	Porcentaje de población residente abastecida mediante fuentes públicas o tomas de agua.
QS6	Tomas de agua en servicio (%)
	Porcentaje de tomas de agua existentes que no están fuera de servicio.
QS7	Distancia media de las tomas de agua a las viviendas (m)
	Distancia media entre las tomas de agua y la vivienda más lejana servida por dicha toma.
QS8	Agua per cápita consumida en fuentes públicas y tomas de agua (1/persona/día)
	Relación entre el volumen de agua suministrado por las fuentes públicas y las tomas de agua potable y la población que abastecen.
QS9	Población por fuente pública o toma de agua (personas/toma de agua)
	Número medio de personas abastecidas por fuente pública o toma de agua.

El siguiente subgrupo contiene indicadores de presión y continuidad del servicio, expresado como una medida de la calidad que reciben los usuarios finales, en cuanto a presión de suministro, horas continuas con adecuada presión, las interrupciones e incluso las restricciones con que cuenta la población usuaria para abastecerse del servicio de agua potable.

ID de presión y continuidad del servicio	
QS10	Adecuación de la presión de suministro (%) Porcentaje de puntos de distribución (uno por acometida) que recibe y es probable que reciba presión adecuada.
QS11	Adecuación del suministro de agua en alta (%) Porcentaje de puntos de distribución que suministrados en cualquier momento de acuerdo con el caudal, volumen y / o presión objetivo.
QS12	Continuidad del suministro (%) Porcentaje de horas en las que el sistema (de suministro intermitente) está presurizado.
QS13	Interrupciones de agua (%) Porcentaje medio de horas que cada persona servida está sujeta a interrupciones de agua.
QS14	Interrupciones por acometida (No./1000 acometidas/año) Número medio de interrupciones por acometida al año.
QS15	Interrupciones de suministro (No./punto de entrega/año) Número medio de interrupciones por punto de distribución al año.
QS16	Población con restricciones en el acceso al servicio de abastecimiento (%) Porcentaje promedio de horas en las que cada persona suministrada experimentó restricciones al servicio de agua.
QS17	Días con restricciones en el acceso al servicio de abastecimiento (%) Porcentaje de días con restricciones al servicio de agua.

Los siguientes indicadores se enfocan en la calidad de agua suministrada según el cumplimiento de la normatividad, esto aplicado a parámetros organolépticos, microbiológicos, fisicoquímicos y de radioactividad e incluso con la oportunidad de incluir algunos otros de interés según la normatividad del país o los que sean de particular interés para este proyecto.

ID de calidad del agua suministrada	
QS18	Calidad del agua suministrada (%) Porcentaje de número total de test de agua tratada que han cumplido con las normas o legislación aplicable.
QS19	Cumplimiento de ensayos organolépticos (%) Porcentaje de número total de test organolépticos de agua tratada que han cumplido con las normas o legislación aplicable.
QS20	Cumplimiento de ensayos microbiológicos (%) Porcentaje de número total de test microbiológicos de agua tratada que han cumplido con las normas o legislación aplicable.
QS21	Cumplimiento de ensayos físico-químicos (%) Porcentaje de número total de test físico-químicos de agua tratada que han cumplido con las normas o legislación aplicable.
QS22	Cumplimiento de ensayos de radioactividad (%) Porcentaje de número total de test de radioactividad de agua tratada que han cumplido con las normas o legislación aplicable.

Proceso general para la selección de un indicador

De acuerdo con la metodología de la IWA, es necesario considerar los siguientes pasos para la obtención de los indicadores a evaluar en una planta:

1. Preselección de los indicadores de desempeño (ID) considerados importantes para la evaluación (junto con los objetivos, estrategias y factores críticos de éxito relevantes seleccionados).
2. Selección de los ID e información de contexto (IC) utilizados en la evaluación inicial.
3. Desarrollo de ID e IC adicionales si se considera necesario. Comprobar su consistencia.
4. Realización de una prueba piloto con los ID seleccionados inicialmente. Selección final de los ID a utilizar, que serán aquellos considerados como importantes en la evaluación.

A continuación, se muestra un diagrama base (Figura 4.2) para la selección de los indicadores de desempeño.

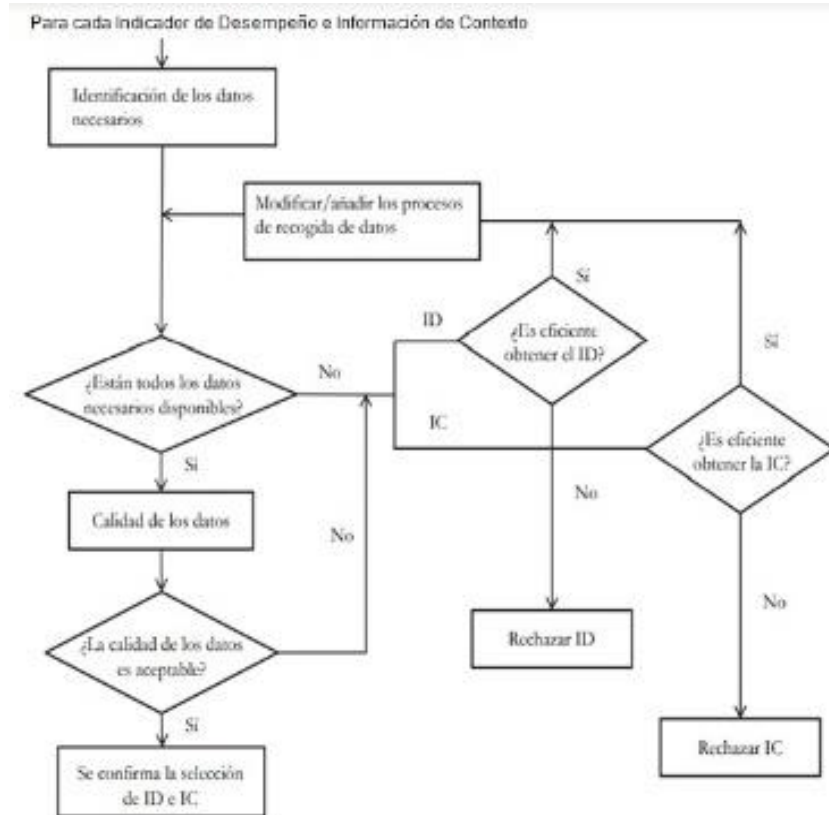


Figura 4.2 Diagrama de flujo para la selección de los indicadores. Fuente: A partir de Alegre et al, 2017.

4.1.2 Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores (PIGOO)

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) evalúa desde el año 2005 el desempeño de organismos operadores de agua potable, esta labor se realiza al interior de la Subcoordinación de Hidráulica Urbana y se denomina Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores o PIGOO (Hansen & Rodríguez, 2019). Se realiza a través de una batería de indicadores con la que se han evaluado un total de 387 ciudades de México en el programa.

El objetivo del programa es identificar y promover acciones para la mejora de los organismos operadores que les permitan proporcionar un mejor servicio a los usuarios, garantizar su fiabilidad operativa, aumentar su rentabilidad y ayudarles a conservar el recurso agua. Para ello el instituto definió inicialmente 15 indicadores de evaluación, que durante 2005 fueron aplicados a 50 Organismos Operadores de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento (OOAPAS) y para 2019 se contó con la

participación de 146 OOAPAS, a quienes se aplicó una batería de 32 indicadores de evaluación.

A partir de los indicadores de gestión publicados, cada OOAPAS puede diseñar políticas públicas de cobertura del servicio y realizar acciones de mejora o prevención que en el siguiente ejercicio sean verificables.

Entre algunos de los documentos que se comprometieron a entregar los OOAPAS para la edición 2019 del programa fueron:

1. Cálculo de los indicadores de gestión de los organismos operadores que hayan enviado la información suficiente, analizando su evolución histórica en el proceso de desarrollo y modernización de los sistemas de distribución, así como su gestión comercial e institucional.
2. Mantenimiento y actualización del desarrollo tecnológico de benchmarking del Sitio web.
3. Actualización y publicación de los resultados en el sitio www.pigoo.gob.mx, los datos correspondientes a la Edición 2019 son proporcionados por los OOAPAS participantes.

Durante el periodo 2005 al 2017 (Figura 4.3) se tuvo un crecimiento anual en la participación de los Organismos en el Programa, sin embargo, en los últimos años se presentó un decremento en la misma, por lo que es importante identificar la razón de este comportamiento.

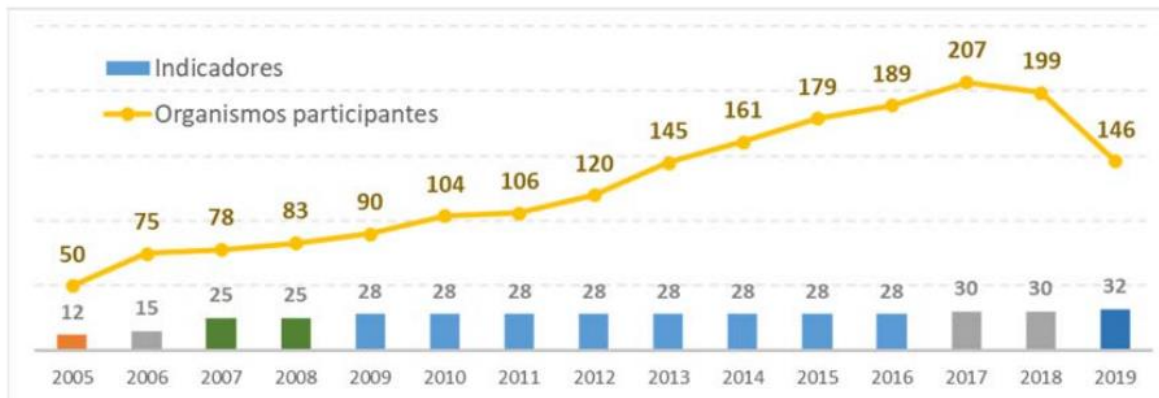


Figura 4.3 Comportamiento de los participantes en el programa desde 2005 a 2019 (Hansen & Rodríguez, 2019).

Según el PIGOO el desempeño en la calidad del servicio que ofrece un Organismo Operador de cualquier ciudad, se puede medir según: 1) la eficiencia y eficacia con la que suministra el agua y recolecta y trata las aguas residuales; 2) la satisfacción de los usuarios; 3) si el suministro de agua es continuo en cantidad y calidad; 4) si conoce los elementos que forman su infraestructura; 5) si se tiene un registro confiable de sus usuarios; 6) si sabe cuánta agua se produce y cuánta entrega a los

consumidores;7) si utiliza toda la capacidad de sus unidades de tratamiento; 8) si son atendidas todas las quejas de los usuarios en un tiempo razonable y ellos a su vez pagan el servicio; 9) si los costos de operación, mantenimiento y administración pueden ser amortizados por el propio sistema.

El PIGOO estableció una batería de 30 indicadores de gestión (hasta la Edición 2018) que sirven para medir aspectos operativos del sistema de agua potable, los temas financieros y las eficiencias. Idealmente, los indicadores de desempeño de un organismo operador deben estar ligados a un objetivo o estrategia que establezca la misma entidad. En la Edición 2019 se incorporaron dos indicadores relacionados con la energía eléctrica: **Consumo energético en sistemas de agua potable (kWh/m³)** y **Costo del consumo energético en sistemas de agua potable (\$-kWh/m³)**

En general, los 32 indicadores se clasifican según ciertos objetivos y variables que los componen (Tabla 4.2):

Tabla 4.2 Variables generales para la creación de los indicadores de gestión.
(Hansen & Rodríguez, 2019).

VARIABLES	INDICADORES DE GESTIÓN
• Volumen de agua	• Operacionales
• Empleados	• Calidad en el Servicio
• Activos Físicos	• Gestión Comercial
• Demografía y datos del cliente	• Población
• Datos Financieros	• Financieros

Para facilitar a los Organismos Operadores a recolectar la información solicitada se les envía la descripción de los 39 datos históricos requeridos para los periodos del año 2002 al 2018, esta información es usada para el cálculo de 32 indicadores de gestión.

Los 39 datos se resumen en la Tabla 4.3, y la descripción completa de los mismos se encuentra en el ANEXO A de este documento.

Tabla 4.3 Cédula de información solicitada a cada organismos operador participante. (Hansen & Rodríguez, 2019).

NO.	VARIABLES		DATOS ANUALES		
			2016	2017	2018
1.	NO. TOTAL DE TOMAS REGISTRADAS (Num)	DOMICILIARIA			
2.		COMERCIAL			
3.		INDUSTRIAL			
4.		OTRAS			
5.		TOTAL			
6.	NO. DE TOMAS DEL PADRON ACTIVAS (CORROBORADAS EN SITIO) (Num)	DOMICILIARIA			
7.		COMERCIAL			
8.		INDUSTRIAL			
9.		OTRAS			
10.		TOTAL			
11.	NO. DE TOMAS CON SERVICIO CONTINUO (Num)				
12.	TAMAÑO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN TOTAL (Km², Km)	POR AREA DE DISTRIBUCIÓN (km²)			
13.		LONGITUD CONDUCCIÓN (km)			
14.		LONGITUD DISTRIBUCIÓN (km)			
15.	TAMAÑO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN ACTUALIZADA (Km², Km)	POR AREA DE DISTRIBUCIÓN (km²)			
16.		LONGITUD CONDUCCIÓN (km)			
17.		LONGITUD DISTRIBUCIÓN (km)			
18.	REHABILITACIÓN DE TUBERÍA (km)				
19.	REHABILITACIÓN DE TOMAS DOMICILIARIAS (Num)				
20.	HORAS CON SERVICIO TANDEADO (horas/día)				
21.	NO. DE MICROMEDIDORES (Num)	INSTALADOS			
22.		FUNCIONANDO			
23.	NO. DE CAPTACIONES (Num)				
24.	NO. DE MACROMEDIDORES (Num)	INSTALADOS			
25.		FUNCIONANDO			
26.		% DE APORTACIÓN AL VOLUMEN TOTAL CAPTADO			
27.	NO. DE FUGAS OCURRIDAS Y REPARADAS (Num)				
28.	NO. DE EMPLEADOS EN EL ORGANISMO OPERADOR (Num)	ADMINISTRATIVOS			
29.		PERSONAL DE CAMPO			
30.		SINDICALIZADOS			
31.		CONFIANZA			
32.	TOTAL				
33.	NO. DE EMPLEADOS DEDICADOS AL CONTROL DE FUGAS (Núm)				
34.	NO. DE RECLAMACIONES DE USUARIOS (Núm)				
35.	NO. DE USUARIOS CON PAGO A TIEMPO (2 MESES)				
36.	NO. DE USUARIOS ABASTECIDOS CON PIPAS (Núm de casas)				
37.	COBERTURA DE AGUA POTABLE (%)				
38.	COBERTURA DE ALCANTARILLADO (%)				
39.	VOLUMEN ANUAL DE AGUA POTABLE PRODUCIDO (m³)				

Tabla 4.3 Continuación.

NO.	VARIABLES		DATOS ANUALES		
			2016	2017	2018
40.	VOLUMEN ANUAL DE AGUA CONSUMIDO(m ³)				
41.	VOLUMEN ANUAL DE AGUA FACTURADA (m ³)				
42.	VOLUMEN ANUAL DE AGUA COBRADO (m ³)				
43.	VOLUMEN ANUAL DE AGUA RESIDUAL TRATADO (m ³)				
44.	PESOS FACTURADOS POR VENTA DE AGUA (\$)				
45.	INGRESO POR VENTA DE AGUA (\$)				
46.	TARIFA MEDIA (\$/m ³);	DOMICILIARIA			
47.	TARIFA PROMEDIO POR	COMERCIAL			
48.	METRO CUBICO PARA UN	INDUSTRIAL			
49.	CONSUMO DE 25m ³	OTRAS			
50.	INGRESOS TOTALES (\$)				
51.	EGRESOS TOTALES (\$)				
52.	COSTOS (\$)	OPERACIÓN			
53.		MANTENIMIENTO			
54.		ADMINISTRACIÓN			
55.		TOTAL			
56.	INVERSIÓN TOTAL (\$)				
57.	POBLACIÓN ATENDIDA (Hab)				
58.	HABITANTES POR CASA (Hab)				
59.	NO. DE MUESTREOS PARA ANÁLISIS DE CALIDAD DEL AGUA				
60.	PRUEBAS NOM-127				
61.	PIB				
62.	CONSUMO ENERGETICO TOTAL EN EL SISTEMA (kWh)				
63.	COSTO TOTAL DE ENERGÍA (\$)				
64.	INVERSIONES EN INFRAESTRUCTURA (\$)	AGUA POTABLE			
65.		ALCANTARILLADO			
66.		SANEAMIENTO			
67.		INSTITUCIONAL (COMERCIAL, ADMINISTRATIVA, FINANCIERA)			
68.		TOTAL			

Todas las variables anteriores son capturadas por los organismos operadores y enviadas al IMTA para el cálculo de los 32 indicadores. La clasificación de estos indicadores se da en 3 vertientes: operación, financieros y eficiencias. La tabla completa de los indicadores se añade en el ANEXO A.

Del indicador 1 al 22 que representan casi el 70% de todos los disponibles son de operación, y estos evalúan diversos aspectos como la continuidad en el servicio de agua según las tomas domiciliarias y cuántas de éstas tienen suministro de 24 horas. Así mismo se estima el consumo de agua sin considerar pérdidas por fugas en la red y en las tomas; y aspectos en tema de energía como el consumo promedio del sistema en kWh según el volumen anual de agua producido así como el costo promedio por metro cúbico de agua producido. Además se evalúa la capacidad del organismo vista desde la fuerza laboral disponible según el tamaño de la red operativa, y de aquí mismo las fugas por kilómetro detectadas y el personal que se encuentra disponible para los trabajos correspondientes de reparación. Finalmente, con los indicadores operativos se calcula la energía consumida por volumen de agua que se produce en las plantas.

El segundo grupo de indicadores son los financieros que van del 23 al 27. Los indicadores financieros son necesarios en toda evaluación integral de servicios de potabilización y de tratamiento de agua residual, ya que, como todo proyecto de infraestructura física, requiere de una inversión económica, un costo de operación, un costo de materiales, gastos administrativos, entre otros, tal que se pueda construir y mantenerse por el tiempo de vida estimado. Las razones por las cuales algunos de los sistemas de potabilización o de tratamiento de agua residual no tienen éxito en los países en desarrollo son las altas inversiones económicas que se requiere para su instalación, los elevados consumos de energía eléctrica (en PTAR particularmente) así como los altos costos de mantenimiento y operación. Por lo tanto, ciertos tipos de sistemas de tratamiento de aguas no son sostenibles para comunidades con bajo nivel de ingresos, porque en el proceso de selección de los mismos no se consideró la conveniencia de la tecnología para la cultura de la comunidad, el clima local y la capacidad económica del municipio (Sánchez, 2017), es por esto que los indicadores financieros aparecen también en el desempeño de una planta, o de un organismo operador, como es el caso.

Para el tercer grupo de indicadores, llamados de eficiencia, se calcula el volumen de agua producida por la consumida, y se interrelaciona con los financieros para determinar la eficiencia de cobro del agua. Estos indicadores no llevan a cabo otro tipo de cálculo de eficiencias, como podrían ser de las operaciones unitarias y procesos, están enfocados hacia el organismo operador.

La metodología empleada por el IMTA para la generación de los indicadores contempla distintas etapas (Figura 4.4):



Figura 4.4 Metodología para la obtención de la información hacia el IMTA. Fuente: Hansen & Rodríguez, 2019.

De la etapa 1 a la 3 consiste en la comunicación del IMTA hacia el organismo operador para solicitar y obtener la información de las 39 variables básicas y el registro histórico de esos datos usados en la etapa número 4; de la 5 a la 7 se carga y verifica la base de datos, posteriormente en la etapa 8 a 11 se diseña y ejecuta el *Extract, Transform and Load* (ETL) y finalmente se publica en el PIGOO.

A continuación se presenta un ejemplo para el caso del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), organismo operador de las plantas de potabilización “Río Magdalena” y “Río Magdalena 2” y de tratamiento de agua residual “Magdalena Contreras” descritas en los antecedentes de esta investigación.

La última participación del SACMEX en el PIGOO fue en 2017 (Figura 4.5) de acuerdo con el sitio <http://www.pigoo.gob.mx/Ciudad> :



Figura 4.5 Dirección electrónica del PIGOO con la ventana abierta del SACMEX (Sitio Web del PIGOO, 2021).

En general la evaluación para el organismo operador es de 1.5 en escala de 3, además se hace referencia a cuantos indicadores sí fueron calculados y de estos la escala en la que se ubica el resultado de cada uno (bajo, bueno, sobresaliente). En cuanto a los resultados por indicador, el PIGOO muestra la siguiente información (Figura 4.6)

Indicador	Resultado
 Costos entre volumen producido (\$/m ³)	★ ★ ★ (13.31)
 Relación de trabajo (%)	—
 Relación inversión-pib (%)	—
 Relación costo-tarifa	★ (0.71)
 Costo del consumo energético en sistemas de agua potable (\$-kWh/m ³)	—
 Tomas con servicio continuo (%)	★ ★ (85)
 Redes e instalaciones (%)	—
 Padrón de usuarios (%)	★ ★ ★ (99.97)

Figura 4.6 Forma gráfica de presentar los resultados en la página del PIGOO para cada organismos operador participante. (Sitio Web del PIGOO, 2021).

A modo de ejemplo, el resultado del indicador “tomas con servicio continuo” fue de 85 %, el cual está considerado como “bueno”. La determinación sobre otorgar la calificación de bajo, bueno o sobresaliente está dada según la información promedio nacional de cada indicador desde el año 2002 al año de evaluación en cuestión en este caso 2017; de tal forma que para el indicador anterior se tomó el criterio de la Figura 4.7. Debido a que el resultado se encuentra en el intervalo de 25% a 95% queda dentro de la categoría de “bueno”.


	Tomas con servicio continuo (%)	25%	25% - 95%	95%
---	---------------------------------	-----	-----------	-----

Figura 4.7 Criterio para determinar lo bajo, bueno o sobresaliente de cada indicador calculado. (Sitio Web del PIGOO, 2021).

Se considera importante el indicador “dotación”, por su estrecha relación con el cumplimiento del artículo cuarto de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en donde se establece que “*toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma*

suficiente, salubre, aceptable y asequible”, y es en la definición de la palabra “suficiente” donde el indicador mencionado juega un papel trascendente.

Para el caso de SACMEX, se reporta al 2017, una dotación de 305.68 L/h/d, el cual está considerado como “bueno”, siendo el promedio de todos los organismos evaluados para ese mismo año de 329.92 L/h/d, por lo cual aunque el valor es cercano, sigue estando por debajo de ese promedio. Cabe mencionar que, en este caso las mismas variables de este indicador permite fácilmente identificar que, siendo la Ciudad de México el estado con el segundo mayor número de habitantes, la comparación directa con otros organismos operadores podría no ser la mejor alternativa de análisis, sin embargo el resultado por sí mismo indica que deberán tomarse las decisiones correspondientes para que el valor incremente y pueda alcanzar, como se espera para todos los indicadores, el valor más alto.

4. 2 Índices de calidad del agua

Los índices de calidad del agua se basan en funciones de agregación que permiten el análisis de grandes conjuntos de datos de calidad del agua que varían temporal y espacialmente para producir un valor único. Son atractivos para las agencias de gestión / suministro de agua, ya que son relativamente fáciles de usar y convierten conjuntos de datos de calidad del agua en una sola medida del valor de la calidad del agua que es fácil de entender (Uddin et al, 2021).

La historia del desarrollo del modelo del índice de calidad del agua (ICA) se presenta gráficamente en la Figura 4.8. Aunque los modelos ICA solo se han desarrollado en los últimos 50 años, los índices de calidad del agua se utilizaron para la clasificación de la calidad del agua desde hace más de 200 años (Abbasi y Abbasi, 2012). Horton desarrolló el primer modelo ICA en la década de 1960 basado en 10 parámetros de calidad del agua considerados significativos en la mayoría de los cuerpos de agua (Horton, 1965). Brown, con el apoyo de la Fundación Nacional de Saneamiento (NSF) desarrolló una versión más rigurosa del modelo ICA de Horton, el NSF-WQI, para el cual un panel de 142 expertos en calidad del agua informó la selección y ponderación de los parámetros de calidad (Abbasi y Abbasi, 2012). Otros modelos ICA se basaron desde entonces en el NSF-WQI. En 1973, el Departamento escocés de Desarrollo de Investigación (SRDD) desarrolló el SRDD-WQI, que también se basó en el modelo de Brown y se utilizó para la evaluación de la calidad del agua de los ríos. El Índice de Bascaron (1979), el Índice House (1986) y el Índice Dálmata (Stambuk-Giljanovic, 2003) se derivaron del SRDD-WQI. Steinhart *et al.* (1982) más tarde desarrollaron el modelo de Índice de Calidad Ambiental para la evaluación de la calidad del agua en los ecosistemas de los Grandes Lagos.

Otro desarrollo importante fue el British Columbia WQI (BCWQI) que fue desarrollado por el Ministerio de Medio Ambiente, Tierras y Parques de Columbia

Británica a mediados de los años 90 y se utilizó para evaluar el estado de la calidad de muchos cuerpos de agua en la provincia de British Columbia, Canadá (Saffran *et al.*, 2001). Said *et al.* (2004) señalan que se encontró que el BCWQI tenía la mayor sensibilidad al diseño de muestreo y la mayor dependencia de la aplicación específica de los objetivos de la calidad del agua. Por otro lado el grupo de trabajo del Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente desarrolló el CCME-WQI en 2001 (Saffran *et al.*, 2001) seguido de una evaluación y revisión del modelo BCWQI (Lumb *et al.*, 2011). En los últimos tiempos también se han desarrollado modelos como el Índice Liou, el Índice de Malasia y el Índice Almeida.

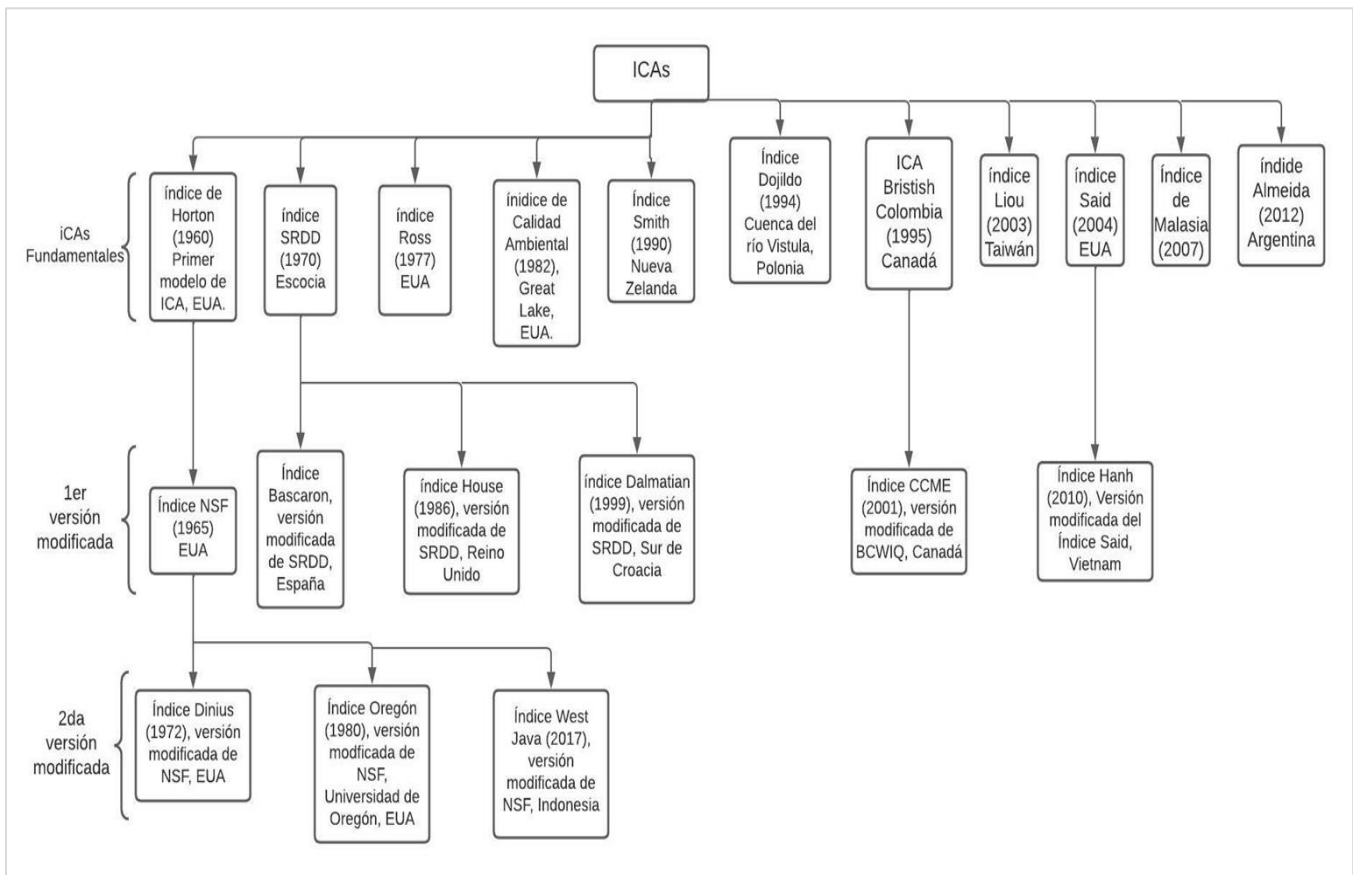


Figura 4.8 Desarrollo histórico de los modelos de índices de calidad del agua. Modificada de Uddin *et al.*, 2021.

Hasta la fecha, varios países y/o agencias han introducido más de 35 modelos ICA para evaluar la calidad de las aguas superficiales en todo el mundo (Abbasi y Abbasi, 2012; Dadolahi-Sohrab *et al.*, 2012; Kannel *et al.*, 2007; Stoner, 1978). Uddin *et al.*, (2021) revisaron en su investigación 110 publicaciones sobre índices de calidad del agua y encontraron que, aunque los modelos ICA se han aplicado a todos los tipos principales de cuerpos de agua, el 82% de las aplicaciones han sido

para evaluar la calidad del agua de los ríos (Tabla 4.4), además, la tabla muestra que los modelos CCME y NSF se utilizaron en el 50% de los estudios revisados.

Tabla 4.4 Resumen de las aplicaciones de los ICA encontradas en la literatura publicada de 1960 a 2019. Modificado de Uddin et al, 2021.

Modelo ICA	Número de publicaciones	Tipo del área de estudio		
		Río	Lago	Marino/costero/mar
CCME	36	28	5	3
NSF	18	17	1	-
FIS	12	10	1	1
MWQI	8	6	1	1
Horton	7	6	-	1
SRDD	6	6	-	-
Bascaron	4	3	-	1
EQI	2	1	1	-
Oregón	2	2	-	-
Smith	2	2	-	-
Almeida	1	1	-	-
BCWQI	1	1	-	-
Dalmatian	1	-	-	1
Dojildo	1	1	-	-
Dinius	1	1	-	-
índice Hanh	1	1	-	-
índice Houses	1	1	-	-
Índice Liou	1	1	-	-
Said	1	-	-	1
WJWQI	1	-	-	1
Total	107	88	9	10

4.2.1 Índice Canadiense por el Consejo de Ministros Canadiense del Medio Ambiente (CCME)

Como se mostró anteriormente, es uno de los índices (probablemente el primero) que más se ocupa a nivel internacional, además Canadá ha jugado un papel pionero en el desarrollo de índices, al ser precursor del modelo de indicadores ambientales dentro de la cadena lógica de “Presión-Estado-Respuesta”, ampliamente difundidos a nivel internacional por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, OCDE (Berger y Hodge, 1998). Canadá también es considerado país líder en la gestión del agua, por ocupar el segundo lugar, sólo detrás de Finlandia, en la evaluación por el Índice de Pobreza de Agua (comprende la disponibilidad del recurso, su accesibilidad espacial, económica y temporal, la capacidad de la población para gestionar el agua y el estado del medio ambiente) (Sullivan, 2002).

El Índice Canadiense de Calidad del Agua (CWQI) es un medio para proporcionar procedimientos consistentes para que las jurisdicciones canadienses o cualquiera que lo aplique reporte información sobre la calidad del agua tanto a la administración como al público (CCME, 2005)

El programa CWQI es una calculadora interactiva diseñada en Visual Basic para aplicaciones en torno a la plataforma de Microsoft Excel por parte de la División de Gestión de Recursos Hídricos del Departamento de Medio Ambiente y Conservación de Canadá. Este programa es de uso y descarga libre directamente de la página oficial del CWQI (<https://www.gov.nl.ca/ecc/waterres/quality/background/cwqi/>)

La formulación del CWQI es diferente de los índices derivados del método Delphi (como el de Stoner que se menciona en el subtema 4.2.2). El CWQI calcula los valores durante un período de índice, generalmente una temporada o un año. Por lo tanto, está diseñado para evaluar la calidad promedio del agua durante un período de tiempo específico en lugar de usarse como una herramienta para identificar problemas inmediatos de calidad del agua.

El CWQI se basa en el cálculo de 3 factores:

1. F_1 denominado como el alcance representa el porcentaje de variables que no cumplen sus objetivos al menos una vez durante el período de tiempo considerado ("variables fallidas"), en relación con el número total de variables medidas, este se calcula de la siguiente forma:

$$F_1 = \frac{\text{Número de variables fallidas}}{\text{Número total de variables}} \times 100$$

En este caso, por variables se entiende como los parámetros de calidad del agua medidos o considerados para el cálculo del índice.

2. F_2 denominado como frecuencia, representa el porcentaje de mediciones individuales que no cumplieron los objetivos ("mediciones fallidas").

$$F_2 = \frac{\text{Número de mediciones fallidas}}{\text{Número total de mediciones}} \times 100$$

3. F_3 denominado como amplitud y se calcula en 3 etapas:

- A. El número de veces que una concentración individual es mayor que el objetivo se denomina "desviación" y se expresa de la siguiente

manera. Cuando el valor de la prueba o medición no debe exceder el objetivo:

$$desviación_i = \frac{\text{valor de la medición fallida } i}{\text{objetivo } i} - 1$$

- B. El monto colectivo por el cual las pruebas individuales están fuera de cumplimiento se calcula sumando las desviaciones de las pruebas individuales de sus objetivos y dividiendo por el número total de pruebas. Esta variable, denominada suma normalizada de desviaciones o *nse* se calcula como:

$$nse = \frac{\sum_{i=1}^n \text{desviaciones}}{\# \text{ de mediciones}}$$

- C. F_3 se calcula mediante una función asintótica que escala la suma normalizada de las desviaciones de los objetivos para producir un rango entre 0 y 100.

$$F_3 = \left(\frac{nse}{0.01nse + 0.01} \right)$$

Una vez obtenidos los factores, el índice en sí puede calcularse sumando los tres factores como si fueran vectores. Por tanto, la suma de los cuadrados de cada factor es igual al cuadrado del índice. Este enfoque trata el índice como un espacio tridimensional definido por cada factor a lo largo de un eje. Con este modelo, el índice cambia en proporción directa a los cambios en los tres factores.

El CWQI se calcula de la siguiente forma:

$$CWQI = 100 - \left(\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \right)$$

Una vez que se ha determinado el valor CWQI, un número entre 0 y 100, el resultado se puede simplificar aún más asignándolo a la categoría descriptiva las cuales fueron sugeridas por el comité desarrollador del CWQI.

- **Excelente:** Con un intervalo del CWQI entre 95-100; la calidad del agua está protegida con una virtual ausencia de amenaza o deterioro; condiciones muy cercanas a los niveles naturales o vírgenes. Estos valores de índice solo se pueden obtener si todas las mediciones están dentro de los objetivos prácticamente todo el tiempo.

