



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

**METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UNA PLANTA
TRATADORA DE UN EFLUENTE SECUNDARIO DESTINADO A LA RECARGA DE
ACUÍFEROS**

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

PRESENTA:
FLOR STEPHANIE LÓPEZ HERNÁNDEZ

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

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

DRA. CLEMENTINA RITA RAMÍREZ CORTINA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA, AZCAPOTZALCO

DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ
UNAM, FACULTAD DE INGENIERÍA

DR. IGNACIO MONJE RAMÍREZ
UNAM, INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, OCTUBRE DE 2021.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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. Ignacio Monje Ramírez

1^{er} Vocal: Dra. Clementina Rita Ramírez Cortina

2^{do} Vocal: Dr. Enrique César Valdez

3^{er} Vocal: Dra. Alma Concepción Chávez Mejía

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

TUTORA DE TESIS:

Dra. Alma C. Chávez Mejía

FIRMA

DEDICATORIA

A mis padres, Sofía Hernández Vasquez y Alejandro López Casique, y mi hermano, Manuel Alejandro López Hernández, sabiendo que jamás encontraré la forma de agradecer su constante apoyo y confianza, espero comprendan que mis ideales, esfuerzos y logros han sido también suyos e inspirados en ustedes.

A mi Maestro favorito, Roberto Zenil Hernández, tú has confiado en mí antes que yo misma. A lo largo del posgrado fuiste mi mayor inspiración y lo seguirás siendo por el resto de mi vida.

Los amo,

Stephie.

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a la Virgen, gracias porque todo este tiempo han sido mi fortaleza y junto a ustedes me encuentro en paz.

A mis padres, Sofía y Alejandro, sin su apoyo moral y económico posiblemente no hubiese cumplido esta meta profesional. Gracias infinitas por creer en mí, por nunca cortarme las alas y dejarme volar tan alto como lo he deseado. ¡Gracias por siempre demostrarme su amor en cientos de formas!

Al M.I. Roberto Zenil Hernández, gracias infinitas por compartir tu amplio conocimiento conmigo, por tu paciencia para explicarme lo que desconocía y por ser el mejor compañero de la Maestría que tengo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, al posgrado en Ingeniería Ambiental y al Instituto de Ingeniería, fue un honor ser parte de la mejor casa de estudios a nivel nacional, de una Maestría con reconocimiento internacional y de un centro de investigación de gran prestigio.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, estaré eternamente agradecida por el financiamiento de la beca otorgada a una servidora durante el período de realización de mis estudios de posgrado.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica, por el apoyo otorgado al proyecto *Uso del pez cebra para evaluar la calidad y seguridad del agua renovada como potencial fuente de recarga del acuífero del Valle de México*.

A mi asesora, Dra. Alma C. Chávez Mejía, gracias por integrarme al Grupo de Tratamiento y Reúso, por su apoyo constante en mi paso por la Maestría, por sus contribuciones a este proyecto, por su invaluable amistad, por aconsejarme y siempre impulsarme a seguir aprendiendo.

A la Dra. Ana Elisa Silva Martínez, Dra. Clementina Rita Ramírez Cortina, Dr. Enrique Cesar Valdez y Dr. Ignacio Monje Ramírez, gracias por formar parte de mi carrera profesional, por las experiencias compartidas y por cada una de sus aportaciones para la mejora de este proyecto de investigación.

A la M.I. Paloma Zaragoza Sánchez, gracias de todo corazón por tu tiempo, tu disposición y tu paciencia cada vez que necesité de tu ayuda, por todas las dudas resueltas, por cada una de tus correcciones y recomendaciones a este proyecto, y por todo el apoyo moral que me brindaste a lo largo del posgrado.

Al Grupo de Tratamiento y Reúso, gracias M.C. Isaac Alejandro Ramos Ramírez, M.I. Solen Magaly Romero Beltrán y M.I. Ulises Molina Valencia, ustedes siempre estuvieron dispuestos a apoyarme con material para el desarrollo del proyecto y a compartir su vasto conocimiento sobre técnicas analíticas de calidad del agua.

RESUMEN

El principal objetivo de una planta de tratamiento de agua (PTA) es producir agua con una calidad tal que cumpla con los estándares normativos en forma confiable y que, a su vez, conserve un costo asequible. En México, la normativa ambiental referente a la utilización de agua residual tratada (ART) para los sistemas de **recarga gestionada de acuíferos** (MAR) contempla asegurar la protección de la calidad del agua nativa de los cuerpos receptores y de la salud de la población.

Considerando que el tratamiento de agua es un componente clave en la operación de una PTA, este proyecto de investigación tiene el propósito de desarrollar una propuesta metodológica que evalúe el desempeño en términos de **calidad del agua** de una planta piloto (PP) que trata un efluente secundario con el objetivo de recargar el acuífero del Valle de México en apego a la NOM-014-CONAGUA-2003.

El Sistema de **evaluación del desempeño** (SED) adaptado se basó en el uso de **indicadores de desempeño** (ID), **índices de desempeño** (ÍnD) y **eficiencias de remoción** de contaminantes, los cuales emplean datos históricos de calidad del ART; asimismo, se apoyó en la información de contexto consultada sobre la PP “Cerro de la Estrella” para la recarga del acuífero.

Después de la aplicación de 9 ID, 28 Índ, 5 comparaciones de las eficiencias de remoción de parámetros críticos y el análisis respectivo de la información de contexto recopilada se estableció que la actual gestión de monitoreo infringe la frecuencia establecida por norma para los 115 parámetros de calidad del agua; se incumple con la calidad microbiológica y química exigida en el agua regenerada y, las barreras múltiples presentaron menores eficiencias de remoción de contaminantes respecto de las teóricas, presumiblemente ligadas a anomalías operativas, lo que generó desempeños insatisfactorios o nulos en la remoción de las bacterias, el nitrógeno amoniacal, el cadmio y el boro.

Asimismo, se plantearon propuestas de mejora en la gestión y operación de la PP que coadyuven al cumplimiento de los criterios de monitoreo y calidad del ART conforme a lo exigido por la normatividad vigente y que consisten en el establecimiento de medidas correctivas para el tratamiento de los parámetros críticos y el monitoreo de parámetros de control operativo. Finalmente, se identificaron alternativas de gestión de los residuos del proceso.

El SED desarrollado se presenta como una herramienta estandarizada y objetiva para la toma de decisiones sobre la gestión y operación de la PP Cerro de la Estrella. A su vez, el SED puede aplicarse a otras plantas tratadoras de agua residual con fines de recarga de acuíferos.

Palabras clave: *recarga gestionada de acuíferos, calidad del agua, evaluación del desempeño, indicadores de desempeño, índices de desempeño, eficiencias de remoción*

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	15
2.	JUSTIFICACIÓN.....	17
3.	OBJETIVOS.....	19
3.1	General.....	19
3.2	Particulares.....	19
4.	ALCANCES Y LIMITACIONES.....	20
5.	MARCO TEÓRICO.....	21
5.1	Agua.....	22
5.1.1	Agua como derecho humano.....	22
5.1.2	Agua dulce y su escasez.....	22
5.2	Acuíferos.....	24
5.2.1	Delimitación administrativa de acuíferos en México.....	24
5.2.2	Situación actual del agua subterránea en México.....	25
5.3	Acuífero del Valle de México.....	25
5.3.1	Ubicación geográfica y administrativa.....	25
5.3.2	Estrés hídrico en el acuífero del Valle de México.....	27
5.4	Recarga de acuíferos.....	28
5.4.1	Recarga natural de acuíferos.....	28
5.4.2	Recarga gestionada de acuíferos.....	29
5.4.3	Recarga directa con agua renovada.....	37
5.5	Sistemas de evaluación de desempeño.....	39
5.5.1	Sistemas de indicadores e índices de desempeño.....	40
5.6	Caso de estudio: Cerro de la Estrella, Iztapalapa, Ciudad de México.....	44
5.6.1	Localización del proyecto.....	45
5.6.2	Planta de tratamiento de aguas residuales “Cerro de la Estrella”.....	45
5.6.3	Planta piloto “Cerro de la Estrella” para la recarga del acuífero.....	46
6.	METODOLOGÍA.....	64
6.1	Evaluación del desempeño global.....	65
6.2	Evaluación del desempeño operativo.....	74
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	86
7.1	Evaluación del desempeño global.....	86

7.1.1	Indicadores de parámetros de calidad del agua	86
7.1.2	Indicadores de parámetros físicos y organolépticos.....	88
7.1.3	Indicadores de parámetros microbiológicos	90
7.1.4	Indicadores de parámetros químicos.....	92
7.1.5	Indicadores de parámetros de radiactividad.....	94
7.2	Evaluación del desempeño operativo.....	96
7.2.1	Índices de parámetros físicos	96
7.2.2	Índices de parámetros microbiológicos	97
7.2.3	Índices de parámetros químicos.....	103
7.2.4	Índice global de desempeño.....	114
7.3	Propuestas de gestión y operación	116
7.3.1	Medidas correctivas para el tratamiento de los parámetros críticos	116
7.3.2	Parámetros y criterios de control operativo	123
7.3.3	Monitoreo de parámetros de control operativo	128
7.3.4	Propuestas para la gestión de residuos del proceso.....	134
8.	CONCLUSIONES	146
9.	REFERENCIAS.....	149
	ANEXOS	162

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 5.1. Distribución de agua en el mundo (SEMARNAT, 2016)	23
Figura 5.2. Delimitación de acuíferos (CONAGUA, 2018)	24
Figura 5.3. Delimitación hidrológica-administrativa de la Cuenca del Valle de México (Banco Mundial, 2013)	26
Figura 5.4. Superficie por subregión y entidades federativas que conforman la RHA XIII (CONAGUA, 2013)	26
Figura 5.5. Proyectos MAR en México (Palma et al., 2014)	34
Figura 5.6. Tren de tratamiento de aguas residuales de PTAR Cerro de la Estrella (Ramos, 2021) .	46
Figura 5.7. Estudios realizados en el acuífero de la zona oriente de la CDMX (Ávila et al., 2017). ..	48
Figura 5.8. Configuración 1 de la PP Cerro de la Estrella (Adaptado de SACMEX, 2011).....	49
Figura 5.9. Configuración 2 de la PP Cerro de la Estrella (Adaptado de SACMEX, 2011).....	50
Figura 5.10. Configuración 3 de la PP Cerro de la Estrella (Adaptado de SACMEX, 2011).....	51
Figura 5.11. Barreras múltiples de la PP Cerro de la Estrella (Adaptado de SACMEX, 2011).....	52
Figura 5.12. Mezclador estático PP Cerro de la Estrella (IEMA, 2010).....	53
Figura 5.13. Hidrociclones PP Cerro de la Estrella (IEMA, 2010)	53
Figura 5.14. Filtros a presión PP Cerro de la Estrella (IEMA, 2010)	54
Figura 5.15. Generador de O3 y tanque de contacto con O3 PP Cerro de la Estrella (IEMA, 2010).	57
Figura 5.16. Unidades de filtración PP Cerro de la Estrella (IEMA, 2010)	58
Figura 5.17. Unidades de ósmosis inversa PP Cerro de la Estrella (IEMA, 2010)	59
Figura 5.18. Etapa de desinfección con luz UV PP Cerro de la Estrella (IEMA, 2010)	60
Figura 5.19. Diagrama de residuos del proceso de potabilización Cerro de la Estrella (Adaptado de SACMEX, 2011)	61
Figura 6. 1. Diagrama de flujo de la metodología aplicada	64
Figura 6. 2. Metodología para la evaluación del desempeño global (Vieira, 2009)	65
Figura 6. 3. Metodología para la evaluación del desempeño operativo (Adaptado de Vieira, 2009).....	75
Figura 6. 4. Función de desempeño para la evaluación del rendimiento en términos de calidad del agua tratada para parámetros químicos (excepto pH) y físicos (Vieira, 2009)	77
Figura 6. 5. Función de desempeño para la evaluación del desempeño en términos de la calidad del agua tratada del parámetro de pH (Adaptado de Vieira, 2009).....	79
Figura 6. 6. Funciones de desempeño para la evaluación del desempeño en términos de la calidad del agua tratada de los parámetros microbiológicos	80
Figura 6. 7. Función de desempeño para la evaluación del desempeño en términos de la calidad del agua tratada de parámetros especiales.....	81

Figura 7. 1. Resumen de resultados – ID1.....	87
Figura 7. 2. Resumen de resultados – ID6.....	88
Figura 7. 3. Resumen de resultados – ID2.....	89
Figura 7. 4. Resumen de resultados – ID7.....	90
Figura 7. 5. Resumen de resultados – ID3.....	91
Figura 7. 6. Resumen de resultados – ID8.....	92
Figura 7. 7. Resumen de resultados – ID4.....	93
Figura 7. 8. Resumen de resultados – ID9.....	94
Figura 7. 9. Resumen de resultados – ID5.....	95
Figura 7. 10. Índ calidad del agua tratada – Turbiedad	97
Figura 7. 11. Índ calidad del agua tratada – Color verdadero	97
Figura 7. 12. Índ calidad del agua tratada – Coliformes fecales.....	98
Figura 7. 13. Índ calidad del agua tratada – Coliformes totales.....	98
Figura 7. 14. Índ calidad del agua tratada – Conteo de bacterias heterotróficas	98
Figura 7. 15. Índ calidad del agua tratada – Sulfatos.....	103
Figura 7. 16. Índ calidad del agua tratada – Manganeso.....	103
Figura 7. 17. Índ calidad del agua tratada – Dureza	105
Figura 7. 18. Índ calidad del agua tratada – Arsénico.....	105
Figura 7. 19. Índ calidad del agua tratada – Floururos	105
Figura 7. 20. Índ calidad del agua tratada – Cloruros.....	105
Figura 7. 21. Índ calidad del agua tratada – Aluminio	105
Figura 7. 22. Índ calidad del agua tratada – SAAM.....	105
Figura 7. 23. Índ calidad del agua tratada – Hierro	106
Figura 7. 24. Índ calidad del agua tratada – Selenio.....	106
Figura 7. 25. Índ calidad del agua tratada – Cobre.....	106
Figura 7. 26. Índ calidad del agua tratada – Cromo.....	106
Figura 7. 27. Índ calidad del agua tratada – Zinc.....	106
Figura 7. 28. Índ calidad del agua tratada – Bario	106
Figura 7. 29. Índ calidad del agua tratada – Nitratos	107
Figura 7. 30. Índ calidad del agua tratada – Nitritos	107
Figura 7. 31. Índ calidad del agua tratada – Sodio	107
Figura 7. 32. Índ calidad del agua tratada – Sólidos disueltos totales.....	108
Figura 7. 33. Índ calidad del agua tratada – Plomo	108

Figura 7. 34. Índ calidad del agua tratada – pH.....	109
Figura 7. 35. Índ calidad del agua tratada – Nitrógeno amoniacal.....	110
Figura 7. 36. Índ calidad del agua tratada – Cadmio	110
Figura 7. 37. Índ calidad del agua tratada – Boro.....	111
Figura 7. 38. Índ global.....	115
Figura 7. 39. Configuración propuesta para el manejo de residuos de la PP Cerro de la Estrella..	145
Figura 5.20. Requisitos para proyecto de recarga artificial NOM-014-CONAGUA-2003 (Salvador, 2013)	163
Figura 6. 8. Funciones de desempeño de parámetros químicos.....	172
Figura 6. 9. Funciones de desempeño de parámetros químicos.....	173
Figura 6. 10. Funciones de desempeño de parámetros químicos.....	174
Figura 6. 11. Funciones de desempeño de parámetros químicos.....	175

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5. 1. Agua renovable per cápita, volumen concesionado per cápita y grado de presión, 2017 y 2030. (CONAGUA, 2018)	27
Tabla 5. 2. Balance hídrico de los acuíferos locales que abastecen al Valle de México (Banco Mundial, 2013)	28
Tabla 5. 3. Descargas de aguas residuales municipales y no municipales, 2017 (CONAGUA, 2018)	37
Tabla 5. 4. Calidad del ART para recarga artificial de acuíferos (SEMARNAT, 2009a)	38
Tabla 5. 5. Contaminantes contemplados para diseño de configuración 1 (IEMA, 2010)	49
Tabla 5. 6. Remoción de constituyentes en la potabilización de agua destinada a uso doméstico o recarga	55
Tabla 5. 7. Remoción de constituyentes en la potabilización de agua destinada a uso doméstico o recarga (continuación)	56
Tabla 6. 1. ID del monitoreo de la calidad del agua.....	66
Tabla 6. 2. ID de la calidad del agua tratada	67
Tabla 6. 3. Variables necesarias para el cálculo de ID.....	68
Tabla 6. 4. Clasificación de los parámetros de calidad del agua tratada en términos de desempeño.	82
Tabla 6. 5. Parámetros clave de monitoreo de calidad del agua.....	83
Tabla 7. 1. Remoción teórica vs real de coliformes totales.....	100
Tabla 7. 2. Remoción teórica vs real de bacterias heterotróficas	102
Tabla 7. 3. Remoción teórica vs real de nitrógeno amoniacal	112
Tabla 7. 4. Remoción teórica vs real de cadmio	113
Tabla 7. 5. Remoción teórica vs real de boro	114
Tabla 7. 6. Métodos de pretratamiento para sistemas de nanofiltración y ósmosis inversa (Metcalf y Eddy, 2007)	118
Tabla 7. 7. Parámetros y criterios de control operativo	125
Tabla 7. 8. Frecuencia recomendada para el monitoreo de parámetros de control operativo	130
Tabla 7. 9. Ventajas y desventajas de deshidratación por filtro prensa de placas (Adaptado de CONAGUA, 2019e; CONAGUA, 2007)	135
Tabla 7. 10. Ventajas y desventajas de la estabilización con cal (CONAGUA, 2019e)	136
Tabla 7. 11. Ventajas y desventajas del espesamiento por gravedad (CONAGUA, 2019e)	138
Tabla 7. 12. Ventajas y restricciones de la disposición de concentrado en aguas residuales (Mackey y Seacord, 2008; U.S Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2009b)	141
Tabla 5. 8. Parámetros de calidad de agua regulados por la NOM-014-CONAGUA-2003 (SEMARNAT, 2009a; SSA, 2000)	164

Tabla 5. 9. Calidad del agua del efluente PP Cerro de la Estrella (SACMEX, 2020b; SSA, 2019; SEMARNAT, 2009a; SSA, 2000).....	168
Tabla 6. 6. Límites de detección y/o cuantificación de métodos analíticos empleados en análisis de calidad del agua (SACMEX, 2020e)	171
Tabla 7. 13. Parámetros físicos y organolépticos, microbiológicos y radiactivos obligatorios vs analizados.....	176
Tabla 7. 14. Parámetros químicos obligatorios vs analizados	176

ÍNDICE DE NOMENCLATURAS

Nomenclatura	Significado
ART	Agua residual tratada
ARFG	Agua de retrolavado de filtros gastada
ASR	Almacenamiento en el acuífero y recuperación
ASTR	Almacenamiento en el acuífero, transporte y recuperación
CPEUM	Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos
C _R T	Producto de la concentración de desinfectante residual [C en mg/l] y el tiempo de contacto [T en minutos], que el desinfectante residual está en contacto con el agua.
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
COT	Carbono orgánico total
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno, prueba de 5 días
DGCOH	Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica
DQO	Demanda Química de Oxígeno
HPC	Heterotrophic Plate Count, conteo de bacterias heterotróficas
IAH-MAR	International Association of Hydrogeologists Commission on Managing Aquifer Recharge, Comisión de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos sobre la gestión de la recarga de acuíferos
ID	Indicador(es) de desempeño
IEMA	Ingeniería Especializada del Medio Ambiente S.A. de C.V.
Índ	Índice(s) de desempeño
IWA	Asociación Internacional del Agua
LC	Límite(s) de cuantificación (de técnica analítica)
LD	Límite(s) de detección (de técnica analítica)
LAN	Ley de Aguas Nacionales
LMP	Límite(s) máximo(s) permisible(s)
LNEC	Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil de Portugal
LPS	Litros por segundo
MAR	Managed aquifer recharge, recarga gestionada de acuíferos
NMP	Número más probable
NOM	Norma Oficial Mexicana
OCWD	Orange County Water District, Distrito de Aguas del Condado de Orange
OI	Ósmosis inversa
ONU	Organización de las Naciones Unidas
OPU	Operaciones y procesos unitarios
pH	Potencial de hidrógeno
PP	Planta piloto
PRA	Proyecto de recarga artificial
PTA	Planta(s) de tratamiento de agua
PTAR	Planta(s) de tratamiento de aguas residuales
RHA	Región(es) hidrológico-administrativa(s)

SAAM	Sustancias activas al azul de metileno
SACMEX	Sistema de Aguas de la Ciudad de México
SAT	Tratamiento suelo-acuífero
SDF	Sólidos Disueltos Fijos
SDT	Sólidos Disueltos Totales
SDV	Sólidos Disueltos Volátiles
SSF	Sólidos Suspendidos Fijos
SST	Sólidos Suspendidos Totales
SSV	Sólidos Suspendidos Volátiles
ST	Sólidos Totales
STF	Sólidos Totales Fijos
STV	Sólidos Totales Volátiles
SED	Sistema de evaluación del desempeño
SEMARNAT	Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SLG	Solución de limpieza gastada
SRA	Sistema de recarga artificial
SST	Sólidos suspendidos totales
UFC	Unidades formadoras de colonias
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
UNT	Unidad nefelométrica de turbidez
UV	Ultravioleta
VL1	Valor límite 1
VL2	Valor límite 2
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un derecho humano universal declarado por la Asamblea de las Naciones Unidas (AG-ONU, 2010) y reconocido en el artículo 4° de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM, 2019). Este derecho al acceso, disposición y saneamiento del agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible para todos los ciudadanos mexicanos (CPEUM, 2019) no debería contraponerse a la responsabilidad de adoptar medidas de protección que garanticen un manejo sostenible del recurso; tal como lo plantea la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2018) en el objetivo número 6 de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

El manejo actual del agua en el Valle de México se considera ineficiente, insostenible y no equitativo, lo cual compromete al derecho de generaciones futuras de aprovechar este recurso tan vital (Banco Mundial, 2013). La extracción desmesurada de agua subterránea ha permitido resolver la demanda actual de agua de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), sin importar que se supere el volumen máximo factible de aprovechamiento anual de los acuíferos; lo que ha provocado que los acuíferos locales del Valle de México se encuentren bajo un grado muy alto de estrés hídrico, de acuerdo con datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2018).

La gestión de las reservas de agua subterránea debe estar encaminada a la aplicación de estrategias integrales que impliquen, entre otras acciones, la recarga gestionada de acuíferos (MAR, por sus siglas en inglés). En México, ya se incentiva esta práctica, la cual en algunos casos de aplicación emplea agua residual tratada (ART). De acuerdo con lo estipulado en la NOM-014-CONAGUA-2003, dos de los criterios requeridos en el análisis de proyectos de recarga con ART se refieren al cumplimiento del monitoreo periódico y de las concentraciones de los parámetros regulados y no regulados (microorganismos enteropatógenos, carbono orgánico total y aquellos referidos en la Tabla 5. 8 de Anexos) por la NOM-127-SSA1-1994, en su modificación del 2000.

El desempeño mide qué tan bien una máquina realiza un trabajo o una actividad (Cambridge University Press, 2021). Por lo cual, es dependiente de un propósito de evaluación específico. En esta investigación, por medio de una propuesta metodológica será medido el desempeño global y operativo de un sistema de tratamiento de agua con fines de recarga de acuíferos en el logro de ciertos objetivos de evaluación de la calidad del ART, los cuales incluyen: frecuencias de monitoreo, límites permisibles de la normatividad y/o límites de cuantificación de técnicas analíticas de parámetros de calidad de agua. El desempeño global de la PP será analizado mediante el uso de indicadores de desempeño (ID) mientras que el operativo empleará índices de desempeño (ÍnD) y eficiencias de remoción de parámetros.

El proyecto de MAR sometido a evaluación se trata de la planta piloto (PP) Cerro de la Estrella, el cual cuenta con una capacidad operativa de 20 L/s y con un tren de tratamiento terciario a base de barreras múltiples con las etapas de coagulación, floculación, clarificación, prefiltración, oxidación con ozono, posfiltración, ósmosis inversa y desinfección con luz ultravioleta (Ramos, 2021; SACMEX, 2020c; CONAGUA, 2019a; Ávila *et al.*, 2017).

La aplicación de la metodología propuesta sólo contempló el uso de datos históricos de la calidad del ART para 7 períodos de evaluación reportados por el organismo operador de la PP Cerro de la Estrella. En el desarrollo del Sistema de evaluación del desempeño (SED) se adaptaron 9 ID, 28 Índ y 5 comparaciones de eficiencias de remoción para el análisis respectivo de objetivos en la gestión y operación de la PP. Las condiciones de mejora propuestas en la remoción de los parámetros críticos promueven la implementación de mejores prácticas en las unidades de filtración, ósmosis inversa (OI) y desinfección con luz ultravioleta (UV); así como la ejecución de pruebas de tratabilidad en la coagulación-floculación-clarificación-filtración, la ozonación y la desinfección con luz UV. Adicionalmente, se establecieron alternativas de tratamiento y disposición de los residuos generados en las operaciones y procesos unitarios (OPU) de la PP.

2. JUSTIFICACIÓN

Debido a que el principal objetivo de una planta de tratamiento de agua (PTA) es producir agua con una calidad tal que cumpla con los estándares normativos en forma confiable y a un costo razonable, por medio de una fuente de suministro convencional o no convencional (CONAGUA, 2019b); resulta indispensable proponer una herramienta que contribuya a evaluar el desempeño del tratamiento implementado sobre la consecución de este propósito y a que a su vez, funcione como apoyo en la toma de decisiones en la gestión y la operación de la PTA.

Por lo anterior y, considerando que el tratamiento de agua es un componente clave en la operación de las estaciones de suministro, este proyecto de investigación presenta un SED como una herramienta estandarizada y objetiva para la evaluación del rendimiento de un sistema de tratamiento de agua en el cumplimiento de dos aspectos exigidos por la normatividad mexicana: el monitoreo y la concentración de parámetros de calidad del agua.

El SED se basa en el uso de ID, Índ y eficiencias de remoción de contaminantes, los cuales emplean datos históricos de calidad del agua. Mientras los ID se tratan de un recurso de gestión de la PTA (Vieira *et al.*, 2008), los Índ (Vieira *et al.*, 2010) y las eficiencias de remoción mantienen un nivel de detalle adecuado para la toma de decisiones de aspectos operativos.

En México, la normativa ambiental referente a la utilización de ART para los sistemas de MAR contempla el aseguramiento de los objetivos encaminados a la protección de la calidad del agua nativa en los cuerpos receptores y el cuidado de la salud de la población (CONAGUA, 2019a; SEMARNAT, 2009a). Respecto a la legislación que rige la recarga de acuíferos con ART, se cuenta con una Norma Oficial Mexicana (NOM), la NOM-014-CONAGUA-2003, que establece los lineamientos a seguir en la construcción de un proyecto de MAR y define los estándares de calidad del agua requeridos para su recarga.

El Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) implementó la recarga a nivel piloto del acuífero del Valle de México bajo técnicas de infiltración superficial e inyección directa de ART. Uno de sus proyectos inició en el año 1992, por medio de la PP Cerro de la Estrella para la recarga del acuífero, el cual dió pulimiento al efluente secundario de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Cerro de la Estrella (CONAGUA, 2019a; Ávila *et al.*, 2017).

La factibilidad técnica de implementación del proyecto piloto Cerro de la Estrella, no ha podido ser comprobada o por lo menos hasta este momento, no existe información pública sobre ella. Sin embargo, desde el inicio de sus operaciones, a lo largo de los años la PP ha trabajado de manera intermitente sufriendo rehabilitaciones y modificaciones en su proceso o se ha mantenido fuera de operación, sin poder trascender a un proyecto de recarga autorizado por la CONAGUA.

Ávila *et al.* (2017) reportó que en la PP Cerro de la Estrella se ejecutó un programa de monitoreo continuo de la calidad del influente, del agua tratada en las barreras múltiples y del efluente. Por lo cual, esta investigación consideró que la aplicación del SED propuesto se implementaría a este caso de estudio con el fin de determinar el grado de cumplimiento de la frecuencia de monitoreo y de las concentraciones de los criterios de calidad de tipo estético, microbiológico, químico y de radiactividad en conformidad con establecido por la NOM-014-CONAGUA-2003.

La información de contexto del SED desarrollada para el caso de estudio es referente a: las configuraciones que adoptó el proceso de tratamiento desde 2010 a 2020, una descripción breve de los principios de funcionamiento de las barreras múltiples, los contaminantes que de acuerdo con la teoría deberían ser removidos en las barreras múltiples, las características de calidad del efluente y las corrientes residuales del proceso de potabilización.

De acuerdo con los resultados obtenidos tras la aplicación del SED, este estudio plantea propuestas de mejora en la gestión y operación de la PP que coadyuven al cumplimiento de los criterios de monitoreo y calidad del agua renovada conforme lo exigido por la NOM-014-CONAGUA-2003.

SACMEX (2020e) reportó que el agua de retrolavado de la filtración y el concentrado de ósmosis inversa generados son vertidos en la línea de alimentación de la PTAR Cerro de la Estrella. Por lo que, se sugirió una alternativa de tratamiento y posterior disposición para estos residuos, así como para los lodos de clarificación y las soluciones de limpieza de ósmosis inversa.

3. OBJETIVOS

3.1 General

Desarrollar una propuesta metodológica que evalúe el desempeño en términos de calidad del agua de una planta piloto para tratar un efluente secundario con fines de recarga al acuífero del Valle de México en apego a la NOM-014-CONAGUA-2003.

3.2 Particulares

(1) Evaluar el desempeño global de un sistema de potabilización con fines de recarga al acuífero en términos del cumplimiento de los criterios de calidad del agua y monitoreo de parámetros establecidos por la NOM-014-CONAGUA-2003 por medio de la selección y aplicación de indicadores de desempeño (ID).

(2) Evaluar el desempeño operativo de un sistema de potabilización con fines de recarga al acuífero en términos de calidad del agua tratada mediante el desarrollo y aplicación de índices de desempeño (ÍnD).

(3) Analizar el desempeño de las barreras múltiples de la planta piloto (PP) con respecto al grado de remoción esperado de contaminantes críticos con el fin de identificar posibles problemáticas asociadas a cada barrera.

(4) Establecer propuestas de mejora en la gestión y operación de un proyecto piloto para la recarga del acuífero mediante la aplicación de un Sistema de evaluación del desempeño (SED) para beneficiar el cumplimiento de los requisitos establecidos por la NOM-014-CONAGUA-2003.

(5) Proponer estrategias adecuadas de tratamiento, uso y/o disposición final de los residuos generados en el proceso de potabilización por medio de la adaptación de acciones implementadas por distintas plantas de tratamiento de agua (PTA).

4. ALCANCES Y LIMITACIONES

El presente proyecto desarrolla una propuesta metodológica para la evaluación del rendimiento de una PP en cuanto al cumplimiento de dos criterios (frecuencia de monitoreo y concentración de parámetros) de calidad del agua especificados en la NOM-014-CONAGUA-2003. La aplicación de la metodología propuesta al caso de estudio solo contempla el uso de datos históricos de la calidad de ART para 7 períodos de evaluación reportados por el SACMEX.

La información de contexto referente a las configuraciones y operación de la PP Cerro de la Estrella fue recopilada de fuentes oficiales y medios bibliográficos, ya que no se realizaron visitas de campo a sus instalaciones.

Por medio de la aplicación del SED y de los principios de funcionamiento teóricos de las OPU se realiza una aproximación del comportamiento de la PP, a partir de la cual se lleva a cabo el planteamiento de propuestas de mejora en la gestión y la operación de la planta.

Las propuestas de manejo de las corrientes residuales solo consideran la identificación y selección de las alternativas de tratamiento que podrían ser adoptadas en la última configuración de la PP Cerro de la Estrella, para el cumplimiento de la normatividad nacional o internacional (según aplique) conforme al aprovechamiento y disposición final de los residuos.

5. MARCO TEÓRICO

En los siguientes párrafos serán abordados seis apartados, mismos que fueron considerados para fijar las bases teóricas del proyecto de investigación: *Metodología para la evaluación del desempeño de una planta tratadora de un efluente secundario destinado a la recarga de acuíferos.*

El apartado 1 – Agua – y el 2 – Acuíferos –, hacen mención del reconocimiento del agua como derecho humano, la distribución del recurso hídrico subterráneo en el planeta, cifras de escasez de agua, el concepto de un acuífero, así como su delimitación técnico-administrativa en México; pretendiendo establecer las bases conceptuales de conocimiento sobre los acuíferos como punto de partida para promover su gestión adecuada.

Dado que el presente proyecto estudia una práctica de recarga gestionada del acuífero del Valle de México, es necesario abordar un apartado – 3, Acuífero del Valle de México – con contenido referente a la ubicación geográfica y administrativa de este acuífero y la situación de estrés hídrico en la cual se encuentra.

La recarga gestionada de acuíferos es presentada en el apartado 4. En este apartado se reconocen las clasificaciones de recarga existentes y se mencionan ciertos ejemplos de aplicación de MAR alrededor del mundo y en México. Debido a que esta investigación se dirige a la evaluación de la calidad de agua residual sometida a potabilización con fines de recarga directa al acuífero, se aborda la recarga de acuíferos con el uso de ART y se desarrolla a detalle la normatividad nacional vigente consultada sobre este sistema de recarga.

Debido a la relevancia de los conceptos de desempeño, calidad del agua, ID e ÍnD; se consideró importante que fueran descritos en el apartado 5. A su vez, en este apartado, se mencionan los antecedentes de SED consultados, los cuales forman parte del fundamento considerado en el planteamiento de la metodología de evaluación del desempeño propuesta.

Finalmente, el último apartado considera información particular del caso de MAR bajo estudio en Cerro de la Estrella, Iztapalapa, Ciudad de México. Se desarrollan los antecedentes de la práctica de recarga, se mencionan características generales de la PTAR Cerro de la Estrella y de la PP Cerro de la Estrella, se describen las configuraciones de tratamiento de la PP Cerro de la Estrella desde 2010 a 2020, se enuncian los principios de las operaciones y procesos de tratamiento aplicados, se relacionan los parámetros de calidad del agua que deben de ser removidos por las unidades de tratamiento, se presentan datos sobre los residuos del proceso de potabilización y de los parámetros de calidad medidos en la PP Cerro de la Estrella. Este apartado se generó como antecedente de conocimiento sobre el contexto en el cual se desarrolla un proyecto piloto que pretende promover los beneficios de la recarga de acuíferos con agua regenerada.

5.1 Agua

5.1.1 Agua como derecho humano

La Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció por medio de la Resolución **A/RES/64/292**, el 28 de julio de 2010, que todo ser humano tiene derecho al agua potable y al saneamiento de agua; declaró este derecho como esencial para el pleno disfrute de la vida y de todos los derechos humanos (AG-ONU, 2010).

Por su parte, la CPEUM en su **artículo 6** dicta que todo ciudadano mexicano tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible; y establece que para la consecución de dichos fines se requiere la participación de la Federación, los estados, los municipios y la ciudadanía (CPEUM, 2019).

El **Objetivo de Desarrollo Sostenible número 6** de las Naciones Unidas busca garantizar la disponibilidad, la gestión sostenible y el saneamiento del agua para todos. Se considera que se tienen enormes desafíos para la disponibilidad futura de agua, los cuales deberán ser enfrentados por medio de una gestión integral de los recursos hídricos incluso a niveles transfronterizos, y de la inclusión del recurso hídrico, así como su respectivo saneamiento en políticas públicas (ONU, 2018).

5.1.2 Agua dulce y su escasez

Se estima que el planeta Tierra cuenta con aproximadamente 1,400 millones de km³ de agua, de los cuales el 2.5% corresponde a agua dulce, localizada principalmente en glaciares, acuíferos, mantos de hielo y cuerpos superficiales. Alrededor de tres cuartas partes del agua dulce está contenida en los glaciares y mantos de hielo, el 30% se encuentra como agua subterránea, mientras que la suma de las aguas superficiales (lagos, embalses, ríos, arroyos y humedales) alcanza el 0.4% del total (SEMARNAT, 2016). La distribución total del agua en la Tierra puede verse en la Figura 5.1.

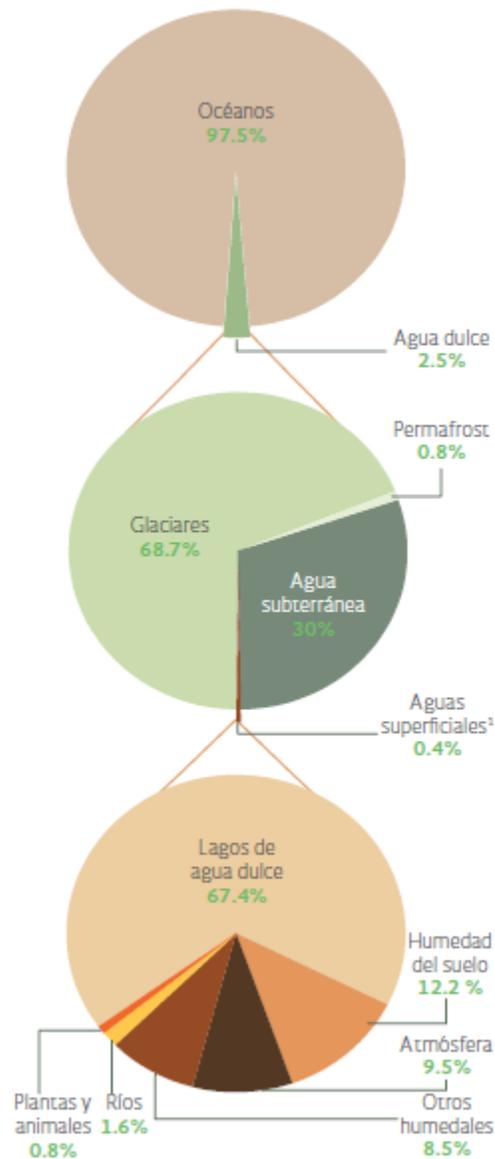


Figura 5.1. Distribución de agua en el mundo (SEMARNAT, 2016)

A pesar de que el acceso al agua es un derecho humano, miles de millones de personas alrededor del mundo enfrentan diariamente dificultades para cubrir las necesidades básicas que impliquen su uso (ONU, 2016). Actualmente, se estima que más del 40% de la población mundial padece escasez de agua y el pronóstico es que dicho porcentaje incremente como consecuencia de problemas de saneamiento e higiene, la creciente demanda de agua y del cambio climático (UNESCO, 2018; ONU, 2016). Se prevé que, en 2025, 1 800 millones de personas habitarán en países (o regiones) con escasez absoluta de agua y aproximadamente el 66% de la población mundial podría vivir bajo condiciones de estrés hídrico (ONU, 2014).

5.2 Acuíferos

La Ley de Aguas Nacionales (2016) define como -Acuífero- a “Cualquier formación geológica o conjunto de formaciones geológicas hidráulicamente conectados entre sí, por las que circulan o se almacenan aguas del subsuelo que pueden ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento y cuyos límites laterales y verticales se definen convencionalmente para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo”.

5.2.1 Delimitación administrativa de acuíferos en México

La delimitación técnico-administrativa de los acuíferos del territorio nacional fue planteada en CONAGUA (2006) por la Subdirección General de Administración de Agua y la Subdirección General Técnica con los propósitos de ejecutar una correcta administración en el aprovechamiento del agua subterránea por parte de los usuarios y de llevar a cabo la evaluación del recurso hidráulico subterráneo. La Figura 5.2 presenta las 13 regiones hidrológico – administrativas (RHA) determinadas por las entidades antes mencionadas, con su respectiva delimitación de los acuíferos, resultando un total de 653 acuíferos establecidos (CONAGUA, 2018).



Figura 5.2. Delimitación de acuíferos (CONAGUA, 2018)

5.2.2 Situación actual del agua subterránea en México

En todo su territorio, los Estados Unidos Mexicanos enfrentan una problemática relacionada a la disponibilidad de agua potable como consecuencia de su escasez y de su mala calidad sanitaria. De acuerdo con cifras de la CONAGUA, en 2018, el 69.1% de las aguas para uso consuntivo tiene como origen fuentes superficiales, mientras que el 31.9% restante proviene de fuentes subterráneas (CONAGUA, 2018).

En lo que respecta a las aguas subterráneas, su importancia radica en que abastecen alrededor del 70% del volumen de agua potable requerido por las ciudades, donde se estima que habita una población de alrededor de 60 millones de personas (AMC, 2010).

La delimitación administrativa del territorio nacional definió un total de 653 acuíferos, de los cuáles en 2020, la CONAGUA declaró 157 acuíferos en estado de sobreexplotación, 18 con intrusión salina y 32 bajo el fenómeno de salinización de suelos o aguas subterráneas salobres (CONAGUA, 2020).

5.3 Acuífero del Valle de México

5.3.1 Ubicación geográfica y administrativa

La RHA XIII, Aguas del Valle de México tiene una extensión de 18 229 km² y comprende 105 municipios de los estados de Hidalgo, Tlaxcala, Estado de México y las 16 alcaldías de la Ciudad de México (CONAGUA, 2013).

Para fines de planeación, la CONAGUA secciona a la RHA XIII, Aguas del Valle de México, en dos subregiones: Valle de México y Tula (Banco Mundial, 2013; CONAGUA 2013).

En la Figura 5.3 se muestra el mapa que ilustra la delimitación de la subregión Valle de México, la cual se conforma por las 16 alcaldías de la Ciudad de México, 50 municipios del Estado de México, 15 municipios de Hidalgo y 4 municipios de Tlaxcala (CONAGUA, 2013). Por su parte, la subregión Tula se compone de 12 municipios del Estado de México y 24 municipios de Hidalgo. En la Figura 5.4 se muestra la extensión para la subregión Valle de México y la subregión Tula en las 4 entidades federativas anteriormente mencionadas.

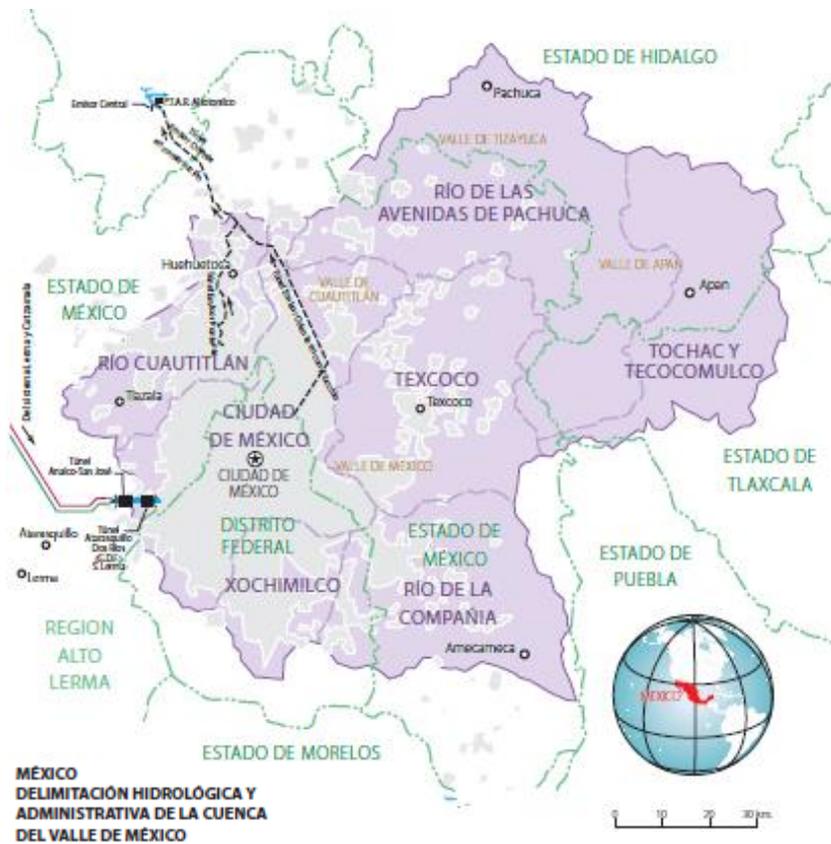


Figura 5.3. Delimitación hidrológica-administrativa de la Cuenca del Valle de México (Banco Mundial, 2013)

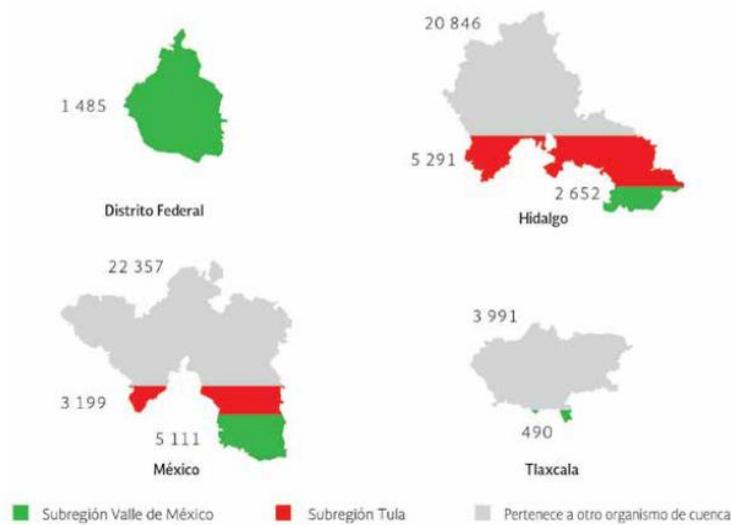


Figura 5.4. Superficie por subregión y entidades federativas que conforman la RHA XIII (CONAGUA, 2013)

El acuífero del Valle de México se localiza en el suroeste de la cuenca del Valle de México y ocupa el 17% de su superficie. Dentro de la extensión del acuífero se consideran trece alcaldías de la Ciudad de México y siete municipios del Estado de México. Bajo la cuenca se encuentra un acuitardo arcilloso con una profundidad aproximada de 50 m, mientras que el acuífero somero alcanza profundidades por encima de los 800 m y en él, se tienen pozos de extracción con profundidades que oscilan entre 100 y 400 m (Ávila *et al.*, 2017).