- **Bueno:** Con un intervalo del CWQI entre 80-94; la calidad del agua está protegida con solo un grado menor de amenaza o deterioro; las condiciones rara vez se apartan de los niveles naturales o deseables.
- **Razonable/Tolerable:** Con un intervalo del CWQI entre 65-79; la calidad del agua suele estar protegida, pero en ocasiones se ve amenazada o deteriorada; las condiciones a veces se apartan de los niveles naturales o deseables.
- **Marginal:** Con un intervalo del CWQI entre 45-64; la calidad del agua se ve frecuentemente amenazada o deteriorada; las condiciones a menudo se apartan de los niveles naturales o deseables.
- **Malo:** Con un intervalo del CWQI entre 0-44; la calidad del agua casi siempre está amenazada o deteriorada; las condiciones generalmente se apartan de los niveles naturales o deseables.

El CWQI es una herramienta que ofrece de manera práctica el resultado a cerca de la calidad del agua de estudio, además de ser fácilmente manejable a través de una hoja de cálculo programada para la cual se debe seleccionar la información de forma adecuada (por lo menos 4 parámetros de calidad con 4 datos reportados para cada uno), además de adaptar la hoja de cálculo con las normas mexicanas. A nivel internacional, el CWQI se adoptó en el marco del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente en tres vertientes: como Índice Mundial de Calidad del Agua Potable, un Índice de Calidad del Agua Saludable y su Índice de Calidad del Agua Aceptable y se ha utilizado para calificar la calidad del agua en Marruecos, Argentina, Japón, República de Corea, Bélgica, Polonia, Suiza, Sudáfrica, India, Pakistán y federación de Rusia (Saffran, 2017). El CWQI ha formado la base para un ICA egipcio (Khan *et al.* 2004). Otros autores han utilizado el CWQI para calificar la calidad del agua en otros países, entre los que se encuentran el uso para evaluar la calidad del agua marina en Nueva Zelanda, evaluar su uso para el cultivo de camarón en Brasil (Ferreira *et al.* 2011); calificar la calidad del agua en la Bahía de San Francisco (Bay.org, 2003) y la calidad de las aguas superficiales en Vietnam (Pham *et al.* 2011) e Irak (Ali, 2010).

4.2.2 Índices de Calidad del Agua para Usos Específicos del Agua por Jerry D. Stoner

El índice de Stoner (1978) está basado en el índice de la NSF elaborado por Brown *et al.* en 1965 pero se consideró modificaciones con la intención de contemplar de forma importante los usos específicos para los que se evalúa la calidad del agua.

Stoner diseñó el índice para calificar la conveniencia o aptitud de una fuente de agua para uso y consumo humano o algún otro uso específico.

La clasificación de las aguas según sus usos específicos se ha vuelto cada vez más importante ya que aplicar un índice general de calidad del agua a usos específicos de agua puede llevar a conclusiones que no son del todo válidas, principalmente porque la importancia y la influencia de las propiedades de la calidad del agua varían para diferentes usos. Por ejemplo, la temperatura del agua es relativamente poco importante en el agua utilizada para el riego, pero es de vital importancia en las aguas utilizadas para el mantenimiento de la vida acuática.

Con el método que se describirá, se puede desarrollar un índice de calidad del agua para cualquier uso, que pueda ser muy robusto o sencillo, según la cantidad y calidad de información que pueda ser proporcionada.

Condiciones de Frontera

El mismo autor menciona que las FC (función de calidad), que son las funciones matemáticas que representan las propiedades individuales de calidad del agua que componen el ICA, asignan a un agua "ideal" el valor arbitrario de 100.

Debido al método de cálculo, se deben aplicar unas condiciones de frontera para cada función de calidad. Esta condición establece que un agua en los límites de concentración recomendados obtendrá un valor de 0. De esta manera, cuando las FC o el ICA (que es la suma de los efectos individuales), estén en algún lugar en el intervalo de 0 a 100, se podrá juzgar lo "apropiado" del agua para un uso específico. La FC de una propiedad individual cuyo valor supere el límite obtiene un valor negativo. Cuanto más se exceda el límite recomendado mayor será el número negativo y no habrá límite para cuan negativo pueda ser ese valor. Si la suma de los efectos individuales es negativa, entonces el ICA se vuelve negativo.

Funciones matemáticas

Stoner menciona que las expresiones matemáticas proporcionan un esquema de cálculo más simple y rápido que la interpretación gráfica y se adaptan fácilmente al procesamiento por computadora, debido a que no hay evidencia que indique que una función complicada sea más válida que una función simple, para la creación de este índice se usaron las funciones más simples que describirían los efectos aparentes de las propiedades.

La función lineal $a + bx$, la función parabólica $a + bx^2$ y la función parabólica $a + bx + cx^2$ fueron las únicas funciones utilizadas porque satisfacen adecuadamente los criterios de desarrollo de los índices de acuerdo con Stoner.

Tipos de parámetros

El índice de Stoner considera los parámetros seleccionadas para la evaluación en dos clases: Tipo I, los que normalmente se consideran tóxicos a bajas

concentraciones ($\mu\text{g/L}$ o menor), y de Tipo II, aquellos que afectan las condiciones estéticas o que en altas concentraciones pueden considerarse tóxicos o de lo contrario, el agua no sería apta para el uso previsto.

Otra característica de los parámetros de Tipo I es que indican un peligro significativo para la salud cuando una propiedad excede los límites prescritos. Es por ello que se evalúa directamente si se rebasa o no el límite. Sin embargo si se dispone de información de los efectos de diversas concentraciones de una propiedad de Tipo I, es decir que al incrementar la concentración se van presentando diferentes reacciones en la salud y esto está debidamente reportado en la literatura, se tratará como un parámetro de Tipo II.

El esquema de cálculo adoptado para los parámetros de Tipo I es esencialmente un sistema “pasa” o “no pasa”, en donde se asume que si la concentración es igual o menor que la concentración límite, no habrá efecto sobre el ICA, mientras que si la concentración es mayor que el límite, habrá un impacto significativo. Si un valor positivo del ICA representa un agua "adecuada", entonces el efecto de un parámetro de Tipo I que exceda la concentración límite en el ICA es tal que el ICA no es mayor que cero. Si más de un parámetro de Tipo I excede el límite, el agua se volverá cada vez menos apta para su uso; por lo tanto, se permite que los efectos individuales se vuelvan aditivos.

Los parámetros de Tipo I tienen asignados los siguientes valores: un cero si la concentración es menor o igual que la concentración límite y -100 si se excede la concentración límite recomendada. Por lo tanto, si el valor de al menos un parámetro Tipo I excede la concentración límite, el valor del ICA nunca podrá ser mayor que cero. El siguiente término de la ecuación describe el efecto en el ICA de los parámetros Tipo I:

$$\sum_{j=1}^n T_j$$

Donde T_j es el valor del j -ésimo parámetro Tipo I, y T sólo puede ser igual a cero o -100.

A los parámetros de Tipo II se les asignan funciones matemáticas simples para describir sus efectos. La suma de las FC de los parámetros de Tipo II seleccionados se acerca a un valor de ICA de 100 a medida que las concentraciones respectivas se acercan a los valores ideales, sin embargo es necesario ajustar las FC debido a que no son igualmente importantes. Antes de que se puedan ajustar las FC, es necesario clasificar, en términos de su importancia relativa, los parámetros de Tipo II seleccionados.

A esta importancia relativa se le llama factor de ajuste (FA) en donde la condición de frontera de los FA es que su suma debe ser igual a uno. Es decir:

$$\sum_{i=1}^m FA_i = 1.0$$

Donde FA_i es el factor de ajuste del i-ésimo parámetro Tipo II.

Se utilizó el siguiente esquema de cálculo para determinar los valores de FA. De las propiedades de la "A" a la "E" están en orden de rango, entonces:

$$(FA)_A + (FA)_B + (FA)_C + (FA)_D + (FA)_E = 1.0$$

Los respectivos FA se pueden determinar si a los valores de FA de B a E se les puede asignar algún valor o función en términos de A, la propiedad de mayor rango. Esta técnica se puede utilizar cuando las propiedades están en grupos de igual peso; es decir, cuando a más de una propiedad se le asigna el mismo peso con respecto a la propiedad o propiedades más significativas. Todo lo que se requiere es una simple sustitución en la ecuación anterior de la siguiente manera:

$$a(FA)_A + b(FA)_B + \dots + e(FA)_E = 1.0$$

Donde a,b...e son los números de las propiedades en cada grupo.

Luego de la elección de los parámetros se determina una función simple que relaciona los valores de concentración con la FC. El FA multiplicado por la FC respectiva es la contribución de los parámetros Tipo II al ICA.

$$\sum_{i=1}^n (FC)_i (FA)_i$$

El índice de calidad del agua de uso específico es la suma de los efectos de las propiedades Tipo I y Tipo II.

$$ICA = \sum_{i=1}^n (FC)_i (FA)_i + \sum_{j=1}^z T_j$$

Donde el ICA es el índice de calidad de agua para un uso específico, *n* es el número de parámetros Tipo II, *z* es el número de parámetros Tipo I, FC_i es la función de calidad del i-ésimo parámetro Tipo II, FA_i es el factor de ajuste del i-ésimo parámetro Tipo II, T_j es el valor del j-ésimo parámetro Tipo I.

Cuando un parámetro de Tipo II excede su límite recomendado lo suficiente como para que el agua no sea apta para su uso previsto, es decir, el valor de la FC

respectiva multiplicada por el FA es -100 o un número negativo mayor, el ICA entero tiene un número negativo y el agua simplemente se considera no apta.

Los resultados posibles para el caso de este índice van desde un hipotético número infinitamente negativo hasta cero (para el caso donde al menos un parámetro Tipo I sea negativo, o uno o varios Tipo II sean negativos); puntuación de cero en el caso de que la suma de los parámetros Tipo I y Tipo II entre positivos y negativos resulten a cero y puntuación mayor que cero y hasta 100 puntos; calificando el agua como no apta para consumo, dentro del límite de calidad y apta para consumo respectivamente.

El índice de Stoner tiene como ventaja establecer la calidad del agua para un momento específico, ya que es suficiente con tener un solo dato para cada parámetro Tipo I y II. También es específico respecto a cada parámetro, ya que existe una ecuación particular relacionada con aspectos inherentes del parámetro (con base en esto se asigna una ecuación de 1er o 2do grado) así como con el límite máximo de la norma aplicable (lo cual impacta los valores de las constantes en la ecuación generada). Por otro lado, este índice no contempla todos los parámetros de la NOM-127-SSA1-1994, únicamente 21 de 46, aunque esto no necesariamente representa una desventaja ya que bajo el estudio del autor se consideró que estos 21 son de los más relevantes por su presencia en el ambiente, la importancia a la salud y razones de operación para el tratamiento en una planta.

Otro aspecto a considerar para elegir este índice es que se basa en el de la NSF de Brown (1965), los cuales constituyeron en el estudio de Uddin *et al*, 2021 (107 publicaciones revisadas) el segundo más utilizado, por lo que se consideró importante la conveniencia de ocuparlo en las plantas potabilizadoras de esta investigación.

5 METODOLOGÍA

La metodología planteada para esta investigación se divide en 3 etapas que son descritas a continuación.

5.1 Etapa 1 Cálculo del índice canadiense a las plantas potabilizadoras y de tratamiento de agua residual.

5.1.1 Revisión y consideraciones al CWQI para el uso en las plantas de tratamiento de estudio

5.1.2 Cálculo del CWQI en temporada de estiaje y lluvia para la PP1

5.1.3 Cálculo del CWQI en temporada de estiaje y lluvia para la PP2

5.1.4 Cálculo del CWQI en temporada de estiaje y lluvia para la PTAR

5.2 Etapa 2 Cálculo del Índice de Stoner a las plantas potabilizadoras

5.2.1 Selección de parámetros Tipo I

5.2.2 Selección de parámetros Tipo II

5.2.3 Cálculo del índice de Stoner para las Plantas Potabilizadoras en temporada de lluvia y estiaje.

5.3 Etapa 3 Propuesta de indicadores para evaluar las plantas potabilizadoras.

5.3.1 Propuesta de indicadores de eficiencia basados en la calidad del agua

5.3.2 Cálculo de los indicadores para las plantas potabilizadoras

5.1 ETAPA 1

5.1.1 Revisión y consideraciones al CWQI para el uso en las plantas de tratamiento de estudio

El CWQI recomienda que para obtener resultados significativos se deben tener datos de al menos 4 parámetros de calidad y cada uno de ellos con al menos 4 muestreos, aunque sólo es una recomendación se tomó como un criterio importante para casi todos los cálculos realizados (para los siguientes años se consideraron 3 muestreos por parámetro debido a la disponibilidad de datos, PP1: 2010-estiaje, 2018-estiaje, 2018-19 lluvias, PP2: 2018-19 lluvias, PTAR: 2018-19 estiaje)

La forma de cálculo consistió en utilizar la hoja de Excel programada y proporcionada por el sitio oficial del CWQI (<https://www.gov.nl.ca/ecc/waterres/quality/background/cwqi/>).

Al Ingresar a la hoja de Excel se muestra la ventana de inicio (Figura 5.1) en donde se encuentra una reseña básica del CWQI y 5 pestañas: datos, criterio, reporte, manual y CWQI.

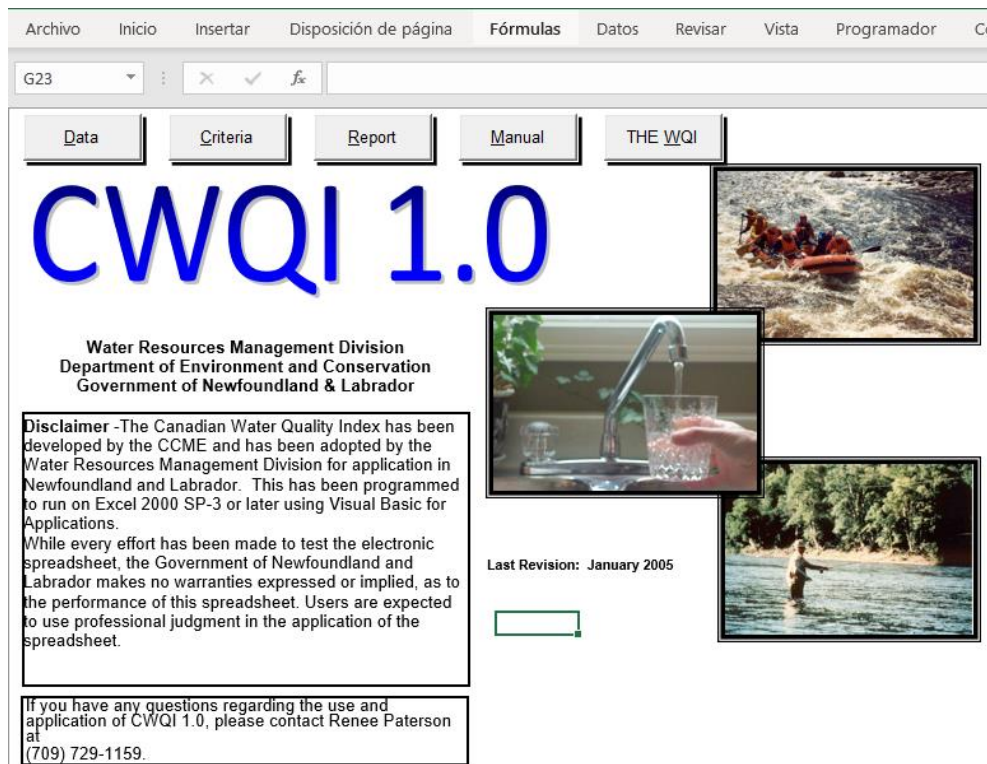


Figura 5.1 Ventana de presentación del Libro programado para el CWQI. Extraído del sitio web del CWQI.

Al seleccionar la pestaña “data”, se despliega una ventana como en la Figura 5.2, en la cual se colocan los datos del muestreo. Inicialmente se colocan las fechas específicas de cada muestreo individual (celda “Date”), enseguida se insertan todos los datos de calidad para todos los parámetros con que se cuenta con la información, verificando la concordancia de las unidades que solicita el programa y las que se reportan en el muestreo.

File Used: C:\WINDOWS\Desktop\testdata1.xls

Date	Group	Color	Turb	DO	PH	Alk	Ca	Na	Mg	K	Sulphate	Chloride	Fluoride	DOC	P
		(TCU)	(UNT)			(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)
1 19/01/2010	1	2.5	1.03		7.77				5.46						
2 29/04/2010	1	5	0.64		7.9				6.66						
3 03/11/2010	1	7.5	0.92		8				6.57						
4															
5															
6															
7															
8															
9															
10															
11															
12															
13															
14															
15															
16															
17															
18															
19															

Figura 5.2 Ventana para la colocación de datos. Fuente: Extraído del sitio web del CWQI.

En la siguiente pestaña “criteria” (Figura 5.3) se colocan los valores de norma a tomar en cuenta según el uso que se le puede dar al agua analizada, por lo que ahí se procedió a colocar los valores de la NOM-127-SSA1-1994 para el caso de las potabilizadoras y la NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-003-SEMARNAT-1997 para la PTAR.

En este caso existe la posibilidad de acomodar el orden de los parámetros a criterio propio o mantener la lista como el programa la genera. Cabe destacar que también se puede añadir de forma libre más parámetros de calidad. En esta pestaña se ubica el símbolo de cada parámetro de calidad, las unidades en que se mide y los

apartados para colocar los límites inferiores y superiores de cada parámetro según el tipo de uso del agua.

Please Note: In order to provide meaningful results the CWQI should be applied on data sets that contain at least 4 variables and at least 4 tests of each variable. However, users can exercise professional judgement based on knowledge of the data and site specific conditions.

Variables	Symbol	Units	Overall		Drinking		Aquatic		Recreation		Irrigation	
			Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper
1 Color	Color	TCU				20						
2 Turbidity	Turb	NTU				5						
3 Dissolved Oxygen	DO	mg/L										
4 pH	pH				6.5	8.5						
5 Alkalinity(Total Alkalinity)	ALKT	mg/L										
6 Calcium	Ca	mg/L										
7 Sodium	Na	mg/L				200						
8 Magnesium	Mg	mg/L										
9 Potassium	K	mg/L										
10 Sulphate	SO42-	mg/L				500						
11 Chloride	Cl-	mg/L				250						
12 Fluoride	F-	mg/L				1.5						
13 Dissolved Organic Carbon	DOC	mg/L										
14 Phosphorus(Total Phosphorus)	P	mg/L										
15 Nitrate(nit),Nitrite)	NO3-(NO2-)	mg/L				10						
16 Nitrogen	N	mg/L				0.5						
17 Silica(Silicon Dioxide)	SiO2	mg/L										
18 Aluminium	Al	mg/L										
19 Arsenic	As	mg/L										

Figura 5.3 Ventana de criterios o normas a tomar en cuenta para establecer los límites de los parámetros de calidad. Fuente: Extraído del sitio web del CWQI.

En las pestañas “Manual” y “CWQI” se expone el método de cálculo del índice canadiense basado en 3 factores explicado previamente así como las instrucciones detalladas del uso de este libro de Excel.

Ya que fueron ingresados los datos y los valores límite de norma, se selecciona el ícono “compute” y se obtendrá el reporte simplificado del cálculo del índice (Figura 5.4).

A4 Canadian Water Quality Index 1.0

Start Data Criteria Manual THE WQI

Canadian Water Quality Index 1.0

Data Summary	Overall	Drinking	Aquatic	Recreation	Irrigation	Livestock
CWQI	N/A	100	N/A	N/A	N/A	N/A
Categorization	No Data	Excellent	No Data	No Data	No Data	No Data
F1 (Scope)		0				
F2 (Frequency)		0				
F3 (Amplitude)		0				
Minimal Dataset Requirement of 4 Variables	Not Met	Met	Not Met	Not Met	Not Met	Not Met
Contaminant Analysis of Last Sample	Not Tested	Not Tested	Not Tested	Not Tested	Not Tested	Not Tested

Details of any contaminant failures listed at the bottom of this sheet when applicable.

Turbidity Flagging Option	Not Used
Site Specific Guideline Generation Option (CCME)	Not Used

Details available in Calculations Summary when applied.

File Used: C:\WINDOWS\Desktop\testdata1.xls

In-depth Report Options

Calculations Summary WQI Chart Indexed Test Data Outliers Turbidity

Please Note: In order to provide meaningful results the CWQI should be applied on data sets that contain at least 4 variables and at least 4 tests of each variable. However, users can exercise professional judgement based on knowledge of the data and site specific conditions.

Figura 5.4 Ventana de Resultados. Fuente: Extraído del sitio web del CWQI.

Tal como se observa en la Figura 5.4, el resultado según los datos ingresados es un CWQI de 100 puntos dentro de la categorización de excelente para el uso y consumo humano.

Además en esta ventana, se cuenta con la posibilidad de obtener un reporte detallado al seleccionar la pestaña “calculations summary” (Figura 5.5) e incluso una pestaña de la cual se puede obtener una gráfica resumen para el valor del índice comparando los usos del agua.

B7 Overall

Back

CANADIAN WATER QUALITY INDEX 1.0
C:\WINDOWS\Desktop\testdata1.xls
Summary of Results

	Overall	Drinking	Aquatic	Recreation	Irrigation	Livestock
Number of variables tested	0	12	0	0	0	0
Number of variables that failed	0	0	0	0	0	0
Variables with most failed tests	None	None	None	None	None	None
Variables with highest use	None	None	None	None	None	None

Variables that Failed the objectives	Color	Turb	DO	pH	ALKT	Ca	Na	Mg
Overall	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Drinking	No Failures	No Failures	N/A	No Failures	N/A	N/A	No Failures	N/A
Aquatic	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Recreation	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Irrigation	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Livestock	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Number of Tests (Number of Failures)	Color	Turb	DO	pH	ALKT	Ca	Na	Mg
Overall	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Drinking	3 (0)	3 (0)	N/A	3 (0)	N/A	N/A	3 (0)	N/A
Aquatic	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Recreation	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Irrigation	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Livestock	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Figura 5.5 Ventana que muestra el detallado de los cálculos para cada parámetro de calidad. Fuente: Extraído del sitio web del CWQI.

5.1.2 Cálculo del CWQI en temporada de estiaje y lluvia para la PP1

En esta sección se calculó el índice canadiense para la PP1, para lo cual se consideró el método expuesto en el apartado 5.1.1. Se consideró el cálculo para el influente y el efluente de la PP1, con el objetivo de contrastar la calidad y los parámetros más importantes antes del tratamiento e inmediatamente posterior a ello.

Para esto se tomó en cuenta la siguiente información para el influente de la PP1 en temporada de estiaje (Tabla 5.1):

Tabla 5.1 Recopilación de parámetros y número de muestras para los años de evaluación en el influente de la PP1 en temporada de estiaje.

Parámetros de la NOM-127-SSA1-1994	Año					
	2017		2018		2019	
	¿Se cuenta con este?	# muestras	¿Se cuenta con este?	# muestras	¿Se cuenta con este?	# muestras
Organismos coliformes totales	✓	4	✓	3	✓	4
Coliformes fecales	✓	4	✓	3	✓	4
Color	✓	4	✓	3	✓	4
Olor y sabor						
Turbiedad	✓	4	✓	3	✓	4
Aluminio						
Arsénico						
Bario						
Cadmio						
Cianuros						
Cloro residual libre						
Cloruros	✓	4	✓	3	✓	4
Cobre						
Cromo total						
Dureza total	✓	4	✓	3		
Fenoles						
Hierro						
Fluoruros	✓	4	✓	3	✓	4
Hidrocarburos aromáticos						
Manganeso						
Mercurio						

Nitratos	✓	4	✓	3	✓	4
Nitritos	✓	4	✓	3	✓	4
Nitrógeno amoniacal	✓	4	✓	3	✓	4
pH	✓	4	✓	3	✓	4
Plaguicidas						
Plomo						
Sodio						
SDT	✓	3				
Sulfatos	✓	3	✓	3	✓	4
SAAM	✓	4	✓	3	✓	4
Trihalometanos totales						
Yodo residual libre						
Zinc						
Radiactividad alfa						
Radiactividad beta						
Total	14	54	13	39	12	48

En el caso del influente en temporada de lluvia (Tabla 5.2):

Tabla 5.2 Recopilación de parámetros y número de muestras para los años de evaluación en el influente de la PP1 en temporada de lluvia.

Parámetros de la NOM-127-SSA1-1994	Año	
	2018-2019	
	¿Se cuenta con este?	# muestras
Organismos coliformes totales	✓	3
Coliformes fecales	✓	3
Color	✓	3
Olor y sabor		
Turbiedad	✓	3
Aluminio	✓	3
Arsénico	✓	3
Bario	✓	3
Cadmio	✓	3
Cianuros		
Cloro residual libre		

Cloruros	✓	3
Cobre	✓	3
Cromo total	✓	3
Dureza total	✓	3
Fenoles		
Hierro	✓	3
Fluoruros	✓	3
Hidrocarburos aromáticos		
Manganeso	✓	3
Mercurio		
Nitratos	✓	3
Nitritos	✓	3
Nitrógeno amoniacal	✓	3
pH	✓	3
Plaguicidas		
Plomo	✓	
Sodio	✓	
SDT		
Sulfatos	✓	3
SAAM	✓	3
Trihalometanos totales		
Yodo residual libre		
Zinc	✓	3
Radiactividad alfa		
Radiactividad beta		
Total	24	72

En el caso del efluente en temporada de estiaje (Tabla 5.3):

Tabla 5.3 Recopilación de parámetros y número de muestras para los años de evaluación en el efluente de la PP1 en temporada de estiaje.

Parámetros de la NOM-127-SSA1-1994	Año															
	2010		2013		2014		2015		2016		2017		2018		2019	
	¿?	#	¿?	#	¿?	#	¿?	#	¿?	#	¿?	#	¿?	#	¿?	#

Organismos coliformes totales	sí	3	sí	4	sí	5	sí	4	sí	6	sí	4	sí	3	sí	4
Coliformes fecales	sí	3	sí	4	sí	5	sí	4	sí	6	sí	4	sí	3	sí	4
Color	sí	3	sí	4	sí	6	sí	4	sí	6	sí	4	sí	3	sí	4
Olor y sabor																
Turbiedad	sí	3	sí	4	sí	6	sí	4	sí	6	sí	4	sí	3	sí	4
Aluminio																
Arsénico																
Bario																
Cadmio																
Cianuros																
Cloro residual libre																
Cloruros			sí	3	sí	5			sí	5	sí	4	sí	3	sí	4
Cobre																
Cromo total																
Dureza total	sí	3	sí	4	sí	5			sí	3	sí	4	sí	3		
Fenoles																
Hierro	sí	3	sí	4					sí	3						
Fluoruros									sí	6	sí	4	sí	3	sí	4
Hidrocarburos aromáticos																
Manganeso	sí	3	sí	4					sí	3						
Mercurio																
Nitratos	sí	3	sí	4	sí	6	sí	4	sí	4	sí	4	sí	3	sí	4
Nitritos	sí	3	sí	4	sí	6	sí	4	sí	4	sí	4	sí	3	sí	4
Nitrógeno amoniacal	sí	3	sí	4	sí	6					sí	4	sí	3	sí	4
pH	sí	3	sí	4	sí	6	sí	4	sí	6	sí	4	sí	3	sí	4
Plaguicidas																
Plomo																
Sodio	sí	3	sí	4	sí	5							sí	3		
SDT			sí	4	sí	5	sí	4	sí	4	sí	4	sí	3	sí	4
Sulfatos									sí	3	sí	3	sí	3	sí	4
SAAM									sí	4	sí	4	sí	3	sí	4
Trihalometanos totales																
Yodo residual libre																
Zinc																
Radiactividad alfa																
Radiactividad beta																

Total	12	36	14	55	12	66	8	32	14	69	14	55	15	45	13	52
--------------	----	----	----	----	----	----	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----

En el caso del efluente en temporada de lluvia (Tabla 5.4):

Tabla 5.4 Recopilación de parámetros y número de muestras para los años de evaluación en el efluente de la PP1 en temporada de lluvia.

Parámetros de la NOM-127-SSA1-1994	Año			
	2015		2018-2019	
	¿Se cuenta con ese?	# muestras	¿Se cuenta con ese?	# muestras
Organismos coliformes totales	sí	4	sí	3
Coliformes fecales	sí	4	sí	3
Color	sí	4	sí	3
Olor y sabor				
Turbiedad	sí	4	sí	3
Aluminio				
Arsénico			sí	3
Bario			sí	3
Cadmio			sí	3
Cianuros				
Cloro residual libre				
Cloruros	sí	4	sí	3
Cobre			sí	3
Cromo total			sí	3
Dureza total	sí	4	sí	3
Fenoles				
Hierro	sí	4	sí	3
Fluoruros	sí	3	sí	3
Hidrocarburos aromáticos				
Manganeso	sí	3	sí	3
Mercurio				
Nitratos	sí	4	sí	3
Nitritos	sí	4	sí	3
Nitrógeno amoniacal			sí	3
pH	sí	4	sí	3
Plaguicidas				
Plomo			sí	3
Sodio			sí	3
SDT	sí	3		

Sulfatos			sí	3
SAAM	sí	3	sí	3
Trihalometanos totales				
Yodo residual libre				
Zinc			sí	3
Radiactividad alfa				
Radiactividad beta				
Total	13	48	23	69

5.1.3 Cálculo del CWQI en temporada de estiaje y lluvia para la PP2

En esta sección se calculó el índice canadiense para la PP2, para lo cual se consideró el método expuesto en el apartado 5.1.1. Se tomó en cuenta el cálculo para el influente y el efluente de la PP2, con el objetivo de contrastar la calidad y los parámetros más importantes antes del tratamiento e inmediatamente posterior a ello.

Para esto se tomó en cuenta la siguiente información para el influente de la PP2 en temporada de estiaje (Tabla 5.5):

Tabla 5.5 Recopilación de parámetros y número de muestras para los años de evaluación en el influente de la PP2 en temporada de estiaje.

Parámetros de la NOM-127-SSA1-1994	Año			
	2018		2019	
	¿Se cuenta con ese?	# muestras	¿Se cuenta con ese?	# muestras
Organismos coliformes totales	sí	4	sí	3
Coliformes fecales	sí	4	sí	3
Color	sí	4	sí	3
Olor y sabor				
Turbiedad	sí	4	sí	3
Aluminio	sí	3		
Arsénico	sí	3		
Bario	sí	3		
Cadmio	sí	3		
Cianuros				

Cloro residual libre				
Cloruros	sí	4	sí	3
Cobre	sí	3		
Cromo total	sí	3		
Dureza total	sí	4		
Fenoles				
Hierro	sí	3		
Fluoruros	sí	4		
Hidrocarburos aromáticos				
Manganeso	sí	3		
Mercurio				
Nitratos	sí	4	sí	3
Nitritos	sí	4	sí	3
Nitrógeno amoniacal	sí	4	sí	3
pH	sí	4	sí	3
Plaguicidas				
Plomo	sí	3		
Sodio	sí	4		
SDT				
Sulfatos	sí	4	sí	3
SAAM	sí	4	sí	3
Trihalometanos totales				
Yodo residual libre				
Zinc	sí	3		
Radiactividad alfa				
Radiactividad beta				
Total	24	86	12	36

En el caso del influente en temporada de lluvia (Tabla 5.6):

Tabla 5.6 Recopilación de parámetros y número de muestras para los años de evaluación en el influente de la PP2 en temporada de lluvia.

Parámetros de la NOM-127-SSA1-1994	Año	
	2018-2019	
	¿Se cuenta con este?	# muestras

Organismos coliformes totales	sí	3
Coliformes fecales	sí	3
Color	sí	3
Olor y sabor		
Turbiedad	sí	3
Aluminio		
Arsénico		
Bario		
Cadmio		
Cianuros		
Cloro residual libre		
Cloruros		
Cobre		
Cromo total		
Dureza total		
Fenoles		
Hierro		
Fluoruros	sí	3
Hidrocarburos aromáticos		
Manganeso		
Mercurio		
Nitratos	sí	3
Nitritos	sí	3
Nitrógeno amoniacal	sí	3
pH	sí	3
Plaguicidas		
Plomo		
Sodio		
SDT		
Sulfatos	sí	3
SAAM	sí	3
Trihalometanos totales		
Yodo residual libre		
Zinc		
Radiactividad alfa		
Radiactividad beta		

Total	11	33
--------------	----	----

En el caso del efluente en temporada de estiaje (Tabla 5.7):

Tabla 5.7 Recopilación de parámetros y número de muestras para los años de evaluación en el efluente de la PP2 en temporada de estiaje.

Parámetros de la NOM-127-SSA1-1994	Año							
	2015		2016		2018		2019	
	¿Se cuenta con este?	# muestras	¿Se cuenta con este?	# muestras	¿Se cuenta con este?	# muestras	¿Se cuenta con este?	# muestras
Organismos coliformes totales	sí	4	sí	6	sí	4	sí	4
Coliformes fecales	sí	4	sí	6	sí	4	sí	4
Color	sí	4	sí	6	sí	4	sí	4
Olor y sabor								
Turbiedad	sí	4	sí	6	sí	4	sí	4
Aluminio					sí	3		
Arsénico					sí	3		
Bario					sí	3		
Cadmio					sí	3		
Cianuros								
Cloro residual libre								
Cloruros			sí	5	sí	4	sí	4
Cobre					sí	3		
Cromo total					sí	3		
Dureza total					sí	4		
Fenoles								
Hierro					sí	3		
Fluoruros	sí	4	sí	6	sí	4	sí	4
Hidrocarburos aromáticos								
Manganeso					sí	3		
Mercurio								
Nitratos	sí	4	sí	4	sí	4	sí	4
Nitritos	sí	4	sí	4	sí	4	sí	4
Nitrógeno amoniacal					sí	4	sí	4
pH	sí	4	sí	6	sí	4	sí	4
Plaguicidas								

Plomo					sí	3		
Sodio					sí	4		
SDT	sí	4	sí	4				
Sulfatos					sí	4	sí	4
SAAM	sí	4	sí	4	sí	4	sí	4
Trihalometanos totales								
Yodo residual libre								
Zinc					sí	3		
Radiactividad alfa								
Radiactividad beta								
Total	10	40	11	57	24	86	12	48

En el caso del efluente en temporada de lluvia (Tabla 5.8):

Tabla 5.8 Recopilación de parámetros y número de muestras para los años de evaluación en el efluente de la PP2 en temporada de lluvia.

Parámetros de la NOM-127-SSA1-1994	Año			
	2016-2017		2018-2019	
	¿Se cuenta con ese?	# muestras	¿Se cuenta con ese?	# muestras
Organismos coliformes totales	sí	4	sí	3
Coliformes fecales	sí	4	sí	3
Color	sí	4	sí	3
Olor y sabor				
Turbiedad	sí	4	sí	3
Aluminio			sí	3
Arsénico			sí	3
Bario			sí	3
Cadmio			sí	3
Cianuros				
Cloro residual libre				
Cloruros	sí	3	sí	3
Cobre			sí	3
Cromo total			sí	3
Dureza total			sí	3
Fenoles				

Hierro			sí	3
Fluoruros	sí	4	sí	3
Hidrocarburos aromáticos				
Manganeso			sí	3
Mercurio				
Nitratos	sí	4	sí	3
Nitritos	sí	4	sí	3
Nitrógeno amoniacal	sí	4	sí	3
pH	sí	4	sí	3
Plaguicidas				
Plomo				
Sodio			sí	3
SDT	sí	4		
Sulfatos	sí	4	sí	3
SAAM	sí	4	sí	3
Trihalometanos totales				
Yodo residual libre				
Zinc			sí	3
Radiactividad alfa				
Radiactividad beta				
Total	13	51	24	72

5.1.4 Cálculo del CWQI en temporada de estiaje y lluvia para la PTAR

En esta sección se calculó el índice canadiense para la PTAR, para lo cual se consideró el método expuesto en el apartado 5.1.1. Se consideró el cálculo para el influente y el efluente de la PTAR, con el objetivo de contrastar la calidad y los parámetros más importantes antes del tratamiento e inmediatamente posterior a ello.