5.3.2 Estrés hídrico en el acuífero del Valle de México

El porcentaje del agua empleada en usos consuntivos respecto a la cantidad máxima factible de explotar anualmente (agua renovable) indica el grado de presión que se ejerce sobre el recurso hídrico de una cuenca o región. Cuando este grado de estrés hídrico se encuentra entre un 40 a 100% se considera alto, o al ser mayor de 100% se califica como muy alto (CONAGUA, 2018). En la Tabla 5. 1 se presentan los valores calculados para agua renovable per cápita, volumen concesionado per cápita y grado de presión de las RHA.

Tabla 5. 1. Agua renovable per cápita, volumen concesionado per cápita y grado de presión, 2017 y 2030. (CONAGUA, 2018)

Número	Región Hidrológica Administrativa	Agua renovable (hm ³ /año)	Volumen concesionado (hm ³ /año)		Agua renovable per cápita (m ³ /hab/año)		Volumen concesionado per capita (m ³ /hab/año)		Grado de presión (%)	
		2017	2017	2030	2017	2030	2017	2030	2017	2030
I	Península de Baja California	4858	3951	4633	1057	881	859	840	81.3	95.4
II	Noroeste	8274	7007	5224	2837	2465	2403	1556	84.7	63.1
III	Pacífico Norte	26747	10811	11480	5823	5289	2354	2270	40.4	42.9
IV	Balsas	21668	10874	11277	1799	1627	903	847	50.2	52
V	Pacífico Sur	30836	1579	1955	6017	5711	308	362	5.1	6.3
VI	Río Bravo	12844	9680	10177	1019	894	768	708	75.4	79.2
VII	Cuencas Centrales del Norte	8024	3824	3867	1725	1566	822	755	47.7	48.2
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	35071	15845	18505	1419	1266	641	668	45.2	52.8
IX	Golfo Norte	28655	6055	8213	5329	4806	1126	1377	21.1	28.7
X	Golfo Centro	94363	6069	7337	8796	8130	566	632	6.4	7.8
XI	Golfo Sur	147195	2547	3113	18776	16643	325	352	1.7	2.1
XII	Península de Yucatán	29647	4793	8341	6212	5081	1004	1430	16.2	28.1
XIII	Aguas del Valle de México	3401	4808	5039	144	134	204	198	141.4	148.2
	Total	451585	87842	99161	3656	3285	711	721	19.5	22

En particular, la RHA de las Aguas del Valle de México (XIII), compuesta por un total de 14 acuíferos, al 2017 presentó un grado de presión muy alto, del 141.4%, lo que

indica el aprovechamiento irracional del recurso, así como la necesidad de implementación de estrategias urgentes que atenúen la acelerada extracción de las reservas de agua subterráneas. Es de destacar que, las proyecciones a 2030 para esta RHA XIII es que mantenga su situación de escasez de agua y de estrés hídrico muy alto con 148.2% de grado de presión (CONAGUA, 2018).

Cabe destacar que el acuífero de la ZMVM se encuentra con un déficit de agua anual de 22.6 m³/s (713 hm³/año) lo cual confirma la grave situación de presión hídrica a la que está siendo sometido, tal como se muestra en la Tabla 5. 2.

Tabla 5. 2. Balance hídrico de los acuíferos locales que abastecen al Valle de México (Banco Mundial, 2013)

Acuíferos	Recarga anual media	Descarga natural comprometida	Volumen concesionado	Disponibilidad/déficit	
				m ³ /s	hm ³ /año
Zona Metropolitana de la Ciudad de México	16.3	0	38.9	-22.6	-713
Tecocomulco	0.9	0	0	0.8	26
Apan	5	2.8	0.3	1.9	59
Chalco-Amecameca	2.5	0.1	2.9	-0.5	-16
Texcoco	5.1	0.3	6.3	-1.6	-49
Cuatitlán-Pachuca	6.4	0	10.5	-4.1	-129
Soltepec	2.9	1.3	0.6	1.1	33
Total	39.1	4.6	59.5	-25	-788

La presión sobre los acuíferos locales que abastecen la ZMVM es constante y las tendencias al crecimiento de las ciudades o de la relocalización de la población, pronostican un aumento latente en la extracción de recursos hídricos subterráneos. Se intercambian volúmenes de agua con el sector agrícola con la compra de derechos del sector para el desarrollo de vivienda; pero no existen acciones eficaces que conduzcan a revertir el desequilibrio. La vigilancia de los volúmenes extraídos es insuficiente y los patrones de extracción e infiltración cambian radicalmente al cambiar el uso del agua y del suelo (Banco Mundial, 2013).

Entre otros aspectos, la sobreexplotación de agua en los acuíferos de la ZMVM causa el hundimiento entre 6 a 28 cm anuales del suelo de la Ciudad de México y de algunos municipios conurbados (Banco Mundial, 2013).

5.4 Recarga de acuíferos

5.4.1 Recarga natural de acuíferos

El recurso hídrico de la recarga natural de un acuífero procede de la precipitación pluvial, de escurrimientos superficiales en cauces, del agua almacenada en cuerpos de agua o de otros acuíferos con niveles piezométricos más altos. La formación de embalses y la posterior infiltración del agua a través de la zona no saturada hacia el

nivel freático provoca el almacenamiento de volúmenes significativos de agua en el acuífero (CONAGUA, 2019a).

5.4.2 Recarga gestionada de acuíferos

Como alternativa a la recarga natural de acuíferos, se encuentra la recarga antropogénica. Este tipo de recarga es clasificada por Bonilla y Stefan (2017) en tres categorías: no intencional, no controlada y controlada.

La **gestión de la recarga de acuíferos, recarga gestionada de acuíferos o MAR**, tercera categoría de la recarga antropogénica se trata de una alternativa de gestión hídrica en la cual se introduce de manera **controlada** agua de recarga adicional en el sistema de aguas subterráneas por medio de mecanismos de infiltración. Otros nombres con los que se reconoce a la MAR son: recarga artificial, recarga mejorada o aumentada, embancamiento de agua (water banking) y almacenamiento subterráneo sostenible (ídem) [Bonilla y Stefan, 2017].

Los principales propósitos de los proyectos MAR son: lograr un equilibrio entre el volumen de agua recargado a los acuíferos y el volumen extraído del mismo, mejorar la calidad del agua subterránea receptora, detener el hundimiento del terreno generado por el abatimiento del nivel del manto freático, reducir la intrusión marina o salina continental, hacer uso de los acuíferos como sistemas de conducción y filtración del agua; y generar un reservorio de agua para uso posterior. (Bonilla y Stefan, 2017; CONAGUA y IINGEN-UNAM, 2014)

La factibilidad de esta práctica depende de tres consideraciones principales, la primera es que exista un volumen de agua disponible para su inyección; la segunda, es que exige una calidad elevada en el agua de recarga, dado que esta incidirá directamente en las características del agua nativa del acuífero o en el caso de no alcanzar los estándares de calidad, deberá ser sometida a un tratamiento que mejore sus condiciones; y la tercera, la existencia de zonas o sitios permeables que promuevan la infiltración de agua en el acuífero tales como pozos, estanques o galerías filtrantes (Bonilla y Stefan, 2017; SGO & Lesser y Asociados, 1991).

Frente al almacenamiento superficial, las técnicas de MAR representan una alternativa que requiere una menor área para su construcción, mantiene menores costos de inversión y mantenimiento y, además, se tienen menores pérdidas de agua por evaporación. Pueden ser implementadas para cumplir diversos propósitos, en distintas clases de acuíferos, con diversos tipos de fuentes de agua de recarga y con una amplia variedad de requerimientos sociales y ambientales (Bonilla y Stefan, 2017).

5.4.2.1 Tipos de recarga artificial de acuíferos

La tecnología de MAR es una herramienta que promueve la correcta gestión de los recursos hídricos subterráneos, el aumento de la disponibilidad del recurso y la

mejora de la calidad de las aguas subterráneas. La NOM-014-CONAGUA-2003 clasifica la recarga artificial en los métodos:

a) Superficial: La recarga se realiza desde una superficie permeable por infiltración mediante estanques, lagunas de infiltración, humedales, canales, inundación del terreno, retornos de riego, o la combinación de estas obras;

b) Subsuperficial: El agua de recarga es introducida en la zona no saturada del acuífero por medio de pozos secos, zanjas o estanques profundos, y

c) Directo: Conocidos también como sistemas profundos de recarga y consisten en la introducción directa del agua al acuífero por medio de pozos realizando una perforación parcial o total de las capas superiores del acuífero.

Algunas de las tácticas aplicadas en la recarga directa de acuíferos son: los pozos abiertos de inyección, los pozos profundos y mini sondeos, sondeos, el almacenamiento en el acuífero y recuperación (ASR) y el almacenamiento en el acuífero, transporte y recuperación (ASTR) (CONAGUA y IINGEN-UNAM, 2014).

5.4.2.2 Casos internacionales

De acuerdo con el grupo de trabajo del inventario de MAR creado por la IAH-MAR se cuentan con alrededor de 1,200 sistemas de recarga artificial (SRA) en 62 países (Bonilla y Stefan, 2017).

El primer proyecto MAR según el inventario global fue implementado en Reino Unido en 1810, mismo que consistió en filtración en la margen de un río. Cien años después, Estados Unidos de América (1900-1909) generó un proyecto de lagunas y estanques de infiltración. Fue entre 1950-1959, que Australia desarrolló represas de recarga y Túnez implementó esta misma práctica 10 años después. Por su parte, Brasil realizó represas subsuperficiales en el período de 1980-1989 (Bonilla y Stefan, 2017).

En este apartado, se mencionan algunos proyectos MAR ejecutados en diferentes regiones del mundo.

Condado de Orange, California, Estados Unidos de América

En el Condado de Orange, en la costa sur de California, el Orange County Water District (OCWD) ha llevado a la práctica técnicas de MAR en la zona haciendo uso de agua regenerada altamente tratada. En 1976, el ART a nivel terciario comenzó a recargarse en el acuífero con el propósito de ser una barrera frente a la intrusión salina y años después, la inyección se efectuó con un porcentaje del efluente en combinación con agua de pozos profundos a partir de cuatro pozos ubicados en la PTAR avanzada. Así, el porcentaje restante del agua regenerada es dirigida hasta las cuencas de recarga de agua subterránea. Además, por medio de serpenteos en los ríos Santa Ana, Colorado y Sacramento también se lleva a cabo la recarga profunda de acuíferos (Hutchinson, 2017).

El condado de Orange depende en un 75% del acuífero para el suministro de agua potable. La operación de las prácticas anteriormente descritas ha dado como resultado que en promedio se logren recargar 280 millones de m³/año de agua; lo que ha favorecido al rendimiento de la cuenca de agua subterránea y permitido una extracción del recurso de hasta 430 millones de m³/año (CONAGUA, 2019a; Hutchinson, 2017).

El Paso, Texas, Estados Unidos de América

El abastecimiento de agua para consumo humano en Cd. Juárez, Chihuahua y Cd. El Paso, Texas, depende de tres fuentes: el acuífero del Bolsón del Hueco, el Bolsón de la Mesilla y del río Bravo. La tasa de extracción del Bolsón del Hueco era 15 a 20 veces mayor que la tasa de recarga natural, por lo que una de las acciones emprendidas para la conservación del nivel del acuífero no confinado fue inducir su recarga con ART (CONAGUA, 2019a).

El tratamiento que la PTAR Fred Hervey realiza al agua residual doméstica incluye las etapas de: cribado, desarenado, sedimentación primaria, homogenización, reactor biológico aireado con adición de carbón activado en polvo, desnitrificación, clarificación (2 fases), adición de cal, recarbonatación (2 fases), filtración en arena, ozonación, filtración en carbón activado granular y desinfección con cloro (CONAGUA, 2019a).

El agua regenerada con una calidad de potable es inyectada por medio de pozos al Bolsón del Hueco y también es destinada a sistemas de riego y a torres de enfriamiento de refrigeración (CONAGUA, 2019a).

Ginebra, Suiza

El sistema de MAR del acuífero del Genevois (o del Arve), ubicado entre territorio francés y suizo, es un ejemplo de gestión conjunta de aguas subterráneas transfronterizas que opera de manera exitosa desde 1980. El agua de recarga tiene como origen el río Arve. A esta agua cruda se le remueve el material flotante y arenas por medio de una rejilla y desarenador, y es sometida a los procesos de micro-floculación con tricloruro de hierro (FeCl₃) sobre filtro de tres capas y desinfección con cloro (Cl₂) antes de ser introducida al acuífero (De los Cobos, 2017).

A lo largo de 35 años, la técnica de zanjas por drenes de infiltración aplicada en Ginebra ha permitido a la región beneficiarse de una gran reserva natural de agua, al incrementar el nivel medio del acuífero en 6 a 7 metros de profundidad, al facilitar la distribución del agua infiltrada a decenas de kilómetros y al promover la gestión de las estaciones de bombeo a lo largo del acuífero (De los Cobos, 2017).

Ginebra es dependiente en un 20% de las reservas de agua subterránea para la distribución del agua potable. El beneficio de la técnica de MAR empleada en el acuífero del Arve, traducido en cifras representa una recarga de 290 hm³ de agua

renovada y más de 555 hm³ de extracción de reservas de manera anual (De los Cobos, 2017).

Windhoek, Namibia

La implementación de la técnica de MAR en la ciudad de Windhoek, Namibia resultó una alternativa viable frente al bombeo de agua potable del río Okavango (Murray *et al.*, 2017).

El acuífero de Windhoek se trata de un banco de agua en el cual agua superficial y residual tratada son transferidas para su almacenamiento y posterior extracción. El primer período de “producción” del sistema se dió entre 2006 a 2012, teniendo 3.3 hm³ como volumen de recarga artificial total. Esta capacidad de recarga provocó que algunas de las baterías de pozos alcanzarán su capacidad máxima (Murray *et al.*, 2017).

El agua de inyección del sistema tiene como fuentes de recarga en un 75% cuerpos superficiales y en un 25% aguas residuales; estas fuentes son sometidas a procesos de tratamiento que aseguran una calidad de agua potable. La inyección del flujo en el acuífero se lleva a cabo de manera directa debajo del nivel piezométrico por medio de pozos profundos (Murray *et al.*, 2017).

Adelaida, Australia

Desde 1999, el agua residual sometida a tratamiento terciario en la PTAR de Bolívar, Australia ha sido utilizada para riego agrícola, no obstante, debido a la alta demanda del recurso y la posibilidad de almacenar el agua producida en temporada de invierno se aplicó el ASR como sistema de recarga del ART. Dicho sistema realiza una inyección directa al acuífero por medio de un pozo a una profundidad aproximada de 103 a 160 m (Page *et al.*, 2010).

La legislación australiana establece que el agua utilizada para irrigación de zonas de horticultura debe contar con un proceso de tratamiento terciario por lo cual, la PTAR de Bolívar cuenta con un tren de tratamiento compuesto por las etapas de sedimentación, lodos activados, lagunas de estabilización, filtración, cloración y almacenamiento en estanques. Finalmente, el ART se utiliza en riego o se recarga en el pozo ‘T2’ – Puerto inferior del acuífero Willunga (Page *et al.*, 2010).

Gaobeidian, Pekin, China

La PTAR de Gaobeidian cuenta con una capacidad de tratamiento de 1 millón de m³/día de agua residual. Esta planta es la más grande de las 15 plantas de tratamiento en operación (o en gestión) de la capital; trata aproximadamente el 40% del total de descargas de aguas contaminadas de Pekin (CONAGUA, 2019a).

En sus instalaciones la PTAR cuenta con una planta de demostración de recarga de acuíferos. Se utiliza un efluente tratado a nivel secundario, el cual es sometido a tratamiento de coagulación, sedimentación-filtración rápida, ozonación y filtración lenta de arena; para finalmente ser inyectado a un caudal de 20 m³/h en los pozos de recarga de un acuífero aluvial. La práctica de MAR de inyección directa en pozos se considera como una opción buena y efectiva para Pekin debido a su limitada disponibilidad de tierra (CONAGUA, 2019a).

5.4.2.3 Casos nacionales

En México el primer antecedente de aplicación de prácticas MAR tiene registro en 1943, con la obra de anegamiento por modificación de canales de corriente para el río Magdalena, Ciudad de México. Esta obra tuvo un alcance en su tasa de infiltración de 0.14 m³/s y 0.33 m³/s en cada canal. No obstante, en 1960 su operación fue cancelada debido a inundaciones. Después de ello, muchos proyectos de recarga que se pusieron en marcha fueron abandonados por problemas en su operación, mantenimiento o administración (CONAGUA y IINGEN-UNAM, 2014).

Actualmente, la recarga gestionada de acuíferos es implementada en su mayoría a escala piloto y en pocos casos a mayor escala y, tiene un volumen aproximado de recarga de 100 Mm³/año (Millones de metros cúbicos por año). Se cuenta con propuestas fundamentadas en estudios que promueven la ejecución o construcción de proyectos de MAR con un potencial de volumen de recarga de 255 Mm³/año (CONAGUA y IINGEN-UNAM, 2014).

Palma *et al.* (2014) establecen que en México se cuenta con 3 proyectos de recarga en operación identificados por la CONAGUA y 8 anteproyectos de recarga, que están en gestión o construcción, o que actualmente se encuentran en el desarrollo de los estudios necesarios para la implementación de un proyecto a mayor escala. De acuerdo con CONAGUA y IINGEN-UNAM (2014) los proyectos de MAR en operación se ubican en San Luis Río Colorado, Sonora; en la Región Lagunera, Coahuila y en el Valle de México. Estos proyectos y los anteproyectos nacionales son mostrados en el mapa presentado en la Figura 5.5.

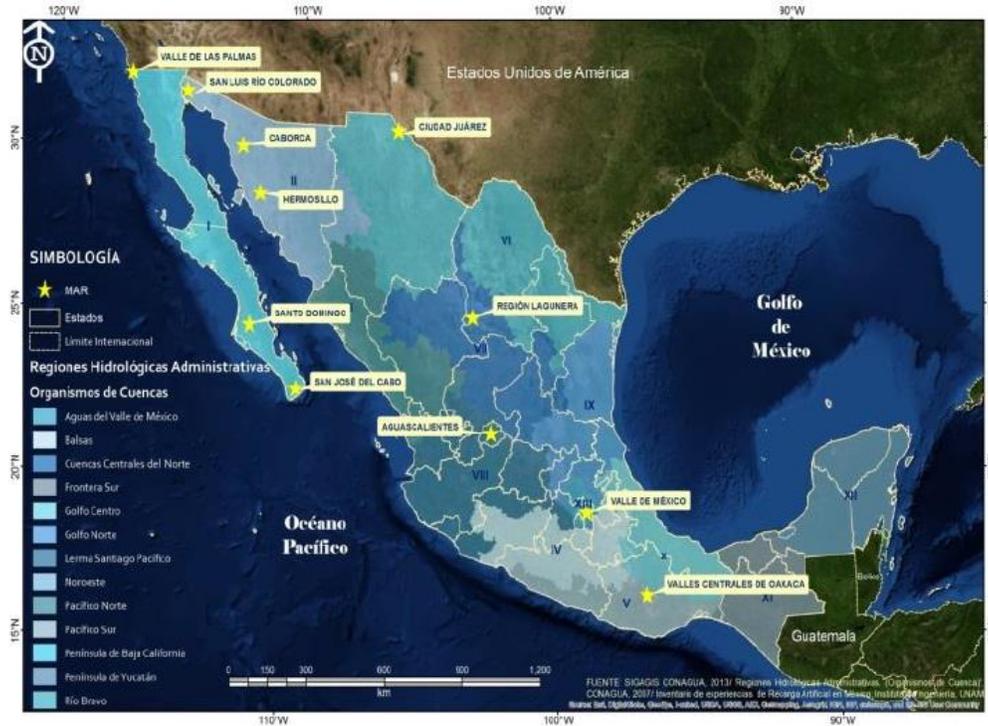


Figura 5.5. Proyectos MAR en México (Palma et al., 2014)

Toluca, Estado de México

Para cubrir la demanda de agua potable en el municipio de Toluca, Estado de México, México, se utilizan como fuentes de abastecimiento de agua potable: el agua proveniente de pozos con un 60% de aportación y, el flujo del acueducto Cutzamala que representa un 40% del agua de distribución (CONAGUA, 2019a).

El abastecimiento trae consigo la sobreexplotación del acuífero del Valle de México, misma que junto al aumento en la tala de bosques, el cambio de uso de suelo y al alto grado de erosión de la región, han propiciado un decremento en la infiltración natural al acuífero. Como consecuencia, se ha generado una disminución del nivel freático en el acuífero que va de 1.2 a 3 metros cada año (CONAGUA, 2019a).

En aras de mitigar este característico déficit hídrico del acuífero, se han propuesto la creación de obras que promuevan su recarga natural con agua pluvial como zanjas, tinas ciegas o trincheras y, además, se construyó una PP que trata 20 L/s del efluente secundario proveniente de la macro-PTAR de Toluca Norte por medio del tren de tratamiento de biofiltro, reactor biológico para desnitrificación, sedimentación, filtración de lecho profundo, adsorción en carbón activado y desinfección con luz UV, para producir un agua con los niveles de calidad requeridos para su inyección en el acuífero (CONAGUA, 2019a).

Valle de Ocotlán, Oaxaca

Las obras de recarga hídrica del acuífero de los Valles Centrales realizadas por 16 comunidades zapotecas en Valle de Ocotlán, Oaxaca, México se conforman por aproximadamente 588 pozos de absorción y las lagunas artificiales junto a presas pequeñas sobre ríos y arroyos suman 21 sistemas. En la subcuenca de Ocotlán existen 1113 aprovechamientos de agua subterránea, el 87.6% del volumen extraído es utilizado en propósitos agrícolas y el 9.5% tiene como propósito el uso público-urbano y doméstico (Ojeda-Olivares *et al.*, 2017).

De acuerdo con resultados de evaluaciones de efectividad aplicadas a las obras de recarga, se consideró que las lagunas artificiales aportan mayor volumen y que las obras con mayor potencial de recarga son las localizadas en áreas con conductividades hidráulicas altas (Ojeda-Olivares *et al.*, 2017).

Dado que las construcciones ayudan a recuperar el recurso de escorrentía superficial y estas no cuentan con materiales filtrantes, la concentración alta de nitratos en el agua de recarga puede alterar la calidad hídrica en el acuífero y podría representar un riesgo a la salud por su posterior consumo. Por lo anterior, son necesarios los estudios de la calidad del agua de recarga y del monitoreo piezométrico de cada obra para asegurar una correcta gestión del sistema de recarga del acuífero (Ojeda-Olivares *et al.*, 2017).

San Luis Río Colorado, Sonora

La planta de tratamiento de tipo lagunar de San Luis Río Colorado, Sonora, México, posee una capacidad hidráulica de 375 L/s y cuenta con dos trenes de tratamiento compuestos cada uno por una laguna anaerobia, una laguna facultativa, dos unidades de lagunas de maduración y finalmente, con una variación entre estanque de filtración e infiltración, respectivamente (CONAGUA, 2019a).

Ante la disponibilidad de agua tratada a nivel secundario, se comenzó el proyecto de recarga artificial por medio de la infiltración del acuífero de la región de San Luis Río Colorado (CONAGUA, 2019a). Este sistema de MAR es el primero operado de manera regular y exitosa en México (Hernández-Aguilar, 2017); emplea dos trenes constituidos por cuatro lagunas cada uno, dotados por un canal central y con volumen total de infiltración de 29 800 m³/día; así como cuatro pozos de seguimiento de la calidad del agua tras su infiltración y contacto posterior con el agua nativa (CONAGUA, 2019a).

Los valores de los parámetros de calidad del agua infiltrada se consideran “muy aceptables” en cumplimiento a los establecidos en la NOM-127-SSA1-1994 (CONAGUA, 2019a). De manera posterior a la infiltración tratamiento suelo-acuífero (SAT) del efluente de la PTAR se obtuvieron muestras en los pozos de observación, en las cuales se reportaron reducciones de los parámetros bacteriológicos y químicos, indicando con ello que el suelo cumple con el propósito de mejorar la calidad del efluente (Hernández-Aguilar, 2017).

Chihuahua, Chihuahua

El proyecto piloto de MAR en la cuenca de los Ojos del Chuvíscar consiste en: una presa filtrante (muro de gavión) en el cauce del río Chuvíscar, tubería aguas arriba de este último, tubería de conducción, un medidor de flujo y volumen, un sistema de desinfección por cloración y un pozo de recarga (Silva-Hidalgo *et al.*, 2017).

Durante el período de operación de la técnica, el cual se trata de la época de precipitación de la zona, son los pozos de extracción de agua potable (activos e inactivos) de la ciudad de Chihuahua los que son beneficiados por la infiltración de agua. De acuerdo con los análisis de calidad hídrica en tres pozos ubicados aguas abajo de la zona de recarga aún se preserva la calidad del agua nativa después de 12 años de ejecución del proyecto (Silva-Hidalgo *et al.*, 2017).

San Luis Potosí, San Luis Potosí

El colector Salk realiza la infiltración de agua pluvial al acuífero del Valle de San Luis Potosí. El proyecto surge como solución tanto a la sobreexplotación del acuífero mencionado como a la disposición de los grandes volúmenes de agua pluvial proveniente de la sierra San Miguelito por fenómenos hidrometeorológicos extraordinarios (Briseño-Ruiz *et al.*, 2017).

El modelo de recarga se compone por un sistema de rejillas que remueve los sólidos mayores a una pulgada de los escurrimientos pluviales; del colector Salk, un sistema de conducción debajo de la avenida Salk que tiene un gasto máximo de 21.93 m³/s de agua de tormenta; el área de captación y almacenamiento de agua en un banco de materiales en desuso, el cual funciona como sedimentador natural y es en él donde se lleva a cabo la infiltración al acuífero del Valle de San Luis Potosí (Briseño-Ruiz *et al.*, 2017).

En lo referente a las características fisicoquímicas y biológicas del agua de tormenta que se infiltra por medio del colector Salk, al no haber una legislación vigente en sus inicios de operación, se dió por hecho que la calidad del agua a recargar poseía características similares a las del agua con fines de distribución (Briseño-Ruiz *et al.*, 2017).

Cuenca del río Magdalena, Ciudad de México

La técnica de MAR implementada en la cuenca del río Magdalena consiste en 22 represas de gavión que captan las aguas de lluvia y escurrimientos de la zona para ser infiltrados en la cañada de Aguaje. La infiltración anual promedio por parte de las represas es de 382,060.72 m³/año, cantidad que representa la operación cuatrimestral de 19 represas y la anual de 3 (Mendoza-Cázares, 2017).

La recarga tiene beneficios locales al incrementar el grado de humedad del suelo boscoso y al contribuir al flujo de los manantiales de la zona. Se considera que la infiltración de agua superficial por medio de represas de gavión no impacta de forma

directa al acuífero de la ZMVM pero sí favorece con la recarga a la parte alta de la cuenca del río Magdalena (Mendoza-Cázares, 2017).

5.4.3 Recarga directa con agua renovada

Las fuentes de recarga consideradas en la MAR son: las aguas meteóricas colectadas en instalaciones urbanas, los escurrimientos de lluvias torrenciales, el agua contenida en presas de almacenamiento y las aguas residuales de zonas urbanas-industriales (Arreguín *et al.*, 2017).

Las aguas residuales son consideradas un recurso potencial en la recarga gestionada de acuíferos debido a su generación constante y creciente. De acuerdo con los datos de CONAGUA (Tabla 5. 3) en 2017, en la República Mexicana, el volumen de aguas residuales no municipales descargado fue de 218.1 m³/s, del cual solo se trataba el 38.4%; mientras que la generación de las aguas residuales municipales ascendió a 234.9 m³/s, siendo el 63% del volumen de agua recolectado por medio de los sistemas de alcantarillado el cual fue sometido a tratamiento en las 2,562 PTAR en operación en el país (CONAGUA, 2018).

Tabla 5. 3. Descargas de aguas residuales municipales y no municipales, 2017 (CONAGUA, 2018)

Centro urbanos (descargas municipales)		
Volumen		
Aguas residuales municipales	7.41	miles de hm ³ /año (234.9 m ³ /s)
Se recolectan en alcantarillado	6.79	miles de hm ³ /año (215.2 m ³ /s)
Se tratan	4.28	miles de hm ³ /año (135.6 m ³ /s)
Carga contaminante		
Se generan	2.00	millones de toneladas de DBO ₅ al año
Se recolectan en alcantarillado	1.83	millones de toneladas de DBO ₅ al año
Se remueven en los sistemas de tratamiento	0.92	millones de toneladas de DBO ₅ al año
Usos no municipales incluyendo a la industria		
Aguas residuales no municipales	6.88	miles de hm ³ /año (218.1 m ³ /s)
Se tratan	2.64	miles de hm ³ /año (83.7 m ³ /s)
Carga contaminante		
Se generan	10.32	millones de toneladas de DBO ₅ al año
Se remueven en los sistemas de tratamiento	1.75	millones de toneladas de DBO ₅ al año

Al considerar el reúso directo de agua renovada para consumo humano o la infiltración incidental hasta reservorios de agua usados para la distribución de agua potable, la recarga de acuíferos con ART podría generar efectos como el deterioro de las características físicas, químicas, microbiológicas y radiológicas del agua subterránea nativa, así como daños potenciales en la salud pública (Arreguín *et al.*, 2017). Por lo anteriormente expuesto, existen regulaciones que en vías de gestionar

la seguridad y confiabilidad de la calidad sanitaria del agua renovada establecen valores específicos límite para diversos tipos de contaminantes.

5.4.3.1 Normatividad nacional

En los Estados Unidos Mexicanos, la administración del agua se encuentra a cargo del gobierno federal por medio de la CONAGUA y la regulación del agua está establecida en el artículo 27 de la CPEUM. Por su parte, las responsabilidades de los municipios sobre este recurso son declaradas en el artículo 115 de la Constitución (Cruz-Ayala y Megdal, 2020).

De acuerdo con lo mencionado en el artículo 7 de la Ley de Aguas Nacionales (LAN, 2016), sobre la declaración de utilidad pública de la recarga artificial de acuíferos, la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) publicó y mantiene vigentes las Normas Oficiales Mexicanas NOM-014-CONAGUA-2003 y NOM-015-CONAGUA-2007, las cuales establecen los lineamientos a seguir para la construcción de proyectos de MAR y definen los estándares de calidad para el agua de recarga.

En lo referente a la NOM-015-CONAGUA-2007, se dictan las características del agua y especificaciones de las obras en la infiltración artificial a acuíferos con aguas pluviales y escurrimientos superficiales.

Por su parte, la NOM-014-CONAGUA-2003 es aplicable a obras de recarga artificial que ejecuten el uso de ART y cuyo propósito sea almacenar e incrementar el volumen de agua en los acuíferos, para una posterior recuperación y reúso. En ella, se estipulan los requisitos a cumplir referentes a: información y estudios básicos del proyecto de recarga artificial, la calidad del agua, la operación y el monitoreo por aplicar en los sistemas de recarga artificial de acuíferos con ART. La calidad del ART para recarga debe cumplir con los parámetros que se especifican en la Tabla 5. 4.

Tabla 5. 4. Calidad del ART para recarga artificial de acuíferos (SEMARNAT, 2009a)

Tipo de contaminante	Tipos de sistemas de recarga	
	<i>Superficial/Subsuperficial</i>	<i>Directo</i>
Microorganismos patógenos	Remoción o inactivación de microorganismos enteropatógenos	Remoción o inactivación de microorganismos enteropatógenos
Contaminantes regulados por norma	Límites permisibles NOM-127-SSA1- 1994	Límites permisibles NOM-127-SSA1- 1994
Contaminantes no regulados por norma*	DBO ₅ ≤ 30 mg/l COT = 16 mg/l	COT ≤ 1 mg/l

* DBO₅: Demanda Bioquímica de Oxígeno, prueba a los 5 días, COT: Carbono Orgánico Total.

De acuerdo con la norma, cuando el límite exterior del SRA se encuentre a una distancia menor de 1.0 km de captaciones que suministren agua subterránea para usos público-urbano o doméstico, de manera adicional a los requisitos referidos en la Tabla 5. 4, se deberán de cumplir entre otros requisitos, los siguientes:

- a) Dar cumplimiento a los LMP de calidad del agua de recarga que determine CONAGUA, para aquellos parámetros no regulados por la NOM-127-SSA1-1994, cuya presencia se suponga atendiendo al origen del ART. La totalidad de parámetros regulados por la NOM-014-CONAGUA-2003 puede consultarse en la Tabla 5. 8 del apartado de Anexos;
- b) Realizar, en su caso, en el agua renovada los estudios toxicológicos que determine la CONAGUA.

En el apartado de Anexos se presenta la Figura 5.20, donde se define el procedimiento de solicitud para construcción de un proyecto de recarga artificial (PRA), con base en lo establecido en la NOM-014-CONAGUA-2003.

Cruz-Ayala y Megdal (2020) establecen que en México las políticas nacionales representan una barrera para promover las prácticas de MAR. Consideran factible que estas políticas planteen un sistema eficaz de derechos de aguas subterráneas y además, que se promuevan los proyectos de demostración locales exitosos, en los cuáles se especifique la información técnica y costos, se muestre su efectividad, así como los aspectos técnicos empleados; con el fin de incentivar a la adopción y operación de tecnologías de MAR en el país. Además, reconocen que existe una necesidad del establecimiento y publicación de directrices adecuadas que detallen los beneficios que ofrece la recarga artificial de acuíferos.

5.5 Sistemas de evaluación de desempeño

El término **desempeño** refiere qué tan bien una persona o una máquina, realiza un trabajo o una actividad (Cambridge University Press, 2021). En esta investigación, el desempeño de un sistema de tratamiento de agua será medido para aspectos de monitoreo y calidad de muestras de ART en el logro de ciertos objetivos de evaluación (frecuencias de monitoreo, límites permisibles de la normatividad, límites de medición de las técnicas analíticas y/o eficiencias de remoción de parámetros de calidad).

Abbasi y Abbasi (2012) establecen que la calidad del agua depende de todo lo que ésta pueda recoger durante su trayecto, por lo que en ella se pueden encontrar cientos de constituyentes en forma disuelta, coloidal o suspendida. El principal objetivo de una PTA es producir por medio de una fuente de suministro (convencional o no convencional), agua con una calidad que cumpla los estándares normativos en forma confiable y a un costo razonable (CONAGUA, 2019b), por lo que se considera importante establecer una herramienta que contribuya a evaluar el desempeño del tratamiento implementado sobre la consecución de dicho propósito.

En los últimos 15 años, la práctica de SED se ha vuelto común para los servicios de agua globales y a su vez, la relevancia sobre la necesidad de su uso ha incrementado. Un SED aplicado a los servicios de suministro de agua es considerado como una herramienta sistemática que aporta una visión global del servicio y que apoya la toma de decisiones (Alegre *et al.*, 2017) a corto, mediano o largo plazo.

Algunos de los sistemas de evaluación más relevantes desarrollados para los servicios de abastecimiento y de aguas residuales fueron los promovidos por la Asociación Internacional del Agua (IWA, por sus siglas en inglés) y por el Banco Mundial. En el sector de agua potable, se han realizado evaluaciones de desempeño en las áreas de producción, almacenamiento y distribución de agua potable. Los sistemas de la IWA, del Banco Mundial y de la Ofwat evalúan el cumplimiento de la calidad del agua potable, sin embargo, solo se centran en aspectos sobre su gestión y no abordan los de tipo técnico. Además, estos SED no se enfocan en el componente clave de los sistemas de suministro: el tratamiento del agua (Vieira *et al.*, 2008).

5.5.1 Sistemas de indicadores e índices de desempeño

En el 2017, Alegre y colaboradores establecieron que la **evaluación de desempeño** se trata del uso de ID para determinar el estado actual y la evolución del desempeño de un servicio de agua o saneamiento.

El SED se apoya en el Sistema de indicadores de desempeño (SID). Un SID es parte de una entidad más amplia que asocia a los ID con objetivos, estrategias y factores críticos de éxito dentro de la empresa (Alegre *et al.*, 2017).

El SID se diseña para evaluar el rendimiento general de la planta durante un período de referencia, llamado *período de evaluación*, el cual se recomienda sea de un año (Silva *et al.*, 2012). Por lo tanto, los ID utilizan datos históricos y producen información agregada a nivel de planta, por lo que se utilizan más como un recurso de gestión de la PTA (Silva *et al.*, 2014a; Vieira *et al.*, 2008). Es pertinente mencionar que, los ID considerados más importantes por las empresas de agua y las entidades reguladoras de la industria del agua son los referentes a la calidad del servicio y la calidad del producto (Vieira *et al.*, 2008).

Un **ID** es un instrumento cuantitativo de efectividad y eficiencia de aspectos particulares del servicio otorgado por los proveedores de agua. Mientras la efectividad se trata de la proporción de objetivos preestablecidos logrados, la eficiencia hace referencia a la magnitud en que los recursos de una empresa de agua son utilizados de manera óptima en la producción del servicio (Vieira *et al.*, 2008).

Los **ID** son definidos como razones entre variables de misma o diferente naturaleza. El numerador expresa el objetivo del ID y el denominador la dimensión del sistema,

este último debe ser una causa de cambio en el numerador. Los ID pueden ser adimensionales (por ejemplo, %, -) o intensivos (por ejemplo, kWh/m³, \$/m³) [Alegre *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2012; Vieira *et al.*, 2008].

Vieira *et al.* (2008) consideran que el nivel de detalle de los ID es insuficiente para la toma de decisiones técnicas, por lo que proponen un SED operativo que tome en cuenta los aspectos de las eficiencias generales y unitarias de los procesos u operaciones y su respectiva relación con las condiciones operativas por medio de un Sistema de índices de desempeño (SínD).

Los ID pueden coexistir con los índices, así como con niveles de desempeño o métricas de riesgos cuando se considera factible su presencia en el desarrollo de los criterios de evaluación (Alegre *et al.*, 2017).

Los **ÍnD** son valores adimensionales y son resultado de la aplicación de una función de desempeño a datos de ciertas variables de estado (como las concentraciones de parámetros de calidad del agua) que representan los aspectos clave de la operación de una PTAR (Silva *et al.*, 2014a), o en su caso de una PTA. El empleo de **ÍnD** representa un apoyo para la toma de decisiones a nivel operativo (Vieira *et al.*, 2010).

Los **ÍnD** fueron diseñados con la finalidad de evaluar y mejorar el desempeño operativo diario de una PTA en términos de la calidad del agua residual, la eficiencia de remoción de concentraciones de contaminantes y las condiciones de operación de cada etapa de tratamiento (Silva *et al.*, 2014a) de agua. La principal diferencia es que los ID proporcionan información de desempeño general anual de la PTA mientras que los **ÍnD** proporcionan el desempeño continuo de la PTA y de cada OPU de la planta (Vieira *et al.*, 2010) tan continuamente como lo permita la disponibilidad de los datos (cada hora, diario, etc.) [Silva *et al.*, 2014a] para la toma de decisiones de aspectos operativos (Vieira *et al.*, 2010).

5.5.1.1 Sistema IWA

El SID de la IWA tiene como propósito incorporar todos los aspectos relevantes que hagan referencia a los objetivos y resultados de gestión de una empresa de servicios públicos por medio de la evaluación del desempeño (Alegre *et al.*, 2017).

Este sistema es considerado como referencia en la industria del agua, por lo cual ha sido probado desde 1997 por diversas empresas de abastecimiento de agua en todo el mundo (Alegre *et al.*, 2017; Vieira *et al.*, 2008).

El SID del *Manual de buenas prácticas para los servicios de abastecimiento de agua* desarrollado por Alegre *et al.*, (2017) cuenta con una cartera de 170 indicadores que abarcan las categorías de: **recursos hídricos (4 ID)**, **personal (26 ID)**, **físicos (15 ID)**, **operacionales (44 ID)**, **calidad del servicio (34 ID)** y **financieros y económicos (47 ID)**. En el mismo Manual se establecen las pautas y los principios

teóricos para llevar a la práctica el uso de los ID, además de un apartado de Especificaciones del sistema donde se abordan las definiciones, las variables y la descripción detallada de cada ID.

5.5.1.2 Sistema Ofwat

La entidad gubernamental reguladora del sector del agua de Inglaterra y Gales, Ofwat, promueve la aplicación y publicación de un conjunto de indicadores clave de desempeño por parte de empresas prestadoras de servicios de agua. Considera que los indicadores proporcionan una visión general sobre el desempeño de una empresa que puede ser de interés para reguladores, inversores y clientes del servicio y, además estipula que su publicación debe realizarse por lo menos una vez al año (Ofwat, 2013).

Los indicadores se clasifican en cuatro áreas consideradas de alto nivel en la evaluación del desempeño de la empresa de servicios de agua: **experiencia del cliente (3 ID), confiabilidad y disponibilidad (6 ID), impacto ambiental (5 ID) y financiera (4 ID)** [Ofwat, 2013]. En la guía publicada para las empresas de agua y alcantarillado se especifica la definición y la unidad de medición de los ID. Es de resaltar que tal como lo comenta Vieira (2009) este marco de ID guarda prioridad a aspectos sobre la satisfacción del consumidor de agua.

5.5.1.3 Sistema de Santana

En 1998, Santana y colaboradores propusieron una metodología de Evaluación del Funcionamiento de las PTA para abastecimiento público, la cual conserva dos vertientes de evaluación, una expedita y otra técnica.

La evaluación expedita genera un índice global que es resultado de la suma ponderada de dos subíndices: calidad del agua tratada y eficiencia del tratamiento. Por su parte, la evaluación técnica relaciona con mayor detalle parámetros de calidad del agua en un subíndice, y ejecuta su adición ponderada junto con los subíndices de eficiencia de tratamiento y de los criterios de control de cada OPU de tratamiento, para dar como resultado del análisis de estas tres variables un índice global (Santana *et al.*, 1998).

5.5.1.4 Sistemas de desempeño global y operativo

Desde 2006, investigadores del Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil de Portugal (LNEC) han desarrollado SED para PTA y PTAR para ejecutar la evaluación respectiva del desempeño **general**, así como del desempeño **operativo** de la planta (Silva *et al.*, 2012).

Los SED para empresas de agua potable y aguas residuales a lo largo de sus generaciones, dos para potable y tres para aguas residuales, consideran que el

objetivo general de toda planta de tratamiento es la producción eficiente y sostenible de agua potable o regenerada. Se han desarrollado los siguientes dominios principales de evaluación del desempeño por medio de ID: **calidad de aguas residuales tratadas, eficiencia y confiabilidad de la planta, uso de recursos naturales y materias primas, gestión de subproductos, seguridad, personal, recursos financieros y, planificación y diseño** (Quadros *et al.*, 2010; Vieira *et al.*, 2010; Vieira *et al.*, 2008).

Vieira (2009) estableció un SED estandarizado, cuantitativo y orientado a objetivos con el que evaluó el desempeño global y operativo de cinco PTA de diferentes características por medio de la implementación de ID y de Índ. Los Índ que analizaron el rendimiento operativo de las plantas utilizaron una escala de desempeño de 0 a 300, para los **criterios de calidad del agua tratada, la eficiencia de OPU** y las **condiciones operativas de las unidades de tratamiento**.

Por su parte Vieira *et al.* (2010) aplicaron el SED desarrollado por Vieira (2009) para analizar el rendimiento de dos PTA bajo condiciones variables de demanda de agua y de calidad del influente para los aspectos de **calidad del agua y eficiencia del tratamiento**.

Mientras los ID ejecutan una comparación directa de los valores que toman las concentraciones de parámetros contra estándares de calidad del agua. Los Índ utilizan medidas de desempeño que identifican cuándo el tratamiento dió cumplimiento/incumplimiento a los objetivos de evaluación preestablecidos, y a su vez, toma el incumplimiento como una oportunidad de mejora (Silva *et al.*, 2014a).

En suma y con base en lo antes mencionado, los SED son una herramienta poderosa que puede ser aplicada en PTA en México ya que, si bien se cuenta con un *Manual para la evaluación rápida de plantas potabilizadoras* desarrollado por la CONAGUA (2019d), los SED ofrecen la ventaja de que pueden ser adaptados y aplicados tanto a plantas potabilizadoras como a PTAR, lo cual dependerá del caso de estudio y de los objetivos establecidos por los que se ejecuta la evaluación del desempeño. Además, se pretende que el SED propuesto en esta investigación sobre criterios del desempeño global y operativo sea empleado por el personal operador, así como por los tomadores de decisiones de la planta caso de estudio; con los propósitos de detectar el incumplimiento de la normatividad en cuanto al monitoreo y calidad del efluente y a su vez, las posibles anomalías en las OPU de la planta. De manera adicional, y de acuerdo con los principios de funcionamiento teóricos y reales de las OPU, las partes interesadas pueden dictaminar las posibles causas de incumplimiento y posteriormente, aplicar medidas correctivas pertinentes en la gestión y operación del sistema que coadyuven al cumplimiento de la normatividad mexicana para la recarga de acuíferos con ART, la NOM-014-CONAGUA-2003.

5.6 Caso de estudio: Cerro de la Estrella, Iztapalapa, Ciudad de México

El SACMEX pretendió implementar la recarga artificial a nivel piloto del acuífero de la ZMVM bajo técnicas de infiltración superficial e inyección directa de ART en el período de 2010-2013, como medidas frente a las problemáticas de explotación intensiva del acuífero (mayor extracción que recarga), el abatimiento de sus niveles freáticos y la contaminación del acuífero por infiltración de agua de lluvia de mala calidad o de agua residual sin tratamiento (Ávila *et al.*, 2017).

Algunos factores como el relieve geográfico de la zona, la poca infiltración natural a causa del asfaltado de la ciudad y la falta de áreas disponibles para el almacenamiento de grandes volúmenes de agua de tipo pluvial y de escorrentía de irrigación agrícola, también promueven la recarga artificial. El agua utilizada para la potencial recarga del acuífero del Valle de México es proveniente de la PTAR Cerro de la Estrella, ubicada en la alcaldía Iztapalapa, Ciudad de México (Ávila *et al.*, 2017).

Desde los años 80's, la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH), ahora SACMEX, realizó estudios de recarga en la Ciudad de México. Es en 1992 cuando una planta experimental avanzada comienza sus operaciones en la depuración de 20 L/s del efluente secundario de la PTAR Cerro de la Estrella para la recarga del acuífero por medio del pozo Santa Catarina 6. En años posteriores, se llevaron a cabo estudios de impacto ambiental del proceso y se decidió suspender la operación de la planta experimental. En 2010, el SACMEX desarrolló proyectos y estudios pertinentes requeridos por la NOM-014-CONAGUA-2003 para las prácticas de MAR localizadas en la zona oriente de la Ciudad de México (Ávila *et al.*, 2017), incluyendo al proyecto piloto Cerro de la Estrella. En ese mismo año, después de la rehabilitación de la PP Cerro de la Estrella, se retomaron las investigaciones para establecer el tratamiento apropiado para la recarga del acuífero (Encargada de PP Cerro de la Estrella, comunicación personal, 24 de octubre 2019).