Para esto se tomó en cuenta la siguiente información para el influente de la PTAR en temporada de estiaje (Tabla 5.9):

Tabla 5.9 Recopilación de parámetros y número de muestras para los años de evaluación en el influente de la PTAR en temporada de estiaje.

	Año			
	2014	2015	2017	2018-2019

Parámetros de la NOM-003-SEMARNAT-1997	¿Se cuenta con este?	# muestras	¿Se cuenta con este?	# muestras	¿Se cuenta con este?	# muestras	¿Se cuenta con este?	# muestras
Coliformes fecales								
Huevos de helminto								
Grasas y aceites	sí	5	sí	5			sí	3
DBO₅	sí	5	sí	5	sí	4	sí	3
SST	sí	5	sí	5	sí	4	sí	3
Arsénico	sí	5	sí	5	sí	3		
Cadmio	sí	5	sí	5	sí	4	sí	3
Cianuro								
Cobre	sí	5	sí	5	sí	4	sí	3
Cromo	sí	5	sí	5	sí	4	sí	3
Mercurio	sí	5	sí	5				
Níquel					sí	4	sí	3
Plomo	sí	5	sí	5	sí	4	sí	3
Zinc	sí	5	sí	5	sí	4	sí	3
NOM-001-SEMARNAT-1996								
Temperatura					sí	3		
Sólidos Sedimentables	sí	5	sí	5	sí	4	sí	3
Nitrógeno total			sí	5	sí	4	sí	3
Fósforo total	sí	5	sí	5	sí	3		
Total	12	60	13	65	13	49	11	33

En el caso del influente en temporada de lluvia (Tabla 5.10):

Tabla 5.10 Recopilación de parámetros y número de muestras para los años de evaluación en el influente de la PTAR en temporada de lluvia.

Parámetros de la NOM-003-SEMARNAT-1997	Año							
	2014		2015		2016		2018-2019	
	¿Se cuenta con este?	# muestras	¿Se cuenta con este?	# muestras	¿Se cuenta con este?	# muestras	¿Se cuenta con este?	# muestras
Coliformes fecales								
Huevos de helminto								
Grasas y aceites	sí	4	sí	6	sí	5	sí	6
DBO₅	sí	4	sí	6	sí	7	sí	6
SST			sí	6	sí	7	sí	6

Arsénico	sí	4	sí	6				
Cadmio	sí	4	sí	6	sí	4	sí	4
Cianuro								
Cobre	sí	4	sí	6	sí	4	sí	4
Cromo	sí	4	sí	6	sí	4	sí	4
Mercurio	sí	4	sí	6				
Níquel							sí	4
Plomo	sí	4	sí	6	sí	4	sí	4
Zinc	sí	4	sí	6	sí	4	sí	4
NOM-001-SEMARNAT-1996								
Temperatura								
Sólidos Sedimentables	sí	4	sí	6	sí	7	sí	6
Nitrógeno total	sí	3	sí	6	sí	7	sí	5
Fósforo total	sí	4	sí	6	sí	7	sí	5
Total	12	47	13	78	11	60	12	58

En el caso del efluente en temporada de estiaje (Tabla 5.11):

Tabla 5.11 Recopilación de parámetros y número de muestras para los años de evaluación en el efluente de la PTAR en temporada de estiaje.

Parámetros de la NOM-003-SEMARNAT-1997	Año							
	2014		2015		2017		2018-2019	
	¿Se cuenta con este?	# muestras	¿Se cuenta con este?	# muestras	¿Se cuenta con este?	# muestras	¿Se cuenta con este?	# muestras
Coliformes fecales								
Huevos de helminto								
Grasas y aceites	sí	5	sí	5			sí	3
DBO₅	sí	5	sí	5	sí	4	sí	3
SST	sí	5	sí	5	sí	4	sí	3
Arsénico	sí	5	sí	5	sí	3		
Cadmio	sí	5	sí	5	sí	4		
Cianuro								
Cobre	sí	5	sí	5	sí	4		
Cromo	sí	5	sí	5	sí	4		
Mercurio	sí	5	sí	5				
Níquel					sí	4		
Plomo	sí	5	sí	5	sí	4		
Zinc	sí	5	sí	5	sí	4		

NOM-001-SEMARNAT-1996								
Temperatura					sí	4	sí	3
Sólidos Sedimentables	sí	5	sí	5	sí	4	sí	3
Nitrógeno total			sí	5	sí	3	sí	3
Fósforo total	sí	5	sí	5	sí	3		
Total	12	60	13	65	13	49	6	18

En el caso del efluente en temporada de lluvia (Tabla 5.12):

Tabla 5.12 Recopilación de parámetros y número de muestras para los años de evaluación en el efluente de la PTAR en temporada de lluvia.

Parámetros de la NOM-003-SEMARNAT-1997	Año							
	2014		2015		2016		2018-2019	
	¿Se cuenta con este?	# muestras	¿Se cuenta con este?	# muestras	¿Se cuenta con este?	# muestras	¿Se cuenta con este?	# muestras
Coliformes fecales								
Huevos de helminto								
Grasas y aceites	sí	4	sí	6	sí	5	sí	4
DBO₅	sí	4	sí	6	sí	7	sí	5
SST	sí	4	sí	6	sí	7	sí	5
Arsénico	sí	4	sí	6				
Cadmio	sí	4	sí	6	sí	4	sí	4
Cianuro								
Cobre			sí	6	sí	4	sí	4
Cromo	sí	4	sí	6	sí	4	sí	4
Mercurio	sí	4	sí	6				
Níquel							sí	4
Plomo	sí	4	sí	6	sí	4	sí	4
Zinc	sí	4	sí	6	sí	4	sí	4
NOM-001-SEMARNAT-1996								
Temperatura							sí	5
Sólidos Sedimentables	sí	4	sí	6	sí	7	sí	5
Nitrógeno total	sí	3	sí	6	sí	7	sí	4
Fósforo total	sí	4	sí	6	sí	7	sí	4
Total	12	47	13	78	11	60	13	56

5.2 ETAPA 2

5.2.1 Selección de parámetros Tipo I

En el caso de este índice se consideró necesario realizar algunas modificaciones con el objetivo de obtener resultados acordes a la normatividad mexicana y con base en la información disponible.

Primero, se seleccionaron los parámetros Tipo I y Tipo II que se mantendrían de la versión original del autor, las que se descartarían y las que se incorporarían.

La selección de las propiedades respetó en la medida de lo posible la propuesta original del autor, sin embargo, está limitado a los 46 parámetros monitoreados por el SACMEX para las plantas potabilizadoras, siendo que es el organismos operador que proporcionó la base de datos de calidad del agua.

En la Tabla 5.13 se presenta los parámetros Tipo I de la versión de Stoner (1978) en donde principalmente se encuentran elementos químicos metálicos, plaguicidas e incluso isótopos radioactivos.

Tabla 5.13 Parámetros Tipo I y su límite máximo, expresados en mg/L, excepto los isótopos radioactivos (pCi/L). Fuente: Stoner, 1978

<i>Parámetro</i>	<i>Valor límite</i>
Arsénico (As)	0.1
Bario (Ba)	1.0
Cadmio (Cd)	0.01
Cromo (Cr)	0.05
Plomo (Pb)	0.05
Mercurio (Hg)	0.002
Selenio (Se)	0.01
Cianuro (CN⁻)	0.2
Aldrín (C₁₂H₈Cl₆)	0.001
Clordano (C₁₀H₆Cl₈)	0.003
DDT (C₁₄H₉Cl₅)	0.05
Dieldrín (C₁₂H₈Cl₆O)	0.0005
Endrina (C₁₂H₈Cl₆O)	0.0001
Heptacloro (C₁₀H₅Cl₇)	0.0001
Epóxido de heptacloro	0.0001
Lindano (C₆H₆Cl₆)	0.005
Metoxicloro (C₁₆H₁₅Cl₃O₂)	1.0
Toxafeno (C₁₀H₁₀Cl₈)	0.005
Carbamato organofosforado	0.1
ácido 2,4-diclorofenoxiacético (C₈H₆Cl₂O₃)	0.02
Silvex (C₉H₇Cl₃O₃)	0.03

ácido 2,4,5-triclorofenoxiacético(C₈H₅Cl₃O₃)	0.002
Radio-226	20
Yodo-131	100
Estroncio-90	200
Estroncio-89	2000

En la Tabla 5.14 se encuentra los parámetros Tipo I que serán considerados para el cálculo de los índices, según los datos existentes y tomando como referencia la NOM-127-SSA1-1994 en su modificación del año 2000, además se incluye en este grupo a las bacterias coliformes totales debido a que son un indicador específico de contaminación usado ampliamente (OMS, 2018).

Por otra parte, se descartó el mercurio debido a que no está reportado en la base de datos así como el compuesto de cianuro. También, aunque algunos de los pesticidas sí se encuentran dentro de la norma mexicana, no se reportó alguno en la base de datos proporcionada por SACMEX por lo que se descartaron todos; el mismo caso se aplicó a todos los isótopos radiactivos.

Se añadió al elemento aluminio debido a que está ampliamente reportado en la base de datos disponible, por lo que se consideró importante no excluir esta información, además cumple con la característica que Stoner indica para los parámetros Tipo I con respecto a su importancia por afectaciones a la salud en donde según la Organización Mundial de la Salud, debido a que existen escasos indicios de que la ingestión de aluminio por la vía oral produce toxicidad aguda en el ser humano, a pesar de la amplia presencia del elemento en alimentos, agua de consumo humano y numerosos antiácidos. Se ha sugerido la hipótesis de que la exposición al aluminio es un factor de riesgo para el desarrollo o la aparición temprana de la enfermedad de Alzheimer en el ser humano (OMS, 2018).

Tabla 5.14 Valores de los parámetros Tipo I seleccionados para el índice de calidad del agua, expresados en mg/L, excepto CT (col/100ml)

<i>Aluminio</i>	0.20
<i>Arsénico</i>	0.025
<i>Bario</i>	0.70
<i>Cadmio</i>	0.005
<i>Cromo</i>	0.05
<i>Plomo</i>	0.01
<i>Selenio</i>	0.04
<i>Coliformes Totales</i>	0.00

En la Tabla 5.15 se presenta a los parámetros Tipo II de la versión original del autor, en donde se encuentran parámetros que afectan el aspecto estético del agua y

algunos otros componentes que si llegaran a presentar altas concentraciones serían nocivos para la salud. Stoner consideró para estos parámetros, no sólo el límite que establece la norma de ese tiempo, adicionalmente tomó en cuenta un valor “ideal”, que puede ser interpretado como el mejor escenario posible para ese parámetro en el consumo de agua potable. Para la gran mayoría de los parámetros (excepto fluoruros; en este caso para pH el valor ideal es agua neutra) Stoner consideró que el valor ideal para estos debía ser cero en agua de consumo humano, porque por un lado algunos de estos (elementos esenciales como zinc) se consumen en alimentos y no sería necesaria la aportación a través del consumo de agua, y los que se consideran como no esenciales, lo ideal es que fueren cero porque un incremento en su concentración los convierte en un riesgo.

Tabla 5.15 Valores de los parámetros Tipo II expresados en mg/L, excepto coliformes (col/100mL) Fuente: Stoner, 1978

	Límite	Ideal
Nitrógeno Amoniacal	0.5	0.0
Cloruros	250	0.0
Color	75 Pt-Co	0 Pt-Co
Cobre	1.0	0.0
Bacterias Coliformes Totales	2000/100	0/100
Fluoruros	R=1	R=0.1
Hierro	0.3	0.0
SAAM	0.5	0.0
Nitrito	1	0.0
pH	5-9	7
Fenol	1 µg/L	0.0
Sulfato	250	0
Zinc	5.0	0.0

5.2.2 Selección de parámetros Tipo II

En la Tabla 5.16 se encuentran los parámetros Tipo II que serán considerados para el cálculo de los índices, según los datos existentes y tomando como referencia la NOM-127-SSA1-1994 en su modificación del año 2000 para el establecimiento de los valores límite, en cambio para los valores ideales se realizó una nueva propuesta tomando en consideración la ingesta diaria admisible de algunos elementos químicos considerados como “esenciales” y su asociación al consumo de agua reportada en las “Guías para la calidad del agua de consumo humano” de la OMS en su versión de 2018.

Para el caso de los parámetros Tipo II, se respetaron en su mayoría (13/15) los de la versión original, en este caso no se consideró necesario añadir otros parámetros,

pero si restar 2, en este caso las bacterias coliformes totales debido a que se consideró como parámetro Tipo I y también Fenol, que no está reportado dentro del muestreo histórico disponible del parámetro, por lo que fue necesario retirarlo.

Tabla 5.16 Valores de los parámetros Tipo II seleccionados para el índice de calidad del agua, expresados en mg/L.

	<i>Límite</i>	<i>Ideal</i>
<i>Nitrógeno Amoniacal</i>	0.5	0.0
<i>Cloruros</i>	250	0.0
<i>Color</i>	20 Pt-Co	0 Pt-Co
<i>Cobre</i>	2.0	0.2
<i>Sodio</i>	200	0
<i>Fluoruros</i>	1.5	0.15
<i>Hierro</i>	0.3	0.03
<i>SAAM</i>	0.5	0.0
<i>Nitrito</i>	1.0	0.0
<i>pH</i>	6.5-8.5	7
<i>Manganeso</i>	0.15	0.03
<i>Sulfato</i>	400	0
<i>Zinc</i>	5.0	0.5

A continuación se presentan las razones principales por las que Stoner consideró estos parámetros como Tipo II en la generación del índice, así como la función matemática (Función de Calidad, FC) correspondiente (en donde se respeta el grado de la ecuación que recomienda Stoner, pero se modifican los valores de las constantes con base en los límites propios de la norma mexicana y el valor ideal propuesto) también se mencionan algunos aspectos adicionales resultado de la búsqueda bibliográfica y respecto a la propuesta del valor ideal, con base en importancia a la salud que tiene cada parámetro según corresponda. Cabe mencionar que en primera instancia, cada ecuación se planteó con la capacidad de obtener 100 puntos máximo, sin embargo más adelante se realizó la modificación de las ecuaciones mediante la multiplicación arbitraria por un factor reportado en el trabajo de Stoner según la importancia de la propiedad, de tal forma que la suma de todos los índices individuales de las propiedades Tipo II permita obtener un valor máximo de 100 unidades.

Nitrógeno amoniacal. El nitrógeno amoniacal se seleccionó porque es un indicador de contaminación (peligro para la salud) y por su efecto sobre la eficiencia de la cloración (una razón económica). El límite recomendado para el amonio es 0.5 mg/L y se establece que la concentración ideal es 0.0 mg/L. Las concentraciones de amoníaco en solución acuosa se expresan en términos de miligramos por litro de

amonio visto como nitrógeno amoniacal (N-NH₄). Stoner propuso una ecuación lineal para este parámetro, la cual adaptada al valor límite e ideal es:

$$FC(N - NH_4) = 100 - 200 \left(\frac{mg}{L} N - NH_4 \right)$$

En donde, al evaluar en los valores límite e ideal:

$$FC(\text{valor límite}) = 100 - 200(0.5) = 0$$

$$FC(\text{valor ideal}) = 100 - 200(0) = 100$$

Por lo tanto el rango de posibles resultados = [0,100]

Con lo anterior expuesto, se comprueba que la ecuación es correcta y permite obtener el valor del índice en el rango correcto de resultados posibles.

Por otro lado, si la concentración del nitrógeno amoniacal fuera mayor que el límite de norma, en este caso >0.5 mg/L.

$$FC \left(> 0.5 \frac{mg}{L} \right) = 100 - 200(> 0.5)$$

Para este caso, se espera un resultado de números negativos que ascenderá conforme la concentración de nitrógeno amoniacal sea cada vez mayor que 0.5 mg/L. Al ocurrir esta situación, dicho número negativo cumplirá el objetivo matemático de restar unidades al índice de calidad global de la muestra de agua evaluada.

Cloruros. El cloruro se seleccionó por su efecto sobre el sabor y porque acelera la corrosión de los sistemas de distribución. Además, las altas concentraciones de cloruro pueden hacer que el agua no sea apta para el consumo humano. El límite recomendado es de 250 mg/L y la concentración ideal se considera en 0.0 mg/L. En general, la utilidad de un agua para el suministro público disminuye a medida que aumenta la concentración de cloruro. Se desconoce la velocidad a la que disminuye esta característica; por lo tanto, Stoner eligió la forma lineal porque es la expresión más simple que expresaría esta relación. La ecuación determinada para el cloruro es:

$$FC(Cl^-) = 100 - 0.4 \left(\frac{mg}{L} Cl^- \right)$$

Color. Se seleccionó el color porque al presentarse algún incremento de este puede hacer que el agua sea estéticamente indeseable, además, un mayor grado de color

reduce la eficiencia de ciertos productos utilizados en los procesos de potabilización, por ejemplo, un nivel de color alto proveniente del carbono orgánico natural (p. ej., ácidos húmicos) también podría indicar una gran propensión a la generación de subproductos en los procesos de desinfección (OMS, 2018). El límite recomendado para el color es de 20 U Pt-Co (unidades platino-cobalto), y el ideal asumido es 0 U Pt-Co. La aceptación estética del color en el agua potable es muy difícil de cuantificar. Originalmente Stoner creyó que el rechazo de un agua debido al color aumenta a un ritmo más rápido que el expresado por una ecuación lineal; por lo tanto, utilizó una ecuación de segundo grado. La ecuación para el color determinada a partir de su suposición y los ajustes realizados al límite vigente y valor ideal es:

$$FC(\text{Color}) = 100 - 0.25 (U \text{ Pt} - Co)^2$$

Cobre. Se seleccionó el cobre porque afecta el sabor, puede acelerar la corrosión y en grandes dosis puede causar a los consumidores vómitos y/o daño hepático. El límite de concentración recomendado de cobre para el suministro público de agua es 2 mg/L, sin embargo el cobre es un nutriente esencial para la salud humana, por lo que aun cuando Stoner consideró el valor ideal como 0.0 mg/L, basándose en que este elemento se consume en cantidades adecuadas en alimentos, se optó por realizar una modificación tal que el valor ideal sea el 10% del valor límite permitido de norma con base en las guías para la calidad del agua de consumo humano (OMS, 2018) en donde se toma en cuenta para muchos de los elementos esenciales de consumo humano el 10% de la ingesta diaria admisible asociada con el agua potable, por lo que el valor ideal es 0.2 mg/L. Stoner eligió una ecuación de segundo grado para el cobre porque refleja la rápida degradación del agua potable debido al sabor por concentraciones de cobre superiores al límite. La FC desarrollada para el cobre es:

$$FC(\text{Cu}) = 101.01 - 25.2525\left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{Cu}\right)^2$$

Cabe mencionar que esta ecuación aplica de manera correcta al intervalo entre 2 (límite de norma) y 0.2 (ideal) en donde el rango al evaluar la ecuación está entre 0 y 100, por otro lado si se evalúa la ecuación con valores por arriba del límite de norma el resultado será de algún número negativo, lo cual también es adecuado matemáticamente sin embargo al evaluar concentraciones por debajo del valor ideal (0.2) ya no puede aplicarse la misma ecuación porque se estaría obteniendo un rango de valores cercanos o incluso de 100 puntos lo que ya no refleja la idea de tener un solo punto ideal; es decir, el rango obtenido por concentraciones <0.2 mg/L debe tender a ser menor que 100 y no un número negativo, porque aunque no se está dentro del intervalo de límite de norma e ideal, lo fundamental es reflejar la importancia de exceder el límite de norma así obteniendo valores negativos que

resten puntos al índice global; por todo esto se planteó una segunda ecuación para el intervalo entre 0.2-0 mg/L tal que al acercarse a 0 mg/L el valor resultante del índice también se acerque a 0 puntos del índice. Esta ecuación es la siguiente:

$$FC(Cu) = 2500 \left(\frac{mg}{L} Cu\right)^2$$

Por lo que, en forma de resumen, la forma de calcular el índice para Cobre queda de la siguiente forma:

Intervalo de valores	Ecuación Aplicable	Rango
$(-\infty, 2]$	$FC(Cu) = 101.01 - 25.2525 \left(\frac{mg}{L} Cu\right)^2$	$(-\infty, 0]$
$[2, 0.2]$	$FC(Cu) = 101.01 - 25.2525 \left(\frac{mg}{L} Cu\right)^2$	$[0, 100]$
$[0.2, 0]$	$FC(Cu) = 2500 \left(\frac{mg}{L} Cu\right)^2$	$[100, 0]$

Sodio. Este elemento se eligió porque refleja un importante efecto en el sabor del agua, además, aunque no precisamente representa un riesgo por sí solo el exceso de sodio en agua potable es necesario el control y los límites, ya que esto se suma al consumo en alimentos que ya contienen sodio e incluso a la facilidad con que se puede sobreañadir a cualquier comida. Estas dietas con alto contenido de sodio están asociadas con un mayor riesgo de desarrollar presión sanguínea alta, que es la principal causa de accidentes cerebrovasculares y enfermedad cardiovascular (FDA, 2021). Stoner estableció una ecuación lineal para este parámetro, que desarrollada para el límite de norma y valor ideal es:

$$FC(Na) = 100 - 0.5 \left(\frac{mg}{L} Na\right)$$

Fluoruros. Diversos estudios (Fawell *et al*, 2006; USNRC, 2006; OMS, 2018) establecen claramente que el consumo elevado de fluoruro produce principalmente efectos en los tejidos óseos (huesos y dientes). Las concentraciones bajas proporcionan protección contra la caries dental, tanto en niños como en adultos. Los efectos protectores del fluoruro aumentan con una concentración de hasta aproximadamente 2 mg/L de agua de consumo humano; la concentración mínima de fluoruro en el agua de consumo humano requerida para producirlo es de aproximadamente 0.15 mg/L. La concentración máxima recomendada por la norma mexicana para fluoruro en el agua potable es 1.5 mg/L, sin embargo, una cierta cantidad de flúor en el agua ayuda a prevenir las caries dentales; por lo que Stoner estableció la concentración ideal en una décima parte de la concentración máxima recomendada en lugar de cero, es decir 0.15 mg/L. Stoner recomendó una ecuación

parabólica para reflejar la relación bilateral de las concentraciones de fluoruro. La ecuación determinada para el fluoruro es:

$$FC(F^-) = 101.01 - 44.893 \left(\frac{mg}{L} F^- \right)^2$$

Hierro. El hierro afecta el gusto, mancha la ropa y los accesorios de plomería, y forma depósitos en los sistemas de distribución, estas razones son principalmente estéticas y económicas. El límite recomendado para el hierro es 0.3 mg/L, mientras que el valor ideal será del 10% (OMS, 2018) del límite máximo, es decir 0.03 mg/L en virtud de que el hierro es un elemento esencial en la nutrición humana, particularmente del hierro en su estado de oxidación (II) en donde las necesidades diarias mínimas de este elemento varían en función de la edad, el sexo, el estado físico y la biodisponibilidad del hierro, y oscilan entre 10 y 50 mg/día. Stoner eligió la forma lineal porque era la ecuación más simple que describiría como la utilidad de hierro disminuye a medida que aumenta la concentración. Las ecuaciones determinadas para el hierro son:

Intervalo de valores	Ecuación Aplicable	Rango
$(\infty, 0.3]$	$FC(Fe) = 111.11 - 370.37 \left(\frac{mg}{L} Fe \right)$	$(-\infty, 0]$
$[0.3, 0.03]$	$FC(Fe) = 111.11 - 370.37 \left(\frac{mg}{L} Fe \right)$	$[0, 100]$
$[0.03, 0]$	$FC(Fe) = 3333.33 \left(\frac{mg}{L} Fe \right)$	$[100, 0]$

SAAM. Se eligieron las sustancias activas de azul de metileno (SAAM) debido a su tendencia a producir efectos estéticos indeseables, a producir dispersión de sustancias insolubles o sorbidas, a formar espuma, a interferir con la eliminación de sustancias por los procesos de coagulación, sedimentación y/o filtración. El límite recomendado para las SAAM es 0.5 mg/L, y la concentración ideal es 0.0 mg/L. Stoner seleccionó la forma lineal para representar de forma simple como al aumentar la concentración de las SAAM se añaden efectos no deseables en el agua. La ecuación determinada para las SAAM es:

$$FC(SAAM) = 100 - 200 \left(\frac{mg}{L} SAAM \right)$$

Nitritos. Se seleccionó el nitrito debido a su toxicidad, particularmente porque causa metahemoglobinemia en los lactantes. El nitrito puede reaccionar con compuestos nitrosables (principalmente aminas secundarias) en el cuerpo para formar compuestos N-nitroso; algunos de ellos se consideran carcinógenos para los seres humanos (Health Canada, 2013). El límite recomendado para nitritos es 1.0 mg/L

expresado como N (nitrógeno), y se estableció que la concentración ideal es 0.0 mg/L. La ecuación determinada es:

$$FC(NO_2^-) = 100 - 100 \left(\frac{mg}{L} NO_2^- \right)$$

pH. Se seleccionó el pH porque afecta los procesos de tratamiento de agua y puede contribuir a la corrosión de las líneas de distribución y los accesorios de plomería domésticos. Esta corrosión puede agregar componentes tales como hierro, cobre, plomo, zinc y cadmio al suministro de agua. Los límites recomendados para el pH son 6.5 y 8.5, y por simplicidad, el valor ideal se toma como 7.0. Se eligió la siguiente forma parabólica para representar las variaciones bilaterales del pH:

$$f(x) = aX^2 + bX + c = 0$$

$$x_1 = 6.5, \quad x_2 = 8.5 \quad \text{y} \quad f(7) = 100$$

$$x_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = 6.5$$

$$x_2 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = 8.5$$

$$a(6.5)^2 + b(6.5) + c = 0$$

$$a(8.5)^2 + b(8.5) + c = 0$$

$$a(7)^2 + b(7) + c = 100$$

Resolviendo:

$$a = -133.33, \quad b = 2000, \quad c = -7366.67$$

Finalmente:

$$FC(pH) = -7366.67 + 2000(pH) - 133.33(pH)^2$$

Manganeso. La presencia de este metal en el agua agrega olor, color y sabor a la misma, en altas concentraciones ocasiona cambios en la capacidad de concentración de las personas y puede provocar movimientos involuntarios, al igual que el hierro afecta el gusto, mancha la ropa y los accesorios de plomería, en ciertas condiciones forma depósitos en las tuberías y tanques de almacenamiento (razones

estéticas y económicas). El límite recomendado para el manganeso es 0.15 mg/L, mientras que el valor ideal se propuso del 20% (OMS, 2018) del valor límite de norma, considerando que el manganeso es un elemento esencial para los seres humanos. Se eligió la forma lineal porque era la ecuación más simple que describiría la aptitud del agua para uso doméstico, que disminuye a medida que aumenta la concentración. Las ecuaciones determinadas para el manganeso son:

Intervalo de valores	Ecuación Aplicable	Rango
$(\infty, 0.15]$	$FC(Mn) = 125 - 833.33 \left(\frac{mg}{L} Mn\right)$	$(-\infty, 0]$
$[0.15, 0.03]$	$FC(Mn) = 125 - 833.33 \left(\frac{mg}{L} Mn\right)$	$[0, 100]$
$[0.03, 0]$	$FC(Mn) = 3333.33 \left(\frac{mg}{L} Mn\right)$	$[100, 0]$

Sulfato. La selección del sulfato (SO_4^{-2}) se basó en su sabor y efectos laxantes. El límite recomendado para sulfato es 400 mg/L, y se respetó la recomendación de Stoner que supone que la concentración ideal es 0.0 mg/L. La forma lineal se seleccionó para el caso de este parámetro; dicha ecuación es:

$$FC(SO_4^{-2}) = 100 - 0.25 \left(\frac{mg}{l} SO_4^{-2}\right)$$

Zinc. El zinc se seleccionó debido a su efecto sobre el sabor a concentraciones más altas. El zinc es esencial en el metabolismo humano, y las actividades de la insulina y varias enzimas corporales dependen de él. El límite recomendado para la concentración máxima de zinc en los suministros públicos de agua es de 5.0 mg/L. Ya que el zinc es un oligoelemento esencial, la concentración ideal se establece con el 10% del límite de norma. De acuerdo con Stoner las concentraciones bastante altas pueden tolerarse durante periodos prolongados sin daños, por lo que se decantó por una ecuación lineal. Las ecuaciones determinadas para el zinc son:

Intervalo de valores	Ecuación Aplicable	Rango
$(\infty, 5]$	$FC(Zn) = 111.11 - 22.222 \left(\frac{mg}{L} Zn\right)$	$(-\infty, 0]$
$[5, 0.5]$	$FC(Zn) = 111.11 - 22.222 \left(\frac{mg}{L} Zn\right)$	$[0, 100]$
$[0.5, 0]$	$FC(Zn) = 200 \left(\frac{mg}{L} Zn\right)$	$[100, 0]$

Stoner consideró que los parámetros de la calidad del agua elegidos como propiedades Tipo II no tenían la misma importancia en su contribución al índice de calidad del agua, es por ello que se intentó clasificarlos según el siguiente orden de importancia: toxicidad, peligro para la salud, efecto estético y efecto económico y aunque no fue sencillo determinar un orden de clasificación exacto para las 13

propiedades Tipo II; era razonable separarlos en grupos que pudieran clasificarse y así entonces cada propiedad dentro de un grupo tiene el mismo peso que cualquier otra propiedad en ese mismo grupo. Los grupos se designaron de la “A” a la “E”; el grupo A fue el más significativo, por lo que se asignaron los siguientes valores a los grupos: A=1.00; B=0.667*A; C=0.50*A; D=0.40*A y E=0.33*A. De esta manera, a través del método explicado en los antecedentes de esta investigación se determinaron los factores de ajuste para cada parámetro (Tabla 5.17).

Tabla 5.17 Factor de ajuste para las propiedades Tipo II. Fuente: Stoner, 1978.

Propiedades Tipo II	Grupo	FA
Nitrógeno Amoniacal	A	0.134
Cloruros	C	0.067
Color	E	0.045
Cobre	E	0.045
Sodio	A	0.134
Fluoruros	B	0.089
Hierro	E	0.045
SAAM	D	0.053
Nitrito	A	0.134
pH	B	0.089
Manganeso	D	0.053
Sulfato	C	0.067
Zinc	D	0.053
	Σ=	1.000

Finalmente al multiplicar el FA por la respectiva FC, la ecuación correspondiente para el cálculo del WQI de las propiedades Tipo II se muestra en la Tabla 6.18

Tabla 5.18 Ecuaciones para el cálculo del WQI de cada propiedad Tipo II.

Propiedades Tipo II	WQI
Nitrógeno Amoniacal	$= 13.4 - 26.8 \left(\frac{mg}{L} N - NH_4 \right)$
Cloruros	$= 6.7 - 0.0268 \left(\frac{mg}{L} Cl^- \right)$
Color	$= 4.5 - 0.01125 (U Pt - Co)^2$
Cobre	$= 4.545 - 1.136 \left(\frac{mg}{L} Cu \right)^2$

	$= 112.5 \left(\frac{mg}{L} Cu\right)^2$
Sodio	$= 13.4 - 0.067 \left(\frac{mg}{L} Na\right)$
Fluoruros	$= 8.98989 - 3.996 \left(\frac{mg}{L} F^{-}\right)^2$
Hierro	$= 4.999 - 16.66 \left(\frac{mg}{L} Fe\right)$ $= 149.99 \left(\frac{mg}{L} Fe\right)$
SAAM	$= 5.3 - 10.6 \left(\frac{mg}{L} SAAM\right)$
Nitrito	$= 13.4 - 13.4 \left(\frac{mg}{L} NO_2^{-}\right)$
pH	$= -655.633 + 178(pH) - 11.866(pH)^2$
Manganeso	$= 6.625 - 44.166 \left(\frac{mg}{L} Mn\right)$ $= 176.66 \left(\frac{mg}{L} Mn\right)$
Sulfato	$= 6.7 - 0.01675 \left(\frac{mg}{L} SO_4^{-2}\right)$
Zinc	$= 5.888 - 1.177 \left(\frac{mg}{L} Zn\right)$ $= 10.6 \left(\frac{mg}{L} Zn\right)$

A partir de estas ecuaciones se creó un libro de Excel programando el cálculo del índice de Stoner para cada muestreo diario que fuera satisfactorio en la cantidad de datos necesarios para el cálculo. El índice se calculó para el influente y efluente de las plantas potabilizadoras en las dos épocas del año: estiaje y lluvia, no fue calculado para la PTAR ya que el índice está totalmente enfocado a parámetros de agua de consumo humano.

5.2.3 Cálculo del índice de Stoner para las Plantas Potabilizadoras en temporada de estiaje y lluvia.

El método de cálculo empleado consistió en programar una hoja de cálculo (Tabla 5.19) en la cual se programaron condicionales para los parámetros Tipo I, tal que automáticamente al proporcionar la concentración del parámetro se califique y se obtenga el ICA individual. Para los parámetros Tipo II se programaron las funciones matemáticas obtenidas en la sección 5.2.2 de este escrito en donde al proporcionar

la concentración del parámetro se calcule el valor de ICA individual. Al final se suman todos los ICA individuales para obtener el ICA total para ese muestreo de agua en la fecha específica.

Tabla 5.19 Programación del cálculo del índice de Stoner

		Influyente/Efluente	Estiaje/Lluvia	
			Fecha	
			Concentración en [mg/L] =Ci	índice individual = (ICA)i
P a r á m e t r o s	T I P O 1	Aluminio	[mg/L]	$SI(Ci > VL, -100, 0)$
		Arsénico	[mg/L]	$SI(Ci > VL, -100, 0)$
		Bario	[mg/L]	$SI(Ci > VL, -100, 0)$
		Cadmio	[mg/L]	$SI(Ci > VL, -100, 0)$
		Cromo	[mg/L]	$SI(Ci > VL, -100, 0)$
		Plomo	[mg/L]	$SI(Ci > VL, -100, 0)$
		Selenio	[mg/L]	$SI(Ci > VL, -100, 0)$
		Coliformes Totales (UFC/100 mL)	[UFC/100mL]	$SI(Ci > VL, -100, 0)$
	T I P O 2	Nitrógeno Amoniacal	[mg/L]	FUNCIÓN = $13.4 - (26.8 * Ci)$
		Cloruros	[mg/L]	FUNCIÓN = $6.7 - (0.0268 * Ci)$
		Color	[mg/L]	FUNCIÓN = $4.5 - (0.01125 * Ci^2)$
		Cobre	[mg/L]	FUNCIÓN = $4.5 - 1.125 * (Ci^2)$
		Sodio	[mg/L]	FUNCIÓN = $13.4 - 0.067 * (Ci)$
		Fluoruros	[mg/L]	FUNCIÓN = $8.98989 - 3.996 * (E19^2)$
		Hierro	[mg/L]	FUNCIÓN = $4.5 - 14.999 * (Ci)$
SAAM	[mg/L]	FUNCIÓN = $5.3 - 10.6 * (Ci)$		
Nitrito	[mg/L]	FUNCIÓN = $13.4 - 13.4 * (Ci)$		
pH	[mg/L]	FUNCIÓN = $-655.633 + 178 * (Ci) - 11.866 * (Ci^2)$		
Manganeso	[mg/L]	FUNCIÓN = $5.3 - 35.333 * (Ci)$		
Sulfato	[mg/L]	FUNCIÓN = $6.7 - 0.01675 * (Ci)$		
Zinc	[mg/L]	FUNCIÓN = $4.5 - 0.9 * (Ci)$		
		VL=Valor límite en [mg/L]	ICA total =	SUMA DE TODOS LOS ICAi

5.3 ETAPA 3

5.3.1 Propuesta de indicadores de eficiencia basados en la calidad del agua

En esta etapa se revisó bibliografía referente a los procesos y operaciones unitarias que se recomiendan para la remoción de los contaminantes en el agua que será puesta para tratamiento. Con base en ella se conformó la Tabla 5.20, de tal forma que sirvió como base para plantear las ecuaciones de eficiencias de las operaciones unitarias de las plantas potabilizadoras (en este caso no se consideró la PTAR debido a que no se cuenta con datos de calidad entre operaciones unitarias). Los documentos revisados fueron el libro 24 del *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento* de la CONAGUA, la *NOM-127-SSA1-1994* (vigente al momento de realizar esta investigación), la *NOM-127-SSA1-2021* (publicada en el DOF desde

mayo de 2022), así como las *Guías para la calidad del agua de consumo humano* de la OMS. La Tabla 5.20 se conformó de tal forma que se incluyen únicamente los procesos que existen en las dos potabilizadoras de estudio, por otro lado los parámetros que se mencionan son los que se consideraron viables de cálculo, debido a la disponibilidad de datos.