SACMEX (2020b) reportó que en el período 2014 a 2016 la PP se encontró fuera de operación. Para 2016, tuvo lugar la adecuación tecnológica de la PP y se reanudaron sus operaciones en 2017 (SACMEX, 2020c). En el año 2019, de acuerdo con la encargada de la PP Cerro de la Estrella (comunicación personal, 24 de octubre de 2019) se iniciaron trabajos de mantenimiento en el sistema de tratamiento de agua, en específico en las áreas de bioensayos y las unidades de filtración, ozonación y ósmosis inversa; se consideró que dichos trabajos fueran desarrollados en un período de medio año, dando el reinicio a las operaciones de la PP para enero de 2020. Sin embargo, SACMEX (2020c; 2020e) reportó en el mes de octubre y noviembre de 2020 que aún continuaba el mantenimiento de los procesos e instrumentos de control de la PP.

5.6.1 Localización del proyecto

La localidad de Cerro de la Estrella está ubicada en la zona oriente de la Ciudad de México, en la alcaldía Iztapalapa. Es en esta zona donde se sitúan la PTAR Cerro de la Estrella y el proyecto piloto de recarga del acuífero de la ZMVM.

Iztapalapa tiene como fuentes de abastecimiento de agua potable para más de 1 millón 800 mil habitantes: (1) Agua subterránea proveniente de 78 pozos, con una aportación de 1.3 m³/s; (2) Recursos hídricos de las presas del Sistema Cutzamala (0.7 m³/s), de Xaltepec (0.6 m³/s) y de Cerro de la Estrella (1.8 m³/s) y, (3) Agua procedente del acueducto Santa Catarina, con un flujo de 0.7 m³/s. Además, aproximadamente el 38% del área de la alcaldía recibe agua potable en contadas horas del día y la distribución también es llevada a cabo por medio de pipas, las cuáles entregan alrededor de 3,400 m³/día de agua (Ávila *et al.*, 2017).

5.6.2 Planta de tratamiento de aguas residuales “Cerro de la Estrella”

5.6.2.1 Características del proceso

Las aguas residuales de tipo municipal provenientes de las alcaldías Iztacalco, Benito Juárez y Coyoacán, así como de Ciudad Deportiva son bombeadas desde la planta San José Aculco y una vez en la PTAR Cerro de la Estrella es sometida a un tratamiento a nivel terciario. La capacidad máxima de operación de la PTAR Cerro de la Estrella es de 4 m³/s, siendo el gasto de operación promedio 2 m³/s (Encargado de la PTAR Cerro de la Estrella, comunicación personal, 24 de octubre de 2019).

El tren de tratamiento de la PTAR Cerro de la Estrella se compone de: un pretratamiento por cribado (mecánico), sedimentación primaria, reactores biológicos aerobios de flóculo suspendido (lodos activados), sedimentación secundaria, filtración en lecho de arena y desinfección con cloro gas (Cl₂) [Riveros, 2013; Magaña, 2007]. Las OPU implementados en la planta se ilustran de manera secuencial en la Figura 5.6.

Es de mencionar que, en una visita realizada a la PTAR Cerro de la Estrella en octubre de 2019 por personal adscrito al Grupo de Tratamiento y Reuso del Instituto de Ingeniería – UNAM, el sistema de cribado mecánico no se encontraba en funcionamiento y las unidades de filtración en lecho de arena se mantienen fuera de operación; este último punto también fue reportado por Riveros (2013).

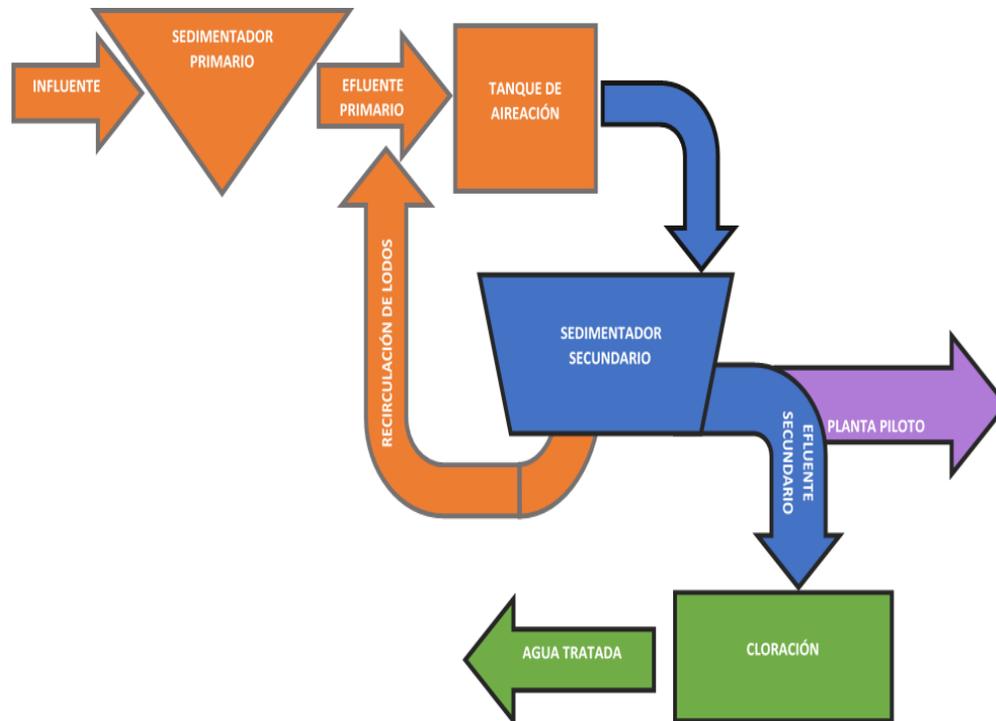


Figura 5.6. Tren de tratamiento de aguas residuales de PTAR Cerro de la Estrella (Ramos, 2021)

El efluente del tratamiento es reutilizado en espacios turísticos y de recreación tales como parques, canales, camellones y lagos; es descargado en zonas lacustres de Mixquic, Tláhuac y Xochimilco; y, es empleado en sectores comerciales e industriales. De acuerdo con Escobar (2014) y Magaña (2007), el 56% del ART se emplea en el llenado de canales y lagos recreativos, el 25% para la recarga de acuíferos, un 8% para riego de áreas verdes, otro 8% es reusado por el sector industrial y un 3% es ocupado por el sector comercial. Debido a los gastos de operación de la PTAR Cerro de la Estrella, se estima que el costo aproximado por 1 m³ de ART es de \$20.00 MXN (Figueroa *et al.*, 2017).

Solo una fracción del efluente secundario (20 L/s) que proviene de las unidades de sedimentación secundaria previa a la de desinfección de la PTAR se envía a la PP Cerro de la Estrella con fines de pulimento para producir agua apta para la recarga del acuífero (Ramos, 2021; SACMEX, 2020d; Ávila *et al.*, 2017).

5.6.3 Planta piloto “Cerro de la Estrella” para la recarga del acuífero

5.6.3.1 Características del proyecto

Con base en el análisis de la estratigrafía del área de Cerro de la Estrella y de factores como el número total de pozos bajo operación ininterrumpida, la variación de los niveles piezométricos de los acuíferos y el abatimiento gradual del volumen de agua subterránea extraída, se planteó la necesidad de llevar a la práctica proyectos de MAR en la zona, cuya fuente de recarga se tratara de agua residual

sometida a potabilización, la cual fuese dispuesta por inyección directa e infiltración al acuífero del Valle de México (Ávila *et al.*, 2017).

La planta experimental de tratamiento avanzado inició sus operaciones con una capacidad operativa de 20 L/s, con los objetivos iniciales de evaluar la factibilidad técnica del sistema de tratamiento para la inyección al acuífero; monitorear y evaluar el comportamiento de las variables hidráulicas y de calidad del agua relacionadas con la recarga artificial, así como su posible impacto al acuífero o al ambiente. Asimismo, la misión de esta planta fue dar observancia al entonces proyecto de norma local (NADF-003-AGUA-2002) y federal (NOM-014-CONAGUA-2003). Como lo solicita la CONAGUA, la planta experimental se trata de un proyecto previo a la recarga masiva de agua a los niveles que demanda el acuífero (Ávila *et al.*, 2017).

De acuerdo con datos de Ávila *et al.* (2017), la PP Cerro de la Estrella cuenta con una extensión territorial de 14.050 m². En ella se distinguen las siguientes áreas físicas: el tren de tratamiento por barreras múltiples, un laboratorio de control, un espacio interactivo de procesos, la zona de bioindicadores de calidad del agua renovada, un lago de infiltración artificial, una sala audiovisual, el área de mantenimiento, las oficinas generales, el área de jardín, el huerto urbano y arbolada, un humedal artificial y la zona piloto superficial y geohidrológica.

Actualmente, el proyecto piloto de tratamiento avanzado busca establecer el sistema de tratamiento de agua adecuado para la recarga artificial (SACMEX, 2018), crear una fuente de abastecimiento de agua interna segura, confiable y económicamente viable, mejorar las características del agua nativa del acuífero, contribuir a la disminución de hundimientos de la zona y, por medio de programas de difusión, crear conciencia colectiva en la ciudadanía sobre el uso eficiente del agua (Ávila *et al.*, 2017).

A partir de 2010, SACMEX reportó la ejecución de una serie de estudios básicos requeridos por la NOM-014-CONAGUA-2003 para la recarga artificial con ART del acuífero de la zona oriente de la Ciudad de México (Ávila *et al.*, 2017). De acuerdo con Palma *et al.* (2014) y Ávila *et al.* (2017) en la totalidad de los requeridos se incluyen la localización, la fuente del agua de recarga, la hidrogeología de la zona del proyecto de recarga artificial y el permiso de infiltración por parte de la CONAGUA. Por su parte, en la Figura 5.7 son presentados los estudios que han sido realizados en el proyecto de recarga de Cerro de la Estrella de acuerdo con Ávila *et al.* (2017).

Debido a que la PP ha operado de manera intermitente, sufriendo rehabilitaciones en las OPU a lo largo de los años o manteniéndose fuera de operación por ciertos períodos sin poder trascender a un proyecto autorizado por la CONAGUA, se presume que una de las principales limitantes del proyecto se trata de la calidad del agua renovada. Es importante mencionar que los datos de calidad del efluente de la PP Cerro de la Estrella no se encontraron disponibles para el público en general, por lo que fueron requeridos al SACMEX para el desarrollo de la presente investigación y pueden ser consultados en la Tabla 5. 9. Calidad del agua del

efluente PP Cerro de la Estrella (SACMEX, 2020b; SSA, 2019; SEMARNAT, 2009a; SSA, 2000) del apartado de Anexos.

Asimismo, SACMEX (2018) refirió que aún se encuentran en desarrollo investigaciones de modelación de la evolución de los niveles freáticos del acuífero y de mejora de la calidad del agua subterránea nativa, los cuales son estudios requeridos por la NOM-014-CONAGUA-2003.

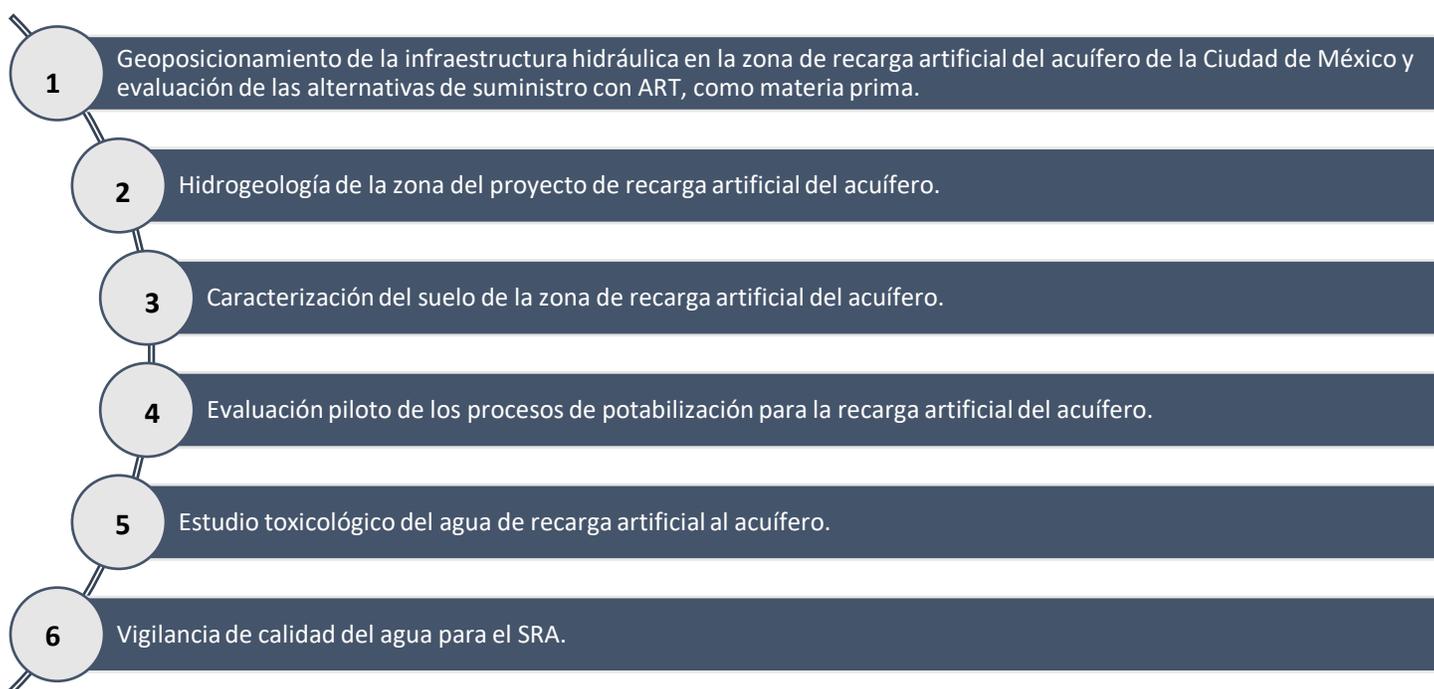


Figura 5.7. Estudios realizados en el acuífero de la zona oriente de la CDMX (Ávila et al., 2017).

5.6.3.2 Barreras múltiples

Un enfoque de tratamiento de agua por medio de barreras múltiples asegura una calidad del agua tratada tal que sea considerada “adecuada” al objetivo de reúso. Este tratamiento consiste en un tren secuencial con diversas vías de retención o eliminación de contaminantes, en el cual la operación o proceso subsecuente complementa la tarea de remoción de la anterior OPU (CONAGUA y IINGEN-UNAM, 2014).

A continuación, se presentan 3 de las configuraciones que ha adoptado a lo largo de los años el proceso de potabilización de la PP Cerro de la Estrella, mismas que en respuesta a una petición de información fueron referidas por SACMEX (2020c).

Configuración 1

En el año 2010, la empresa a cargo de la rehabilitación del proyecto, Ingeniería Especializada del Medio Ambiente S.A. de C.V. (IEMA), conceptualizó un diseño que sólo contempló la remoción de los 11 parámetros de calidad del agua (IEMA,

2010), los cuales son enlistados en la Tabla 5. 5. Así, el proceso de potabilización quedó conformado por las etapas de: coagulación-floculación-sedimentación-filtración con arena sílica, ozonación, filtración con zeolita, ósmosis inversa y desinfección con luz UV (SACMEX, 2020c). En la Figura 5.8 se muestra el diagrama de la configuración del tratamiento anteriormente citada.

Tabla 5. 5. Contaminantes contemplados para diseño de configuración 1 (IEMA, 2010)

Parámetro	Unidad	Valor del influente
Conductividad	μS	697
Turbiedad	NTU	12.64
Color	u Pt-Co	50.86
Sólidos Suspendedos Totales, SST	mg/L	6.7
Demanda Química de Oxígeno (DQO) Total	mg/L	28.93
DQO Soluble	mg/L	26.22
Nitrógeno total	mg/L	1.33
Nitrógeno amoniacal	mg/L	0.34
Nitritos	mg/L	0.13
Fosfatos	mg/L	11.69
Ortofosfatos	mg/L	10.1

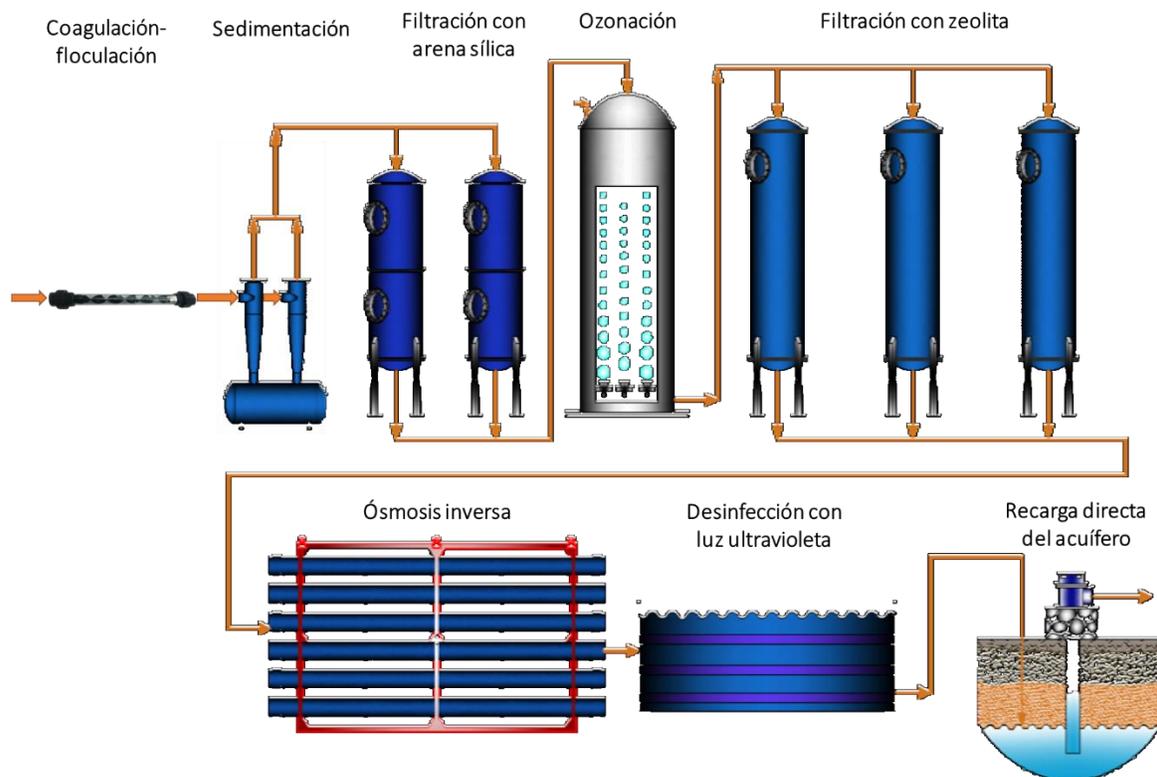


Figura 5.8. Configuración 1 de la PP Cerro de la Estrella (Adaptado de SACMEX, 2011).

Es importante mencionar, que de acuerdo con lo reportado por SACMEX (2020b) la PP estuvo fuera de operación en los años 2014, 2015 y 2016.

Configuración 2

Posteriormente, en 2016-2017, se llevó a cabo una adecuación tecnológica de la PP. De acuerdo con SACMEX (2020c) las modificaciones se dieron en el sistema de filtración, donde todas las unidades fueron empacadas con zeolita. Por lo que las barreras múltiples se configuraron de la siguiente manera: coagulación-floculación-sedimentación-filtración con zeolita, ozonación, filtración con zeolita, ósmosis inversa y desinfección con radiación UV. En la Figura 5.9 se muestra el diagrama del tren de tratamiento implementado en la PP durante su operación de 2017 a 2019. En este período SACMEX (2020e) reportó que se sometía a tratamiento avanzado un flujo promedio de 18 LPS y que el sistema de potabilización operaba 7 horas por día.

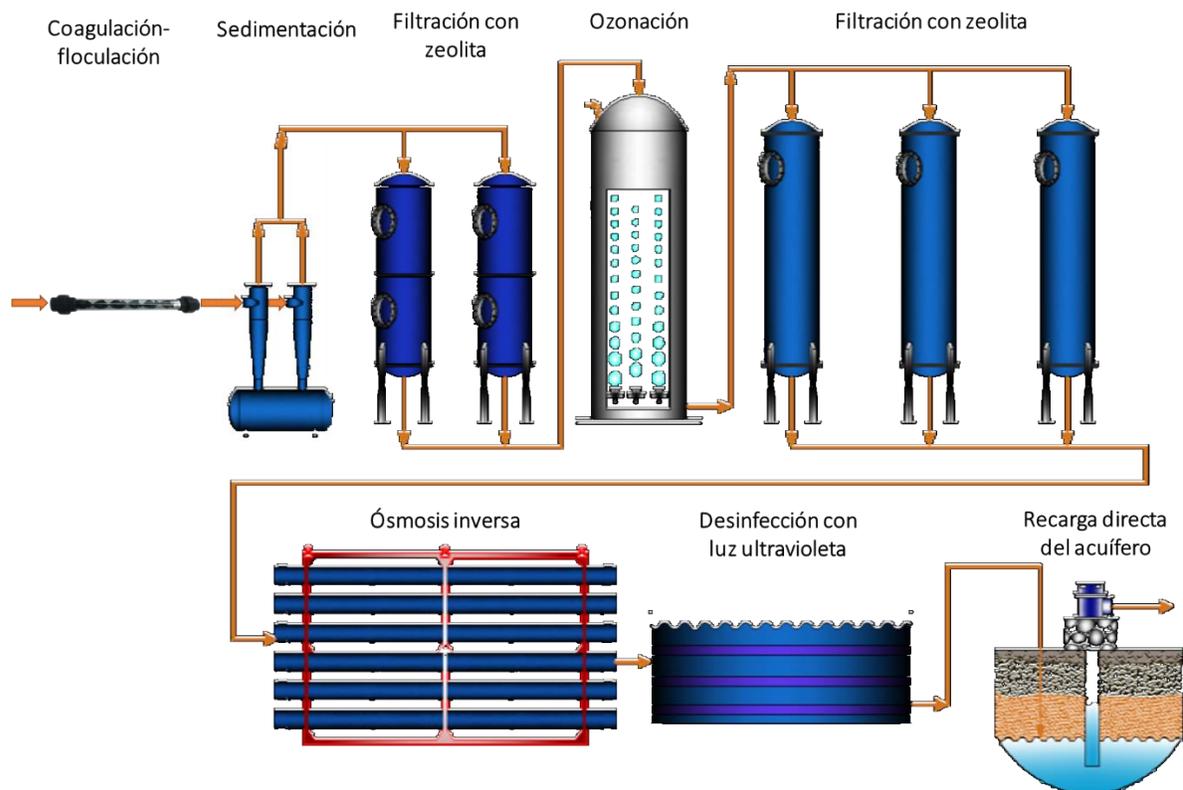


Figura 5.9. Configuración 2 de la PP Cerro de la Estrella (Adaptado de SACMEX, 2011)

Configuración 3

La última rehabilitación que la PP ha experimentado comenzó a finales del año 2019 y se desarrolló a lo largo del 2020. SACMEX (2020c) refiere que esta nueva configuración sigue contando con las OPU de tratamiento que se conceptualizaron en el proyecto original; sin embargo, debido a la geometría de los tanques de las

unidades filtrantes, estos sufrieron cambios, así en la prefiltración (previo a ozonación) se tiene como medio filtrante arena sílica y, en la posfiltración (posterior a la ozonación), se cuenta con un empaque dual de arena sílica y antracita. En la Figura 5.10 se muestra la última configuración del proceso de potabilización implementado en la PP Cerro de la Estrella, la cual se compone por las etapas de: coagulación-floculación-sedimentación-filtración con arena sílica, ozonación, filtración con arena sílica y antracita, ósmosis inversa y desinfección con luz UV.