Tabla 5.20 Tratamientos a los que debe someterse el agua según el contaminante de interés.

Parámetro de calidad	Tratamientos		
	Desinfección con cloro	Tren de Coagulación-Floculación-Sedimentación	Filtración
Bacterias (e. coli, coliformes fecales y organismos termotolerantes)	X^{1,2,3,4}	X^{1,2}	X^{1,2,4}
Turbiedad		X^{1,2,4}	X^{1,2,4}
Sólidos disueltos totales		X¹	X¹
Color verdadero		X¹	X¹
Nitratos		X¹	X¹
Hierro		X²	X^{1,2,4}
Manganeso		X⁴	X^{1,4}
Aluminio		X^{1,3}	X^{1,3}

1 (DOF, 2000). 2 (DOF, 2022). 3 (OMS, 2018). 4 (CONAGUA, 2016)

Se plantearon indicadores de eficiencia de remoción de los contaminantes dependiendo de la operación unitaria que incide sobre el contaminante tal como se expone a continuación.

En forma general se propuso que este indicador se calcule de la siguiente forma:

$$I_{ER} = \frac{C_{ip} - C_{fp}}{C_{ip}} \times 100$$

En donde I_{ER} se refiere al indicador de eficiencia de remoción, C_{ip} es la concentración inicial del parámetro de interés en las unidades correspondientes, C_{fp}

es la concentración final o del efluente de la operación unitaria del parámetro de interés.

Posteriormente, se definió el indicador particular a cada uno de los parámetros que se muestran en la Tabla #.

Color

$$I_{ER-C} = \frac{U_{iPt-Co} - U_{fPt-Co}}{U_{iPt-Co}} \times 100$$

En donde I_{ER-C} está referido al indicador de eficiencia de remoción del parámetro color, U_{iPt-Co} es la medición de color inicial o del influente al proceso de tratamiento en unidades platino-cobalto, U_{fPt-Co} es la medición final o del efluente del tratamiento en unidades platino-cobalto.

Turbiedad

$$I_{ER-T} = \frac{UTN_i - UTN_f}{UTN_i} \times 100$$

En donde I_{ER-T} está referido al indicador de eficiencia de remoción del parámetro turbiedad, UTN_i es la medición de turbiedad inicial o del influente al proceso de tratamiento, UTN_f es la medición final o del efluente del tratamiento.

Hierro

$$I_{ER-Fe} = \frac{[Fe]_i - [Fe]_f}{[Fe]_i} \times 100$$

En donde I_{ER-Fe} está referido al indicador de eficiencia de remoción del parámetro de hierro, Fe_i es la medición de concentración de hierro en el influente del proceso en cuestión, Fe_f es la medición final o del efluente del proceso en cuestión.

Manganeso

$$I_{ER-Mn} = \frac{[Mn]_i - [Mn]_f}{[Mn]_i} \times 100$$

En donde I_{ER-Mn} está referido al indicador de eficiencia de remoción del parámetro de manganeso, Mn_i es la medición de concentración inicial de manganeso en el influente del proceso en cuestión, Mn_f es la medición final o del efluente del proceso en cuestión.

Sólidos Disueltos Totales (SDT)

$$I_{ER-SDT} = \frac{[SDT]_i - [SDT]_f}{[SDT]_i} \times 100$$

En donde I_{ER-SDT} está referido al indicador de eficiencia de remoción del parámetro de SDT; SDT_i es la medición de concentración inicial de SDT en el influente del proceso en cuestión, SDT_f es la medición final en el efluente del proceso en cuestión.

Nitratos (NO_3^-)

$$I_{ER-NO_3^-} = \frac{[NO_3^-]_i - [NO_3^-]_f}{[NO_3^-]_i} \times 100$$

En donde I_{ER-NO_3} está referido al indicador de eficiencia de remoción del parámetro de nitratos; $[NO_3^-]_i$ es la medición de concentración inicial en el influente del proceso en cuestión, $[NO_3^-]_f$ es la medición final en el efluente del proceso en cuestión.

Aluminio

$$I_{ER-Al} = \frac{[Al]_i - [Al]_f}{[Al]_i} \times 100$$

En donde I_{ER-Al} está referido al indicador de eficiencia de remoción del parámetro aluminio; Al_i es la medición de concentración inicial en el influente del proceso en cuestión, Al_f es la medición final en el efluente del proceso en cuestión.

Coliformes fecales

$$I_{ER-CF} = \frac{[CF]_i - [CF]_f}{[CF]_i} \times 100$$

En donde I_{ER-CF} está referido al indicador de eficiencia de remoción del parámetro de coliformes fecales; CF_i es la medición de concentración inicial en el influente del proceso en cuestión, CF_f es la medición final en el efluente del proceso en cuestión.

Coliformes totales

$$I_{ER-CT} = \frac{[CT]_i - [CT]_f}{[CT]_i} \times 100$$

En donde I_{ER-CT} está referido al indicador de eficiencia de remoción del parámetro de coliformes totales; CT_i es la medición de concentración inicial en el influente del proceso en cuestión, CT_f es la medición final en el efluente del proceso en cuestión.

Después de plantear las ecuaciones de cada parámetro de calidad, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones para el cálculo de los indicadores:

1. Se tomaron los datos de calidad histórica disponible para cada parámetro entre cada operación unitaria, por lo que se calculó el promedio de todos los datos disponibles en dos diferentes temporadas: lluvia y estiaje.
2. Se descartaron los datos cuando la concentración del parámetro en el influente de la operación unitaria no rebasaba el límite de la norma, siempre y cuando el efluente se mantuviera por debajo del mismo límite, en caso contrario, y el efluente estuviera por arriba del valor de norma entonces si se tomó en cuenta el dato del influente y se calculó el indicador.
3. No se plantearon indicadores para la PTAR de estudio debido a que no se tuvieron datos de calidad entre operaciones unitarias.

5.3.2 Cálculo de los indicadores para las plantas potabilizadoras

Para calcular las eficiencias entre operaciones unitarias se programó una hoja de cálculo (Tabla 5.21) en donde se colocó la concentración en el influente, entre las operaciones unitarias y en el efluente. Entre cada operación unitaria se calculó la eficiencia de remoción del contaminante en cuestión con el objetivo de analizar la eficiencia promedio de cada operación unitaria dentro de las plantas potabilizadoras y establecer la relación entre que parámetros no son removidos eficientemente y por cuales procesos u operaciones unitarias ocurre esta situación.

Tabla 5.21 Programación del cálculo de eficiencias de remoción de contaminantes

Valor de NOM-127-SSA1-1994 en [mg/L]	5	20	1000	10	1	0.5
Fecha/Parámetros	Turbiedad	Color	SDT	Nitratos	Nitritos	Nitrógeno Amoniacal
Influente	C_i	C_i	C_i	C_i	C_i	C_i
Floculación	C_{-floc}	C_{-floc}	C_{-floc}	C_{-floc}	C_{-floc}	C_{-floc}
Eficiencia	$[C_i - C_{-floc}] / [C_i] \times 100$	%	%	%	%	%
Sedimentación	C_{-sed}	C_{-sed}	C_{-sed}	C_{-sed}	C_{-sed}	C_{-sed}
Eficiencia	$[C_i - C_{-sed}] / [C_i] \times 100$	%	%	%	%	%
Filtración	C_{-filt}	C_{-filt}	C_{-filt}	C_{-filt}	C_{-filt}	C_{-filt}
Efluente	C_f	C_f	C_f	C_f	C_f	C_f
Eficiencia	$[C_{sed} - C_f] / [C_{sed}] \times 100$	%	%	%	%	%

6 Análisis de resultados

Con la etapa 1 se calculó el índice canadiense para diferentes años, según la disponibilidad de datos, considerando el influente y el efluente de las plantas de estudio (2 PP's y una PTAR) y tomando en cuenta dos temporadas por año (lluvia y estiaje), ya que la calidad del influente presenta variaciones considerables e incluso se pudo corroborar que la operación de las plantas también llega a tener variaciones según este aspecto. Con etapa 2, se calculó el índice de Stoner, sin embargo, este se calculó para días específicos en los diferentes años de registro de datos; de igual forma que para el canadiense, se consideró la evaluación del influente y efluente de las plantas, en este caso sólo de las potabilizadoras, ya que el índice de Stoner es específico para el uso de agua de consumo humano. Finalmente para de la etapa 3, se calcularon las eficiencias de remoción de contaminantes que presentan las operaciones unitarias de las plantas potabilizadoras (nuevamente se excluyó la PTAR debido a que no se cuenta con datos de calidad entre operaciones unitarias).

6.1 Índice canadiense en temporada de estiaje y lluvia para la PP1

En la Tabla 6.1 se muestra el resultado del cálculo del índice canadiense para los influentes anuales de la PP1 desde el año 2017 en adelante, según la disponibilidad de datos y para la temporada de estiaje.

Observando el año 2017, se obtuvo un valor de 65 puntos, apenas razonable, esto debido a parámetros de turbiedad aunque principalmente coliformes totales y fecales que exceden la norma en varias de las muestras. En el año 2018, se obtuvo una situación similar, con un valor de 68 puntos debido a que todas las muestras de coliformes totales y fecales superan el límite de norma. Finalmente, para 2019 el influente obtuvo un valor de 50 puntos considerado marginal, debido nuevamente a parámetros como turbiedad, coliformes totales y fecales que exceden la norma.

En los 3 años evaluados se cuenta con un agua influente que se considera con un deterioro constante en la calidad, y por consiguiente en la necesidad de ser tratada para el consumo humano. Se observa que los parámetros más afectados son turbiedad, coliformes totales y fecales, por lo tanto se consideran como los parámetros críticos a analizar en el cálculo del índice del efluente de la PP1.

Tabla 6.1 Resultados del índice canadiense para el influente de la PP1 en temporada de estiaje.			
Influente	Estiaje		
Año	Valor del Índice	Calificación global	No. de parámetros utilizados / Observaciones
2017	65	Razonable	14 parámetros de calidad. Turbiedad presentó una muestra que excede la norma. Coliformes Totales y Fecales exceden la norma en el 75% de las muestras.
2018	68	Razonable	14 parámetros. Coliformes Totales y Fecales exceden la norma en todas las muestras.
2019	50	Marginal	12 parámetros. Turbiedad presentó una muestra que excede la norma. Coliformes Totales y Fecales exceden la norma en el 75% de las muestras.

En la Tabla 6.2, se muestran los resultados para la temporada de lluvia, en donde se cuenta únicamente con algunos datos para el año 2018 y 2019 por lo que se plantea el cálculo y análisis como periodo en conjunto. El valor obtenido es de 56 puntos calificado como marginal, debido a que parámetros como turbiedad, pH, aluminio, hierro, coliformes totales y fecales excedieron la norma.

Tabla 6.2 Resultados del índice canadiense para el influente de la PP1 en temporada de lluvias.			
Influente	Lluvias		
Año	Valor del Índice	Calificación global	No. de parámetros utilizados / Observaciones
2018-2019	56	Marginal	24 parámetros. Una muestra de Turbiedad y de pH excedieron la norma. Una muestra de Aluminio y Hierro excedieron la norma. Coliformes Fecales y Totales exceden la norma en dos muestras.

En comparación, la temporada de estiaje y lluvia tienen en común a los parámetros de turbiedad, coliformes totales y fecales como críticos para el tratamiento del agua en la PP1, en la temporada de lluvia se añaden otros como aluminio, hierro e incluso el pH. En general se puede ver que el influente en la temporada de estiaje es de mejor calidad que en lluvias, razón por la cual la PP1 llega a tener una filosofía de operación diferente según la temporada. Mientras que en temporada de estiaje se opta por excluir las operaciones de floculación y sedimentación, en temporada de lluvia se utilizan todas las operaciones unitarias de la PP1.

En la Tabla 6.3 se muestra el resultado del cálculo del índice canadiense para los efluentes anuales de la PP1 desde el año 2010 en adelante, según la disponibilidad de datos y para la temporada de estiaje.

Para 2010 el resultado obtenido es de 100 puntos, tomando en cuenta los valores de 12 parámetros de calidad de la NOM-127-SSA1-1994, en el cual se encontró que ninguna muestra rebasó el valor límite permisible para esos 12 parámetros de calidad, con lo que cual se califica como un agua “excelente” y por lo tanto plenamente apta para consumo humano. Para 2014, se obtuvo un valor de 63, que califica al agua como “marginal”, es decir que a menudo presenta condiciones no deseables para consumo humano, de hecho la razón principal por la cual se obtuvo esta calificación se debe a que todas las muestras de coliformes totales estuvieron por arriba de la norma, probablemente debido a inconvenientes en el sistema de desinfección de la planta.

Para 2015 la calificación mejoró, ubicándose en un valor de 90, siendo un agua “buena”, con la reserva de que algunas muestras de coliformes totales superaron el límite permisible. Para los años 2016 y 2019, se presentó el mismo caso en donde coliformes totales y fecales tuvieron algunas muestras que rebasaron el límite de norma. En 2017 y 2019 algunas muestras de turbiedad fueron causantes de que el índice estuviera por debajo del ideal de 100 puntos. En forma global sólo 4 de 8 años evaluados alcanzaron la calificación de excelente, presentando como problema principal la presencia de coliformes y en los últimos años (2017 y 2019) la turbiedad por encima del valor límite. Esta situación permite identificar los aspectos más relevantes en los cuales la planta presenta inconvenientes para cumplir eficazmente el tratamiento. Por un lado, respecto a la pre-oxidación que se lleva a cabo en el canal Parshall, esta pudiera ser insuficiente en la dosis suministrada de hipoclorito de sodio. En cuanto al problema de turbidez, se pueden manejar diferentes factores; desde un deficiente suministro de coagulante en cuanto a la dosis actual, recordando también que el suministro del compuesto depende mucho del criterio del operador para ver si el agua es “poco o muy turbia”, e incluso que el tren de tratamiento encargado de reducir la turbidez presente mal funcionamiento. Para el caso de esta planta, en donde se aprovecha el canal Parshall como unidad de mezcla rápida para dispersar coagulante y otros reactivos como hipoclorito de sodio, es importante mencionar que una secuencia apropiada de aplicación de éstos produciría mejores eficiencias en el tratamiento (Martín, 1998); por ejemplo, todos los productos químicos que alteran el pH (como el hipoclorito de sodio) se recomienda aplicarlos antes de la adición del sulfato de aluminio, a una distancia que asegure una completa disolución y mezcla, debido a que el proceso de coagulación puede mejorarse si se sabe previamente el pH del agua (que se espera más o menos constante en el tiempo); desafortunadamente en la PP1 ocurre la adición conjunta de hipoclorito de sodio y sulfato de aluminio.

Tabla 6.3 Resultados del índice canadiense para el efluente de la PP1 en temporada de estiaje.			
Efluente	Estiaje		
Año	Valor del Índice	Calificación global	No. de parámetros utilizados / Observaciones
2010	100	Excelente	12 parámetros de calidad. Todas las muestras por debajo del límite de la norma.
2013	95	Excelente	14 parámetros. Coliformes Totales presentó valor por arriba de la norma en una muestra.
2014	63	Marginal	12 parámetros. Coliformes totales presenta para todas las muestras valores por arriba del límite. Una muestra de Coliformes Fecales por arriba de la norma.
2015	90	Bueno	8 parámetros. Algunas muestras de Coliformes Totales superaron el límite recomendable.
2016	65	Razonable	15 parámetros. Una muestra de Coliformes Totales rebasa por hasta dos órdenes de magnitud el valor de norma y una muestra de Coliformes Fecales rebasa la norma.
2017	96	Excelente	14 parámetros. Una muestra de turbiedad rebasó el límite de norma.
2018	100	Excelente	15 parámetros. Ninguna muestra rebasó el límite.
2019	58	Marginal	12 parámetros. Una muestra de turbiedad rebasó el límite. 2 muestras para Coliformes totales y Fecales rebasaron el límite.

Otra forma de mostrar estos resultados como una propuesta más práctica se presenta en los siguientes gráficos, el primero (Figura 6.1), tipo radial que permite ver rápidamente los años en los cuales el índice está por valores buenos a excelentes, que sería lo deseable y por otro lado mostrar los años en que la calidad efluente presentó alto deterioro. Se observa que, los años 2014, 2016 y 2019 se alejan más del vértice exterior, por lo cual son años de interés en la evaluación de la planta.

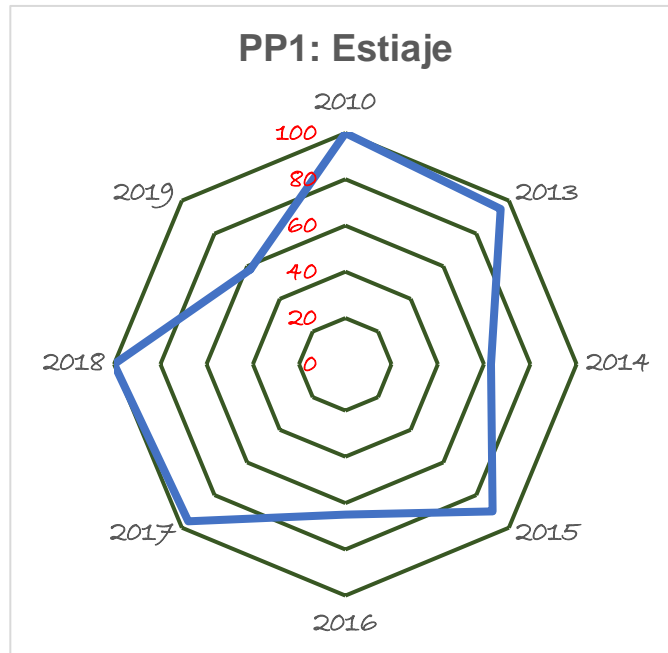


Figura 6.1 Gráfica radial que muestra el índice canadiense en diferentes años para el efluente de la planta potabilizadora 1 en temporada de estiaje.

Como segunda propuesta se muestra la gráfica circular (Figura 6.2), para identificar en tanto por ciento y según la calificación del índice canadiense la calidad del agua en todos los años evaluados. Para este caso, se observa que el 50% de los años 2010 a 2019 (exceptuando 2011, 2012), obtuvo una calificación de excelente, mientras que un 25% se encontró como marginal y se identifica como de mayor interés para la evaluación de la operación de la planta.

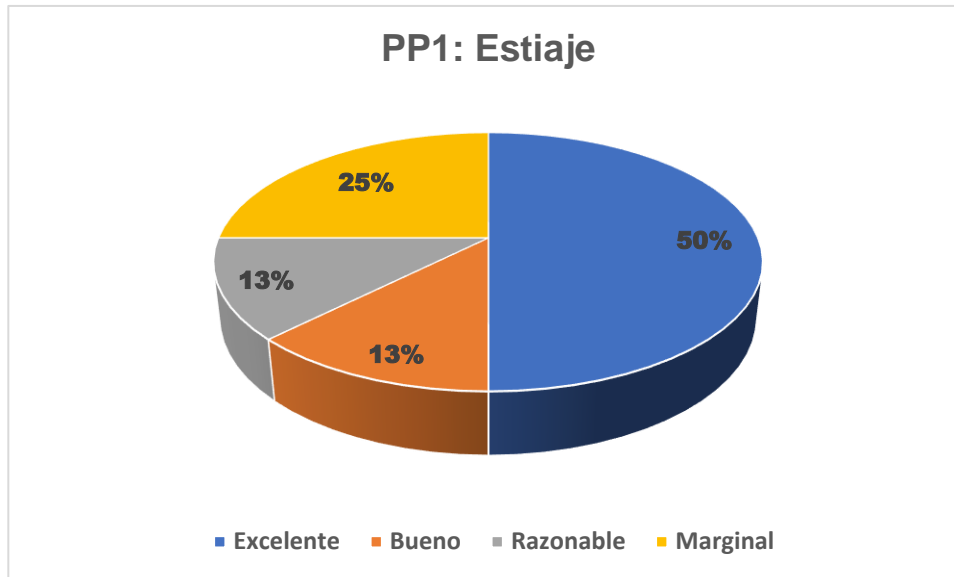


Figura 6.2 Gráfica circular que distribuye el porcentaje de calificaciones obtenidas para el efluente de la PP1 en temporada de estiaje.

Con respecto a la Tabla 6.4 en donde se muestran los resultados del índice para la temporada de lluvias, a diferencia de la temporada de estiaje, la cantidad de datos por año es considerablemente menor y por lo tanto es que se pudo calcular únicamente para dos años. El valor del índice para 2015 fue de 84 puntos, calificado como agua con un grado bajo de deterioro, esto debido a que una muestra de turbiedad y color presentaron valor arriba del límite. Además para coliformes totales se presentó el caso de que todas las muestras estuvieron por arriba del límite, a pesar de ello el valor el índice no fue tan perjudicado, y esto se debe a que en el cálculo del índice canadiense toma relevancia la magnitud del valor del parámetro, es decir que no será lo mismo rebasar el límite de norma por 10 veces su valor que por una vez (lo que significa el tercer factor que toma en cuenta el índice canadiense conocido como F_3 : amplitud)

Para el periodo 2018-2019, se obtuvo una calificación de 97, como agua excelente y apta para el consumo humano a pesar de que dos muestras de turbiedad rebasaron la norma.

A pesar de que son únicamente dos años de evaluación, la constante en esta temporada de lluvias se presentó para el parámetro de la turbidez, por lo cual nuevamente tiene importancia la situación operativa en la cual se determina añadir o no el coagulante para el proceso de coagulación-floculación-sedimentación de forma empírica para los operadores, adicionalmente se infiere que no hay estudios de optimización del proceso por que no se miden parámetros en campo de manera regular, además se añade en el mismo punto hipoclorito de sodio y sulfato de

aluminio, cuando el proceso de coagulación es afectado por el pH (parámetro que se modifica con el hipoclorito).

Tabla 6.4 Resultados del índice canadiense para el efluente de la PP1 en temporada de lluvias.

Efluente		Lluvias	
Año	Valor del Índice	Calificación global	No. de parámetros utilizados / Observaciones
2015	84	Bueno	14 parámetros. Una muestra de turbiedad y color presentaron valores arriba del límite. Todas las muestras de coliformes totales estuvieron por arriba de la norma.
2018-2019	97	Excelente	23 parámetros. Dos muestras de turbiedad rebasaron la norma.

Tomando en cuenta las dos temporadas (estiaje y lluvias) lo que se puede ver es lo siguiente; la constante para el caso de estiaje en donde el valor del índice es menor que una calificación excelente (<95) fue debida al parámetro de coliformes totales e incluso de fecales en algunos casos, por el contrario para lluvias la turbiedad provocó que el valor del índice fuera menor de 100, por lo que se puede establecer la necesidad de revisar la forma de operación según la temporada del año, enfocándose en el proceso de preoxidación en la temporada de estiaje, revisando la dosificación empleada (debido a problemas de sub o sobredosificación) mientras que para la temporada de lluvias es necesario considerar que el arrastre de las lluvias hacia el influente de la planta es un factor a considerar, y que no puede pasar desapercibido al momento de la aplicación del coagulante, ya que podría estarse considerando el mismo criterio de aplicación de forma permanente y por ende que la turbiedad no se vea reducida lo suficiente como para estar por debajo del límite permisible.

Por otro lado al comparar el resultado del efluente contra el influente (Figura 6.3), se observa que en los años 2017-18-19, el efluente de la PP1 es de mejor calidad que al ingreso en el planta, por lo que se establece la importancia del tratamiento que se lleva a cabo. En general el agua influente se ubica en calificación marginal y en 2 de 3 años se alcanzó la calificación por lo menos buena para el efluente, excepto en el año 2019, en el que, aunque el valor del índice es mayor que el influente, la calificación se mantuvo como marginal, es decir que prácticamente la planta potabilizadora no influyó en mejorar la calidad del agua.

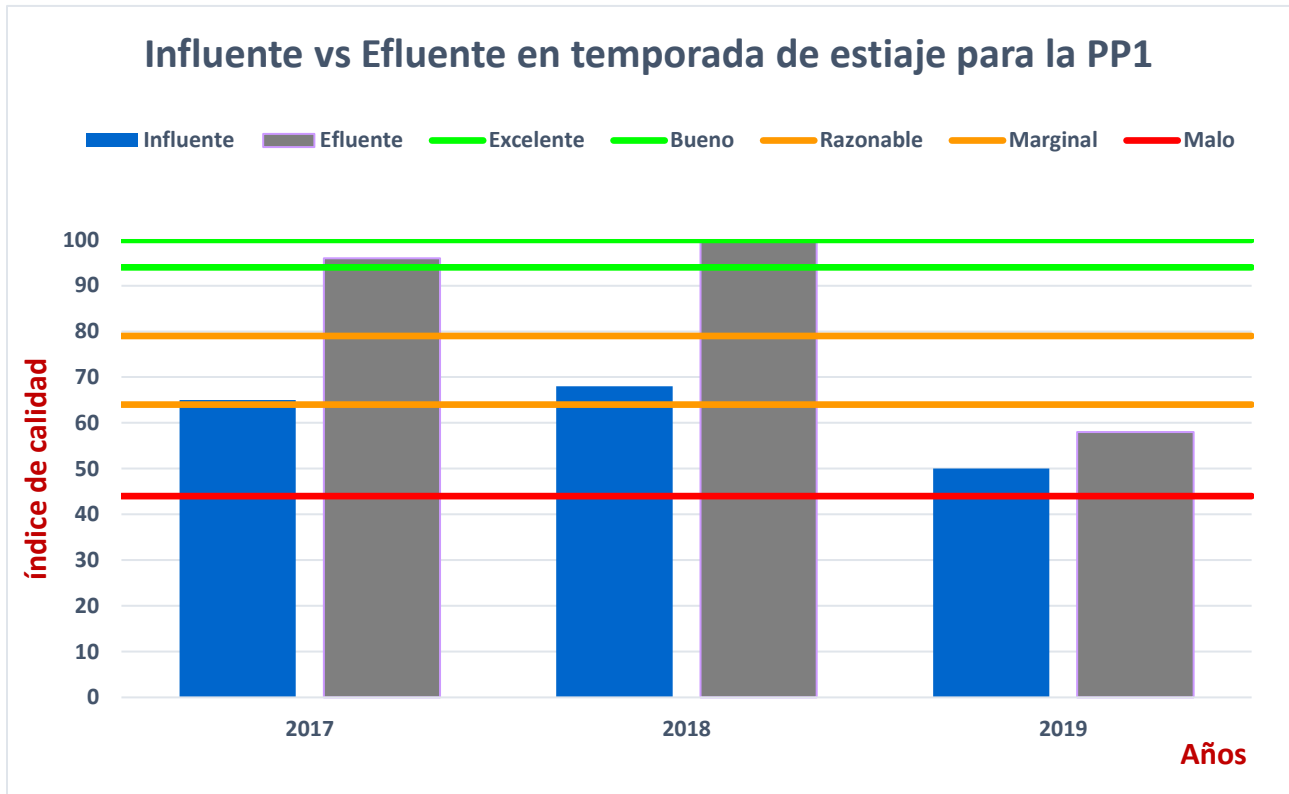


Figura 6.3 Gráfica de barras para el influente y efluente en temporada de estiaje de la PP1.

En la Figura 6.4, se compara el resultado del influente del periodo 2018-19, contra el efluente del mismo año en la temporada de lluvia, en lo cual se observa que el influente por su parte ingresó como marginal mientras el efluente alcanzó la calificación de excelente, teniendo un gran impacto en este periodo el tratamiento aplicado por la PP1 recordando que la filosofía de operación puede cambiar respecto a la temporada de estiaje, sin embargo resultó en este periodo eficaz para alcanzar por lo menos los 95 puntos mínimo para un calidad excelente.

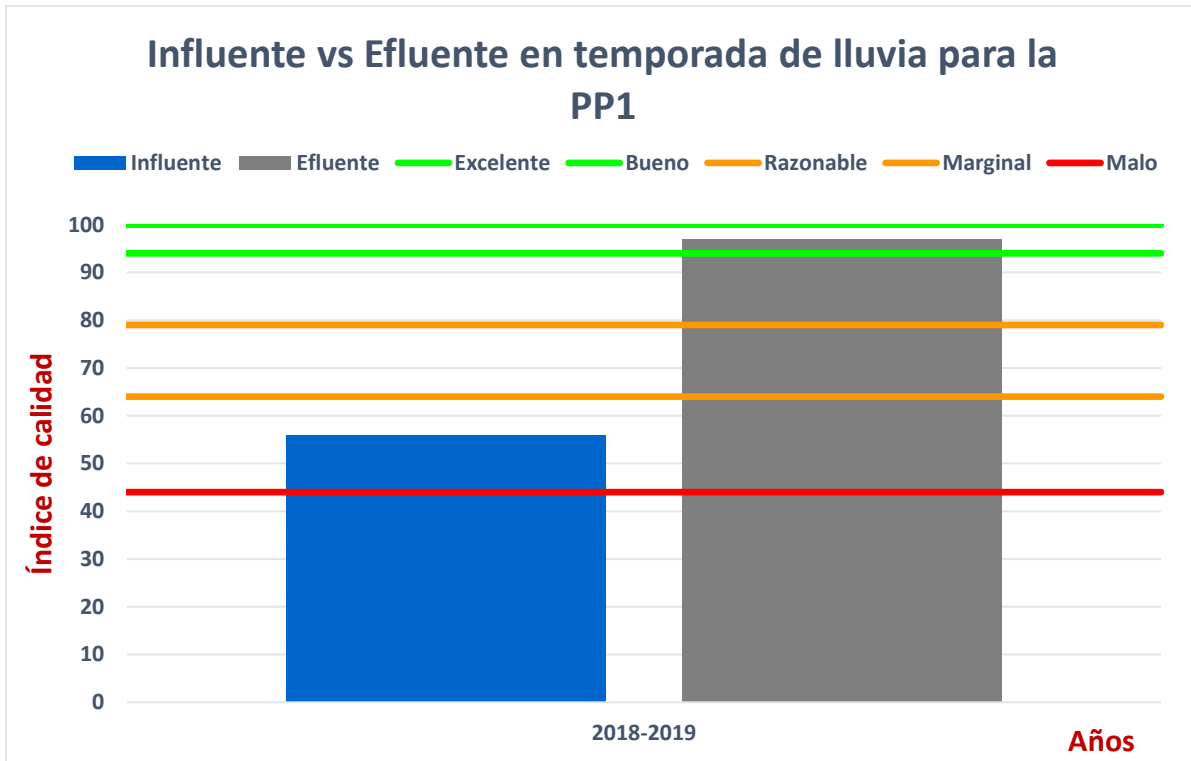


Figura 6.4 Gráfica de barras para el influente y efluente en temporada de lluvia de la PP1.

Finalmente, se elaboró una tabla resumen del resultado de índice canadiense para la PP1, en donde se propone un semáforo informativo (Figura 6.5) según el valor del índice obtenido:















Valor de índice	Símbolo
0-44	↓
45-64	↘
65-79	↗
80-100	↑

Figura 6.5 Semáforo informativo según el valor del índice obtenido.

En donde la interpretación de la tabla anterior consiste en que si el valor obtenido esta entre 0 y 44 se califica con color rojo y una flecha completamente hacia abajo indicando que la calidad del agua es muy mala, si se está dentro de 45 a 64 la flecha adquiere un color amarillo, pero con una inclinación hacia abajo indicando que la calidad es mala, si se está dentro de 65 a 79 la flecha permanece en color amarillo pero la inclinación ya es hacia arriba indicando una calidad regular, y finalmente si el valor está dentro de 80 a 100, la flecha es color verde y apuntando completamente hacia arriba indicando una calidad de buena a excelente.

En la tabla resumen de la PP1 se observa que la calidad influente tanto en estiaje como lluvias va de regular a mala, mientras que el efluente en temporada de estiaje presenta diferentes situaciones, puntualmente en 2014, 2016 y 2019 que va de regular a mala, mientras que en temporada de lluvia se presenta una calidad de buena a excelente.

Tabla 6.5 Resultado del semáforo informativo del índice canadiense para la PP1

Planta Potabilizadora 1			
Influente			
Estiaje		Lluvias	
Año	Índice	Año	Índice
2017	 65	2018-19	 56
2018	 68		
2019	 50		
Efluente			
Año	Índice	Año	Índice
2010	 100	2015	 84
2013	 95	2018-19	 97
2014	 63		
2015	 90		
2016	 65		
2017	 96		
2018	 100		
2019	 58		

6.2 Índice canadiense en temporada de estiaje y lluvia para la PP2

En la Tabla 6.6 se observa que los influentes de los años evaluados sólo alcanzaron el valor marginal; deterioro en la calidad asociado en 2018 a parámetros como la turbiedad, coliformes totales y fecales, para el año 2019 se debió a parámetros de pH, nitrógeno amoniacal, coliformes totales y fecales. Otro aspecto importante es el deterioro a que es sometida el agua del río Magdalena conforme su cauce se adentra en zonas de mayor actividad antropogénica, ya que en comparación de los influentes de la PP1 respecto a la PP2 estos disminuyen de 61 puntos promedio a 51 puntos promedio.

Influente		Estiaje	
Año	Valor del Índice	Calificación global	No. de parámetros utilizados / Observaciones
2018	51	Marginal	24 parámetros. Turbiedad excede la norma en una muestra. Todas las muestras de Coliformes Totales y Fecales exceden la norma.
2019	51	Marginal	12 parámetros. Una muestra de pH excede la norma. Una muestra de Nitrógeno amoniacal excede la norma. Dos muestras de Coliformes Totales y Fecales exceden la norma.

En la Tabla 6.7 se observa el periodo 2018-19 únicamente, debido a falta de datos para años anteriores. El valor del índice se ubica con 44 puntos en el nivel más bajo posible según la clasificación del índice canadiense: pobre, debido a que los siguientes parámetros exceden la norma; turbiedad y con mayor relevancia coliformes totales y fecales ya que todas sus muestras analizadas exceden la norma.

Efluente		Lluvias	
Año	Valor del Índice	Calificación global	No. de parámetros utilizados / Observaciones
2018-2019	44	Pobre	11 parámetros. Una muestra de turbiedad excede la norma. Todas las muestras de Coliformes Totales y Fecales exceden la norma.

En la Tabla 6.8 se muestra el resultado del cálculo del índice canadiense para los efluentes anuales de la PP2 desde 2015 en adelante, según la disponibilidad de datos y para la temporada de estiaje.

En 2015 el resultado obtenido es de 92 puntos, debido a que 3 muestras de coliformes totales rebasaron la norma, sin embargo para 2016 y 2018 se obtuvo un

valor excelente con 100 puntos, en donde ninguna muestra rebasó el límite de norma. Nuevamente para 2019 se obtiene una calificación “buena” en donde sólo una muestra de coliformes fecales y una de coliformes totales rebasaron la norma.