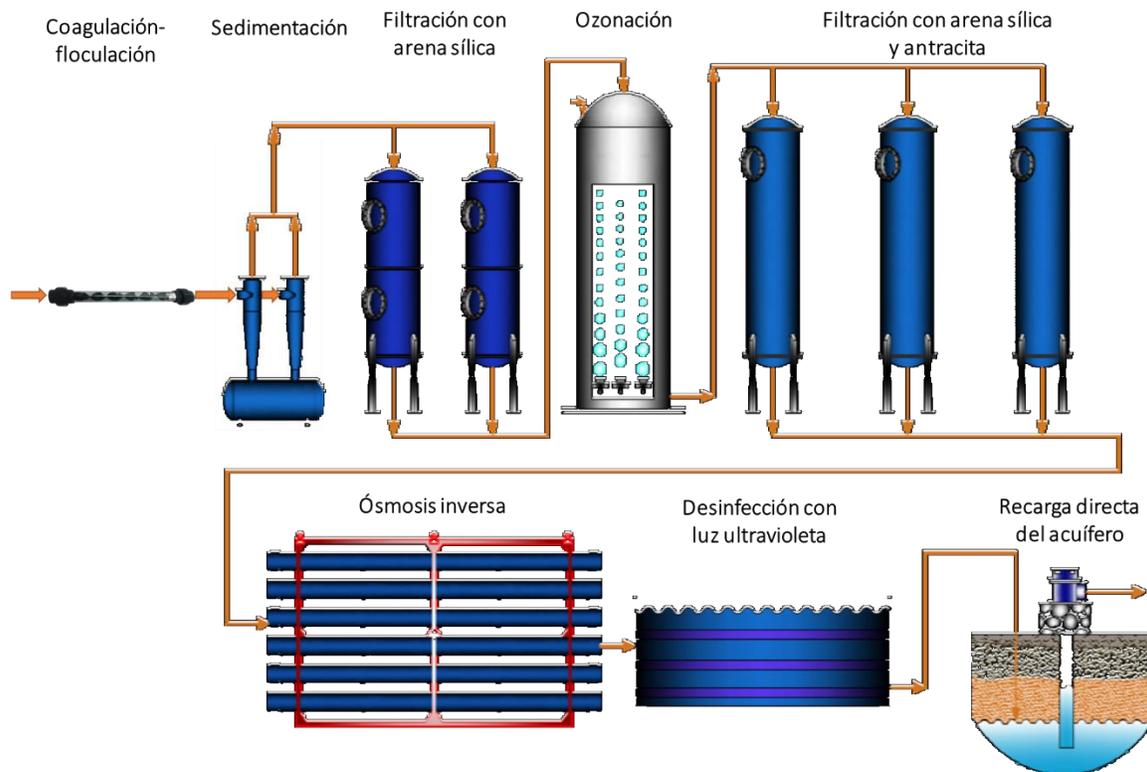


Figura 5.10. Configuración 3 de la PP Cerro de la Estrella (Adaptado de SACMEX, 2011)

La Subdirección para el Análisis y Gestión de la Calidad del Agua del SACMEX, informó que los análisis de calidad de agua en la PP Cerro de la Estrella solo son ejecutados en muestras tomadas en el influente, la prefiltración, la posfiltración, la ósmosis inversa y la desinfección (efluente) [SACMEX, 2020a]. Es decir, no se realizan análisis en todas las barreras múltiples, por lo cual, a efecto de llevar a cabo una homologación de las etapas de tratamiento junto con los datos de calidad histórica proporcionados por el organismo operador, se asignaron los términos de Barrera 1, Barrera 2, Barrera 3 y Barrera 4 ya sea a un conjunto de OPU o a una unidad de tratamiento específica, mismos que son mostrados en la Figura 5.11 y son detallados enseguida.

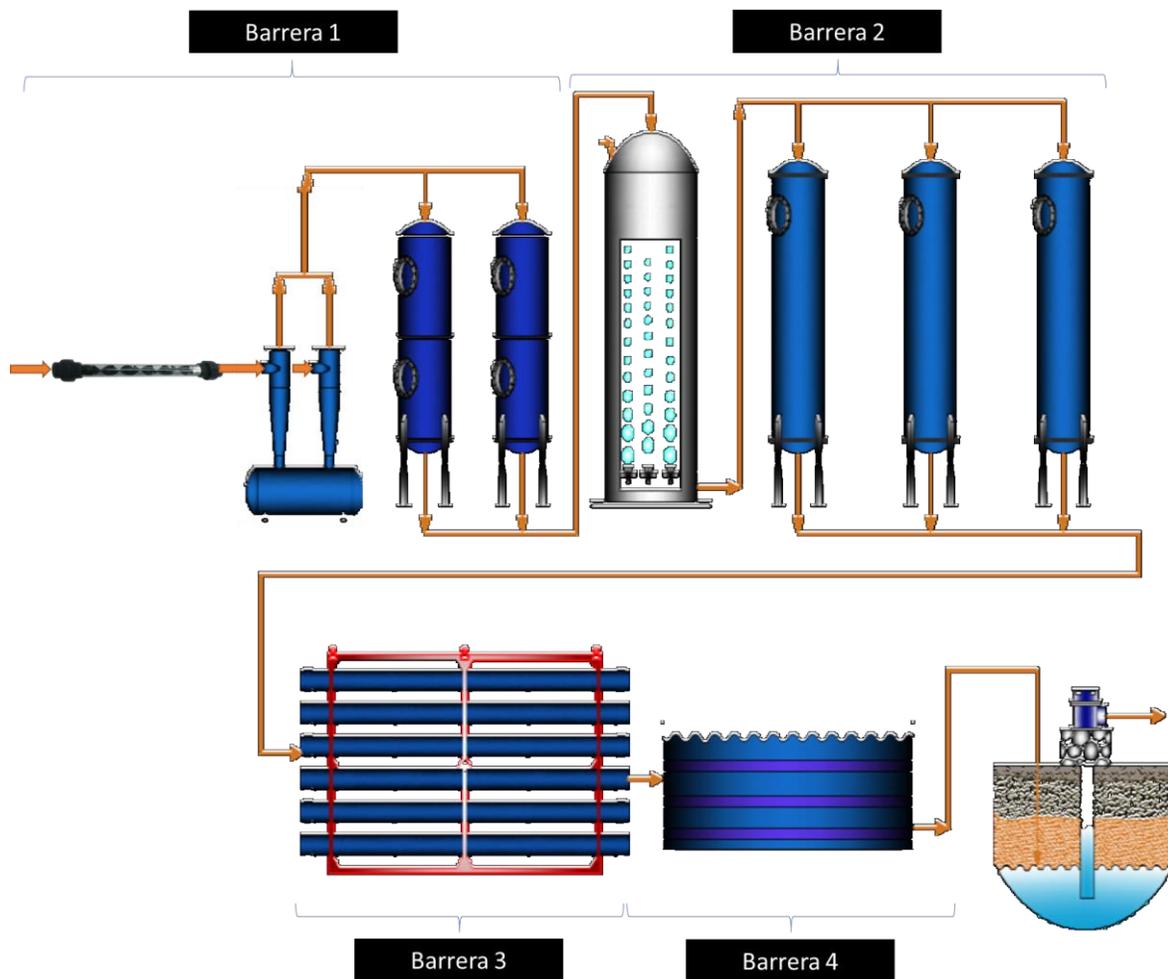


Figura 5.11. Barreras múltiples de la PP Cerro de la Estrella (Adaptado de SACMEX, 2011)

Barrera 1

El flujo de ART proveniente del tratamiento secundario de la PTAR Cerro de la Estrella que ingresa a la PP con una presión de 1 kg/cm² (Ávila *et al.*, 2017).

La primera barrera, llamada **prefiltración** por el organismo operador (SACMEX, 2020a; 2020b) contempla el conjunto de etapas de **coagulación – floculación – sedimentación – filtración**.

En esta primera etapa, se cuenta con un mezclador estático (Figura 5.12), en el cual se produce la desestabilización de las partículas coloidales y suspendidas por medio de la anulación de su carga electrostática negativa tras la adición de sales de hierro (Fe³⁺) generando con ello la formación de microfloculos; y, además, por medio de la mezcla en línea de la masa coagulada y la adición de polímeros, se lleva a cabo la aglomeración de los microfloculos y la producción de floculos más grandes (llamados floculos o partículas floculentas), los cuales serán removidos en la etapa

de separación líquido-sólido (clarificación) [CONAGUA, 2019b; Crittenden *et al.*, 2012; IEMA, 2010].



Figura 5.12. Mezclador estático PP Cerro de la Estrella (IEMA, 2010)

El caudal proveniente del mezclador estático es direccionado a un hidrociclón (Figura 5.13) mismo que funciona como un sedimentador con centrifugación (Martín *et al.*, 2011), en el cual debido a la fuerza centrífuga del flujo rotacional se crean dos corrientes. En la primera corriente, el flujo giratorio de los flóculos suspendidos en el medio desciende en la pared interna del ciclón hacia el tanque colector de lodos para ser purgados del sistema; y en el vórtice secundario, el agua con disminución de la concentración de parámetros fisicoquímicos, químicos inorgánicos, metales, metaloides, microorganismos, entre otros, asciende por la parte central de la corriente hasta la parte superior del hidrociclón (Ávila *et al.*, 2017; Medina, 1997).



Figura 5.13. Hidrociclones PP Cerro de la Estrella (IEMA, 2010)

La corriente de agua proveniente del hidrociclón es direccionada al proceso de filtración, donde por medio de mecanismos físicos y/o químicos se separan las impurezas coloidales o suspendidas de la fase líquida. Esta etapa cuenta con cuatro filtros a presión (Figura 5.14) con una capacidad de flujo de 15 L/s, los cuales trabajan de manera simultánea en dos torres duales de acero al carbón con dimensiones de 3.5 m de altura y 1.2 m de diámetro (Ávila *et al.*, 2017).



Figura 5.14. Filtros a presión PP Cerro de la Estrella (IEMA, 2010)

Para las **configuraciones 1 y 3**, el sistema de filtración previo a ozonación solo cuenta con un lecho filtrante de arena sílica. De acuerdo con CONAGUA (2019b), la eficiencia de remoción de partículas se refleja en la turbiedad del efluente. El tamaño de las partículas retenidas con arena sílica como medio filtrante es de 25 a 50 μm (Evans, 2018).

La **configuración 2**, tiene como medio filtrante zeolita natural. Aquellas partículas de 3 a 5 μm de diámetro que se encuentren suspendidas serán removidas por mecanismos físicos (adsorción) y a su vez, por intercambio catiónico se removerán cationes como metales pesados y amoníaco (Evans, 2018; Ávila *et al.*, 2017).

Los constituyentes específicos que teóricamente la **Barrera 1** puede remover del agua residual se presentan en la Tabla 5. 6 y Tabla 5. 7. La configuración **1 y 3** puede remover del efluente secundario: turbiedad, color, fluoruros, bacterias, quistes de protozoarios, arsénico, cadmio, cobre, cromo, hierro, mercurio, níquel, plomo, selenio, manganeso, zinc, ácidos haloacéticos totales y uranio. Por su parte, la configuración **2** además de los mencionados anteriormente, debido a la filtración con zeolita puede remover de manera adicional dureza, nitrógeno amoniacal, aluminio, bario y radio.

Tabla 5. 6. Remoción de constituyentes en la potabilización de agua destinada a uso doméstico o recarga ^a

Parámetros	Físico-químicos				Inorgánicos							Microorganismos			Metales y metaloides														
	pH	Sólidos disueltos totales	Turbiedad	Color	Cianuros totales	Dureza total	Fluoruros	N - Nitratos	N - Nitritos	N-Amoniacal	Sulfatos	Bacterias	Quistes de protozoarios	Microcistina- LR	Aluminio	Arsénico	Bario	Cadmio	Cobre	Cromo	Hierro	Mercurio	Níquel	Plomo	Selenio	Manganeso	Boro	Zinc	
Tratamiento	Coagulación-Floculación - Clarificación - Filtración		✓	✓ ^c			✓					✓ ^e	✓		✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓ ^b		✓ ^b	
	Ozonación			✓ ⁱ				✓	✓			✓ ^g	✓	✓							✓ ^h					✓ ^h			
	Intercambio catiónico/Adsorción (zeolita)					✓				✓ ^d				✓			✓	✓	✓	✓ ^c	✓ ^c	✓	✓	✓		✓ ^c			
	Ósmosis inversa		✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓ ^d	✓	✓ ^e	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓ ^c	✓	✓	✓	✓	✓ ^c	✓ ^f	✓ ^b
	Desinfección con luz U.V.											✓																	

^a PROY-NOM-127-SSA1-2017; ^b Margeta *et al.*, 2013; ^c Metcalf y Eddy, 2007; ^d Qasim, 1999; ^e WHO y OECD, 2003; ^f Farhat *et al.*, 2013; ^g CONAGUA y IINGEN, 2014; ^h Rodríguez *et al.*, 2008; ⁱ National Drinking Water Clearinghouse, 1999.

Tabla 5. 7. Remoción de constituyentes en la potabilización de agua destinada a uso doméstico o recarga (continuación) ^d

Parámetros		Subproductos de desinfección									Compuestos orgánicos					Radioactivos	
		Trihalometanos				Ácidos haloacéticos totales			Aniones								
		Bromodlorometano	Bromoformo	Cloroformo	Dibromoclorometano	Ácido tricloroacético	Ácido dicloroacético	Ácido cloroacético	**Bromatos	***Cloratos	****Cloritos	Formaldehído	Halogenados absorbibles finos	No halogenados	Halogenados absorbibles purgables	Carbono orgánico purgable	Radio
Tratamiento	Coagulación-Floculación - Clarificación - Filtración					✓	✓	✓									✓ ^c
	Ozonación										✓	✓	✓	✓	✓		
	Intercambio catiónico/Adsorción (zeolita)															✓ ^c	✓ ^c
	Ósmosis inversa											✓	✓			✓ ^c	✓ ^c
	Desinfección con luz U.V.																

** Una vez se forma es difícil removerlos. La prevención se basa en el control apropiado de las condiciones de desinfección. Cuando en la fuente tiene presencia de bromuros, se previene la formación con presencia de amonio a pH 9. *** No existe tratamiento. La formación puede ser evitada o controlada por medio de prácticas de control de la dosis de dióxido de cloro o la adición del anión cuando se aplica hipoclorito de sodio. **** Aplicación de sales ferrosas.

^d CONAGUA y IINGEN, 2014; ^c Metcalf y Eddy, 2007.

Barrera 2

Esta barrera, es nombrada como **posfiltración** por el organismo operador (SACMEX, 2020a; 2020b). En ella, el agua prefiltrada es sometida a una **oxidación con ozono** (O_3). En el tanque de contacto (Figura 5.15), se inyecta el O_3 generado *in situ* y este reacciona de manera directa o indirecta con los constituyentes indeseables del agua eliminando compuestos orgánicos, químicos inorgánicos, microorganismos, así como características organolépticas (CONAGUA, 2019b; Actis, 2015; Crittenden *et al.*, 2012). Los constituyentes particulares que pueden oxidarse se tratan de nitratos, nitritos, bacterias, quistes de protozoarios, microcistina-LR, color, hierro, manganeso, formaldehídos, halogenados absorbibles fijos, no halogenados, halogenados absorbibles purgables y carbono orgánico purgable (Tabla 5. 6 y Tabla 5. 7).



Figura 5.15. Generador de O_3 y tanque de contacto con O_3 PP Cerro de la Estrella (IEMA, 2010)

El agua ozonada es bombeada al sistema de filtración, el cual está constituido por tres filtros de acero al carbón con dimensiones de 5.5 m de alto y 1.2 m de diámetro (Figura 5.16). En esta etapa, el agua se hace pasar a través del medio poroso con un flujo descendente (Ávila *et al.*, 2017; IEMA, 2010).



Figura 5.16. Unidades de filtración PP Cerro de la Estrella (IEMA, 2010)

Por su parte, para las configuraciones **1** y **2**, el lecho filtrante se trata de zeolita natural. En este proceso unitario se busca disminuir partículas suspendidas de tamaño mínimo de 3 – 5 μm (Evans, 2018) y debido a las propiedades de intercambio catiónico de la zeolita natural, también se busca remover del medio metales y amoníaco (Ávila *et al.*, 2017). Los constituyentes que pueden ser removidos en la filtración con zeolita se tratan de dureza total, nitrógeno amoniacal, aluminio, bario, cadmio, cobre, cromo, hierro, mercurio, níquel, plomo, manganeso, radio y uranio (Tabla 5. 6 y Tabla 5. 7).

Como se planteó anteriormente, la configuración **3** del proceso de potabilización utiliza un medio dual compuesto por arena sílica y antracita (SACMEX, 2020c). Los constituyentes podrían removerse del ART por medio de este empaque se tratan de sólidos suspendidos totales (SST), retenidos los de tamaño mínimo de 12 – 15 μm , lo cual a su vez disminuirá el valor de la turbiedad en el agua tratada (CONAGUA, 2019b; Evans, 2018).

Barrera 3

El caudal es bombeado a la etapa de ósmosis inversa, la cual es declarada en las configuraciones **1**, **2** y **3** bajo el mismo nombre por SACMEX (2020a; 2020b).

Como sistema de pretratamiento de la Barrera 3, el agua tratada se hace pasar por filtros de polipropileno de 5 μm de tamaño de poro, contenidos en dos tanques de acero inoxidable de 1.4 m de altura y 0.4 m de diámetro; cada tanque aloja 11 filtros en su interior (Ávila *et al.*, 2017).

El equipo de ósmosis inversa cuenta con dos subetapas, una compuesta por seis cilindros y la otra por cuatro (Figura 5.17). Cada cilindro contiene seis membranas forradas de poliamida con porosidad de 0.0005 a 0.002 μm (Ávila *et al.*, 2017). Esta operación puede remover del medio la mayoría de los compuestos indeseables, desde sólidos disueltos totales (SDT), compuestos orgánicos, químicos inorgánicos hasta microorganismos. Además, coadyuva a disminuir las concentraciones de metales y metaloides en el agua.



Figura 5.17. Unidades de ósmosis inversa PP Cerro de la Estrella (IEMA, 2010)

La totalidad de parámetros que de manera teórica deberían ser removidos del ART por medio de la ósmosis inversa se tratan de sólidos disueltos totales, turbiedad, cianuros totales, dureza total, fluoruros, nitrógeno de nitratos, nitrógeno de nitritos, nitrógeno amoniacal, sulfatos, bacterias, quistes de protozoarios, microcistina-LR, aluminio, arsénico, bario, cadmio, cobre, cromo, hierro, mercurio, níquel, plomo, selenio, manganeso, boro, zinc, halogenados absorbibles fijos, no halogenados, radio y uranio (Tabla 5. 6 y Tabla 5. 7).

Barrera 4

El agua tratada en las etapas anteriores es desinfectada por medio de un sistema de luz UV (Figura 5.18). Este se conforma por cuatro módulos, cada uno con dieciséis lámparas UV en su interior y con una capacidad de flujo de 15 L/s (Ávila *et al.*, 2017). De acuerdo con el PROY-NOM-127-SSA1-2017, en la etapa de

desinfección se logra la inactivación de bacterias. CONAGUA (2019b) menciona que en esta etapa también pueden ser inactivados protozoarios, virus y endoesporas y, por su parte, Metcalf y Eddy (2007) relacionan la inactivación de los microorganismos con la dosis de desinfectante a la cual son expuestos.

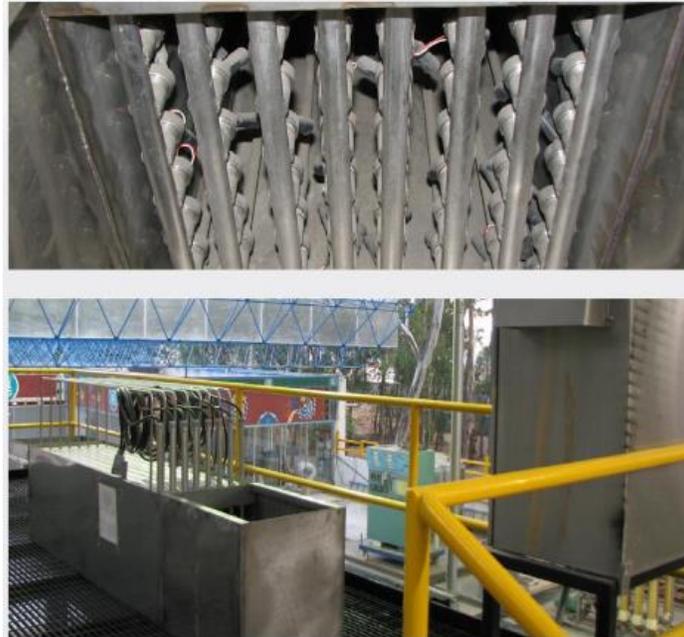


Figura 5.18. Etapa de desinfección con luz UV PP Cerro de la Estrella (IEMA, 2010)

5.6.3.3 Residuos del proceso

El tratamiento adecuado y la disposición pertinente de los residuos generados en las barreras múltiples de la planta de tratamiento deberían de considerarse como un aspecto de control sumamente importante del sistema, ya que como lo establece CONAGUA (2019e), estos aspectos junto al tratamiento y disposición del agua representan hasta el 50% de la infraestructura y los costos de la planta.

De acuerdo con la teoría consultada en Cornwell y Roth (2011) y CONAGUA (2007), los residuos generados en la PP Cerro de la Estrella son **lodos de clarificación**, **agua de retrolavado de filtros gastada (ARFG)**, **el concentrado de membrana** y **la solución de limpieza gastada (SLG)** de las etapas de clarificación, filtración y ósmosis inversa respectivamente.

Los **lodos** consisten en líquidos compuestos en mayor proporción por agua o de mezclas de sólidos húmedos con textura de suelo que son eliminados típicamente en el clarificador, por lo que son nombrados **lodos de clarificación**. El **ARFG** se refiere al agua de lavado y los sólidos que son removidos en los ciclos de retrolavado de filtros o que son extraídos de la parte superior del lecho filtrante. El **concentrado** es la corriente de rechazo de las membranas de OI o nanofiltración, puede contener partículas e iones disueltos en cantidades que dependen de su concentración en el

agua alimentada y la tasa de recuperación del sistema. La **SLG** es el residuo compuesto por los productos químicos utilizados en la eliminación de incrustaciones y por los contaminantes contenidos en las incrustaciones de la membrana (Cornwell y Roth, 2011). La Figura 5.19 identifica los residuos del proceso de potabilización de la PP Cerro de la Estrella anteriormente mencionados.