En estos 4 años, el único inconveniente que además no impactó a tal grado de marginar significativamente el índice del agua del efluente fue la presencia en algunas muestras de coliformes de ambas clases, por lo que se pudieron presentar problemas en la dosificación de hipoclorito de sodio, incluso, de la entrevista con operadores e ingeniería de planta, se sabe que hay ocasiones en que no hay insumos de hipoclorito de sodio, por lo que también esto juega un papel que incide directamente en sobre la calidad del agua.

Tabla 6.8 Resultados del índice canadiense para el efluente de la PP2 en temporada de estiaje.			
Efluente	Estiaje		
Año	Valor del Índice	Calificación global	No. de parámetros utilizados / Observaciones
2015	92	Bueno	10 parámetros. 3 muestras de coliformes totales estuvieron por arriba de la norma.
2016	100	Excelente	11 parámetros. Todas las muestras están por debajo del valor de norma.
2018	100	Excelente	24 parámetros. Todas las muestras se encuentran en valores por debajo de la norma.
2019	90	Bueno	12 parámetros. Una muestra para coliformes fecales y una para totales rebasaron la norma.

En la Tabla 6.9 se muestran los resultados en temporada de lluvias, y se manejan dos periodos bianuales, 2016-17, 2018-19, esto debido a la falta de datos para cada año conforme a lo solicitado por el índice canadiense (4 muestras por parámetro y 4 parámetros), por lo cual se optó por juntar esos dos años tal que fuera suficiente para el cálculo del índice. En el periodo 2016-17, se obtuvo un valor de 100 puntos, siendo que todas las muestras tuvieron valores por debajo de la norma. Para 2018-19 se presentaron algunas muestras para los parámetros de turbiedad, coliformes fecales, coliformes totales y metales como aluminio y hierro que rebasaron la norma, es por ello que el valor bajó a 87 puntos. Otro aspecto importante con el índice canadiense es el número de muestras e incluso de parámetros de calidad evaluados; para el caso de este periodo se tomaron en cuenta 24 parámetros y cada uno con al menos 4 muestras, que es la cantidad más alta de todos los cálculos realizados en esta investigación, e incluso representa a la mitad de parámetros que solicita la NOM-127-SSA1-1994; esta situación robustece el valor e interpretación del índice obtenido por que a pesar de tener algunas muestras de diferentes parámetros por arriba del límite, el valor final evidentemente ya no puede alcanzar una calificación excelente pero se ajusta mejor por el gran número de datos considerados.

Tabla 6.9 Resultados del índice canadiense para el efluente de la PP2 en temporada de lluvias.			
Efluente	Lluvias		
Año	Valor del Índice	Calificación global	No. de parámetros utilizados / Observaciones
2016-2017	100	Excelente	13 parámetros. Todas las muestras se encuentran por arriba de la norma.
2018-2019	87	Bueno	24 parámetros. Una muestra de turbiedad rebasó el límite de la norma. La misma muestra presentó un valor arriba del límite para aluminio y hierro. Otra muestra rebasó el límite en coliformes fecales y totales.

Para el caso de las temporadas de estiaje y lluvia, se presentó un caso similar a la PP1, en donde para estiaje se presentaron algunas muestras de coliformes que rebasaron la norma, mientras que en lluvias, el parámetro de turbiedad fue quien rebasó la norma. Sin embargo las razones son totalmente diferentes, ya que la PP2 considera el proceso de desinfección como el último tratamiento que se le da al agua (en la PP1 es una de las operaciones iniciales) a pesar de ello existen inconvenientes para tratar el parámetro de coliformes, por lo que se recomienda que para estiaje se revisen los siguientes aspectos: naturaleza del desinfectante, concentración del desinfectante, tiempo de contacto del desinfectante con el agua, pH del agua entre algunas otras características fisicoquímicas de la misma (Martín, 1998). Cabe mencionar que en la PP2 no existen procesos de dosificación de coagulantes o floculantes y mucho menos existen las operaciones unitarias para ello, por lo que disminuir la turbiedad del agua depende totalmente del proceso de filtración que se lleva a cabo ahí, por lo que se recomienda verificar el cumplimiento del proceso tal que se consiga el objetivo de norma (turbiedad < 5 UNT).

En la gráfica de la Figura 6.6 se muestra el comparativo en temporada de estiaje, de los influentes contra efluentes; se observa que para ambos casos los efluentes se califican por lo menos “buenos” (> 80 puntos), siendo que los influentes ingresaron con calificación marginal (< 64 puntos).

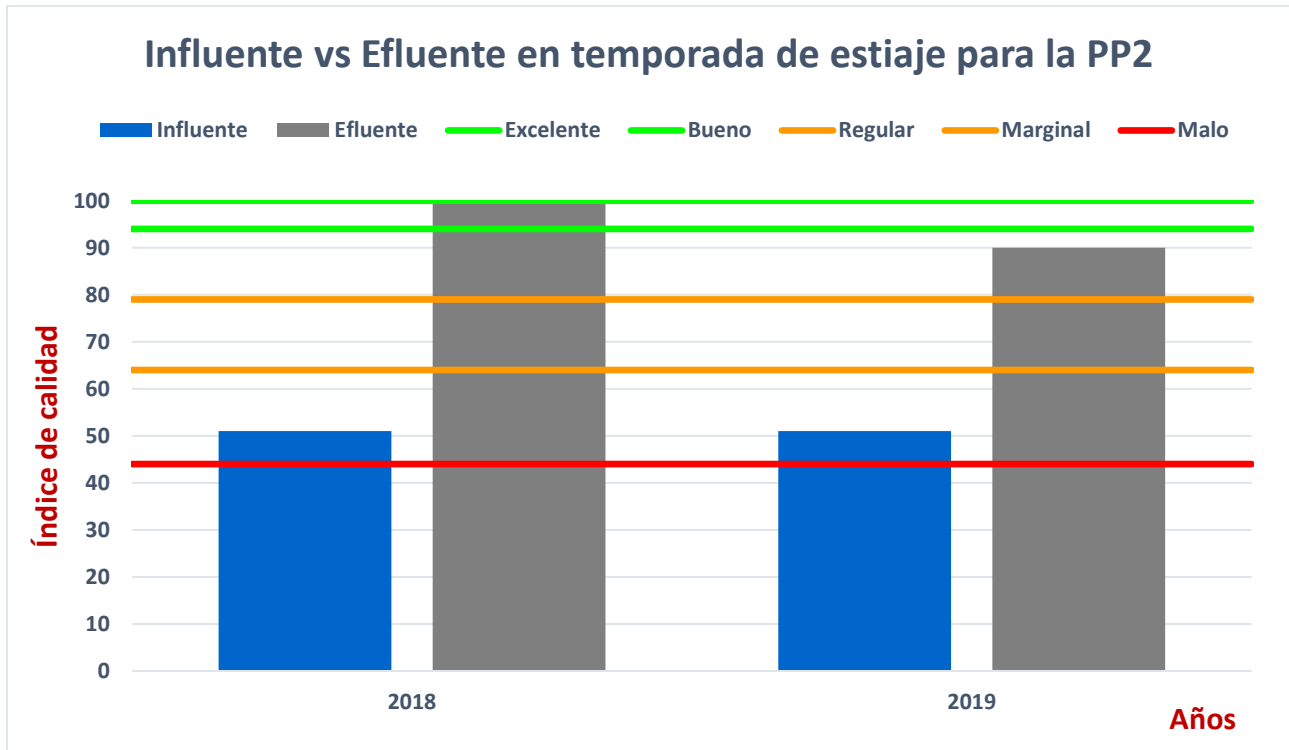


Figura 6.6 Gráfica de barras para el influente y efluente en temporada de estiaje de la PP2.

En la Gráfica de la Figura 6.7 se observa que por lo menos el efluente alcanzó la calificación de “bueno” (> 80 puntos) a pesar de que el influente ingresó con la calificación más baja posible denominada como “mala” (< 44 puntos).

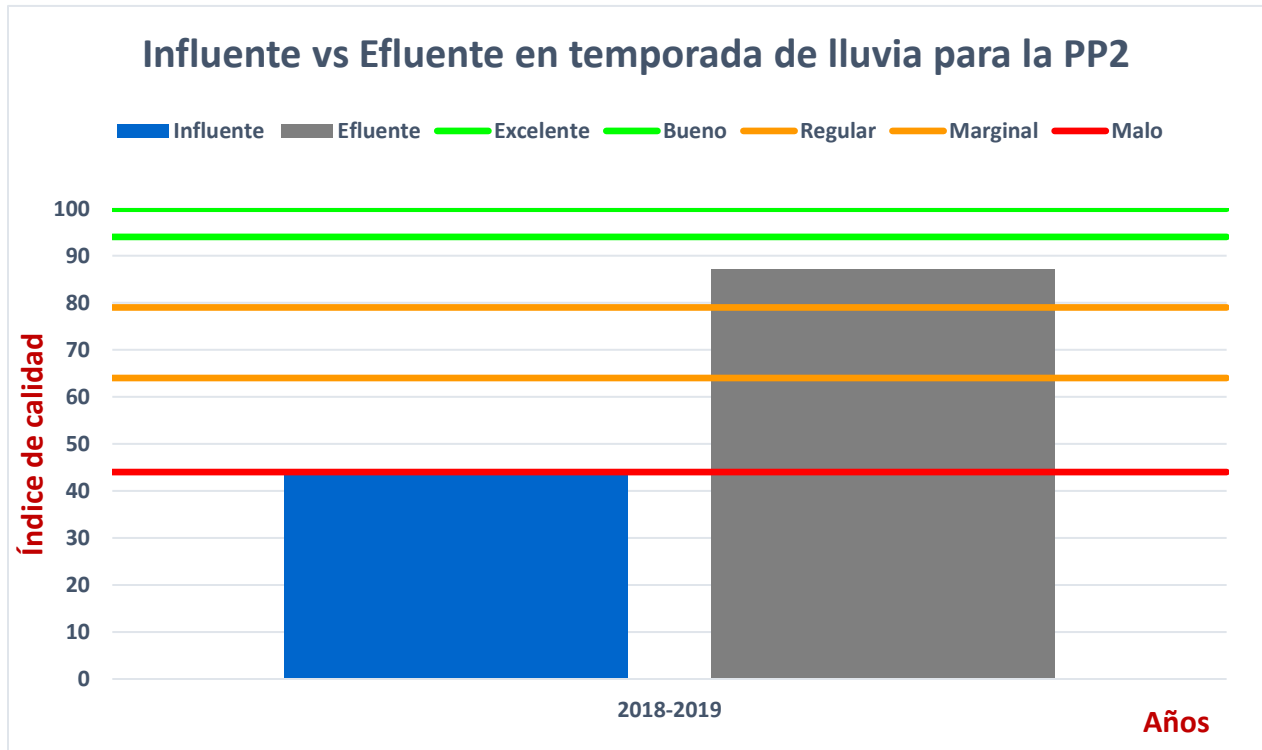


Figura 6.7 Gráfica de barras para el influente y efluente en temporada de lluvias de la PP2.

La tabla resumen de la planta potabilizadora 2 se muestra a continuación; en esta se observa que la calidad del influente en estiaje y lluvias va de mala (< 64 puntos) a muy mala (< 44 puntos) mientras que para el efluente en estiaje se mantiene mayormente excelente (> 95 puntos) y en lluvias va de buena a excelente (>80 puntos).

Tabla 6.10 Resultado del semáforo informativo del índice canadiense para la PP2

Planta Potabilizadora 2			
Influente			
Estiaje		Lluvias	
Año	Índice	Año	Índice
2018	👉 51	2018-19	👎 44
2019	👉 51		
Efluente			
Año	Índice	Año	Índice
2015	👈 92	2016-17	👈 100
2016	👈 100	2018-19	👈 87
2018	👈 100		
2019	👈 90		

6.3 Índice canadiense en temporada de estiaje y lluvia para la PTAR.

En la Tabla 6.11, se muestran los resultados para el influente de la PTAR, en los cuales se observa dos parámetros de calidad recurrente en todos los años evaluados, por un lado los sólidos sedimentables y además DBO₅ en donde este último fue un parámetro en donde todas las muestras analizadas exceden el límite normativo. Además en el año 2015 y 2018-19, también se identifica el parámetro de grasas y aceites y para 2017 y 2018-19 se incluye el de nitrógeno total excediendo la norma.

Debido a lo anterior las calificaciones obtenidas para los influentes se encuentran 75% como marginal y 25% razonable, siendo el periodo 2018-19 con el índice más bajo con 47 puntos. Adicionalmente, los resultados de los índices a lo largo de los años (2014-2019) muestra cómo la calidad del agua se deterioró en 2014 de 77 puntos a 2019 con 47, una reducción de 30 puntos en 5 años, en donde se añaden los parámetros de grasas/aceites y nitrógeno total. Esto se puede asociar en cierta parte al crecimiento poblacional de la zona, ya que en 2015 según la encuesta intercensal del INEGI se reportó 243, 886 personas y para 2020 se reportó 247, 622 personas, un incremento de más de 3, 500 habitantes.

Tabla 6.11 Resultados del índice canadiense para el influente de la PTAR en temporada de estiaje.

Influyente		Estiaje	
Año	Valor del Índice	Calificación global	No. de parámetros utilizados / Observaciones
2014	77	Razonable	12 parámetros. 3 muestra de SST presentaron valor arriba de la norma. Todas las muestras de DBO ₅ exceden la norma.
2015	56	Marginal	13 parámetros. 3 muestras de grasas y aceites exceden la norma. Dos muestras de sólidos sedimentables exceden. Todas las muestras de SST y DBO ₅ exceden la norma.
2017	61	Marginal	13 parámetros. Dos muestras de nitrógeno total exceden la norma. Dos muestras de SS exceden la norma. Todas las muestras de SST y DBO ₅ exceden la norma.
2018-2019	47	Marginal	11 parámetros. Una muestra Nitrógeno total excede la norma. Todas las muestras de Grasas y Aceites, SST y DBO ₅ exceden la norma. Dos muestras de SS exceden la norma.

En la Tabla 6.12 se muestran los resultados para la temporada de lluvias, en donde nuevamente el parámetro de DBO₅ se presenta de forma constante para todos los años, así como sólidos sedimentables, grasas y aceites para los años 2015, 2016, 2018-19. En esta temporada las calificaciones se ubican en el 50% como marginal y se alcanza incluso una calificación “buena” en 2014.

Otro aspecto para destacar en las dos temporadas es que al avanzar en los años, es decir de 2014 al periodo 2018-19 se nota un decremento en la calidad del agua influente (mismo caso que en temporada de estiaje) debido previsiblemente al aumento descontrolado de actividades antropogénicas cercanas al río Magdalena y también por aumento de población en la alcaldía.

Tabla 6.12 Resultados del índice canadiense para el influente de la PTAR en temporada de lluvias.

Influyente		Lluvias	
Año	Valor del Índice	Calificación global	No. de parámetros utilizados / Observaciones
2014	84	Buena	12 parámetros. Una muestra de mercurio rebasó la norma. 3 muestras de DBO ₅ exceden la norma.
2015	72	Razonable	13 parámetros. Una muestra de Grasas y aceites excede la norma. Todas las muestras de SST y DBO ₅ exceden la norma.
2016	56	Marginal	11 parámetros. 2 muestras de GyA y SS exceden la norma. El 85% de muestras de SST y DBO ₅ exceden la norma.
2018-2019	49	Marginal	12 parámetros. Todas las muestras de nitrógeno total exceden la norma. Todas las muestras de

		SST y DBO ₅ exceden la norma. 5 muestras de GyA exceden la norma y el 50% de muestras de SS exceden la norma.
--	--	--

En la Tabla 6.13 se muestran los resultados para el caso del efluente de la PTAR en temporada de estiaje comenzando desde 2014, en donde se obtuvo un resultado de 91 puntos evaluando 12 parámetros de 14 considerando como referencia la NOM-003-SEMARNAT-1997. El valor más bajo del índice se obtuvo para el año 2017, con 84 puntos derivado de dos muestras, una de SS y otra de SST que rebasaron la norma. El parámetro SST rebasó en una muestra para todos los años analizados, lo que refiere un inconveniente en la PTAR para removerlos o disminuir su concentración lo suficiente. De acuerdo con la referencia *Wastewater Treatment Plants: Planning, Design, and Operation* (Qasim, 1998) los sólidos suspendidos totales son removidos con una eficiencia entre el 80-90% por el sistema de lodos activados con el respectivo sedimentador secundario, y ya que la PTAR de estudio tiene ese sistema, se puede ver que hay un problema operativo que pudiera ser multifactorial, desde el tiempo de retención hidráulico, la cantidad de purga que se manda desde el sedimentador secundario o el mismo tiempo que tarda en recircularse al reactor de lodos activados.

Tabla 6.13 Resultados del índice canadiense para el efluente de la PTAR en temporada de estiaje.

Efluente		Estiaje	
Año	Valor del Índice	Calificación global	No. de parámetros utilizados / Observaciones
2014	91	Bueno	12 parámetros. Una muestra de SST presentó un valor arriba de la norma por hasta un orden de magnitud.
2015	95	Excelente	13 parámetros. Una muestra de SST presentó un valor superior a la norma.
2017	84	Bueno	13 parámetros. Una muestra de sólidos sedimentables y una de SST presentó un valor superior a la norma.
2018-2019	90	Bueno	6 parámetros. Una muestra de SST rebasó la norma.

Con respecto a la Tabla 6.14 en donde se presentan los resultados para la temporada de lluvias, en 2014 se obtuvo un valor de 89 puntos, siendo una calificación buena para el agua tratada, sin embargo este valor se obtiene debido a que una muestra de mercurio rebasó el límite de la norma (muy probablemente se trata de un caso aislado ya que en ninguna otra muestra de registro histórico ocurrió) En el 2015 al encontrarse todas las muestras por debajo del límite de norma, se obtuvo una puntuación de 100. Para el año 2016 y el periodo 2018-19, uno de los

parámetros que influenció no obtener una calificación de 100, fue la muestra de SST que rebasó la norma.

Tabla 6.14 Resultados del índice canadiense para el efluente de la PTAR en temporada de lluvias.

Efluente		Lluvias	
Año	Valor del Índice	Calificación global	No. de parámetros utilizados / Observaciones
2014	89	Bueno	12 parámetros. Una muestra de mercurio rebasó la norma.
2015	100	Excelente	13 parámetros. Todas las muestras estan por debajo de la norma.
2016	89	Bueno	11 parámetros. 3 muestras para SST rebasaron la norma. 1 muestra de DBO ₅ rebasó la norma.
2018-2019	95	Excelente	13 parámetros. 1 muestra de SST rebasó la norma.

Comparando las temporadas de lluvia y estiaje, aparentemente los valores de los índices se mantienen muy similares, calificando el agua efluente como buena y en algún caso excelente, sin embargo, se puede ver que al para estiaje el parámetro de los SST se hace más presente que para lluvias, por lo que resulta imperativo la revisión de la operación del sistema de lodos activados y sedimentación en estiaje.

En la siguiente tabla se muestra el resumen del índice con el semáforo propuesto; en esta se observa que para la temporada de estiaje la calidad influente va de mala a regular, sin embargo en lluvias se presentaron índices buenos, regulares pero principalmente malos. Por otro lado para el efluente, en general en ambas temporadas se observan valores de buenos a excelentes con el total de flechas en color verde (>80 puntos).

Tabla 6.15 Resultado del semáforo informativo del índice canadiense para la PTAR.

PTAR "Rio Magdalena"			
Influente			
Estiaje		Lluvias	
Año	Índice	Año	Índice
2014	77	2014	84
2015	56	2015	72
2017	61	2016	56
2018-19	47	2018-19	49
Efluente			
Año	Índice	Año	Índice
2014	91	2014	89
2015	95	2015	100
2017	84	2016	89
2018-19	90	2018-19	95

6.4 Índice de Stoner en temporada de estiaje y lluvia para la PP1

De acuerdo con la metodología de Stoner, el cálculo del índice se realiza para cada muestreo de forma independiente, en este caso ya que los datos disponibles son de muestreos de fechas específicas, se obtuvo el resultado del índice para cada día en que se contara con datos para todos los parámetros de calidad. Se observa en la Tabla 6.16 el índice de Stoner del influente en la PP1 para algunas fechas (2018-2019) de la temporada de estiaje; en las 3 fechas mostradas se observa que el parámetro de coliformes totales excede la norma y por lo tanto se asigna un valor de -100, con lo cual el índice global (suma de todos los índices de cada parámetro) resulta con valor negativo (recordando que, cuando un parámetro tipo 1 excede la norma automáticamente se asigna un valor de -100 puntos) para las 3 fechas, con valores entre -13.00 y -15.00 puntos, asignado esto como agua no apta de consumo humano.

Tabla 6.16 Resultados del índice de Stoner para el influente de la PP1 en temporada de estiaje

	Influente	Estiaje					
		06/02/2018		12/04/2018		19/11/2019	
		mg/L	(WQI) _i	mg/L	(WQI) _i	mg/L	(WQI) _i
TIPO 1	Aluminio	0.030	0.00	0.039	0.00	0.072	0.00
	Arsénico	0.005	0.00	0.005	0.00	0.005	0.00
	Bario	0.005	0.00	0.006	0.00	0.006	0.00
	Cadmio	0.003	0.00	0.003	0.00	0.003	0.00
	Cromo	0.005	0.00	0.005	0.00	0.005	0.00
	Plomo	0.010	0.00	0.010	0.00	0.010	0.00
	Selenio	0.010	0.00	0.010	0.00	0.010	0.00
	Coliformes Totales	18.000	-100.00	15.000	-100.00	100.000	-100.00
TIPO 2	Nitrógeno Amoniacal	0.100	10.72	0.100	10.72	0.100	10.72
	Cloruros	7.040	6.51	9.200	6.45	10.800	6.41
	Color	5.000	4.22	5.000	4.22	5.000	4.22
	Cobre	0.030	0.10	0.030	0.10	0.030	0.10
	Sodio	10.400	12.70	12.400	12.57	12.700	12.55
	Fluoruros	0.200	8.83	0.200	8.83	0.200	8.83
	Hierro	0.032	4.46	0.045	4.25	0.080	3.67
	SAAM	0.025	5.04	0.025	5.04	0.025	5.04
	Nitrito	0.010	13.27	0.010	13.27	0.010	13.27
	pH	7.990	9.06	8.090	7.78	7.910	9.91
	Manganeso	0.030	5.30	0.030	5.30	0.030	5.30
	Sulfato	11.200	6.51	10.000	6.53	10.000	6.53

Zinc	0.010	0.11	0.010	0.11	0.010	0.11
WQI		-13.17		-14.84		-13.35

En la Tabla 6.17 se observan los resultados del índice en el efluente para ciertas fechas (2016, 2018-2019) en temporada de estiaje. Para el 14/03/2016, el resultado del índice arrojó -37.63, siendo un agua no apta para consumo humano. Esto se debe a que uno de los parámetros Tipo I, en este caso el metal aluminio rebasó el valor de norma y por lo tanto se asigna un valor automáticamente de -100; esto ocurrió muy probablemente a la filosofía de operación del proceso de coagulación, específicamente, en la aplicación indiscriminada del coagulante de sulfato de aluminio, para el que se tiene nulo control, ya que, de acuerdo con las visitas realizadas y entrevista con operadores, se aplica concentración y dosis de forma empírica según el aspecto “poco o muy turbio” que tenga el agua, dejando de lado los criterios justificados como la dosis óptima basada en las características del agua (pH, temperatura, alcalinidad, entre otras). Existen varios abordajes para minimizar las concentraciones de aluminio residual en el agua tratada. Estos incluyen el uso del pH óptimo en el proceso de coagulación, evitar la dosificación excesiva de aluminio, hacer una buena mezcla en el punto de aplicación del coagulante y optimizar la velocidad de las paletas de floculación y la filtración eficiente del flóculo de aluminio (OMS, 2018).

Debido a la importancia de los parámetros Tipo I, cuando por lo menos alguna de estas presenta un valor arriba de la norma, el agua estará considerada como no apta y el valor del índice global podrá ser en el mejor de los casos un valor cercano a cero, dependiendo de los parámetros Tipo II.

El resto de los parámetros Tipo I presentó valores por debajo de la norma y por ende se asigna el valor de cero. Para los parámetros Tipo II de igual forma estuvieron por debajo del valor de norma y por lo tanto adquieren un valor positivo, que dependerá su magnitud con base en la diferencia que tengan respecto del valor ideal.

Para la fecha del 05/04/16, se obtuvo un valor del índice de 59.57, que considera el agua apta para consumo humano, y cabe mencionar que ninguna propiedad Tipo I rebasó el límite, en cuanto a los parámetros Tipo II de igual forma ninguna rebasó el límite, sin embargo la posibilidad de llegar a 100 como valor más alto posible indicando excelente calidad depende de cada aportación individual de cada propiedad y su cercanía o no, del valor ideal individual.

En la fecha del 06/02/18 se obtuvo un valor de 87.86 en donde de igual forma que la fecha anterior, se considera agua apta para consumo humano, con cero parámetros Tipo I rebasando el límite, sin embargo las concentraciones de los parámetros Tipo II presentan menor diferencia respecto del valor ideal por lo cual el valor del índice global alcanza un valor mayor que la fecha anterior.

Tabla 6.17 Resultados del índice de Stoner para el efluente de la PP1 en temporada de estiaje

Efluente	Estiaje						
	14/03/2016		05/04/2016		06/02/2018		
	mg/L	(WQI)i	mg/L	(WQI)i	mg/L	(WQI)i	
TIPO 1	Aluminio	0.2237	-100.00	0.119	0.00	0.030	0.00
	Arsénico	0.005	0.00	0.005	0.00	0.005	0.00
	Bario	0.007	0.00	0.008	0.00	0.005	0.00
	Cadmio	0.003	0.00	0.003	0.00	0.003	0.00
	Cromo	0.005	0.00	0.005	0.00	0.005	0.00
	Plomo	0.010	0.00	0.010	0.00	0.010	0.00
	Selenio	0.010	0.00	0.010	0.00	0.010	0.00
	Coliformes Totales	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
TIPO 2	Nitrógeno Amoniacal	-	-	-	-	0.100	10.72
	Cloruros	7.040	6.51	7.040	6.51	7.040	6.51
	Color	2.500	4.43	5.000	4.22	5.000	4.22
	Cobre	0.034	0.13	0.030	0.10	0.030	0.10
	Sodio	-	-	-	-	7.800	12.88
	Fluoruros	0.200	8.83	0.200	8.83	0.200	8.83
	Hierro	0.112	3.14	0.115	3.09	0.038	4.37
	SAAM	0.035	4.93	0.025	5.04	0.025	5.04
	Nitrito	0.010	13.27	0.010	13.27	0.010	13.27
	pH	7.980	9.18	8.170	6.58	7.900	10.01
	Manganeso	0.030	5.30	0.030	5.30	0.030	5.30
	Sulfato	10.800	6.52	10.000	6.53	11.400	6.51
	Zinc	0.013	0.14	0.010	0.11	0.010	0.11
	WQI	-37.63		59.57		87.86	

Pasando a la siguiente fecha de estiaje del mismo año, 12/04/18, el valor del índice que se obtuvo fue muy cercano a la fecha anterior, con 86.68 puntos. Finalmente, en la fecha del 19/11/19, el valor obtenido fue de -11.17, debido a que coliformes totales presentó un valor por encima de la norma y automáticamente se asigna valor de -100 de forma individual. Esta situación se pudo deber a diversos factores como: tiempo de contacto inadecuado (menor que el recomendado de 30 minutos, CONAGUA, 2013), régimen de flujo deficiente (se recomienda altamente turbulento), baja concentración del hipoclorito de sodio respecto de la necesaria, según factores como pH, temperatura y cloro libre residual esperado en el efluente.

Tal como se puede ver, en sólo 2 de 5 fechas evaluadas calificaron al agua como no apta para consumo humano, por un lado, debido al exceso de aluminio y en la otra fecha por la presencia de coliformes totales.

<i>Tabla 6.17 Continuación.</i>					
	Efluente	Estiaje			
		12/04/2018		19/11/2019	
		mg/L	(WQI) _i	mg/L	(WQI) _i
TIPO 1	Aluminio	0.039	0.00	0.087	0.00
	Arsénico	0.005	0.00	0.005	0.00
	Bario	0.007	0.00	0.006	0.00
	Cadmio	0.003	0.00	0.003	0.00
	Cromo	0.005	0.00	0.005	0.00
	Plomo	0.010	0.00	0.010	0.00
	Selenio	0.010	0.00	0.010	0.00
	Coliformes Totales	0.000	0.00	100.000	-100.00
TIPO 2	Nitrógeno Amoniacal	0.100	10.72	0.100	10.72
	Cloruros	7.010	6.51	7.040	6.51
	Color	5.000	4.22	5.000	4.22
	Cobre	0.030	0.10	0.030	0.10
	Sodio	6.960	12.93	5.910	13.00
	Fluoruros	0.200	8.83	0.200	8.83
	Hierro	0.049	4.18	0.092	3.47
	SAAM	0.025	5.04	0.025	5.04
	Nitrito	0.010	13.27	0.000	13.40
	pH	8.000	8.94	7.740	11.22
	Manganeso	0.030	5.30	0.030	5.30
	Sulfato	10.000	6.53	10.000	6.53
	Zinc	0.010	0.11	0.010	0.11
	WQI		86.68		-11.54

Por otra parte, al comparar algunas fechas del influente contra el efluente (Figura 6.8), se observa que el 6 y 12 de marzo de 2018, el índice de Stoner cambió de un valor negativo calificado como agua no apta para consumo humano a un valor por arriba de cero, es decir como agua apta, no así para el caso de la fecha del 19 de marzo de 2019, en donde el influente ingresó como agua no apta y para el efluente se obtuvo un índice de Stoner, aunque más cercano a cero, aún dentro de valores negativos. Esto se debió principalmente al parámetro Tipo I de coliformes totales, cuyo valor de influente ingresó por arriba de la norma, y la cuantificación en el efluente se mantuvo en el mismo valor, por lo que, cuando menos ese día el proceso

de desinfección no fue eficaz en la remoción de los coliformes totales, debido previsiblemente a una dosificación de hipoclorito de sodio menor a la requerida.

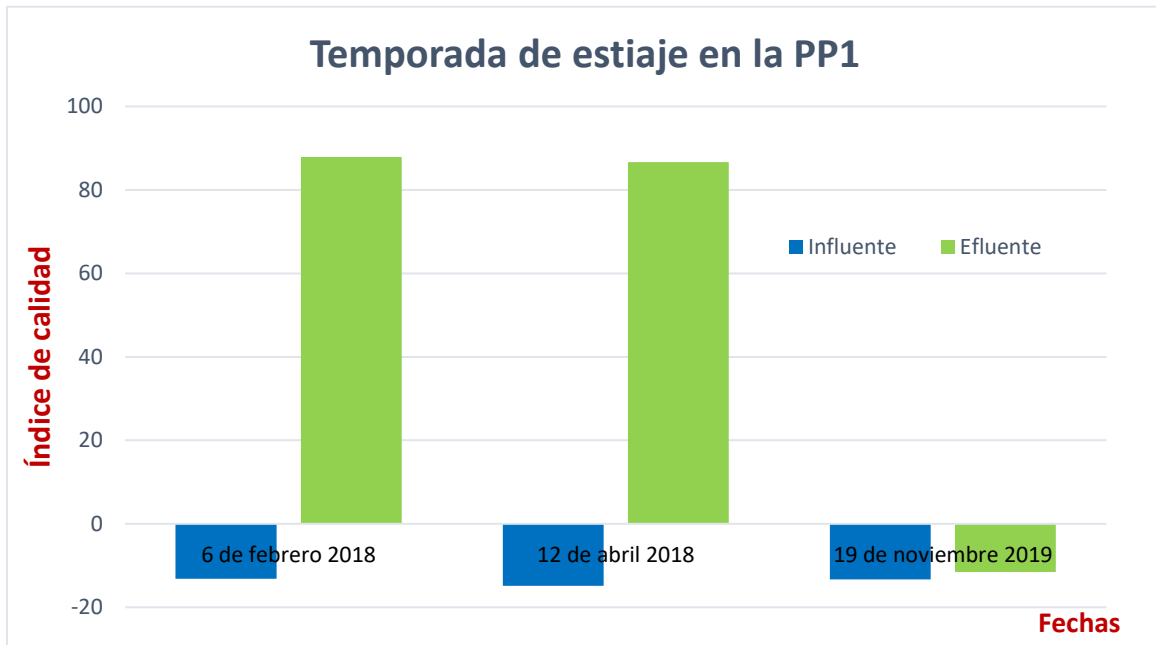


Figura 6.8 Gráfica de barras comparativa de efluente vs influente en temporada de estiaje.

En la Tabla 6.18 se observa el índice de Stoner del influente para la temporada de lluvia en donde las 3 fechas evaluadas resultaron con valor negativo; se destacan el parámetro de coliformes totales y con mayor relevancia para la fecha del 24/08/2018 en el cual el parámetro de aluminio excedió la norma y se calificó con -100 puntos, sin embargo también dos parámetros tipo II: hierro y pH estuvieron fuera del límite de norma o para el caso de pH se reportó fuera del intervalo de norma por lo que añadieron más puntos negativos al índice global, quedando este en -129.52.

Tabla 6.18 Resultados del índice de Stoner para el influente de la PP1 en temporada de lluvias.

	Influente	Lluvias					
		18/07/2017		16/08/2018		24/08/2018	
		mg/L	(WQI)i	mg/L	(WQI)i	mg/L	(WQI)i
TIPO 1	Aluminio	0.102	0.00	0.122	0.00	5.298	-100.00
	Arsénico	0.005	0.00	0.005	0.00	0.005	0.00
	Bario	0.006	0.00	0.006	0.00	0.012	0.00
	Cadmio	0.003	0.00	0.003	0.00	0.003	0.00
	Cromo	0.005	0.00	0.005	0.00	0.005	0.00
	Plomo	0.010	0.00	0.010	0.00	0.010	0.00
	Selenio	0.010	0.00	0.010	0.00	0.010	0.00
	Coliformes Totales	100.000	-100.00	100.000	-100.00	0.000	0.00
TIPO 2	Nitrógeno Amoniacal	0.100	10.72	0.100	10.72	0.100	10.72
	Cloruros	11.500	6.39	7.040	6.51	7.040	6.51
	Color	5.000	4.22	20.000	0.00	10.000	3.38
	Cobre	0.030	0.10	0.030	0.10	0.030	0.10
	Sodio	7.420	12.90	3.520	13.16	2.000	13.27
	Fluoruros	0.200	8.83	0.230	8.78	0.280	8.68
	Hierro	0.090	3.50	0.130	2.83	0.333	-0.56
	SAAM	0.025	5.04	0.025	5.04	0.025	5.04
	Nitrito	0.010	13.27	0.010	13.27	0.010	13.27
	pH	7.830	10.62	7.760	11.10	4.410	-101.42
	Manganeso	0.030	5.30	0.030	5.30	0.030	5.30
	Sulfato	12.100	6.50	10.290	6.53	64.640	5.62
	Zinc	0.010	0.11	0.010	0.11	0.056	0.60
		WQI	-12.52		-16.55		-129.52

Continuando con la Tabla 6.18, se observa de igual forma que para las dos fechas se calculó un valor negativo, y para el muestreo llevado a cabo en 2021 el parámetro relevante fue coliformes totales que aportó -100 puntos al índice global, quedando este en -24.99.

Tabla 6.18 Continuación.

	Influente	Lluvias			
		23/08/2019		19/08/2021	
		mg/L	(WQI)i	mg/L	(WQI)i
TIPO 1	Aluminio	0.095	0.00	0.107	0.00
	Arsénico	0.005	0.00	0.000	0.00
	Bario	0.006	0.00	0.040	0.00
	Cadmio	0.003	0.00	0.000	0.00
	Cromo	0.005	0.00	0.000	0.00
	Plomo	0.010	0.00	0.000	0.00
	Selenio	0.010	0.00	0.000	0.00
	Coliformes Totales	40.000	-100.00	460.000	-100.00
TIPO 2	Nitrógeno Amoniacal	0.100	10.72	0.411	2.38
	Cloruros	10.100	6.43	0.496	6.69
	Color	10.000	3.38	5.000	4.22
	Cobre	0.030	0.10	0.010	0.01
	Sodio	12.700	12.55	3.531	13.16
	Fluoruros	0.360	8.47	0.294	8.64
	Hierro	0.089	3.51	0.119	3.02
	SAAM	0.051	4.76	0.090	4.35
	Nitrito	0.010	13.27	0.002	13.37
	pH	8.120	7.35	7.600	11.79
	Manganeso	0.030	5.30	0.004	0.71
	Sulfato	10.000	6.53	6.310	6.59
	Zinc	0.010	0.11	0.008	0.08
		WQI	-17.53		-24.99

En la Tabla 6.19 se presentan los resultados del efluente para la temporada de lluvias, para lo cual en las 3 fechas mostradas se obtuvo un valor tal que el agua es apta para consumo humano. Para este caso las diferencias en los valores del índice se dan debido a los parámetros Tipo II, que al ser totalmente diferentes las concentraciones de cada muestreo, se acercan o alejan de los 100 puntos de calidad deseable.

Tabla 6.19 Resultados del índice de Stoner para el efluente de la PP1 en temporada de lluvias.

	Efluente	Lluvias					
		18/07/2017		16/08/2018		24/08/2018	
		mg/L	(WQI)i	mg/L	(WQI)i	mg/L	(WQI)i
TIPO 1	Aluminio	0.096	0.00	0.132	0.00	-	-
	Arsénico	0.005	0.00	0.005	0.00	0.005	0.00
	Bario	0.006	0.00	0.006	0.00	0.009	0.00
	Cadmio	0.003	0.00	0.003	0.00	0.003	0.00
	Cromo	0.005	0.00	0.005	0.00	0.005	0.00
	Plomo	0.010	0.00	0.010	0.00	0.010	0.00
	Selenio	0.010	0.00	0.010	0.00	0.010	0.00
	Coliformes Totales	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
TIPO 2	Nitrógeno Amoniacal	0.100	10.72	0.100	10.72	0.100	10.72
	Cloruros	7.040	6.51	7.040	6.51	7.040	6.51
	Color	5.000	4.22	15.000	1.97	10.000	3.38
	Cobre	0.030	0.10	0.030	0.10	0.030	0.10
	Sodio	4.470	13.10	5.550	13.03	2.000	13.27
	Fluoruros	0.200	8.83	0.230	8.78	0.260	8.72
	Hierro	0.089	3.51	0.142	2.64	0.232	1.13
	SAAM	0.025	5.04	0.025	5.04	0.025	5.04
	Nitrito	0.010	13.27	0.010	13.27	0.010	13.27
	pH	7.800	10.84	7.660	11.60	6.650	3.32
	Manganeso	0.030	5.30	0.030	5.30	0.030	5.30
	Sulfato	12.300	6.49	10.000	6.53	39.940	6.03
	Zinc	0.010	0.11	0.010	0.11	0.025	0.27
		WQI	88.04		85.59		77.05

En continuación con la temporada de lluvias, en la Tabla 6.19 se muestran dos fechas para el año 2019 donde se obtuvo índice negativo; 23/08/19, en la cual se obtuvo un valor de -16.89, derivado de que el metal aluminio presentó un valor superior a la norma y se asignó un valor de -100 puntos, y aunque el resto de los parámetros Tipo I y Tipo II estuvieron por debajo del valor de norma el agua está considerada como no apta para consumo humano.

Una situación similar se presentó en la fecha del 19/11/19, en donde debido a una propiedad Tipo I, en este caso Coliformes Totales, el valor final del índice resultó negativo y por lo tanto no apta para consumo humano.

La fecha del 19/08/21 consistió en el muestreo que se realizó en conjunto con el Instituto de Ingeniería para el cual ninguna propiedad Tipo I y Tipo II rebasó el límite

de norma, por lo cual se obtuvo un valor positivo de 73.00 como agua apta para consumo humano.

De estas fechas se destaca la necesidad de enfocar los esfuerzos de mejora hacia los parámetros de aluminio y coliformes totales, ya que es un inconveniente que se presenta en temporada de estiaje y lluvias, aún cuando la filosofía de operación de la planta cambia según la temporada.

<i>Tabla 6.19 Continuación.</i>							
	Efluente	Lluvias					
		23/08/2019		19/11/2019		19/08/2021	
		mg/L	(WQI)i	mg/L	(WQI)i	mg/L	(WQI)i
TIPO 1	Aluminio	0.363	-100.00	0.087	0.00	0.125	0.00
	Arsénico	0.005	0.00	0.005	0.00	0.001	0.00
	Bario	0.010	0.00	0.006	0.00	0.040	0.00
	Cadmio	0.003	0.00	0.003	0.00	0.000	0.00
	Cromo	0.005	0.00	0.005	0.00	0.001	0.00
	Plomo	0.010	0.00	0.010	0.00	0.000	0.00
	Selenio	0.010	0.00	0.010	0.00	0.001	0.00
	Coliformes Totales	0.000	0.00	100.000	-100.00	0.000	0.00
TIPO 2	Nitrógeno Amoniacal	0.100	10.72	0.100	10.72	0.401	2.65
	Cloruros	7.040	6.51	7.040	6.51	3.470	6.61
	Color	15.000	1.97	5.000	4.22	5.000	4.22
	Cobre	0.030	0.10	0.030	0.10	0.010	0.01
	Sodio	5.830	13.01	5.910	13.00	6.290	12.98
	Fluoruros	0.370	8.44	0.200	8.83	0.337	8.54
	Hierro	0.189	1.86	0.092	3.47	0.120	3.00
	SAAM	0.027	5.01	0.025	5.04	0.105	4.19
	Nitrito	0.010	13.27	0.010	13.27	0.003	13.36
	pH	7.870	10.28	7.740	11.22	7.900	10.01
	Manganeso	0.030	5.30	0.030	5.30	0.004	0.71
	Sulfato	10.000	6.53	10.000	6.53	3.050	6.65
	Zinc	0.010	0.11	0.010	0.11	0.008	0.08
		WQI	-16.89		-11.68		73.00

Finalmente al comparar algunas fechas del influente contra el efluente (Figura 6.9) se observa que en 4 de 5 fechas (80%) la calidad del influente cambió de agua no apta para consumo a una calidad por encima de 0 puntos, que según el índice califica el agua como apta para consumo humano. Por otro lado en la fecha del 23 de agosto de 2019 se presentó el caso en el que prácticamente no hubo variación en el índice de efluente contra influente (+0.64 puntos de diferencia), quedando este con un valor por debajo de 0, manteniéndose el agua en el efluente como no apta para consumo humano, esto previsiblemente debido a una dosificación inadecuada de coagulante en el canal Parshall ya que en el influente el parámetro de aluminio ingresa con un valor por debajo de la norma (0.2 mg/L) de 0.095 mg/L (el inconveniente en el influente fueron los coliformes totales) pero en el efluente resulta con un valor que excede la norma y como consecuencia el índice se mantiene con un valor negativo. Esta situación permite identificar los problemas en el proceso de coagulación, en donde la adición de coagulante a base de aluminio con base en criterios empíricos por parte de los operadores impacta con gran intensidad la calidad del agua efluente de la planta ([Aluminio] > Valor de norma para aluminio).

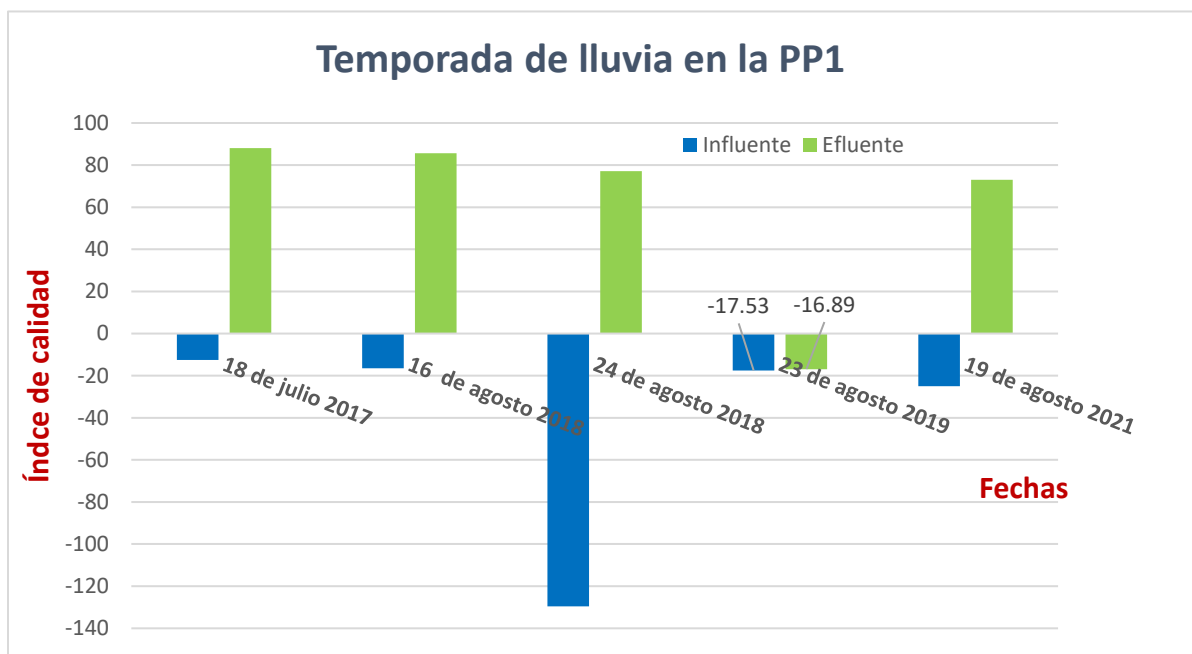


Figura 6.9 Gráfica de barras comparativa de efluente vs influente en temporada de lluvia.

De igual forma que el índice canadiense, se elaboró una tabla resumen del resultado de índice de Stoner para la PP1, en donde se propone un semáforo informativo según el valor del índice obtenido; en este se observan un símbolo por cada posible intervalo resultado; por ejemplo, al encontrarse en algún valor negativo automáticamente se asigna una equis en color rojo, indicando una calidad del agua

no apta para consumo humano, por otro lado en el caso hipotético de tener un valor de cero, se asigna una advertencia con el signo de admiración en color amarillo, indicando una calidad apenas suficiente de consumo humano y finalmente al tener un valor mayor que cero y hasta 100 se obtiene una paloma en color verde que indica una calidad buena y apta de consumo humano.




Valor de índice	Símbolo
$(-\infty, 0)$	
0	
$(0, 100)$	

Figura 6.10 Semáforo informativo del índice de Stoner.

En la tabla resumen para la PP1 (Tabla 6.20) se observa que el influente en ambas temporadas ingresa con calificación no apta de consumo humano con lo que se califica con la equis para todas las fechas evaluadas. En cambio para el efluente en temporada de estiaje se observa calificaciones aprobatorias (paloma verde) en fechas de 2016 y 2018, sin embargo en otras fechas de 2016 y más recientemente 2019 se calificó el agua como no apta. En lluvias, se calificó el agua como apta de 2017 a 2018, sin embargo en 2019 se obtuvo como no apta de consumo. En cuanto al muestreo realizado en 2021, la calificación resultó aprobatoria en color verde.

Tabla 6.20 Semáforo informativo para la PP1 basado en índice de Stoner.

Planta Potabilizadora 1			
Influente			
Estiaje		Lluvias	
Año	Índice	Año	Índice
06/02/2018	✘ -13.17	18/07/2017	✘ -12.52
12/04/2018	✘ -14.84	16/08/2018	✘ -16.55
19/11/2019	✘ -13.35	24/08/2018	✘ -129.52
		23/08/2019	✘ -17.53
		19/08/2021	✘ -24.99
Efluente			
Año	Índice	Año	Índice
14/03/2016	✘ -37.63	18/07/2017	✔ 88.04
05/04/2016	✔ 59.57	16/08/2018	✔ 85.59
06/02/2018	✔ 87.86	24/08/2018	✔ 77.05
12/04/2018	✔ 86.68	23/08/2019	✘ -16.89
19/11/2019	✘ -11.54	19/11/2019	✘ -11.68
		19/08/2021	✔ 73

Como puede observarse a partir de los resultados obtenidos; la Planta Potabilizadora Río Magdalena I cumple el objetivo de tratar el agua del río en más del 50% de las ocasiones (60% en estiaje, 66% en lluvias).

Esta instalación presenta fallas localizadas en dos parámetros Tipo I: aluminio y coliformes totales. Los resultados obtenidos muestran que los problemas son pocos y están bien localizados. Las recomendaciones van en ese sentido y son las siguientes:

- Es necesario asegurar la correcta aplicación del hipoclorito de sodio durante el proceso de desinfección, esto aseguraría la ausencia de coliformes en el efluente de la planta.
- Se debe de regular la adición de sulfato de aluminio durante el proceso de coagulación, pues a pesar de que el uso de este reactivo es común en los procesos de potabilización su presencia por encima de los límites establecidos en el efluente y otros procesos habla de una adición superior a la necesaria.
- Adicionalmente, se podría escalonar la adición de reactivos químicos, ya que, el proceso de coagulación depende de algunas características químicas del agua, por lo que al añadir arbitrariamente en el mismo punto todos los reactivos afecta la eficiencia de los procesos, tanto de coagulación como el de desinfección.

6.5 Índice de Stoner en temporada de estiaje y lluvia para la PP2

Ahora se presentan los resultados, en el orden similar que la PP1, para la PP2. Primero, el índice en temporada de estiaje para el influente, el cual se muestra en la Tabla 6.21; en esta se observan diferentes fechas del año 2018, y los resultados calculados arrojan al parámetro de coliformes totales como el principal indicador para obtener agua no apta de consumo ya que para las 3 fechas se reportó con un valor por arriba de la norma.

Tabla 6.21 Resultados del índice de Stoner para el influente de la PP2 en temporada de estiaje.

Influente		Estiaje					
		02/02/2018		06/02/2018		11/05/2018	
		mg/L	(WQI) _i	mg/L	(WQI) _i	mg/L	(WQI) _i
TIPO 1	Aluminio	0.098	0.00	0.121	0.00	0.145	0.00
	Arsénico	0.005	0.00	0.005	0.00	0.005	0.00
	Bario	0.006	0.00	0.007	0.00	0.009	0.00
	Cadmio	0.003	0.00	0.003	0.00	0.003	0.00
	Cromo	0.005	0.00	0.005	0.00	0.005	0.00
	Plomo	0.010	0.00	0.010	0.00	0.010	0.00
	Selenio	0.010	0.00	0.010	0.00	0.010	0.00
	Coliformes Totales	100.000	-100.00	100.000	-100.00	100.000	-100.00
TIPO 2	Nitrógeno Amoniacal	0.100	10.72	0.100	10.72	0.100	10.72
	Cloruros	7.040	6.51	7.040	6.51	7.040	6.51
	Color	15.000	1.97	10.000	3.38	15.000	1.97
	Cobre	0.030	0.10	0.030	0.10	0.030	0.10
	Sodio	5.060	13.06	6.000	13.00	5.940	13.00
	Fluoruros	0.270	8.70	0.200	8.83	0.340	8.53
	Hierro	0.171	2.14	0.140	2.67	0.146	2.57
	SAAM	0.025	5.04	0.025	5.04	0.025	5.04
	Nitrito	0.010	13.27	0.010	13.27	0.010	13.27
	pH	8.000	8.94	7.800	10.84	8.020	8.70
	Manganeso	0.030	5.30	0.030	5.30	0.030	5.30
	Sulfato	13.100	6.48	12.400	6.49	11.020	6.52
	Zinc	0.129	1.37	0.097	1.03	0.013	0.14
WQI		-16.41		-12.83		-17.64	

En la Tabla 6.22 se muestran los resultados del índice de Stoner para el efluente de la PP2 en temporada de estiaje, en donde en la fecha del 14/03/16 se obtuvo un valor negativo de -37.60 derivado del exceso en la concentración de aluminio por encima de la norma. Este caso presenta una situación particular, ya que en la PP2 no se lleva a cabo el proceso de coagulación-floculación, por lo que no se añade el compuesto de sulfato de aluminio en ningún caso. A pesar de ello, el efluente registró un valor incluso por arriba de la norma para aluminio.

Para las fechas siguientes como el 05/04/16 y el 02/02/18 el valor del índice arroja agua apta para consumo, con la diferencia de que la calidad resulta mejor en la segunda fecha, debido a las aportaciones individuales de parámetros Tipo II, en donde algunas de las concentraciones están más cercanas a valores ideales, por ende, una mayor aportación al índice global.

<i>Tabla 6.22 Resultados del índice de Stoner para el efluente de la PP2 en temporada de estiaje.</i>							
Efluente	Estiaje						
	14/03/2016		05/04/2016		02/02/2018		
	mg/L	(WQI)i	mg/L	(WQI)i	mg/L	(WQI)i	
TIPO 1	Aluminio	0.2009	-100.00	0.115	0.00	0.086	0.00
	Arsénico	0.005	0.00	0.005	0.00	0.005	0.00
	Bario	0.009	0.00	0.006	0.00	0.007	0.00
	Cadmio	0.003	0.00	0.003	0.00	0.003	0.00
	Cromo	0.005	0.00	0.005	0.00	0.005	0.00
	Plomo	0.010	0.00	0.010	0.00	0.010	0.00
	Selenio	0.010	0.00	0.010	0.00	0.010	0.00
	Coliformes Totales	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
TIPO 2	Nitrógeno Amoniacal	-	-	-	-	0.100	10.72
	Cloruros	7.040	6.51	7.040	6.51	7.040	6.51
	Color	2.500	4.43	5.000	4.22	5.000	4.22
	Cobre	0.030	0.10	0.030	0.10	0.030	0.10
	Sodio	-	-	-	-	6.500	12.96
	Fluoruros	0.200	8.83	0.200	8.83	0.310	8.61
	Hierro	0.132	2.80	0.097	3.38	0.065	3.91
	SAAM	0.025	5.04	0.025	5.04	0.025	5.04
	Nitrito	0.010	13.27	0.010	13.27	0.010	13.27
	pH	7.950	9.51	7.950	9.51	7.970	9.29
	Manganeso	0.030	5.30	0.080	3.09	0.030	5.30
	Sulfato	11.000	6.52	10.000	6.53	12.600	6.49
	Zinc	0.010	0.11	0.010	0.11	0.010	0.11
	WQI	-37.60		60.58		86.52	

En la continuación de la tabla se encuentran las siguientes fechas de la misma temporada en donde para el 06/02/18 y el 11/05/18 los índices calculados fueron de 86.51 y 84.56 respectivamente, y por lo tanto un agua apta para consumo humano.

Sin embargo en la fecha del 19/11/19 se presentó que el valor de coliformes totales rebasó la norma y por ende el índice presentó valor negativo.

<i>Tabla 6.22 Continuación.</i>							
Efluente	Estiaje						
	06/02/2018		11/05/2018		19/11/2019		
	mg/L	(WQI) _i	mg/L	(WQI) _i	mg/L	(WQI) _i	
TIPO 1	Aluminio	0.089	0.00	0.088	0.00	0.071	0.00
	Arsénico	0.005	0.00	0.005	0.00	0.005	0.00
	Bario	0.007	0.00	0.007	0.00	0.007	0.00
	Cadmio	0.003	0.00	0.003	0.00	0.003	0.00
	Cromo	0.005	0.00	0.005	0.00	0.005	0.00
	Plomo	0.010	0.00	0.010	0.00	0.010	0.00
	Selenio	0.010	0.00	0.010	0.00	0.010	0.00
	Coliformes Totales	0.000	0.00	0.000	0.00	2.000	-100.00
TIPO 2	Nitrógeno Amoniacal	0.100	10.72	0.100	10.72	0.100	10.72
	Cloruros	7.040	6.51	9.200	6.45	7.040	6.51
	Color	5.000	4.22	5.000	4.22	5.000	4.22
	Cobre	0.030	0.10	0.030	0.10	0.030	0.10
	Sodio	6.300	12.98	10.500	12.70	6.220	12.98
	Fluoruros	0.200	8.83	0.330	8.55	0.200	8.83
	Hierro	0.060	4.00	0.097	3.39	0.073	3.78
	SAAM	0.025	5.04	0.025	5.04	0.025	5.04
	Nitrito	0.010	13.27	0.010	13.27	0.010	13.27
	pH	8.000	8.94	8.060	8.19	7.210	10.90
	Manganeso	0.030	5.30	0.030	5.30	0.030	5.30
	Sulfato	12.000	6.50	10.000	6.53	10.000	6.53
	Zinc	0.010	0.11	0.010	0.11	0.164	1.74
	WQI	86.51		84.56		-10.08	

Al comparar el influente contra efluente de la gráfica de la Figura 6.11 se observa que para las 3 fechas el valor de índice efluente se encuentra con valor positivo, e incluso con 85 puntos promedio aproximadamente destacando que para las 3 fechas el valor influente ingresó con valor negativo, por lo que se asume que hubo un adecuado funcionamiento de la PP2, en donde se cumple la norma y la calidad alcanza 80 puntos mínimo de 100 posibles.

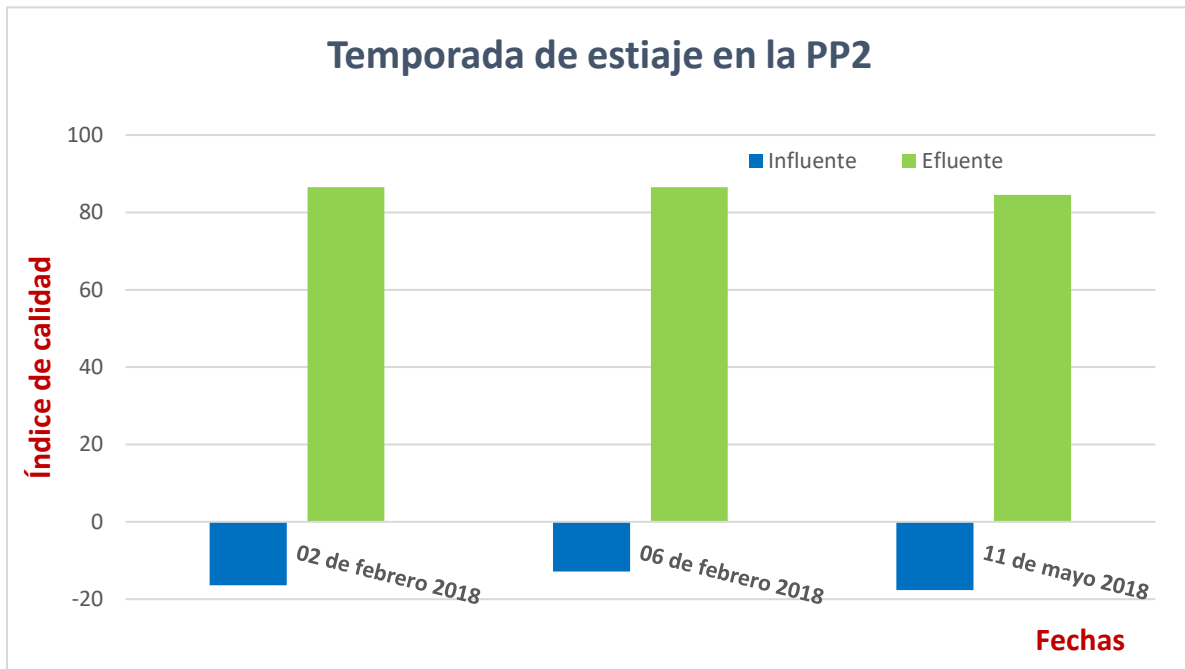


Figura 6.11 Gráfica de barras comparativa de efluente vs influente en temporada de estiaje

Ahora se muestra en la Tabla 6.23 el resultado del índice para el influente en temporada de lluvias, el cual nos arroja para la primera fecha (14/07/2017) de forma extraordinaria una calificación de agua apta para consumo con un valor de índice de 84.37 puntos. En cuanto a la siguiente fecha se obtiene un valor negativo debido al aporte de coliformes totales.

Tabla 6.23 Resultados del índice de Stoner para el influente de la PP2 en temporada de lluvia.

	Influente	Lluvias			
		14/07/2017		15/08/2018	
		mg/L	(WQI)i	mg/L	(WQI)i
TIPO 1	Aluminio	0.179	0.00	0.175	0.00
	Arsénico	0.005	0.00	0.005	0.00
	Bario	0.007	0.00	0.007	0.00
	Cadmio	0.003	0.00	0.003	0.00
	Cromo	0.005	0.00	0.005	0.00
	Plomo	0.010	0.00	0.010	0.00
	Selenio	0.010	0.00	0.010	0.00
	Coliformes Totales	0.000	0.00	100.000	-100.00
TIPO 2	Nitrógeno Amoniacal	0.100	10.72	0.100	10.72
	Cloruros	7.040	6.51	7.040	6.51
	Color	15.000	1.97	15.000	1.97
	Cobre	0.030	0.10	0.030	0.10
	Sodio	5.820	13.01	3.590	13.16
	Fluoruros	0.200	8.83	0.200	8.83
	Hierro	0.226	1.24	0.149	2.52
	SAAM	0.025	5.04	0.025	5.04
	Nitrito	0.010	13.27	0.010	13.27
	pH	7.620	11.73	7.150	10.45
	Manganeso	0.030	5.30	0.030	5.30
	Sulfato	12.800	6.49	11.410	6.51
	Zinc	0.016	0.17	0.011	0.12
		WQI	84.37		-15.51

En cuanto a otras fechas, se observa que para el 14 de agosto de 2019, el influente tomó un valor negativo causado por dos parámetros Tipo I, en este caso aluminio y coliformes totales. Se puede destacar el caso de aluminio, en donde se plantea la hipótesis en la cual las demasías del canal Parshall de la PP1 así como los lodos del sedimentador de la misma planta se descarguen en ciertos momentos al mismo río Magdalena aguas abajo, donde se toma el influente para la PP2, y ya que en la PP1 sí se añade (incluso en exceso) sulfato de aluminio, este mismo llega por encima del valor de norma al influente de la PP2, lo que resulta en lo observado en agosto de 2019.

En la fecha en la que se realizó la visita y muestreo del 19 de agosto de 2021 se obtuvo un valor negativo de -28.03 puntos derivado del parámetro de coliformes totales.

<i>Tabla 6.23 Continuación.</i>					
Influente	Lluvias				
	14/08/2019		19/08/2021		
	mg/L	(WQI)i	mg/L	(WQI)i	
TIPO 1	Aluminio	0.386	-100.00	0.197	0.00
	Arsénico	0.005	0.00	0.000	0.00
	Bario	0.009	0.00	0.040	0.00
	Cadmio	0.003	0.00	0.000	0.00
	Cromo	0.005	0.00	0.001	0.00
	Plomo	0.010	0.00	0.000	0.00
	Selenio	0.010	0.00	0.000	0.00
	Coliformes Totales	100.000	-100.00	1100.000	-100.00
TIPO 2	Nitrógeno Amoniacal	0.100	10.72	0.425	2.01
	Cloruros	8.870	6.46	0.992	6.67
	Color	10.000	3.38	5.000	4.22
	Cobre	0.030	0.10	0.010	0.01
	Sodio	3.360	13.17	4.260	13.11
	Fluoruros	0.200	8.83	0.342	8.52
	Hierro	0.281	0.31	0.192	1.80
	SAAM	0.025	5.04	0.100	4.24
	Nitrito	0.012	13.24	0.004	13.35
	pH	7.230	11.04	7.800	10.84
	Manganeso	0.030	5.30	0.004	0.71
	Sulfato	13.620	6.47	18.000	6.40
	Zinc	0.039	0.41	0.008	0.08
			-115.53		-28.03

Posteriormente con respecto al efluente, se presenta la Tabla 6.24, en donde las 3 fechas mostradas presentan un índice favorable para un agua apta para consumo humano, con valores muy similares en las concentraciones de los parámetros Tipo II tal que el valor del índice global es cercano entre sí.

<i>Tabla 6.24 Resultados del índice de Stoner para el efluente de la PP2 en temporada de lluvia.</i>	
Efluente	Lluvias

		06/07/2009		14/07/2017		15/08/2018	
		mg/L	(WQI)i	mg/L	(WQI)i	mg/L	(WQI)i
TIPO 1	Aluminio	0.161	0.00	0.124	0.00	0.118	0.00
	Arsénico	-	-	0.005	0.00	0.005	0.00
	Bario	0.009	0.00	0.006	0.00	0.006	0.00
	Cadmio	0.005	0.00	0.003	0.00	0.003	0.00
	Cromo	0.004	0.00	0.005	0.00	0.005	0.00
	Plomo	0.002	0.00	0.010	0.00	0.010	0.00
	Selenio	0.004	0.00	0.010	0.00	0.010	0.00
	Coliformes Totales	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
TIPO 2	Nitrógeno Amoniacal	0.100	10.72	0.100	10.72	0.100	10.72
	Cloruros	4.290	6.59	7.040	6.51	7.040	6.51
	Color	7.500	3.87	10.000	3.38	15.000	1.97
	Cobre	0.041	0.19	0.030	0.10	0.030	0.10
	Sodio	11.700	12.62	6.080	12.99	6.290	12.98
	Fluoruros	0.100	8.95	0.200	8.83	0.200	8.83
	Hierro	0.119	3.02	0.104	3.27	0.104	3.27
	SAAM	0.035	4.93	0.025	5.04	0.025	5.04
	Nitrito	0.008	13.29	0.010	13.27	0.010	13.27
	pH	7.700	11.43	7.450	11.87	7.550	11.88
	Manganeso	0.019	3.36	0.030	5.30	0.030	5.30
	Sulfato	11.040	6.52	12.300	6.49	11.060	6.51
	Zinc	0.004	0.04	0.010	0.11	0.010	0.11
	WQI		85.51		87.87		86.48

En la Tabla 6.24 se muestran fechas en la temporada de lluvias para las que se presentaron diferentes inconvenientes, comenzando con la del 13/09/18, en donde el parámetro de coliformes totales estuvo por arriba de la norma y por lo tanto el índice global obtiene un valor negativo, en la segunda fecha del 14/08/19 el problema se presentó para aluminio, que tiene un valor arriba de norma y nuevamente el índice obtiene un valor negativo, adicional al parámetro de hierro que también adquiere valor negativo, pero ya que es una propiedad tipo II el impacto en el índice depende ahora de su respectiva función matemática; finalmente para el muestreo realizado en conjunto con el Instituto de Ingeniería, con fecha del 19/08/21, el valor de coliformes totales toma un valor por encima de la norma que provoca que el índice adquiera valor negativo y por lo tanto para la 3 fechas se obtiene un agua no apta para consumo.

En este sentido se convierten en parámetros críticos tanto aluminio por su exceso en la fecha del 14/08/19 y aún más relevante el de coliformes totales por ser el proceso de desinfección el encargado de garantizar la calidad del agua desde el punto de vista microbiológico y asegurar su inocuidad para la salud del consumidor, eliminando los microorganismos capaces de producir enfermedades.

<i>Tabla 6.24 Continuación.</i>							
	Efluente	Lluvias					
		13/09/2018		14/08/2019		19/08/2021	
		mg/L	(WQI) _i	mg/L	(WQI) _i	mg/L	(WQI) _i
TIPO 1	Aluminio	0.118	0.00	0.553	-100.00	0.084	0.00
	Arsénico	0.005	0.00	0.005	0.00	0.000	0.00
	Bario	0.006	0.00	0.008	0.00	0.040	0.00
	Cadmio	0.003	0.00	0.003	0.00	0.000	0.00
	Cromo	0.005	0.00	0.005	0.00	0.000	0.00
	Plomo	0.010	0.00	0.010	0.00	0.000	0.00
	Selenio	0.010	0.00	0.010	0.00	0.001	0.00
	Coliformes Totales	2.000	-100.00	0.000	0.00	1.000	-100.00
TIPO 2	Nitrógeno Amoniacal	0.100	10.72	0.100	10.72	0.420	2.14
	Cloruros	7.040	6.51	8.850	6.46	1.980	6.65
	Color	5.000	4.22	10.000	3.38	5.000	4.22
	Cobre	0.030	0.10	0.030	0.10	0.010	0.01
	Sodio	6.260	12.98	5.260	13.05	4.745	13.08
	Fluoruros	0.200	8.83	0.200	8.83	0.313	8.60
	Hierro	0.116	3.07	0.310	-0.16	0.087	3.55
	SAAM	0.025	5.04	0.025	5.04	0.095	4.29
	Nitrito	0.010	13.27	0.011	13.25	0.003	13.35
	pH	7.060	9.60	7.270	11.27	7.600	11.79
	Manganeso	0.030	5.30	0.030	5.30	0.004	0.71
	Sulfato	10.060	6.53	12.800	6.49	18.000	6.40
	Zinc	0.010	0.11	0.010	0.11	0.008	0.08
	WQI	-13.73		-16.17		-25.12	

Contrastando el efluente contra el influente se observa de la gráfica de la Figura 6.12 que para todas las fechas hay una mejora en el índice respecto al influente, sin embargo se presentaron diferentes situaciones en donde para la primera fecha el influente ya estaba con un valor positivo y lo que se obtuvo en el efluente es sólo un pequeño incremento (+3.5 puntos) para la segunda fecha el valor influente ingresa con valor negativo y el efluente obtiene valor positivo, en la tercer fecha el influente

ingresa con un valor negativo alto (-115 puntos) y para el efluente el valor se mantiene como negativo (-16 puntos) y en la cuarta fecha el valor influente es negativo (-28 puntos) y nuevamente el efluente se mantiene con valor negativo.

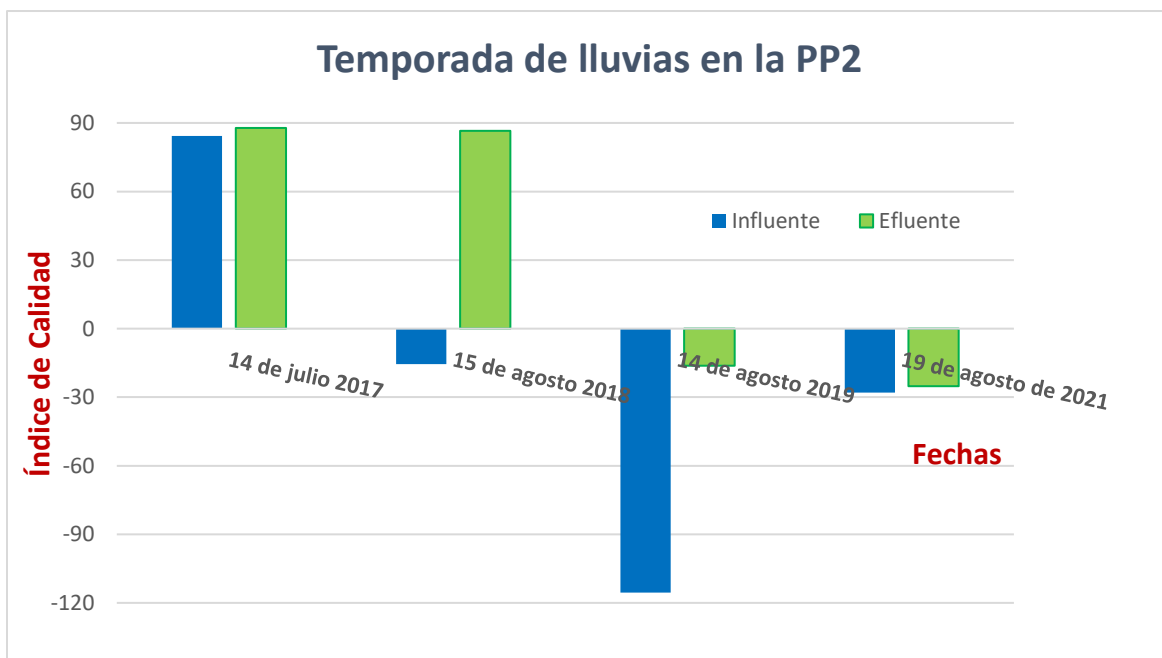


Figura 6.12 Gráfica de barras comparativa de efluente vs influente en temporada de lluvia.