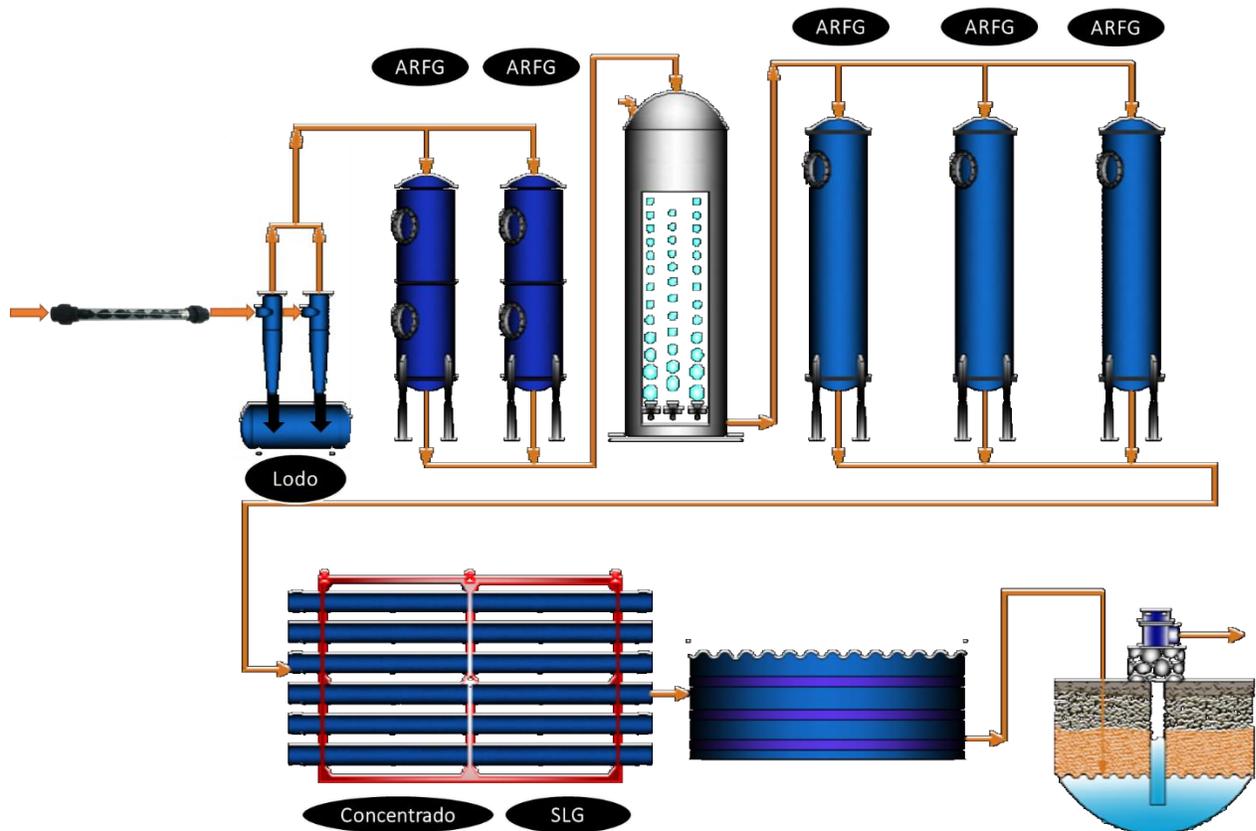


Figura 5.19. Diagrama de residuos del proceso de potabilización Cerro de la Estrella (Adaptado de SACMEX, 2011)

Se consultó información a la oficina de transparencia del SACMEX, referente a los residuos generados a lo largo del proceso de tratamiento, acerca de su posible caracterización fisicoquímica, su volumen y las acciones correspondientes a su manejo y disposición final. Por su parte, SACMEX (2020e) refirió los siguientes puntos: (1) el sistema de hidrociclones no genera residuos (**lodos**) debido a que no se adicionan sustancias químicas (coagulantes, floculantes, polímeros o agentes inhibidores de cloro) al influente de la planta potabilizadora; (2) la caracterización fisicoquímica de la calidad del **agua de retrolavado** solo contempla el monitoreo de la turbiedad y el volumen total de agua consumida en el proceso de retrolavado es de 23 m³/día para la limpieza de las 7 unidades de filtración; (3) no se determina la caracterización de la calidad del agua de **rechazo** (concentrado) de ósmosis inversa y en la limpieza de las membranas los químicos empleados son la solución ácida limpiadora de membranas Hydrex 4503 y la solución alcalina limpiadora de membranas Hydrex 4506.

SACMEX (2020e) menciona que al **ARFG del sistema de filtración y al concentrado de ósmosis inversa** no se les aplica tratamiento previo a su disposición final. Estos efluentes son vertidos directamente al sistema de drenaje del área de procesos, el cual está interconectado a la línea de alimentación de la PTAR Cerro de la Estrella, para finalmente ser ingresados al tren de tratamiento de la PTAR.

5.6.3.4 Calidad del agua de recarga

Ávila *et al.* (2017) refiere que la PP Cerro de la Estrella estableció un programa de monitoreo continuo de la calidad del influente, de agua tratada en las barreras múltiples y del efluente, por medio de la medición de los parámetros establecidos en la modificación del 2000 de la NOM-127-SSA1-1994 y la NOM-014-CONAGUA-2003; además de aplicar el seguimiento de algunos parámetros emergentes no normados y la medición de la toxicidad del agua, esta última mediante la técnica analítica de *Daphnia magna* de la NMX-AA-087-SCFI-2010.

El laboratorio experimental de la PP llevó a cabo los análisis de los parámetros de: pH, temperatura, turbiedad, color, SDT, conductividad eléctrica, alcalinidad total, dureza total, dureza al calcio, dureza al magnesio, nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal, demanda química de oxígeno (DQO), fósforo, sulfuros, COT, hierro y manganeso (Ávila *et al.*, 2017). Sin embargo, los parámetros que fueron reportados por SACMEX (2020a; 2020b) y que sirvieron como base para la aplicación de la propuesta metodológica del SED fueron: pH, turbiedad, color verdadero, sustancias activas al azul de metileno (SAAM), cloruros, fluoruros, calcio, magnesio, sodio, potasio, conductividad, nitrógeno (NO_3^- , NO_2^- , NH_3), sulfatos, alcalinidad total, dureza (total, Ca^{2+} , Mg^{2+}), DQO, sólidos (ST, STV, STF, SST, SSV, SSF, SDT, SDV, SDF), aluminio, arsénico, bario, cadmio, zinc, cobre, cromo, hierro, manganeso, plomo, selenio, boro, bacterias coliformes (totales y fecales) y conteo de bacterias heterotróficas (HPC). De acuerdo con SACMEX (2020a; 2020b) estos parámetros son analizados en el Laboratorio Central de Control de la Calidad del Agua Potable del SACMEX.

La PP trabajó a flujo continuo las 24 horas y el personal operativo realizaba análisis interno de calidad de agua en las barreras múltiples en corridas de 4 horas y, además, entregaba una muestra diaria para el análisis en el Laboratorio Central de Control de la Calidad del Agua Potable del SACMEX de 18 parámetros normados y del estudio toxicológico agudo con *Daphnia Magna*. Los muestreos y análisis mencionados se realizaban en cumplimiento del programa interno de control y vigilancia de la calidad del agua con fines de recarga al acuífero (Ávila *et al.*, 2017).

Para corroborar la ejecución del programa de control y vigilancia de la calidad del agua de la PP en conformidad con la NOM-014-CONAGUA-2003, el SED propuesto en esta investigación hará uso de los registros de monitoreo y de las concentraciones de parámetros de calidad del agua proporcionados por el organismo operador de la PP. Los resultados de la aplicación del SED mostrarán por medio de los indicadores si se realiza un monitoreo en conformidad con la

normatividad y, además, si se cumple con la calidad del ART establecida por la NOM-014-CONAGUA-2003. Mediante los índices de desempeño será posible conocer qué tanto el rendimiento de la PP se acerca al cumplimiento de dos objetivos de evaluación establecidos, uno de ellos se trata del LMP del parámetro de calidad del agua regulado por la NOM-014-CONAGUA-2003. Finalmente, por medio de la identificación de los parámetros críticos de calidad del agua y del análisis en la remoción alcanzada en cada barrera, será posible proponer estrategias de mejora en la gestión y operación de la planta.

Debido a que se busca evaluar el monitoreo de parámetros de calidad del agua, así como el comportamiento individual y conjunto de las unidades de tratamiento de la PP Cerro de la Estrella en el cumplimiento de la NOM-014-CONAGUA-2003, sólo resultarán de utilidad aquellos parámetros que fueron reportados por SACMEX (2020a; 2020b) que se encuentran referenciados en esta norma (Tabla 7. 13 y Tabla 7. 14). Para la aplicación de los indicadores e índices de desempeño se emplearán los valores de calidad reportados en el efluente de la planta (Tabla 5. 9) y por su parte, para las eficiencias de remoción sí se requieren los valores que toma el ART al inicio y final de cada unidad de tratamiento (en la medida de lo posible). La totalidad de variables requeridas, así como el procedimiento respectivo para el desarrollo de indicadores, índices y eficiencias de remoción se presenta con mayor detalle en el apartado de Metodología.

6. METODOLOGÍA

La estrategia metodológica de este estudio comprende las etapas de (1) Propuesta de Sistema de evaluación del desempeño (SED) y su aplicación y el (2) Análisis de resultados y conclusiones. La Figura 6. 1 presenta las etapas y subetapas desarrolladas a lo largo del proyecto de investigación, las cuales serán descritas en los siguientes apartados.

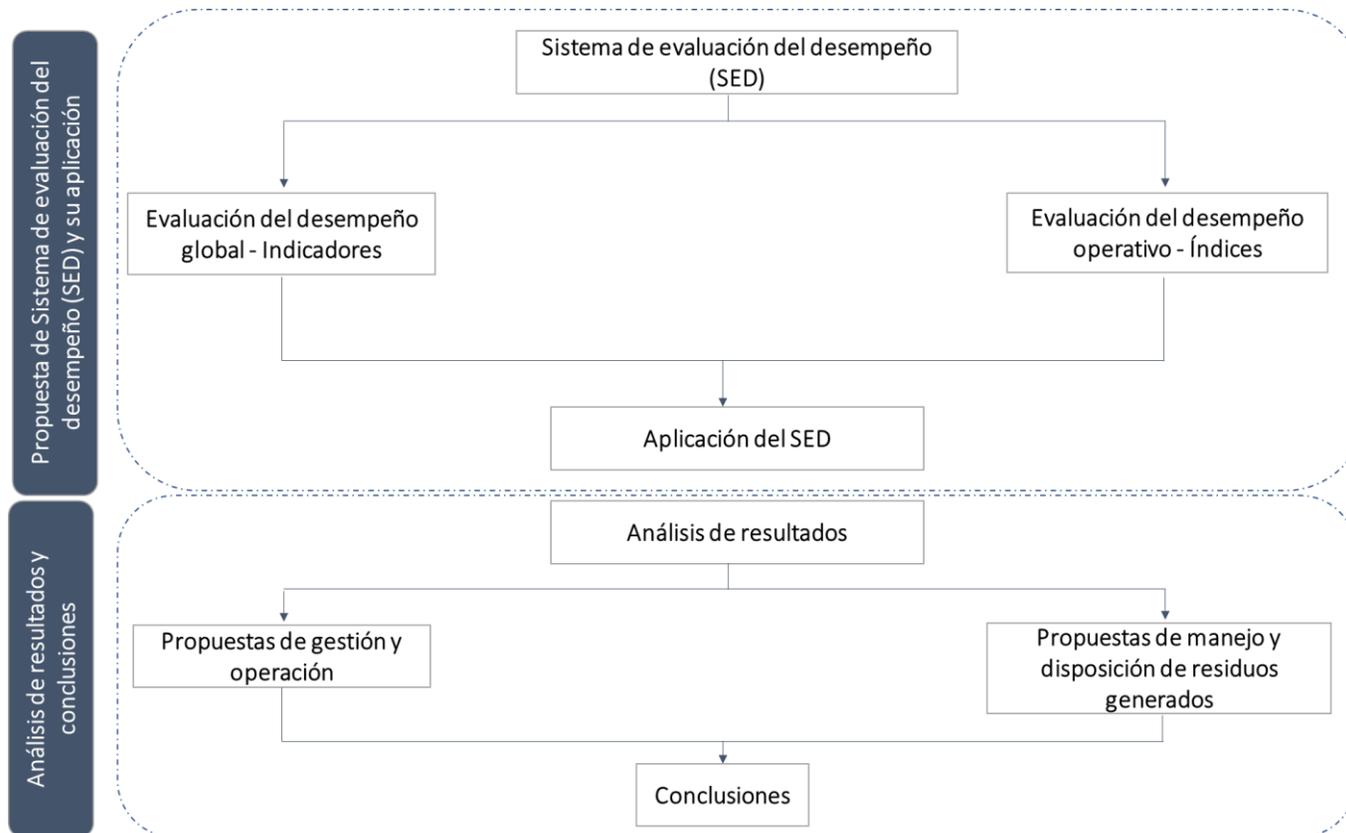


Figura 6. 1. Diagrama de flujo de la metodología aplicada

Propuesta de Sistema de evaluación del desempeño (SED) y su aplicación

6.1 Evaluación del desempeño global

Se implementó la metodología sugerida por Vieira (2009) en el documento *Evaluación del desempeño de plantas de tratamiento de aguas para consumo humano*, la cual consiste en: **(a)** identificación de los objetivos específicos a evaluar en la entidad de gestión de servicios de agua; **(b)** selección de los ID más adecuados para la evaluación del logro de objetivos entre la gama de ID disponibles; **(c)** análisis de la disponibilidad de datos necesarios para el cálculo de los ID seleccionados; y **(d)** cálculo de los ID e interpretación de sus resultados. El último punto **(e)** establece que para indicadores que se consideren relevantes, en caso de ausencia de datos debe sugerirse un procedimiento para su obtención y registro periódico. La Figura 6. 2 muestra de forma resumida esta metodología.

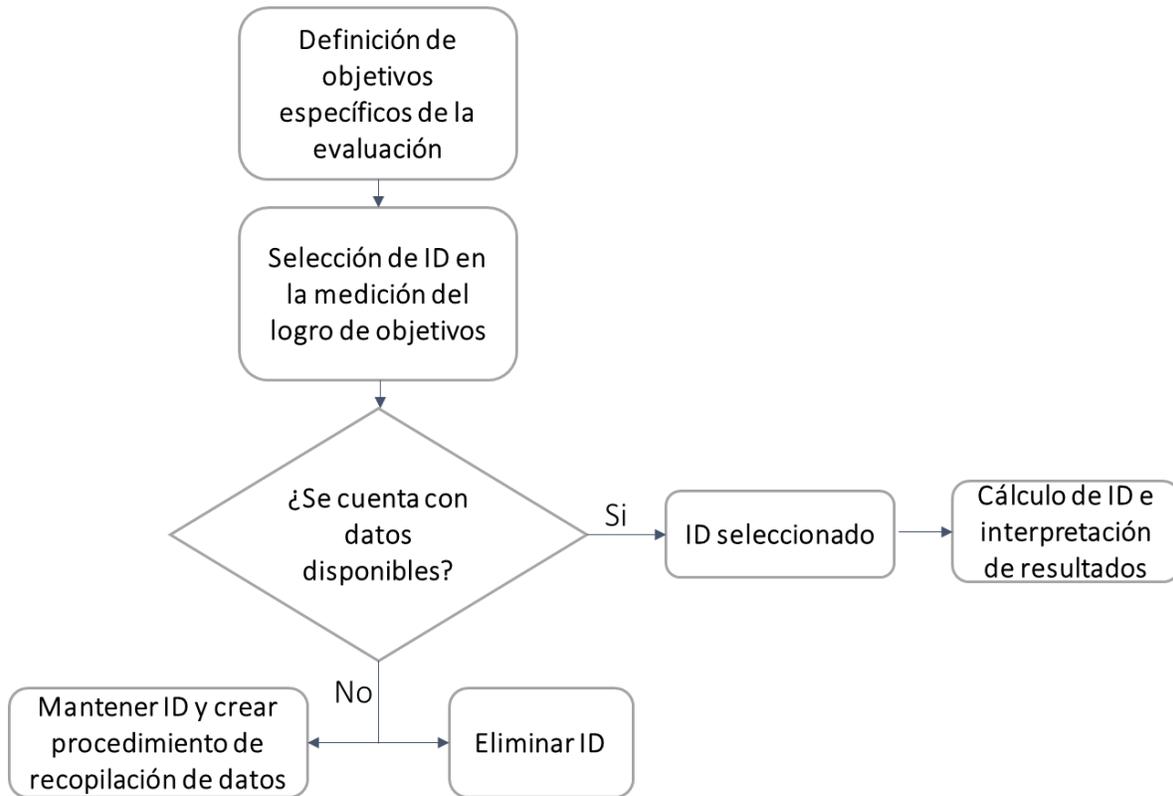


Figura 6. 2. Metodología para la evaluación del desempeño global (Vieira, 2009)

(a) Definición del objetivo específico de la evaluación

Evaluar el desempeño global de un sistema de potabilización con fines de recarga al acuífero en términos del cumplimiento de los criterios de calidad del agua residual tratada y monitoreo de parámetros establecidos por la NOM-014-CONAGUA-2003.

(b) Selección de ID en la medición del logro de objetivos

De los 170 ID desarrollados por Alegre *et al.* (2017) en el *Manual de buenas prácticas Indicadores de desempeño para los servicios de abastecimiento de agua* de la Asociación Internacional del Agua fueron identificados **5 ID** incluidos en el subconjunto Monitoreo de la calidad de agua y **5 ID** contenidos en el subconjunto Calidad del agua tratada que abordaran el cumplimiento del objetivo específico. Estos ID fueron adaptados a los criterios especificados por la NOM-014-CONAGUA-2003.

Los ID del **monitoreo de la calidad del agua** analizan el cumplimiento de la frecuencia de monitoreo exigida por la NOM-014-CONAGUA-2003 para grupos de parámetros de diferente naturaleza. Estos ID están dirigidos a medir la cantidad de pruebas de calidad ejecutadas respecto de la cantidad requerida por la NOM-014-CONAGUA-2003 para las categorías de ensayos físicos y organolépticos, microbiológicos, químicos y de radiactividad. En la Tabla 6. 1 se muestra la definición de estos indicadores y en el apartado Cálculo de ID se puede consultar la ficha con la descripción detallada necesaria para el desarrollo de cada ID.

Tabla 6. 1. ID del monitoreo de la calidad del agua

ID de monitoreo de la calidad del agua		
No.	ID	Definición
1	Pruebas de calidad realizadas (%)	Porcentaje de pruebas de agua tratada exigidas por la NOM-014-CONAGUA-2003 que son ejecutadas.
2	Pruebas físicas y organolépticas realizadas (%)	Porcentaje de ensayos físicos y organolépticos de agua tratada exigidos por la NOM-014-CONAGUA-2003 que son ejecutadas.
3	Pruebas microbiológicas realizadas (%)	Porcentaje de ensayos microbiológicos de agua tratada exigidos por la NOM-014-CONAGUA-2003 que son ejecutadas.
4	Pruebas químicas realizadas (%)	Porcentaje de ensayos químicos de agua tratada exigidos por la NOM-014-CONAGUA-2003 que son ejecutadas.
5	Pruebas de radiactividad realizadas (%)	Porcentaje de ensayos de radiactividad de agua tratada exigidos por la NOM-014-CONAGUA-2003 que son ejecutadas.

Los ID de **calidad del agua tratada** son un grupo de indicadores complementarios a los ID de monitoreo de la calidad del agua; mediante ellos se evalúa el cumplimiento de parámetros de calidad del agua tratada para los ensayos físicos y organolépticos, microbiológicos, químicos y de radiactividad realizados con respecto a los LMP establecidos por la NOM-014-CONAGUA-2003. En la Tabla 6. 2 se muestra la definición para este grupo de indicadores, mientras que en el apartado Cálculo de ID se puede consultar la ficha con la definición detallada para el desarrollo de cada ID.

Tabla 6. 2. ID de la calidad del agua tratada

ID de la calidad del agua		
No.	ID	Definición
6	Cumplimiento de la calidad del agua tratada (%)	Porcentaje del total de pruebas de agua tratada realizadas que cumplen con la NOM-014-CONAGUA-2003.
7	Cumplimiento de pruebas físicas y organolépticas (%)	Porcentaje del número total de ensayos físicos y organolépticos de agua tratada realizados que cumplen con la NOM-014-CONAGUA-2003.
8	Cumplimiento de pruebas microbiológicas (%)	Porcentaje del número total de ensayos microbiológicos de agua tratada realizados que cumplen con la NOM-014-CONAGUA-2003.
9	Cumplimiento de pruebas químicas (%)	Porcentaje del número total de ensayos químicos de agua tratada realizados que cumplen con la NOM-014-CONAGUA-2003.
10	Cumplimiento de las pruebas de radiactividad (%)	Porcentaje del número total de ensayos de radiactividad del agua tratada realizados que cumplen con la NOM-014-CONAGUA-2003.

(c) Disponibilidad de datos para el desarrollo de ID

En esta etapa se identifican las variables requeridas para el desarrollo de los 10 ID anteriormente seleccionados. Se debe realizar la petición y recopilación respectiva de todas las variables involucradas en los ID establecidos para su posterior cálculo.

Las variables que son necesarias para el cálculo de los ID de los subconjuntos de **Monitoreo de la calidad del agua** y **Calidad del agua tratada** que abordan el objetivo específico son referidas en la Tabla 6. 3. A cada variable se le asigna una clave para facilitar su identificación en las operaciones de cálculo de ID, así como su descripción correspondiente.

Tabla 6. 3. Variables necesarias para el cálculo de ID

ID de monitoreo de la calidad del agua			
No.	Indicador de desempeño	Clave	Variables
1	Pruebas de calidad realizadas (%)	V1.1	Pruebas de calidad del agua tratada requeridas (No.) Número de pruebas de agua tratada requeridas por la NOM-014-CONAGUA-2003 durante el período de evaluación*. $V1.1 = V2.1 + V3.1 + V4.1 + V5.1$
		V.1.2	Pruebas de calidad del agua tratada realizadas (No.) Número de pruebas de agua tratada realizadas durante el período de evaluación*. $V1.2 = V2.2 + V3.2 + V4.2 + V5.2$
2	Pruebas físicas y organolépticas realizadas (%)	V2.1	Pruebas físicas y organolépticas requeridas (No.) Número de pruebas físicas y organolépticas del agua tratada requeridas por la NOM-014-CONAGUA-2003 durante el período de evaluación*.
		V2.2	Pruebas físicas y organolépticas realizadas (No.) Número de pruebas físicas y organolépticas de agua tratada realizadas durante el período de evaluación*.
3	Pruebas microbiológicas realizadas (%)	V3.1	Pruebas microbiológicas requeridas (No.) Número de pruebas microbiológicas del agua tratada requeridas por la NOM-014-CONAGUA-2003 durante el período de evaluación*.
		V3.2	Pruebas microbiológicas realizadas (No.) Número de pruebas microbiológicas de agua tratada realizadas durante el período de evaluación*.
4	Pruebas químicas realizadas (%)	V4.1	Pruebas químicas requeridas (No.) Número de pruebas químicas del agua tratada requeridas por la NOM-014-CONAGUA-2003 durante el período de evaluación*.
		V4.2	Pruebas químicas realizadas (No.) Número de pruebas químicas de agua tratada realizadas durante el período de evaluación*.