La tabla resumen de la PP2 quedó de la siguiente forma, los influentes de la temporada de estiaje basados únicamente en 2018 obtuvieron la calificación de no apta, mientras que en lluvias se tuvo la excepción del año 2017 en donde el influente ingresó con agua apta, para el resto (2018-2019, 2021) se calificó como agua no apta. En los efluentes se presentó una situación diferente, en donde en estiaje la mayoría (4 de 5) de las calificaciones entre 2016 y 2018 se obtiene como agua apta, pero más recientemente en 2019 se da el caso del agua no apta. Para las lluvias se calculó un 50% apta y no apto, en donde de 2009 a 2018 se calculó agua apta pero en años recientes de 2018 e incluso el muestreo de 2021 obtiene una calificación no apta de consumo.

Tabla 6.25 Semáforo informativo para la PP2 basado en el índice de Stoner.

Planta Potabilizadora 2			
Influente			
Estiaje		Lluvias	
Año	Índice	Año	Índice
02/02/2018	✘ -16.41	14/07/2017	✔ 84.37
06/02/2018	✘ -12.83	15/08/2018	✘ -15.51
11/05/2018	✘ -17.64	14/08/2019	✘ -115.53
		19/08/2021	✘ -28.03
Efluente			
Año	Índice	Año	Índice
14/03/2016	✘ -37.6	06/07/2009	✔ 85.51
05/04/2016	✔ 60.58	14/07/2017	✔ 87.87
02/02/2018	✔ 86.52	15/08/2018	✔ 86.48
06/02/2018	✔ 86.51	13/09/2018	✘ -13.73
11/05/2018	✔ 84.56	14/08/2019	✘ -16.17
19/11/2019	✘ -10.08	19/08/2021	✘ -25.12

Para la Planta Potabilizadora Río Magdalena II los resultados obtenidos muestran que a pesar de que la planta parece tener episodios de buen funcionamiento al mejorar la calidad del agua también tiene problemas principalmente en la desinfección de esta. La principal falla en esta instalación corresponde a la presencia de coliformes y en menor medida al exceso de aluminio, ambos parámetros Tipo I.

Al igual que la potabilizadora localizada aguas arriba de esta, los valores de los 13 parámetros Tipo II no generaron calificaciones parciales bajas, sólo con la excepción del parámetro de hierro en agosto de 2019, donde incluso, el valor resulta negativo. Los resultados obtenidos indican que el principal problema de esta instalación corresponde a la desinfección del agua, por lo que la recomendación primordial es:

- Asegurar un correcto proceso de desinfección del agua tratada agregando las cantidades necesarias de desinfectante determinadas a partir de estudios de la calidad microbiológica del agua en el influente.

6.6 Índice canadiense vs Índice de Stoner

El índice canadiense tiene un método de cálculo basado en una ecuación de promedio armónico no ponderado en contraste con el índice de Stoner que está basado en la asignación de importancia a los parámetros de calidad según el método Delphi y adicionalmente se plantean ecuaciones lineales y de segundo grado nuevamente por criterios arbitrarios, tomando en cuenta para cada ecuación los valores límite recomendados.

Otra diferencia son los datos de entrada que requieren; en el índice canadiense se recomienda introducir al menos 4 valores por parámetro de calidad y mínimo 4 parámetros, de ahí en adelante al ser mayor el número de valores se tendrá una interpretación de resultados más precisa, mientras que el índice de Stoner es muy estricto al haber determinado qué parámetros de calidad serán tomados en cuenta, cuáles de estos serán de Tipo I o Tipo II y por lo tanto se requiere la existencia de un valor por cada parámetro de calidad, ya que en el caso contrario el resultado estará altamente influenciado por la falta de esos valores.

Los resultados que se obtienen del índice canadiense aplican para una temporada, sea el caso de estiaje y lluvias, o temporalidades anuales, trimestrales etc. En el índice de Stoner el valor resultado es puntal, normalmente de un día de muestreo, aunque también se pueden hacer interpretaciones de temporadas si se tiene la medición de varios días.

La interpretación de resultados en el índice canadiense se basa en intervalos numéricos del 0 al 100 y de ahí 5 calificaciones con adjetivos; para el índice de Stoner existen dos diferentes intervalos resultado: $(-\infty, 0)$ y $(0, 100)$ además de un único valor que es el cero. De ahí que se pueda calificar el agua de dos únicas formas, como apta o no apta para consumo.

Otro aspecto importante ligado con la interpretación de resultados tiene que ver con los datos de entrada, ya que mientras que el índice canadiense pudiera no tomar un parámetro en cuenta por no tener el mínimo número de datos, el índice de Stoner requiere rigurosamente que sea colocado un valor por cada parámetro, por ejemplo en el caso del aluminio, en donde debido a la falta de datos para cumplir el requerimiento mínimo (4 datos) de ser evaluado no fue contemplado en el índice canadiense y como consecuencia de ello es que pasó desapercibido en las observaciones para interpretar el resultado del índice, esto no sucede en el índice de Stoner en donde es obligatorio tener el dato para llevar a cabo el cálculo completo y por ende se pudo ver que es un parámetro de calidad que ha presentado un problema para las plantas potabilizadoras porque en múltiples ocasiones se encuentra en concentraciones superiores al límite (0.2 mg/L) en el efluente de la planta.

El índice de Stoner tiene establecidos los parámetros para llevar a cabo el cálculo del índice, y en comparación con el índice canadiense que puede contemplar los 48 de la NOM-127-SSA1-1994, el de Stoner sólo se basa la decisión en 21 de ellos y por ejemplo, para el caso de la turbidez, en donde con el cálculo del índice canadiense se detectó que este parámetro se encontró en algunas muestras por arriba del límite de norma, en comparación con el índice de Stoner para el que es imposible darse cuenta de ello ya que no contempla a ese parámetro en el cálculo.

La aplicación del índice de Stoner permite informar el estado de calidad de agua para un uso específico, en este caso su aptitud como agua de consumo humano; además su uso en estudios puntuales es recomendado, sin embargo presenta el inconveniente de ser menos sensible a variaciones extremas de la calidad del agua.

Por su parte, el índice canadiense permite informar el estado de calidad de agua para múltiples usos, y para lograrlo basta con introducir al programa los criterios de calidad por casa uso. Este índice resulta ser más sensible a variaciones extremas de calidad de algún parámetro, pero no se puede identificar de forma rápida las variaciones puntuales o incluso puede que lleguen a ser omitidas.

Se considera que la aplicación cruzada de los resultados que se obtienen de ambos índices conformó una evaluación integral de las plantas de estudio, por lo que se propone el uso de ambas metodologías de forma simultánea siempre que se tenga a la mano la calidad histórica del agua y que se vayan a realizar más estudios de calidad.

6.7 Indicadores de eficiencia de los procesos y operaciones unitarias

6.7.1 Planta Potabilizadora 1 en temporada de estiaje

A continuación, se presentan los resultados del promedio de eficiencias de remoción para el tren de tratamiento conformado por las operaciones de **coagulación, floculación y sedimentación** para los parámetros en los que se tenían los suficientes datos.

En la gráfica de la Figura 6.13 se muestra de forma radial el porcentaje de la eficiencia de remoción para turbiedad, color y sólidos disueltos totales. Tal como se observa para el parámetro de color se obtuvo el mayor porcentaje de eficiencia con el 50%, sin embargo para establecer si dicho porcentaje se considera adecuado o no, se revisó a detalle como primer punto si el valor del parámetro en cuestión ingresó al tren de tratamiento por arriba de la norma; para el caso del parámetro color en las fechas evaluadas no ingresó con un valor arriba de la norma en todos los casos considerados, por lo que la eficiencia se considera **adecuada** debido a

que se reduce hasta incluso el 50% el valor inicial. Para el caso de la turbiedad se observa una eficiencia de remoción promedio del 13%, en donde para dos fechas específicas de evaluación se tuvo un valor de influente al tren por encima de la norma, sin embargo, para la primera de ellas siendo el 02/10/2017 se ingresó con un valor de 10 UNT y en el efluente del tren se reportó 9.60 UNT por lo que presumiblemente existieron uno o más problemas en las operaciones de coagulación, floculación y sedimentación; por otro lado en cuanto a la fecha del 24/05/2019 se ingresó con un valor de 14 UNT y en el efluente se reportó 8.10 UNT, teniendo un porcentaje de eficiencia particular del 42%, a pesar de ello el valor de salida sigue estando por encima del valor de norma, por lo que se considera **no adecuado** el valor de eficiencia promedio del 13%, ya que cuando el valor influente es mayor que la norma (5 UNT) el trabajo de las operaciones unitarias y su operación no permite llegar a un valor que esté por debajo de la norma.

Posteriormente con el parámetro de sólidos disueltos totales, se tiene una eficiencia del 3%, que podría considerarse baja, sin embargo, dado que ningún valor de influente ingresó por arriba de la norma no se puede establecer si es adecuada o no la eficiencia en cuestión.

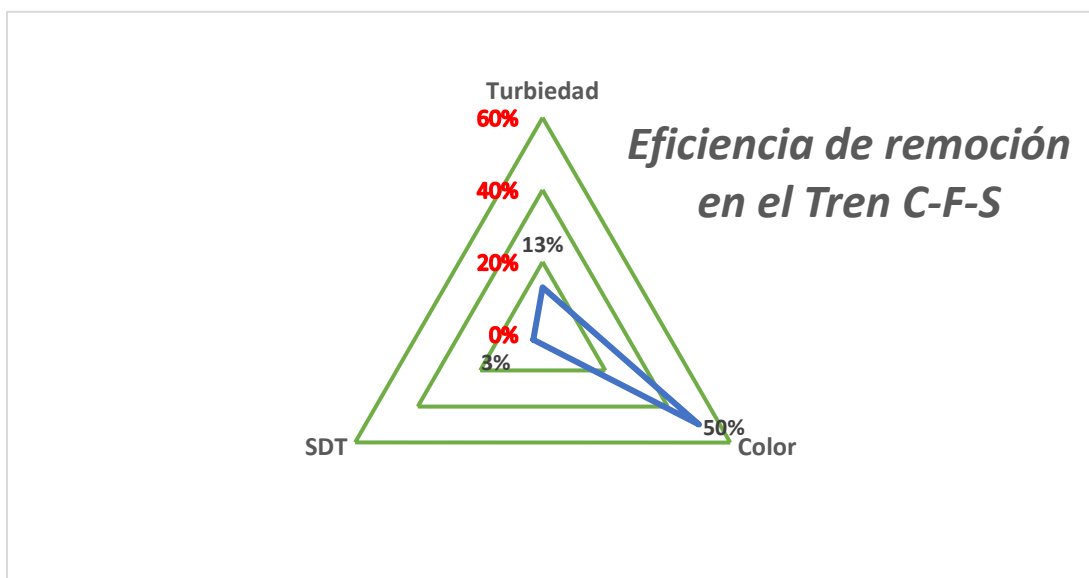


Figura 6.13 Gráfica radial que muestra los porcentajes de eficiencia de remoción para ciertos parámetros de calidad.

Enseguida se muestra la gráfica 6.14 en donde se evalúa ahora el proceso de filtración para los parámetros en que se tuviera suficiente información. Se observa que para el parámetro turbiedad se alcanza un 16% de eficiencia promedio de remoción siendo nuevamente una fecha relevante la del 02/10/2017 ya que el valor

influyente al proceso de filtración es de 9.60 UNT, es decir excediendo el valor de norma de 5 UNT, y en el efluente se reportó 8.10 UNT por lo que no se alcanzó la meta mínima estimada, siendo entonces **no adecuado** el valor de eficiencia reportado.

En cuanto al parámetro de SDT, se alcanzó una eficiencia promedio de 9%, y aunque el valor influente al proceso se reporta por debajo de la norma, no se puede establecer con precisión si resultó adecuado o no para este parámetro.

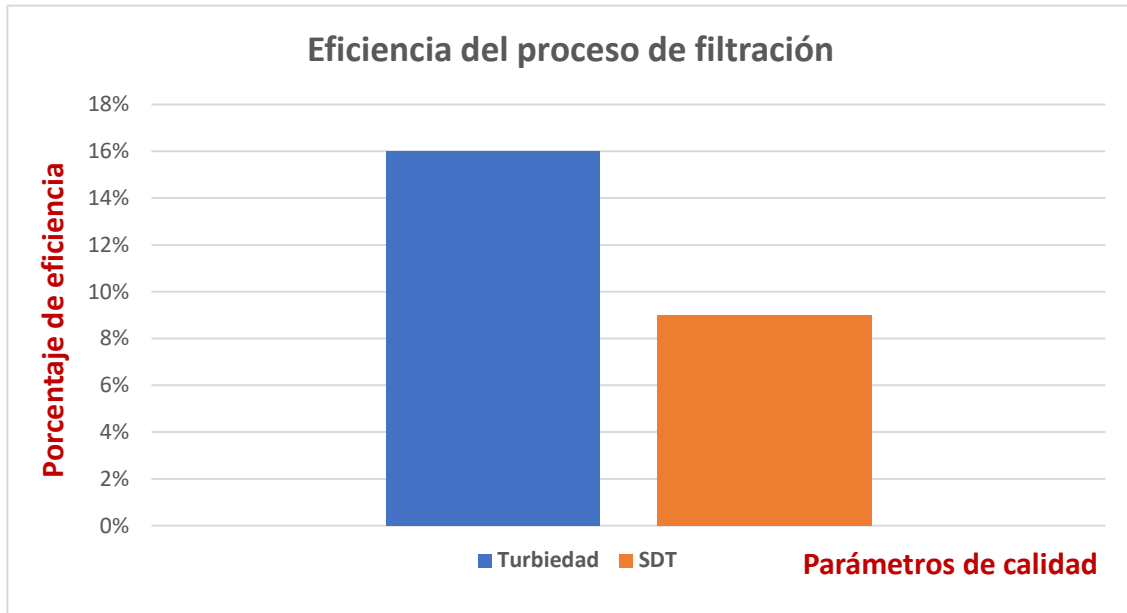


Figura 6.14 Gráfica de barras que muestra los porcentajes de eficiencia de remoción para ciertos parámetros de calidad.

En la gráfica 6.15 se muestra la eficiencia promedio del proceso de desinfección para los parámetros de coliformes totales y fecales. En cuanto al parámetro de coliformes totales se observa que está por arriba del 90%, siendo relevante mencionar que según la norma aplicable, este parámetro debe ser ausente en la medición por lo que cualquier valor mayor que cero en el efluente implica que se está excediendo la norma, y aunque el porcentaje es alto, dada la importancia del parámetro en agua de consumo humano se considera **no adecuada** la eficiencia, porque además existen diferentes fechas en donde se reportó presencia de coliformes en el efluente del proceso. Una situación similar se presenta para coliformes fecales, el cual no alcanza ni el 70% de eficiencia, por lo cual se considera **no adecuada** ya que se requiere la ausencia del parámetro.

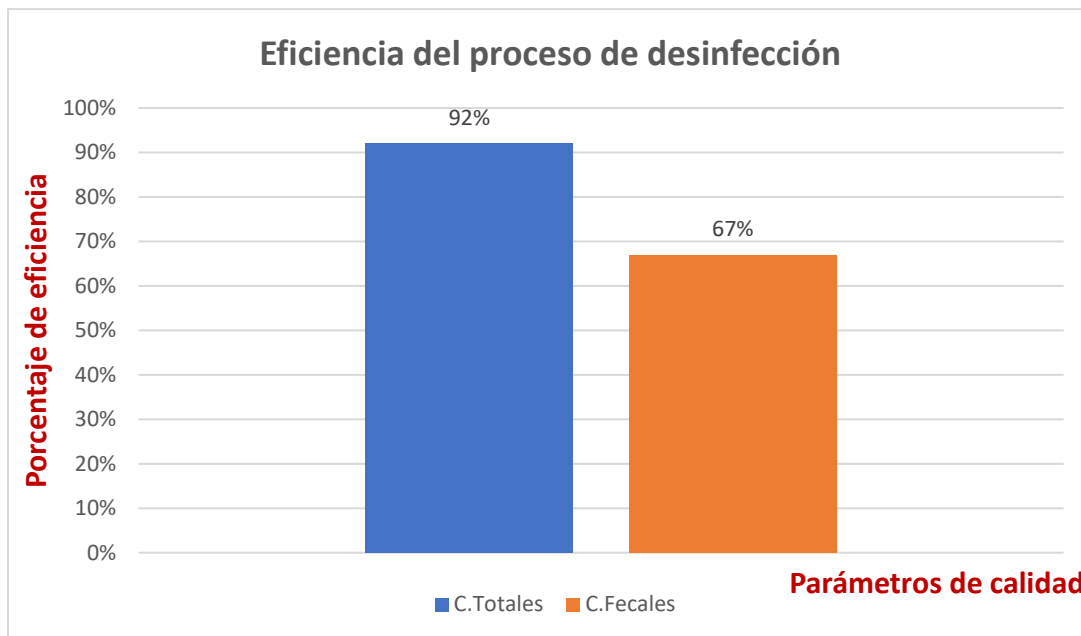


Figura 6.15 Gráfica de barras que muestra los porcentajes de eficiencia de remoción de coliformes totales y fecales en el proceso de desinfección.

6.7.2 Planta Potabilizadora 1 en temporada de lluvia

Enseguida se muestran los resultados de eficiencia de operaciones y procesos en temporada de lluvia. Comenzando con el tren de coagulación-floculación-sedimentación, el cual fue evaluado para únicamente dos parámetros, debido a la falta de información. En la gráfica 6.16 se observa que para la turbiedad se alcanzó una eficiencia promedio menor al 25%, la cual se considera **no adecuada** ya que para un gran número de fechas el efluente del tren se mantuvo con un valor que excedió el límite de norma, tal es el caso del muestreo que se realizó el 19/08/2021 en donde el influente al tren fue de 7.12 UNT y el efluente de 6.34 UNT.

En cuanto al parámetro de nitratos se alcanzó una eficiencia promedio menor al 20%; en este caso en ninguna fecha evaluada el parámetro ingresó con un valor que excediera la norma, por lo que se puede considerar **adecuada** la eficiencia ya que se reduce en todos los casos el valor del parámetro.

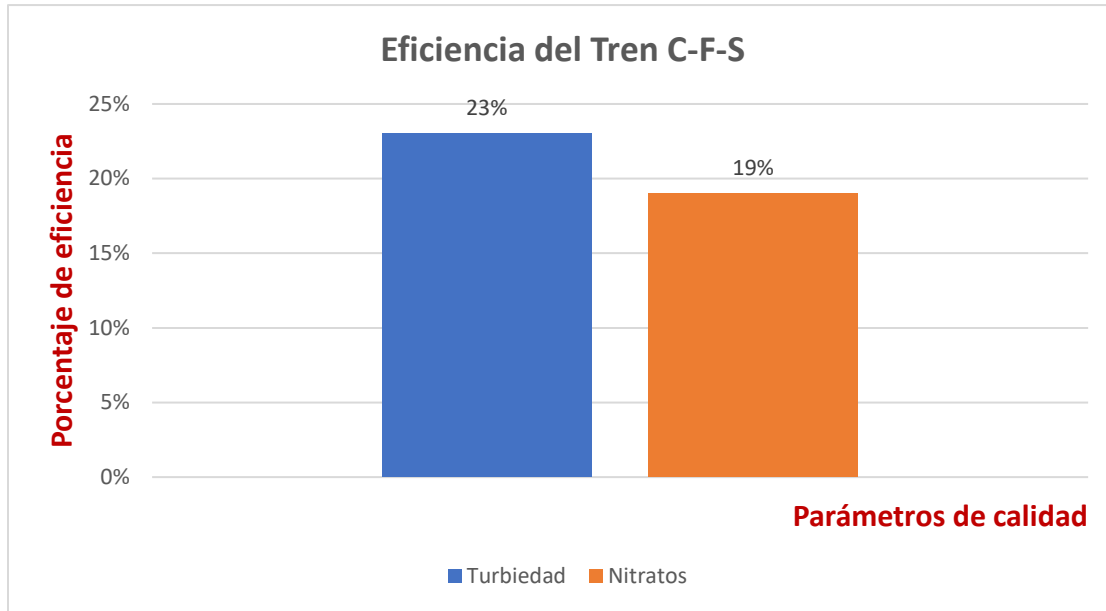


Figura 6.16 Gráfica de barras que muestra los porcentajes de eficiencia de remoción para turbiedad y nitratos.

Respecto al proceso de filtración se evaluaron 4 parámetros: turbiedad, sólidos disueltos totales, aluminio y hierro. En la gráfica 6.17 se observa que para la turbiedad se obtuvo un 18% de eficiencia promedio, en donde se destaca el muestreo con fecha del 19/08/2021, ya que el valor influente al proceso se ubicó en 6.34 UNT y el efluente se reportó en 3.70 UNT, es decir que el proceso de filtración resultó determinante para que la turbiedad alcanzara un valor por debajo del límite de norma, es por esto que se califica como **adecuada** la eficiencia mencionada.

El siguiente parámetro que se observa es el de sólidos disueltos totales, para el cual se obtuvo un 13% de eficiencia promedio; en este caso el valor influente al proceso siempre estuvo por debajo del límite de norma por lo que no se puede establecer la aceptabilidad de la eficiencia. Con respecto a hierro que se obtuvo 18% de eficiencia promedio, se presentó un caso similar en donde los valores influentes al proceso para todas las fechas evaluadas se presentaron por debajo del valor límite, por ello no es posible declarar sobre lo adecuado de la eficiencia, sin embargo, el porcentaje es el más alto junto al parámetro de turbiedad.

Para el caso del aluminio, que no se incluye en la gráfica, pero resulta interesante mencionar desde el punto de vista del funcionamiento del proceso ya que para la fecha del 23/08/2018 se reportó una concentración de 0.197 mg/L en el influente al proceso y en el efluente 0.363 mg/L, es decir que además de incrementarse el valor, este supera el límite de norma de 0.2 mg/L, por lo que el problema de eficiencia de

remoción se convierte en uno de eficacia, en donde el proceso no cumple su objetivo para con el parámetro de aluminio.

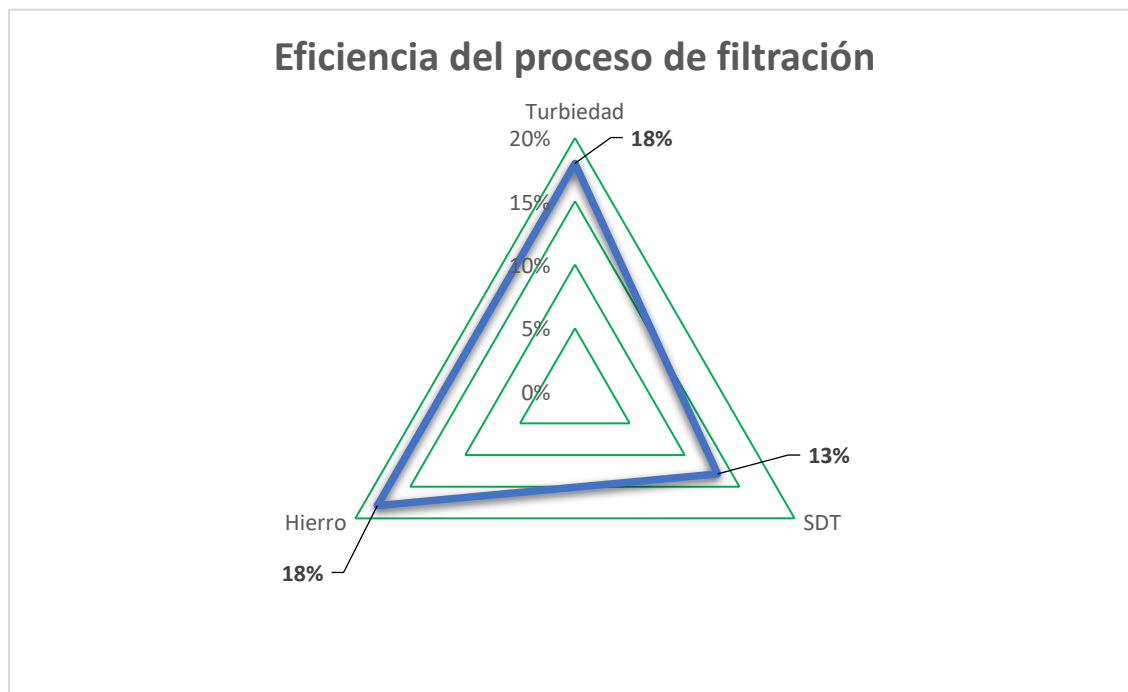


Figura 6.17 Gráfica radial en donde se identifica la remoción de turbiedad, SDT y hierro en el proceso de filtración.

Respecto al proceso de desinfección, en la gráfica 6.18 se observa que para ambos parámetros de coliformes totales y fecales, el porcentaje de eficiencia promedio alcanzado fue de 75%. De manera similar que en temporada de estiaje para la Planta Potabilizadora 1, en temporada de lluvia resulta **ineficiente** e incluso ineficaz el proceso de desinfección ya que no se cumple el objetivo que marca la norma.

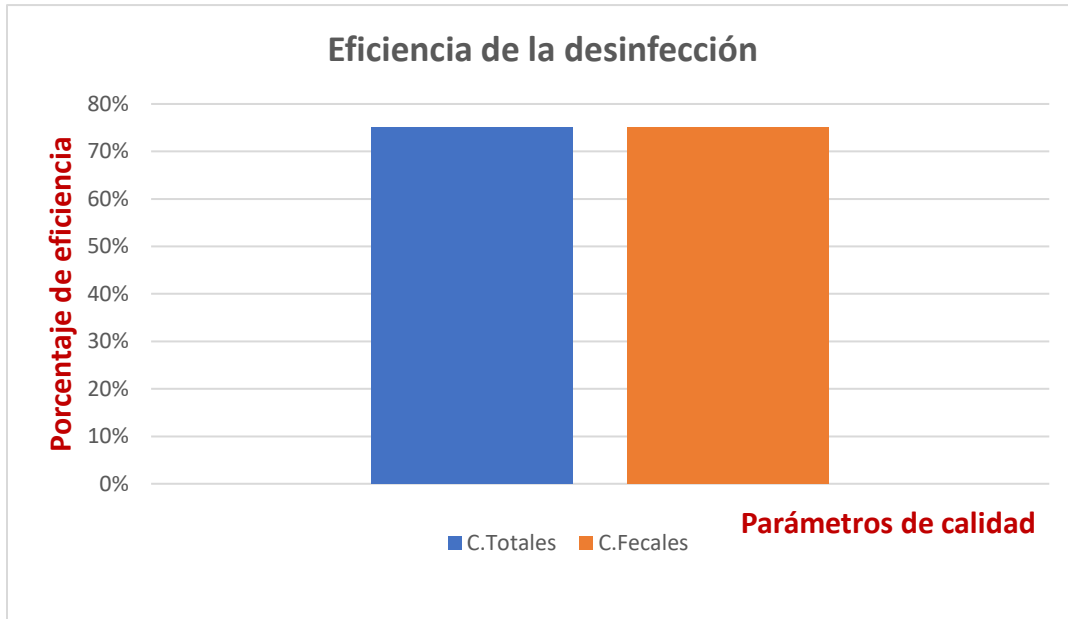


Figura 6.18 Gráfica de barras que muestra los porcentajes de eficiencia de remoción en el proceso de desinfección.

6.7.3 Planta Potabilizadora 2 en temporada de estiaje

A continuación, se presentan los resultados del promedio de eficiencias de remoción para el tratamiento conformado por un tren de filtros rápidos a presión y posteriormente del proceso de desinfección.

En la gráfica 6.19 se muestra los porcentajes de eficiencia promedio para los parámetros: turbiedad, color, aluminio, hierro y manganeso. Para el caso de la turbiedad se obtuvo 73%, el cual se considera **altamente eficiente** debido a que, para todas las fechas consideradas, en el efluente del tren de filtros la turbiedad se reportó por debajo del límite (> 5 UNT) de norma tomando en cuenta que en el 50% de fechas evaluadas este parámetro ingresó con valores arriba del límite de norma.

En cuanto al parámetro de color se calculó 66% de eficiencia, el cual se considera **altamente eficiente**, aun cuando en la mayoría de las fechas evaluadas este parámetro reportó valores de influente por debajo de la norma, pero también se dio el caso, como en la fecha 11/04/2017 donde se reportó un valor de 70 U Pt-Co en el influente y el efluente con 5 U Pt-Co. El siguiente parámetro es aluminio, para el cual se presenta la menor eficiencia de los 5 parámetros evaluados, con 26% la cual no puede evaluarse con precisión debido a que los valores influentes de aluminio estuvieron por debajo del límite de norma (< 0.2 mg/L).

Respecto a hierro, se calculó una eficiencia promedio de 66% la cual se considera **altamente eficiente** ya que permitió que los valores de concentración en el efluente estuvieran en el 100% de las fechas evaluadas por debajo del límite de norma. Un caso similar se presentó para manganeso en donde se calculó un 58% de eficiencia, considerado **altamente eficiente**.

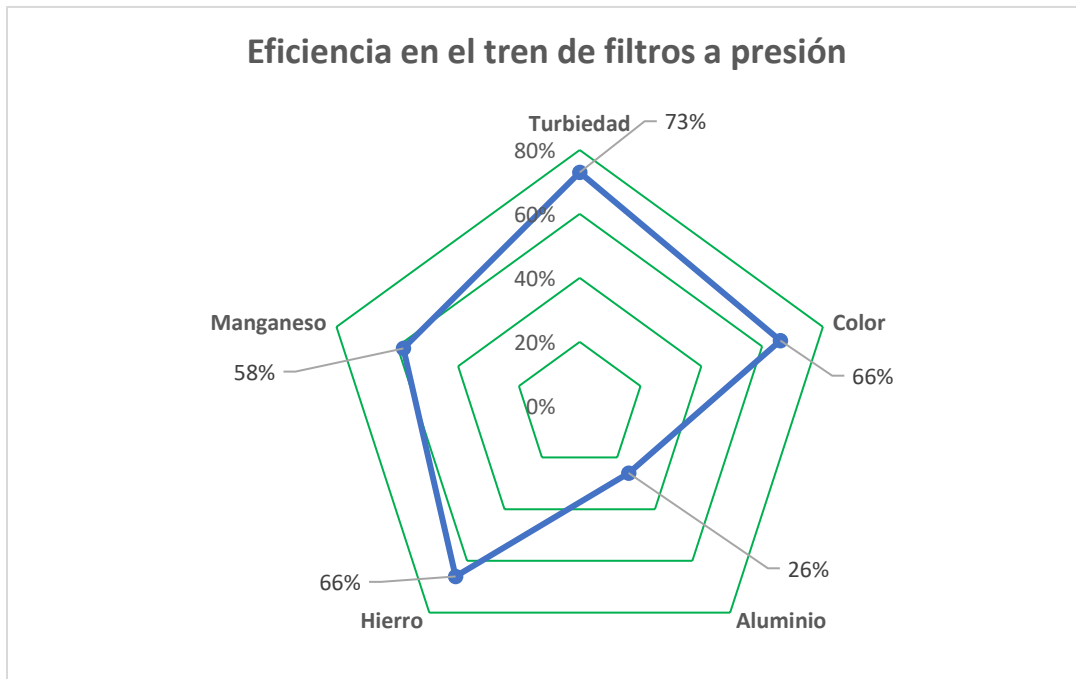


Figura 6.19 Gráfica radial en donde se identifica la remoción de turbiedad, color, aluminio, hierro y manganeso.

Para el caso del proceso de desinfección se obtuvo una eficiencia de 89% tanto para coliformes totales como fecales, y como previamente se comentó, dado la importancia de estos parámetros, se requiere una alta eficiencia del proceso ya que la norma solicita la ausencia de coliformes en agua que se potabiliza para consumo humano.

6.7.4 Planta Potabilizadora 2 en temporada de lluvia

En la gráfica 6.20 se muestra la eficiencia promedio para los parámetros: turbiedad, color, hierro y aluminio. Con respecto a la turbiedad, en donde se obtuvo 51% de eficiencia, se destaca que puede considerarse **adecuada** debido a que la mayoría de fechas evaluadas (5 de 6) obtuvo un valor de turbiedad por debajo de la norma en el efluente del proceso de filtración. El siguiente parámetro, en este caso color, se observa una eficiencia de 63%, que se considera **adecuada** porque en todas las

fechas consideradas (6 fechas) se reportó un valor por debajo del límite de norma. Continuando con aluminio, se calculó 40% de eficiencia, que también se considera **adecuado** puesto que en todas las fechas consideradas se reporta un valor de efluente del proceso por debajo de la norma. Finalizando con hierro, en donde se calculó 48% de eficiencia, se considera **adecuado** en virtud de que los valores de efluente se reportaron dentro del intervalo límite de norma.

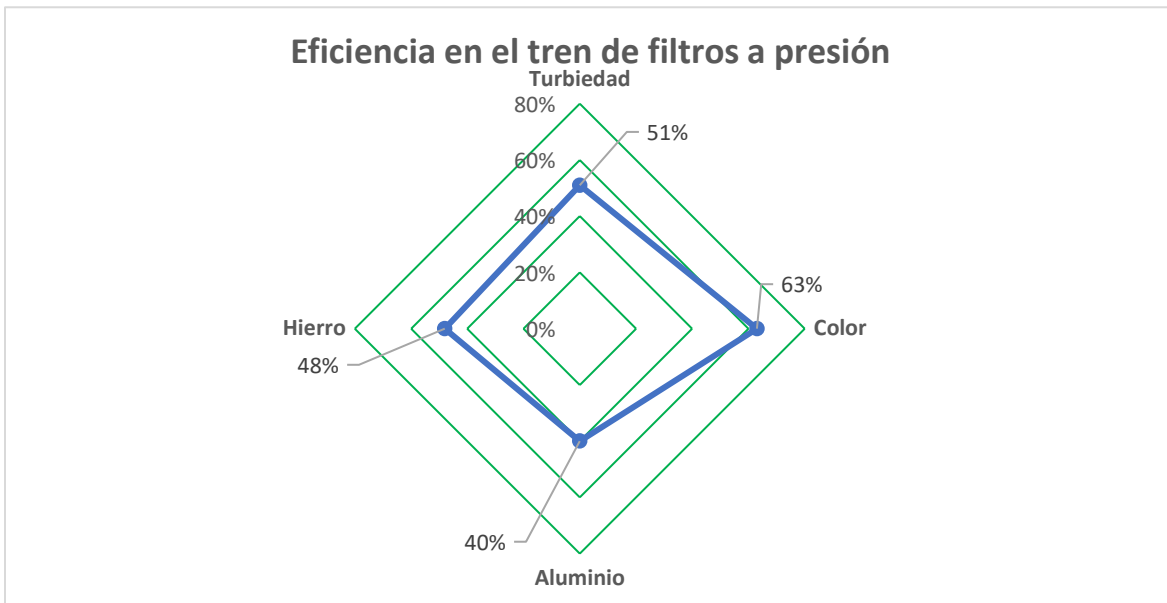


Figura 6.20 Gráfica radial en donde se identifica la remoción de turbiedad, color, aluminio y hierro.

Para el caso del proceso de desinfección se obtuvo una eficiencia de 99% para el caso de coliformes totales que se puede considerar **adecuada** con la reserva de identificar los motivos por los que no se llega a 100% siendo un parámetro de muy alta relevancia para la calidad del agua. Por otra parte, para el caso de coliformes fecales se obtuvo 75% de eficiencia y ya que la norma solicita la ausencia de coliformes en agua, esta se considera **no adecuada**.

7 CONCLUSIONES

La situación actual de las plantas potabilizadoras y la planta de tratamiento de agua residual se estableció mediante la investigación bibliográfica acompañado de la visitad de campo, con lo que se observó principalmente que la PP1 opera bajo el esquema de decisiones empírico, la PP2 cuenta parcialmente con equipo de medición para realizar sus operaciones y la PTAR esta diseñada y parcialmente operada bajo un esquema automatizado. En las 3 plantas de estudio se carece de equipo de medición de parámetros en campo o con el que se cuenta no es actualmente funcional.

Los ICA utilizados son herramientas que sirven calificar la calidad del agua producida en PP's y PTAR lo cual esta influenciado por los parámetros de mayor afectación en el agua evaluada, para el caso de las 3 plantas de estudio fueron:

De acuerdo al índice canadiense la PP1 obtuvo en el 70% de los años evaluados una calificación por lo menos buena, en donde previsiblemente los inconvenientes puntuales se presentan en el proceso de coagulación-floculación (aluminio), así como en la desinfección (coliformes fecales y totales), por otro lado según el índice de Stoner, en el 63% de las fechas evaluadas, se califica el agua como apta para consumo humano, identificando problemas de calidad por exceso de aluminio y presencia de coliformes totales por arriba del norma.

Con base en el índice canadiense la PP2 obtuvo en el 100% de los años evaluados una calificación por lo menos buena, con algunos inconvenientes puntuales en el proceso de desinfección, en cambio de acuerdo con el índice de Stoner sólo para el 58% de las fechas evaluadas se alcanza agua apta para consumo humano, debido principalmente a muestras con detección de coliformes totales, por lo que se hace imperativo la optimización del proceso de desinfección.

Basándose en el índice canadiense la PTAR obtuvo en 100% de los años evaluados una calificación por lo menos buena, con algunos inconvenientes puntuales en el proceso del tanque de aeración, debido a que en todos los años evaluados se tuvo cuando menos una muestra de SST por arriba de la norma.

No se tomaron en cuenta los indicadores de desempeño de la IWA para la evaluación de las plantas debido al tiempo de evaluación necesario para su cálculo, sin embargo se propusieron indicadores de eficiencia de las operaciones unitarias con base en la calidad histórica del agua arrojando lo siguiente:

PP1 en estiaje. Para el tren de tratamiento conformado por las operaciones de coagulación, floculación y sedimentación los parámetros evaluados fueron turbiedad, color y SDT, de los cuales la eficiencia de remoción de turbiedad alcanzó el 13% considerándose no adecuada. Para el proceso de filtración se evaluaron

turbiedad y SDT, en donde la eficiencia para turbiedad alcanzó 16%, considerándose no adecuada. Finalmente para el proceso de desinfección se obtuvo que los parámetros de coliformes totales y fecales alcanzaron eficiencia de remoción de 92% y 67% respectivamente, también considerados como no adecuados. En cuanto a la temporada de lluvias, para el tren de C-F-S los parámetros evaluados fueron turbiedad y nitratos, en donde para turbiedad se calculó 25% de eficiencia, siendo no aceptable. Con respecto al proceso de filtración se evaluó turbiedad, SDT, hierro y aluminio en donde se destaca este último debido a que para algunas fechas puntuales la eficiencia fue de 0% e incluso el efluente presentó un valor mayor que el influente. En el proceso de desinfección se calculó 75% de eficiencia para coliformes totales y fecales.

PP2 en estiaje. Para el tren de filtros rápidos a presión se evaluó turbiedad, color, hierro, manganeso y aluminio, en el caso de los 4 primeros se obtuvieron eficiencias satisfactorias y para aluminio no fue posible establecer una calificación. En cuanto a la desinfección se obtuvo la eficiencia de 89% tanto en coliformes totales como fecales. Respecto a temporada de lluvias, en los filtros rápidos se evaluó turbiedad, color, hierro y aluminio, en donde para los 4 parámetros se calificó como adecuada la eficiencia. Para la desinfección en los parámetros de coliformes totales y fecales se calculó 99% y 75% respectivamente.

8 **REFERENCIAS**

- 1 Abbasi, T., Abbasi, S.A. (2012). Water-Quality Indices. Water Quality Indices. Elsevier, pp. 353–356.
- 2 Alegre, H., Baptista, J. M., Cabrera Jr, E., Cubillo, F., Duarte, P., Hirner, W., & Parena, R. (2017). Performance indicators for water supply services. IWA publishing.
- 3 Alegre, H., Cabrera, E., & Merkel, W. (2008). Current challenges in performance assessment of water services. Water Utility Management International,3(3), pp. 6-7.
- 4 Alegre, H., Melo, B., & Cabrera, E. (2006). Performance Indicators for Water Supply Services (2ed.). London, England: IWA Publishing.
- 5 Ball, R. Church, R. (1980). Water Quality Indexing And Scoring. Journal Of The Environmental Engineering Division, American Society Of Civil Engineers, 106, EE4, pp. 757-771.
- 6 Berger, A. R., & Hodge, R. A. (1998). Natural change in the environment: a challenge to the pressure-state-response concept. Social Indicators Research, 44(2), pp. 255-265.
- 7 Brown R., Mcclelland N., Deininger R., Tozer R. (1970). "A Water Quality Index- Do We Dare?" Water And Sewage Works. October, pp. 339-343
- 8 Canadian Council of Ministers of the Environment. (2001). Canadian Water Quality Index 1.0 Technical Report. Canadian Environmental Quality Guidelines.
- 9 Campos, A. (2015). Potabilización del agua para suministro en la ciudad de México. Tesina de Especialidad. Universidad Nacional Autónoma de México.
- 10 Canepa, L., & Pardón, O. (2008). Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual III: evaluación de plantas de tecnología apropiada.
CEPAL. (2006). Indicadores de Desempeño en el Sector Público. Curso-Seminario "Políticas Presupuestarias y Gestión por Resultados". Recuperado de: [Indicadores de Desempeño.ppt \(cepal.org\)](#)
- 11 CEPAL. (2009). Lineamientos metodológicos para la construcción de indicadores de desempeño. Curso Internacional: Planificación Estratégica, Preparación y Evaluación de Proyectos. Recuperado de: [INDICADORESDESEMPENOARMIJOM \(cepal.org\)](#)
- 12 CONAGUA. (2017). Cap. 3 Potabilización, desinfección y tratamiento. En Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, pp. 30-51. Ciudad de México, México.

- 13 CONAGUA. (2021). Cap. 3 Potabilización, desinfección y tratamiento. En Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Ciudad de México, México.
- 14 CONAGUA. (2018). Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación, Ciudad de México, México: SEMARNAT.
- 15 CONAGUA. (2021). Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación, Ciudad de México, México: SEMARNAT.
- 16 CONAGUA. (2018). Estadísticas del agua en México, Edición 2018
- 17 CONAGUA. (2019). Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento.
- 18 CONAGUA & SEMARNAT. (2014). Programa Nacional Hídrico 2014-2018. Diario Oficial de la Federación.
- 19 CONAGUA & SEMARNAT. (2020). Programa Nacional Hídrico 2019-2020. Diario Oficial de la Federación.
- 20 Crónica. (2013). “Inaugura Mancera planta de tratamiento en Magdalena Contreras”. Recuperado de: <https://www.cronica.com.mx/notas/2013/798404.html#>
- 21 Cude, C. (2001). Oregon Water Quality Index: A Tool For Evaluating Water Quality Management Effectiveness. The Journal Of The American Resources Association 37(1), pp. 125-138.
- 22 Dadolahi-Sohrab, A., Arjomand, F., Fadaei-Nasab, M. (2012). Water quality index as a simple indicator of watersheds pollution in southwestern part of Iran. Water Environmental. J. 26, pp. 445–454.
- 23 Davies, J. M. (2006). Application and tests of the Canadian water quality index for assessing changes in water quality in lakes and rivers of central North America. Lake and Reservoir Management, 22(4), pp. 308-320.
- 24 Domínguez, M. (2021). Día cero: crisis de agua en México más cerca que nunca. Colegio de México.
- 25 Dunn, G., & Bakker, K. (2011). Fresh water-related indicators in Canada: An inventory of indicators. Canadian Water Resources Journal, 36(2), pp. 135-148.
- 26 Edzwald, J., & American Water Works Association. (2011). Water quality & treatment: a handbook on drinking water. McGraw-Hill Education.
- 27 Fawell, J., Bailey, K., Chilton, J., Dahi, E., & Magara, Y. (2006). Fluoride in drinking-water. IWA publishing.
- 28 Gobierno del Distrito Federal. (2005). Programa Delegacional de Desarrollo Urbano para la Delegación La Magdalena Contreras del Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal.

- 29 González, A., Hernández, L., Perló, M. & Zamora, I. (2010). Rescate de ríos urbanos: Propuestas conceptuales y metodológicas para la restauración y rehabilitación de ríos. México.
- 30 Hallock, D. 1990. Results Of The 1990 Water Quality Index Analysis. Washington. Department Of Ecology, Memorandum To Dick Cunningham, July 18, 1990.
- 31 Hansen, M. & Rodríguez, J. (2019). Indicadores de Gestión Prioritarios en Organismos Operadores. Subcoordinación de Hidráulica Urbana. IMTA.
- 32 Health Canada. (2013). Guidelines for Canadian Drinking Water Quality: Guideline Technical Document–Nitrate and Nitrite. Water and Air Quality Bureau, p. 128.
- 33 Hezri, A., & Dovers, S.R. (2006). Sustainability indicators, policy, and governance: Issues for ecological economics. *Ecological Economics*, 60(1), pp. 86-99.
- 34 Horton, R.K. (1965). An index-number system for rating water quality. *J. Water Pollut. Control Fed.* 37, 300–306.
- 35 INEGI. (2020). Censo de Población y Vivienda. Recuperado de: https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/territorio/div_municipal.aspx?tema=me&e=09
- 36 INEGI. (2016). Panorama Sociodemográfico de la Ciudad de México. Recuperado de: https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/inter_censal/panorama/702825082178.pdf
- 37 ITA-Universidad Politécnica de Valencia. SIGMA. Recuperado de: <https://www.sigmalite.com/sigma-es.php>
- 38 Kannel, P.R., Lee, S., Lee, Y.-S., Kanel, S.R., Khan, S.P. (2007). Application of Water Quality Indices and Dissolved Oxygen as Indicators for River Water Classification and Urban Impact Assessment. *Environ. Monit. Assess.* 132, pp. 93–110.
- 39 Khan, A.A., Paterson, R., Khan, H. (2004). Modification and application of the Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) for the communication of drinking water quality data in Newfoundland and Labrador. *Water Qual. Res. J. Canada*.
- 40 Lumb, A., Sharma, T.C., Bibeault, J.-F. (2011). A Review of Genesis and Evolution of Water Quality Index (WQI) and Some Future Directions. *Water Quality Expo. Heal.*
- 41 Lumb, A., Halliwell, D., Sharma, T. (2006). Application of CCME water quality index to monitor water quality: A case study of the Mackenzie River basin, Canada. *Environmental Monitoring and Assessment* .113, pp. 411–429.

- 42 Matos, R., Cardoso, A., Ashley, R., Duarte, P., Molinari, A., & Schulz, A. (2003). Performance indicators for wastewater services. IWA publishing.
- 43 Martín, A., Avilés, M., Flores, L., González, A., Montellano, L., Piña, M., Rivera, M., Sandoval, L., Tirado, M. (1998). Manual de Evaluación de Plantas Potabilizadoras. IMTA, Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua.
- 44 Medina, E., Rojas, G., Rodríguez, A., & Fabila, M. (2009). Análisis básico del reúso de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales en suelos de pradera del Parque Nacional Nevado de Toluca. Quivera. Revista de Estudios Territoriales, 11(2), pp. 35-51.
- 45 Monsiváis, B. (2014). Programa de rescate integral del Río Magdalena en México D.F. Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Cataluña.
- 46 Moral, L., García, A., Monrosi, L., Casas, J., Thomas, A., Martínez, J., Morales, L., Peña, M., Sastre, J., Talavera, A., Mejías, A., Navarro, L. (2015). Guía para la incorporación de la gestión sostenible del agua en áreas urbanas.
- 47 Nápoles, S. (2021). Análisis histórico y sociocultural del recurso hídrico de la subcuenca del río magdalena: aprovechamiento sostenible desde el ecoturismo. Tesis de Maestría: Universidad Nacional Autónoma de México.
- 48 OECD. (2002). Glosario de los principales términos sobre evaluación y gestión basada en resultados. Grupo de trabajo del CAD sobre evaluación de la Ayuda. Evaluation Aid and Effectiveness, (6).
- 49 Organización Mundial de la Salud. (2018). Guías para la calidad del agua de consumo humano. Ginebra, Suiza.
- 50 Ott, W. (1978). Environmental Indices, Theory and Practice, AA Science, Ann Arbor, Michigan.
- 51 Pedrozo, A. (2022). Impactos socioambientales derivados del estrés hídrico y los cambios en el almacenamiento de agua. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- 52 Perló, M. & Zamora, I. (2017). Perspectivas ambientales sobre la contaminación y la recuperación del río magdalena en la Ciudad de México. Revista Interamericana de Contaminación Ambiental. 33 (3), pp. 377-391.
- 53 Pham, T.M.H., Sthiannopkao, S., Ba, D.T., Kim, K.W. (2011). Development of Water Quality Indexes to Identify Pollutants in Vietnam's Surface Water. J. Environmental Engineering. 137, pp. 273–283.
- 54 Programa Mundial de las Naciones Unidas de Evaluación de los Recursos Hídricos. (2018). Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2018: soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua. Recuperado de: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367304>

- 55 (2020). Programa provisional de gobierno, Alcaldía Magdalena Contreras. Recuperado de: <https://mcontreras.gob.mx/programa-provisional-de-gobierno-2019-2020/>
- 56 Qsim, S. (1998). Wastewater Treatment Plants: Planing, Design and Operation. Second Edition. CRC Press.
- 57 Quadros, S., João Rosa, M., Alegre, H., & Silva, C. (2010). A performance indicators system for urban wastewater treatment plants. *Water Science and Technology*, 62(10), pp. 2398-2407.
- 58 Romero, H., García, J. & Janetti, J. (2010). Las vicisitudes de las plantas de tratamiento de aguas residuales en México, CONAGUA. Ciudad de México, México.
- 59 (2018). Rescata GCDMX último río vivo de la ciudad. *Comunicación CDMX*. Recuperado de: <http://comunicacion.cdmx.gob.mx/noticias/nota/rescata-gcdmx-ultimo-rio-vivo-de-la-ciudad>
- 60 SACMEX. (2020). Programa Estratégico para Garantizar el Derecho al Agua. 2020-2024. Recuperado de: <https://www.sacmex.cdmx.gob.mx/storage/app/media/Proyectos/programa-estrategico-2020-2024.pdf>
- 61 Said, A., Stevens, D.K., Sehlke, G., 2004. An innovative index for evaluating water quality in streams. *Environmental Management*.
- 62 Saffran, K., Cash, K., & Hallard, K. (2017). CCME Water Quality Index User's Manual 2017 Update. Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life.
- 63 Saffran, K., Environment, A., Cash, K., Canada, E. (2001). Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life CCME WATER QUALITY INDEX 1 . 0 User ' s Manual. Quality 1–5.
- 64 SEMARNAT. (2020). DECRETO por el que se aprueba el Programa Nacional Hídrico 2020-2024. Diario Oficial de la Federación
- 65 Secretaría del Medio Ambiente-CDMX. (2012). Programa de rescate integral de los ríos magdalena y eslava. México.
- 66 SEMARNAT. Glosario. Recuperado de http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/approot/dgeia_mce/html/RECUADRO_S_INT_GLOS/D3_AGUA/D3_GLOS_AGUA.htm
- 67 Silva, C., & Rosa, M. (2015). Energy performance indicators of wastewater treatment: a field study with 17 Portuguese plants. *Water Science and Technology*, 72(4), pp. 510-519.
- 68 Štambuk-Giljanović, 2003. Comparison of Dalmatian Water Evaluation Indices. *Water Environmental Research*. 75, pp. 388–405.
- 69 Steinhart, C.E., Schierow, L.-J., Sonzogni, W.C., 1982. An environmental quality index for the great lakes. *JAWRA J. Am. Water Resources Association*.

- 70 Stoner, J. D. (1978). Water-quality indices for specific water uses. Department of the Interior, Geological Survey.
- 71 Sullivan, C. (2002). Calculating a water poverty index. *World development*, 30(7), pp. 1195-1210.
- 72 Tiburcio, A. & Perevochtchikova, M. (2020). Propuesta de un marco de indicadores de agua urbana para la Ciudad de México, 2005-2018. *Tecnología y ciencias del agua*.
- 73 Tiburcio, A. (2013). Desarrollo de un marco de indicadores para la gestión del agua urbana. El caso de la Ciudad de México. Tesis de doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México.
- 74 Uddin, M. G., Nash, S., & Olbert, A. I. (2021). A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecological Indicators*, 122.
- 75 UN-WWAP, United Nations, World Water Assessment Program. (2006). *Water a shared responsibility*. Paris, France: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- 76 UNEP/WHO. (1996). *Water Quality Monitoring - A Practical Guide To Design And Implementation Of Freshwater Quality Studies And Monitoring Programmes*.
- 77 Universidad Politécnica de Valencia. (2007). *Sistema de Indicadores para la Gestión de Redes de Agua Potable*. España.
- USNRC (2006) *Fluoride in drinking water: A scientific review of EPA's standards*. Washington, DC, Consejo Nacional de Investigación de los Estados Unidos, National Academies Press.

ANEXO A

Información solicitada a los organismos operadores del programa PIGOO

1. NÚMERO TOTAL DE TOMAS REGISTRADAS. Este concepto se refiere a las tomas registradas actualmente por el Organismo Operador, es decir todas las tomas domésticas, las comerciales, las industriales, y públicas, etc.
2. NÚMERO DE TOMAS DEL PADRÓN ACTIVAS (CORROBORADAS EN SITIO). Aquí se deben poner el número de tomas que se conoce con seguridad de que si existen. Puede ser diferente al dato solicitado en el punto uno, ya que se pueden tener tomas domiciliarias registradas en el padrón de usuarios, que en algún momento dejaron de existir y no se actualizaron en el mismo.
3. NO. DE TOMAS CON SERVICIO CONTINUO. Aquí se deben poner el número de tomas que tienen servicio las 24 horas del día todo el año.
4. TAMAÑO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN TOTAL (km², km). En esta celda se debe de capturar el área que atiende el organismo operador, para calcularlo se puede hacer una envolvente a la localidad y calcular el área de la misma. En caso de contar con el dato de longitud (km) de red de distribución y conducción, favor de anotarlo.
5. TAMAÑO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN ACTUALIZADA (km², km). En este dato se debe de poner el área que se conoce de la localidad. Es decir, aquella que se ha verificado en sitio. En caso de contar con el dato de longitud (km) de red de distribución y conducción, favor de anotarlo.
6. REHABILITACIÓN DE TUBERÍA (km). Longitud total de la red primaria y secundaria de agua potable que se sustituye y/o que se repara al año.
7. REHABILITACIÓN DE TOMAS DOMICILIARIAS (Número). Número total de tomas domiciliarias que se sustituyen o reparan al año.
8. HORAS CON SERVICIO TANDEADO (horas/día). En este rubro se debe indicar el número de horas promedio con que se suministra el agua a los usuarios con servicio tandeado. Si existe servicio continuo para todos los usuarios, dejar sin contestar este punto.
9. NÚMERO DE MICROMEDIDORES. No. de micromedidores instalados en los domicilios que se considera se encuentran: Instalados, funcionando en buen estado y su frecuencia de lectura.
10. NÚMERO DE CAPTACIONES. Es el número de captaciones (pozos, manantiales, ríos, presas, etc.) que se tienen para el abastecimiento de las localidades atendidas y que son operados por el Organismo operador.
11. NO. DE MACROMEDIDORES. Indicar el número de macromedidores instalados en las captaciones que se considera se encuentran: Instalados y funcionando en buen estado, así como su frecuencia de lectura.

12. NÚMERO DE FUGAS OCURRIDAS Y REPARADAS. Indicar el Total de fugas reparadas en el año, tanto en redes de distribución como en tomas domiciliarias, cajas de válvulas y tanques de almacenamiento.
13. NO. DE EMPLEADOS EN EL ORGANISMO OPERADOR. Todos los empleados que laboran en el Organismo Operador, incluyen empleados por honorarios, por base, sindicalizados y temporales.
14. NÚMERO DE EMPLEADOS DEDICADOS AL CONTROL DE FUGAS. Es el total de empleados de las cuadrillas dedicadas a la reparación y control de fugas en redes de distribución, tomas domiciliarias, cajas de válvulas y tanques de almacenamiento.
15. NÚMERO DE RECLAMACIONES DE USUARIOS. Indicar la cantidad anual de reclamaciones que hacen usuarios al organismo operador por problemas de fallas en redes de agua potable, fugas en tomas domiciliarias, falta de suministro de agua, bajas presiones en la red, etcétera.
16. NÚMERO DE USUARIOS CON PAGO A TIEMPO (2 MESES). Es el número de usuarios que pagan su servicio en menos de dos meses una vez que le llega su recibo de agua.
17. USUARIOS ABASTECIDOS CON PIPAS (Número de casas). En este rubro se debe indicar la cantidad de usuarios o habitantes que son suministrados con pipas y/o por toma pública y que están a cargo del organismo operador.
18. COBERTURA DE AGUA POTABLE (%). Es el porcentaje de la población que cuenta con servicio de agua potable en la localidad.
19. COBERTURA DE ALCANTARILLADO (%). Es el porcentaje de la población que cuenta con servicio de alcantarillado sanitario.
20. VOLUMEN ANUAL DE AGUA POTABLE PRODUCIDO (m³). Volumen total de agua que se produce en un año, deben de considerarse las captaciones que no tengan medición, según estudios previos. Si no se tiene el dato se debe de poner "dato no disponible". Este Volumen reportado debe ser previo a los procesos de potabilización.
21. VOLUMEN DE AGUA CONSUMIDO (m³). Es la suma de los Volúmenes de agua registrada por los lecturistas en los medidores domiciliarios, consumos medidos a los usuarios comerciales e industriales, durante todo el año. En caso de que estos volúmenes sean obtenidos mediante estimaciones, debe indicarse el porcentaje de este que se obtiene de esta manera.
22. VOLUMEN DE AGUA FACTURADO (m³). Volumen total de agua facturada en el año, para todos los tipos de usuario (comercial, doméstico, industrial, usos públicos, etcétera).
23. VOLUMEN DE AGUA COBRADO (m³). Es el volumen total de agua pagado por los diferentes tipos de usuario (doméstico, comercial, industrial, etc.) en un año, cuando más puede ser igual al volumen facturado.
24. VOLUMEN ANUAL DE AGUA RESIDUAL TRATADO (m³). Volumen total de agua que ha recibido tratamiento, si no existe planta se debe de

- especificar que no se tiene planta o bien “cero”, si existe y no se sabe el dato se debe de poner “si existe, pero el dato no está disponible”.
25. DINERO FACTURADO POR VENTA DE AGUA (\$). Es el dinero total que se facturaron por venta de agua en un año. Puede ser igual al volumen facturado por el valor promedio del metro cúbico del agua.
 26. DINERO FACTURADO POR VENTA DE AGUA (\$). Es el dinero total que se facturaron por venta de agua en un año. Puede ser igual al volumen facturado por el valor promedio del metro cúbico del agua.
 27. TARIFA MEDIA (\$/m³). Es la tarifa promedio por metro cubico para un consumo de 25m³, si se cuenta con información de la tarifa media de acuerdo al tipo de uso (Doméstico, Comercial, Industrial y Público), favor de anotarlas.
 28. INGRESOS TOTALES (\$). Es el total de dinero recaudado por el Organismo Operador por concepto de: venta de agua, servicio de alcantarillado y saneamiento en un año.
 29. EGRESOS TOTALES (\$). Costo total desglosados; por ejemplo, costos de energía eléctrica, personal, materiales, etcétera. Puede llegar a ser igual a la suma de los costos de operación, mantenimiento y administración.
 30. COSTOS DE OPERACIÓN, MANTENIMIENTO Y ADMINISTRACIÓN (\$). Es el total de los costos necesarios para la operación del sistema. De ser posible desglosados en costos de operación, mantenimiento y administración. Si se cuenta con información desglosada de éstos costos, favor de anotarlos.
 31. INVERSIÓN TOTAL (\$). Cantidad de dinero al año que invierte el organismo operador en infraestructura hidráulica, como instalación de: red de agua potable, red de alcantarillado, tomas domiciliarias, Plantas de tratamiento o potabilización, etcétera.
 32. POBLACIÓN ATENDIDA (Hab). Representa el número de habitantes atendidos por el organismo operador.
 33. HABITANTES POR CASA (Hab). Es el número promedio de habitantes por casa en el área de cobertura del organismo operador.
 34. CALIDAD DEL AGUA (Número). Número de muestreos para análisis de calidad de agua.
 35. PRUEBAS NOM–127. Pruebas que establece la Norma Oficial Mexicana de los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano. Indicar el número de pruebas NOM Satisfactorias obtenidas.
 36. PIB. Producto Interno Bruto.
 37. CONSUMO ENERGÉTICO TOTAL EN EL SISTEMA (kWh). kWh total reportado en todo el sistema.
 38. COSTO TOTAL DE ENERGÍA (\$). Costo TOTAL de los kWh utilizados.
 39. INVERSIONES EN INFRAESTRUCTURA. Cantidad que se ha invertido en mejoramiento para las áreas de agua potable, alcantarillado, saneamiento, institucional (comercial, administrativa y financiera). Si no

se conoce el desglose y solo se cuenta con el dato total indicarlo en TOTAL.

Tabla A.1 Listado de 32 indicadores de desempeño del programa PIGOO 2019

Indicador	Variables	Fórmula	Objetivo
OPERACIÓN			
1) RI: Redes e instalaciones (%)	A_{ACT} : Área de la red de distribución actualizada (km ²) A_{RED} : Área total de la red de distribución (km ²)	$RI = \frac{A_{ACT}}{A_{RED}} * 100$	Evalúa el conocimiento de la infraestructura existente.
2) ReTub : Rehabilitación de tubería (%)	L_{TubRe} : Longitud de tubería rehabilitada (km) L_{TubTo} : Longitud total de la tubería de distribución (km)	$R_{ETUB} = \frac{L_{TubRe}}{L_{TubTo}} * 100$	Evaluar la capacidad del Organismo Operador para mantener actualizada la red de agua potable.
3) ReTom: Rehabilitación de tomas domiciliarias (%)	T_{omRe} : Número de Tomas rehabilitadas T_{REG} : No. total de Tomas Registradas	$R_{ETOM} = \frac{T_{omRe}}{T_{REG}} * 100$	Evaluar la capacidad del Organismo Operador de mantener actualizada la infraestructura de tomas domiciliarias
4) T_{SC} : Tomas con servicio continuo (%)	T_{REG} : No. total de Tomas Registradas T_{CONT} : No. de tomas con servicio continuo	$T_{SC} = \frac{T_{CONT}}{T_{REG}} * 100$	Evalúa la continuidad en el servicio de agua.
5) MACRO: Macromedición (%)	M_{AC} : No. de macromedidores funcionando en captaciones C_{APT} : No. de captaciones	$MACRO = \frac{M_{AC}}{C_{APT}} * 100$	Conocimiento real de agua entregada.
6) MICRO: Micromedición (%)	M_{IC} : No. de micromedidores funcionando T_{REG} : No. de tomas registradas	$MICRO = \frac{M_{IC}}{T_{REG}} * 100$	Capacidad de medir el agua consumida por los usuarios
7) V_{TRAT} : Volumen tratado (%)	V_{ART} : Vol. anual de agua residual tratado (m ³) V_{APP} : Vol. anual de agua potable producido (m ³)	$V_{TRAT} = \frac{V_{ART}}{V_{APP} * 0.70} * 100$	Conocer la Cobertura de tratamiento.
8) Dot: Dotación (l/h/d)	Hab : No. de habitantes de la ciudad, según el censo INEGI	$Dot = \frac{V_{APP} * 1000}{Hab * 365}$	Evaluar la cantidad asignada de agua
	V_{APP} : Vol. anual de agua potable producido (m ³)		según la extracción total

Tabla A1. Continuación...

9) Consumo (l/h/d)	V _{con} : Volumen de agua consumido (m ³ /año) Hab: Habitantes	$Consumo = \frac{V_{con} * 1000}{365 * Hab}$	Estimar el consumo real de agua sin tomar en cuenta las pérdidas por fugas en la red y tomas domiciliarias.
10) Tandeo: Horas con servicio de agua en las zonas de tandeo (%)	H _{tandeo} : Horas con servicio tandeado (horas/día)	$Tandeo = H_{tandeo}$	Horas que los usuarios con servicio tandeado recibe el agua.
11) PU: Padrón de Usuarios (%)	T _{CORR} : No. de tomas del padrón activas T _{REG} : No. de tomas registradas	$PU = \frac{T_{CORR}}{T_{REG}} * 100$	Evalúa el registro confiable de usuarios.
12) U _{PAT} : Usuarios con pago a tiempo (%)	N _{UP} : No. de usuarios con pago a tiempo (2 meses) T _{REG} : No. total de Tomas Registradas	$U_{PAT} = \frac{N_{UP}}{T_{REG}} * 100$	Conocimiento del pago del servicio.
13) P _{IPAS} : Usuarios abastecidos con pipas (%)	U _{pipas} : Número de Usuarios que se abastecen con pipas. T _{REG} : No. total de Tomas Registradas	$P_{IPAS} = \frac{U_{pipas}}{T_{REG}} * 100$	Porcentaje de los usuarios que son abastecidos con pipas y/o tomas públicas.
14) RECLA: Reclamaciones (Por cada mil tomas)	R _U : No. de reclamaciones de usuarios T _{REG} : No. total de Tomas Registradas	$RECLA = \frac{R_U * 1000}{T_{REG}}$	Evalúa la calidad del servicio en lo referente a la satisfacción del cliente.
15) E _{MT} : Empleados por cada mil tomas (Núm)	N _{EOD} : No. de empleados en el organismo operador T _{REG} : No. de Tomas Registradas	$E_{MT} = \frac{N_{EOD} * 1000}{T_{REG}}$	Expresa el uso eficiente de la fuerza laboral.
16) E _{DF} : Empleados dedicados al control de fugas (trabajadores/fugas)	N _{EDF} : No. de empleados dedicados al control de fugas N _{FOR} : No. de fugas ocurridas y reparadas	$E_{DF} = \frac{N_{EDF} * 1000}{N_{FOR}}$	Evaluar la capacidad existente en atención de fugas
17) Agua: Cobertura de agua potable (%)	Reportado por el Organismo Operador	Valor reportado de forma directa	Porcentaje de la población que cuenta con servicio de agua potable
18) Agua: Cobertura de alcantarillado (%)	Reportado por el Organismo Operador	Valor reportado de forma directa	Es el porcentaje de la población que cuenta con servicio de alcantarillado sanitario.

Tabla A.1 Continuación...

Indicador	Variables	Fórmula	Objetivo
OPERACIÓN			
19) PLR: Pérdidas por Longitud de red (m³/Km)	V_{CON} = Volumen Anual Consumido V_{APP} = Volumen Anual Producido L_{ONG} = Longitud Red Distribución	$P_{LR} = \frac{V_{APP}-V_{CON}}{L_{ONG}}$	Determinar Pérdidas de agua en la red por kilometro
20) PPT: Pérdidas por Toma (m³/Toma)	V_{APP} = Volumen anual producido V_{CON} = Volumen anual consumido T_{REG} = No. de tomas registradas	$P_{PT} = \frac{V_{APP}-V_{CON}}{T_{REG}}$	Evalúa el volumen prorrateado de pérdidas por toma.
21) CE: Consumo energético en sistemas de agua potable (kWh/m³)	kWh= Consumo energético total en el sistema (kWh) V_{APP} = Volumen anual producido	$CE = kWh/V_{APP}$	Conocer el consumo promedio considerando como parámetro de normalización el volumen producido total.
22) CCE: Relación del costo total de energía por metro cúbico producido (\$ kWh/m³);	\$ kWh= Costo total de energía (\$kWh) V_{APP} = Volumen anual producido	$CCE = \frac{\$ kWh}{V_{APP}}$	Conocer el costo promedio de energía por cada metro cúbico producido.

Tabla A.1 Continuación del listado en la sección de indicadores financieros

Indicador	Variables	Fórmula	Objetivo
FINANCIEROS			
23) C_{VPP} : Costos entre volumen producido (\$/m³)	C_{OMA} : Costos (Operación, Mantenimiento y Administración) V_{APP} : Vol. anual de agua potable producido (m³)	$C_{VPP} = \frac{C_{OMA}}{V_{APP}}$	Evaluar los costos generales.
24) $ReTa$: Relación de trabajo (%)	E_{Tot} : Egresos Totales (\$) I_{Tot} : Ingresos Totales (\$)	$ReTa = \frac{E_{Tot}}{I_{Tot}} * 100$	Relación Egresos e Ingresos
25) Autosuf: Autosuficiencia (%)	I_{agua} : Ingresos por servicio de agua, no incluye cartera vencida (\$) E_{total} : Egresos Totales (\$)	$Autosuf = I_{agua} / E_{total}$	Relación Ingresos por servicio de agua y Egresos totales
26) $INVPIB$: Relación Inversión PIB (%)	$InvTot$: Inversión total (\$) PIB: Producto Interno Bruto	$INVPIB = \frac{InvTot}{PIB} * 100$	Porcentaje de inversión que realiza el organismo operador con respecto al producto interno bruto de la ciudad.
27) RCT : Relación Costo-Tarifa	CVP : Costo por Volumen Producido TM: Tarifa Media Domiciliaria	$R_{CT} = TM / CVP$	Conocer cuál es la relación entre el costo de producción y venta del agua.

Tabla A.1 Continuación del listado en la sección de eficiencias

Indicador	VARIABLES	Fórmula	Objetivo
EFICIENCIAS			
28) E_{FIS1} : Eficiencia física 1 (%)	V_{CON} : Vol. de agua consumido (m ³) V_{APP} : Vol. anual de agua potable producido (m ³)	$E_{FIS1} = \frac{V_{CON}}{V_{APP}} * 100$	Evalúa la eficiencia entre lo consumido y lo producido
29) E_{FIS2} : Eficiencia física 2 (%)	V_{AF} : Vol. de agua facturado (m ³) V_{APP} : Vol. anual de agua potable producido (m ³)	$E_{FIS2} = \frac{V_{AF}}{V_{APP}} * 100$	Evalúa la eficiencia entre lo facturado y lo producido
30) E_{COM} : Eficiencia comercial (%)	V_{AP} : Vol. de agua pagado (m ³) V_{AF} : Vol. de agua facturado (m ³)	$E_{COM} = \frac{V_{AP}}{V_{AF}} * 100$	Evalúa la eficiencia entre la facturación y el pago de la misma
31) E_{COB} : Eficiencia de cobro (%)	P_{VEN} : Ingreso por venta de agua (\$) P_{FAC} : Dinero facturados por venta de agua (\$)	$E_{COB} = \frac{P_{VEN}}{P_{FAC}} * 100$	Evalúa la eficiencia de cobro del agua
32) E_{global} : Eficiencia Global (%)	E_{FIS} : Eficiencia física 2 E_{COM} : Eficiencia comercial	$E_{global} = E_{FIS2} * E_{COM}$	Se calcula la eficiencia global del sistema de agua potable