5	Pruebas de radiactividad realizadas (%)	V5.1	Pruebas de radiactividad requeridas (No.) Número de pruebas de radiactividad del agua tratada requeridas por la NOM-014-CONAGUA-2003 durante el período de evaluación*.
		V5.2	Pruebas de radiactividad realizadas (No.) Número de pruebas de radiactividad de agua tratada realizadas durante el período de evaluación*.
ID de la calidad del agua tratada			
No.	Indicador de desempeño	Clave	Variables
6	Cumplimiento de la calidad del agua tratada (%)	V.1.2	Pruebas de calidad del agua tratada realizadas (No.) Número de pruebas de agua tratada realizadas durante el período de evaluación*. $V1.2 = V2.2 + V3.2 + V4.2 + V5.2$
		V7.1	Cumplimiento de pruebas físicas u organolépticas (No.)
		V8.1	Cumplimiento de pruebas microbiológicas (No.)
		V9.1	Cumplimiento de pruebas químicas (No.)
		V10.1	Cumplimiento de las pruebas de radiactividad (No.)
7	Cumplimiento de pruebas físicas y organolépticas (%)	V2.2	Pruebas físicas y organolépticas realizadas (No.) Número de pruebas físicas y organolépticas de agua tratada realizadas durante el período de evaluación*.
		V7.1	Cumplimiento de pruebas físicas y organolépticas (No.) Número de ensayos físicos y organolépticos de agua tratada realizados durante el período de evaluación* que cumplen con la NOM-014-CONAGUA-2003.
8	Cumplimiento de pruebas microbiológicas (%)	V3.2	Pruebas microbiológicas realizadas (No.) Número de pruebas microbiológicas de agua tratada realizadas durante el período de evaluación*.
		V8.1	Cumplimiento de pruebas microbiológicas (No.) Número de ensayos microbiológicos de agua tratada realizados durante el período de evaluación* que cumplen con la NOM-014-CONAGUA-2003.

9	Cumplimiento de pruebas químicas (%)	V4.2	Pruebas químicas realizadas (No.) Número de pruebas químicas de agua tratada realizadas durante el período de evaluación*.
		V9.1	Cumplimiento de pruebas químicas (No.) Número de ensayos químicos de agua tratada realizados durante el período de evaluación* que cumplen con la NOM-014-CONAGUA-2003.
10	Cumplimiento de las pruebas de radiactividad (%)	V5.2	Pruebas de radiactividad realizadas (No.) Número de pruebas de radiactividad de agua tratada realizadas durante el período de evaluación*.
		V10.1	Cumplimiento de pruebas de radiactividad (No.) Número de ensayos de radiactividad de agua tratada realizados durante el período de evaluación* que cumplen con la NOM-014-CONAGUA-2003.

*El período de evaluación en este estudio fue de un año.

(d) Cálculo de ID e interpretación de resultados

A continuación, se detallan las expresiones matemáticas para el cálculo de los ID seleccionados que darán cumplimiento al objetivo específico.

ID del Monitoreo de la calidad del agua

Este tipo de indicadores tienen como propósito evaluar la cobertura de la frecuencia de monitoreo de los parámetros de calidad del agua establecidos por la NOM-014-CONAGUA-2003. El período de evaluación considerado es anual y los resultados de este subconjunto de ID están limitados a un valor de 100%.

No. 1. Pruebas de calidad realizadas (%)	
Definición	Número total de pruebas de agua tratada realizadas durante el período de evaluación entre el número total de pruebas de agua tratada requeridas por la NOM-014-CONAGUA-2003 durante el período de evaluación multiplicado por 100.
Cálculo	$ID1 = \frac{V. 1. 2}{V. 1. 1} * 100$
V.1.1	Pruebas de calidad del agua tratada requeridas (No.)
V.1.2	Pruebas de calidad del agua tratada realizadas (No.)
No. 2. Pruebas físicas y organolépticas realizadas (%)	
Definición	Número de pruebas físicas y organolépticas del agua tratada realizadas durante el período de evaluación entre el número de pruebas físicas u organolépticas del agua tratada requeridas por la NOM-014-CONAGUA-2003 durante el período de evaluación multiplicado por 100.
Cálculo	$ID2 = \frac{V. 2. 2}{V. 2. 1} * 100$
V.2.1	Pruebas físicas u organolépticas requeridas (No.)
V.2.2	Pruebas físicas u organolépticas realizadas (No.)
No. 3. Pruebas microbiológicas realizadas (%)	
Definición	Número de pruebas microbiológicas de agua tratada realizadas durante el período de evaluación entre el número de pruebas microbiológicas del agua tratada requeridas por la NOM-014-CONAGUA-2003 durante el período de evaluación multiplicado por 100.
Cálculo	

$$ID3 = \frac{V.3.2}{V.3.1} * 100$$

V.3.1 Pruebas microbiológicas requeridas (No.)

V.3.2 Pruebas microbiológicas realizadas (No.)

No. 4. Pruebas químicas realizadas (%)

Definición

Número de pruebas químicas del agua tratada realizadas durante el período de evaluación entre el número de pruebas químicas del agua tratada requeridas por la NOM-014-CONAGUA-2003 durante el período de evaluación multiplicado por 100.

Cálculo

$$ID4 = \frac{V.4.2}{V.4.1} * 100$$

V.4.1 Pruebas químicas requeridas (No.)

V.4.2 Pruebas químicas realizadas (No.)

No. 5. Pruebas de radiactividad realizadas (%)

Definición

Número de pruebas de radiactividad del agua tratada realizadas durante el período de evaluación entre el número de pruebas de radiactividad del agua tratada requeridas por la NOM-014-CONAGUA-2003 durante el período de evaluación multiplicado por 100.

Cálculo

$$ID5 = \frac{V.5.2}{V.5.1} * 100$$

V.5.1 Pruebas de radiactividad requeridas (No.)

V.5.2 Pruebas de radiactividad realizadas (No.)

ID de la Calidad del agua tratada

Por medio de estos ID se evaluará el desempeño del sistema de potabilización en términos de la calidad del agua tratada. La gestión de la calidad del agua residual tratada es una necesidad imperante en todo proyecto de recarga artificial de acuíferos, este criterio de evaluación es regulado por la NOM-014-CONAGUA-2003. El período de evaluación a considerar para el caso de estudio es anual.

No. 6. Cumplimiento de la calidad del agua tratada (%)

Definición

Número total de pruebas de agua tratada que cumplen con los LMP de la NOM-014-CONAGUA-2003 durante el período de evaluación entre el número total de pruebas de agua tratada realizadas durante el período de evaluación multiplicado por 100.

Cálculo

$$ID6 = \frac{V7.1 + V8.1 + V9.1 + V10.1}{V.1.2} * 100$$

- V.1.2 Pruebas de calidad del agua tratada realizadas (No.)
- V.7.1 Cumplimiento de pruebas físicas u organolépticas (No.)
- V.8.1 Cumplimiento de pruebas microbiológicas (No.)
- V.9.1 Cumplimiento de pruebas químicas (No.)
- V.10.1 Cumplimiento de pruebas de radiactividad (No.)

No. 7. Cumplimiento de pruebas físicas y organolépticas (%)

Definición

Número de pruebas físicas y organolépticas de agua tratada que cumplen con los LMP de la NOM-014-CONAGUA-2003 durante el período de evaluación entre el número total de pruebas físicas u organolépticas de agua tratada realizadas durante el período de evaluación multiplicado por 100.

Cálculo

$$ID7 = \frac{V.7.1}{V.2.2} * 100$$

- V.2.2 Pruebas físicas u organolépticas realizadas (No.)
- V.7.1 Cumplimiento de pruebas físicas u organolépticas (No.)

No. 8. Cumplimiento de pruebas microbiológicas (%)

Definición

Número de pruebas microbiológicas de agua tratada que cumplen con los LMP de la NOM-014-CONAGUA-2003 durante el período de evaluación entre el número total de pruebas microbiológicas de agua tratada realizadas durante el período de evaluación multiplicado por 100.

Cálculo

$$ID8 = \frac{V.8.1}{V.3.2} * 100$$

- V.3.2 Pruebas microbiológicas realizadas (No.)
- V.8.1 Cumplimiento de pruebas microbiológicas (No.)

No. 9. Cumplimiento de pruebas químicas (%)

Definición

Número de pruebas químicas de agua tratada que cumplen con los LMP de la NOM-014-CONAGUA-2003 durante el período de evaluación entre el número total de pruebas químicas de agua tratada realizadas durante el período de evaluación multiplicado por 100.

Cálculo

$$ID9 = \frac{V. 9. 1}{V. 4. 2} * 100$$

V.4.2 Pruebas químicas realizadas (No.)

V.9.1 Cumplimiento de pruebas químicas (No.)

No. 10. Cumplimiento de pruebas de radiactividad (%)

Definición

Número de pruebas de radiactividad de agua tratada que cumplen con los LMP de la NOM-014-CONAGUA-2003 durante el período de evaluación entre el número total de pruebas de radiactividad de agua tratada realizadas durante el período de evaluación multiplicado por 100.

Cálculo

$$ID10 = \frac{V. 10. 1}{V. 5. 2} * 100$$

V.5.2 Pruebas de radiactividad realizadas (No.)

V.10.1 Cumplimiento de pruebas de radiactividad (No.)

Un sistema de potabilización para la recarga del acuífero con ART con desempeño excelente sería aquel que alcance un resultado de 100% para los 10 indicadores anteriormente descritos, lo que indicaría el cumplimiento total de los requisitos de monitoreo frecuente y de calidad de agua de la NOM-014-CONAGUA-2003. La interpretación de los resultados indicará los aciertos, necesidades y/o oportunidades de mejora en la gestión de estos requisitos en la planta estudio de caso.

6.2 Evaluación del desempeño operativo

Mediante la aplicación de los ID anteriores se puede responder a la pregunta ¿Se cumplió con la frecuencia de monitoreo de parámetros y con la calidad del ART para la recarga del acuífero como lo exige la NOM-014-CONAGUA-2003? No obstante, por medio de los resultados se desconocerá para cada parámetro de calidad del efluente qué tanto cumple o incumple con la normatividad. La evaluación del desempeño operativo por medio de la aplicación de índices contribuye a resolver esta limitación principal de los indicadores, debido a que los Índ permiten un análisis más detallado de la conformidad de cada parámetro de calidad del agua tratada con la de un objetivo de evaluación (como la normatividad).

La evaluación del desempeño operativo del SED tomó como referencia y complementó la metodología de Vieira (2009) la cual consiste en: **(a)** identificar los aspectos relevantes en la evaluación del desempeño operativo (por ejemplo: calidad del agua tratada, eficiencia del tratamiento y funcionamiento de las unidades de tratamiento); **(b)** para cada subcomponente de evaluación se deben identificar las variables que puedan representar el desempeño de la planta de tratamiento en el tiempo (en función de los valores que presenten); **(c)** aplicar una función de desempeño a cada variable, para la normalización de los valores de todas las variables. De manera adicional, se propone **(d)** realizar una clasificación global en términos de desempeño y/o la agregación de los valores de desempeño en un índice global; **(e)** ejecutar una evaluación de las eficiencias de remoción de los parámetros críticos. Esta metodología es esquematizada en la Figura 6. 3.

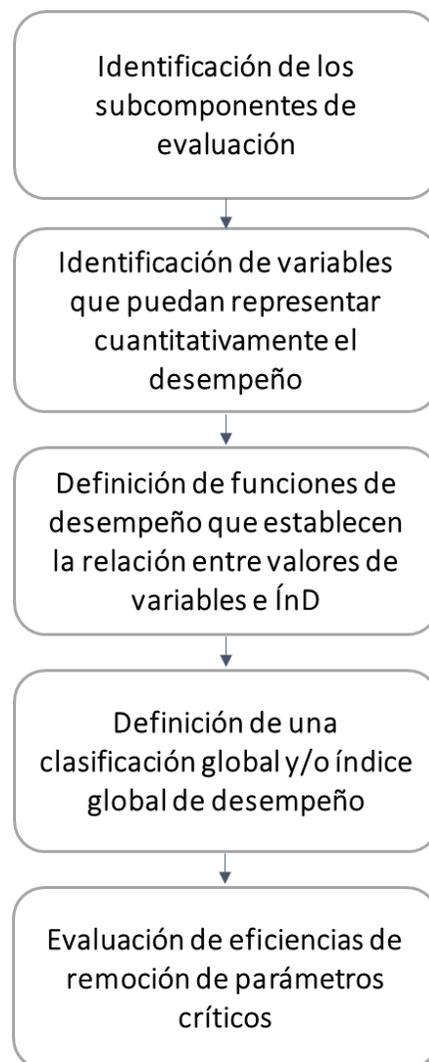


Figura 6. 3. Metodología para la evaluación del desempeño operativo (Adaptado de Vieira, 2009)

(a) Identificación de los subcomponentes de la evaluación

La evaluación del desempeño operativo del sistema de potabilización se encuentra limitada por la disponibilidad de datos para su aplicación, por lo cual se llevará a cabo en términos de calidad del ART con fines de recarga del acuífero. Este aspecto de evaluación – calidad del agua tratada – analiza la efectividad del logro de los objetivos correspondientes a los criterios de calidad para el ART conforme a los valores límite predefinidos para el efluente de la PTA.

Se plantean dos objetivos para el tratamiento de agua que ayudarán a definir las funciones de desempeño, el parámetro de calidad del agua debe: (1) Alcanzar un valor en el ART tal que cumpla con el LMP de la NOM-014-CONAGUA-2003; (2) Conservar un valor en el ART tal que alcance el límite de detección (LD) o límite de cuantificación (LC) de su técnica de análisis.

El objetivo número 1 podrá ser igual o menor al LMP de la NOM-014-CONAGUA-2003, mientras el objetivo número 2 puede ser igual o menor al LD o LC de la técnica analítica con la cual se obtienen las concentraciones del parámetro.

(b) Identificación de variables que representan el desempeño

En el contexto de la calidad del agua ART, las variables que representan el desempeño operativo para este estudio son las concentraciones de parámetros físicos, químicos y microbiológicos cuyos valores son regulados por la NOM-014-CONAGUA-2003. Los Índ requieren datos de las concentraciones obtenidas en el efluente, mientras que las eficiencias de remoción requieren de los valores que toman los parámetros en cada OPU.

(c) Definición de funciones de desempeño

La mayor ventaja de la aplicación de funciones de desempeño frente al análisis de los valores que toman las variables de calidad del agua es que la conversión de estos valores a Índ hace que los resultados del tratamiento de agua relativos a distintos parámetros y su conformidad con los objetivos planteados por los tomadores de decisiones puedan ser comprendidos e interpretados con mayor facilidad. Así, los expertos en calidad del agua, los operadores de una PTA y el público interesado en la salubridad del agua regenerada tendrán la oportunidad de conservar un mismo lenguaje referente a la efectividad en el tratamiento del agua residual por parte de la PTA en el alcance de concentraciones establecidas por los LMP, los LC o los LD de las técnicas analíticas.

De acuerdo con Vieira (2009), otra ventaja asociada al empleo de funciones de desempeño es que los valores de distintos contaminantes del agua pueden ser

comparados entre sí, ya que conservan la misma escala de desempeño, identificando entre ellos cuáles son aquellos parámetros que requieren un mayor control. Además, ejemplifica la adaptación de las funciones de desempeño a diferentes PTA, por lo que las funciones de desempeño se presentan como una herramienta para el análisis de desempeño comparativo entre plantas de tratamiento.

Los datos recopilados para el caso de estudio acerca de los LD y LC de las técnicas analíticas de calidad del agua que ayudaron a construir las funciones de desempeño, pueden ser consultados en la Tabla 6. 6. del apartado de Anexos.

Parámetros químicos y físicos

Se siguió el método propuesto por Vieira *et al.* (2010) y Vieira (2009) para los parámetros químicos (excepto pH) y físicos (color y turbiedad) de calidad del ART. En la Figura 6. 4 se ilustra la función de desempeño que será aplicada a este tipo de parámetros, la cual asocia el valor de la variable en un valor de desempeño dentro de un rango de 0 a 300. Los datos básicos por recopilar para ejecutar el procedimiento comprenden: los valores que toman las variables en el efluente a lo largo del tiempo, los valores límite (LMP) de la normatividad del agua tratada para la recarga del acuífero y, los LC y LD asociados a los métodos de análisis de parámetros.

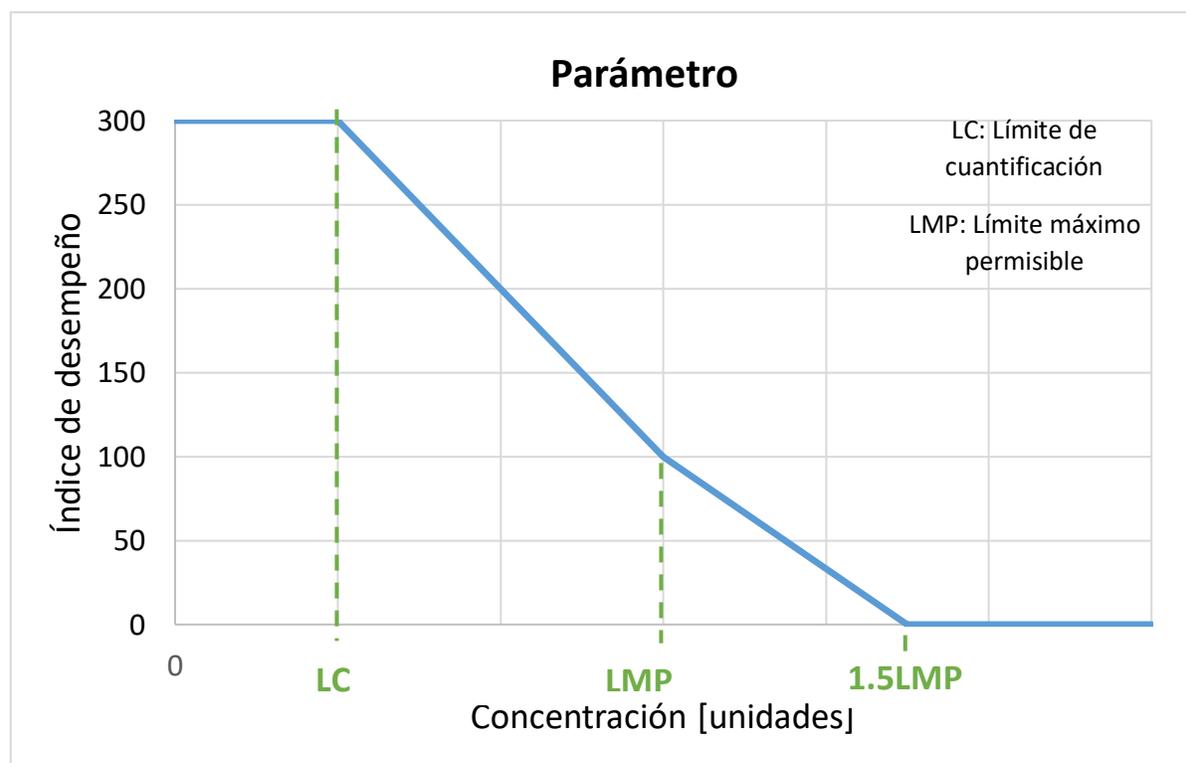


Figura 6. 4. Función de desempeño para la evaluación del rendimiento en términos de calidad del agua tratada para parámetros químicos (excepto pH) y físicos (Vieira, 2009)

Los métodos analíticos no cuantifican las sustancias presentes en el agua a concentraciones por debajo del respectivo LC (o en su caso del LD), así cuando las concentraciones son iguales o menores al LC (fuera del rango de detección), el desempeño se considera “**excelente**” [ÍnD = 300]. Para concentraciones mayores al LC, el desempeño comienza a disminuir linealmente hasta el valor límite, el cual se trata del LMP del contaminante establecido por la NOM-014-CONAGUA-2003 donde el desempeño se considera “**bueno**” [ÍnD = (200, 300)] o “**aceptable**” [ÍnD = (100, 200)]. Cuando el contaminante conserva el valor del LMP se le atribuye un desempeño “**mínimo**” ya que el tratamiento aplicado refleja que solo se alcanza el valor normado para ese parámetro en el efluente [índice de desempeño = 100]. A concentraciones más altas del valor límite, los objetivos de calidad ya no se cumplen y por ello el rendimiento es “**insatisfactorio**” [ÍnD= (0,100)]. Por su parte, para concentraciones que exceden el LMP en un 50%, el rendimiento se considera “**nulo**” [ÍnD = 0].

La tolerancia entre el rendimiento “**insatisfactorio**” y “**nulo**” en la función de desempeño para valores por encima del LMP, puede proporcionar información sobre el grado de incumplimiento, lo que no ocurriría si la función tuviera una caída directa al ÍnD= 0 (cero) para valores inmediatamente por encima de LMP.

Las funciones de desempeño desarrolladas para la totalidad de 24 parámetros químicos y físicos monitoreados en el proyecto de recarga en estudio y regulados por la NOM-014-CONAGUA-2003 pueden ser consultadas en el apartado de Anexos con la Figura 6. 8, Figura 6. 9, Figura 6. 10 y Figura 6. 11.

pH

Debido a los valores de pH encontrados en el agua potable, este parámetro de calidad del agua no se considera motivo de preocupación para la salud. No obstante, su control es básico a lo largo del tratamiento de agua para asegurar una eficaz clarificación (sedimentación) y desinfección. Además, el pH debe de ser controlado para evitar reacciones en el agua con diversos constituyentes presentes o con materiales de los sistemas de distribución de agua, que generen compuestos tóxicos o corrosión por contacto. La modificación del 2000 de la NOM-127-SSA1-1994 establece un rango de pH aceptable de 6.5 a 8.5, así estos valores serán utilizados para la definición de la función de desempeño, siendo el valor límite 1 (VL1) y el valor límite 2 (VL2) respectivamente. Los valores dentro de este rango de la escala de pH tendrán un desempeño “**excelente**” [índice de desempeño= 300].

Es de recordar que, la escala de pH es logarítmica, por lo que la variación de pH en una unidad es igual a una variación de la concentración del ión hidrógeno [H⁺] 10 veces mayor o menor en el agua, generando un agua 10 veces más ácida o 10 veces más básica. Por lo anterior, en la función de desempeño se considera que el rendimiento es “**nulo**” [índice de desempeño = 0] para valores fuera del rango de 5.5 y 9.5 unidades de pH; e “**insatisfactorio**” [índice de desempeño= (0, 300)] para valores entre 5.5 - 6.5 y 8.5 – 9.5 de la escala de pH. La función de desempeño para

el pH se representa gráficamente tal como lo muestra la Figura 6. 5. Función de desempeño para la evaluación del desempeño en términos de la calidad del agua tratada del parámetro de pH (Adaptado de Vieira, 2009)

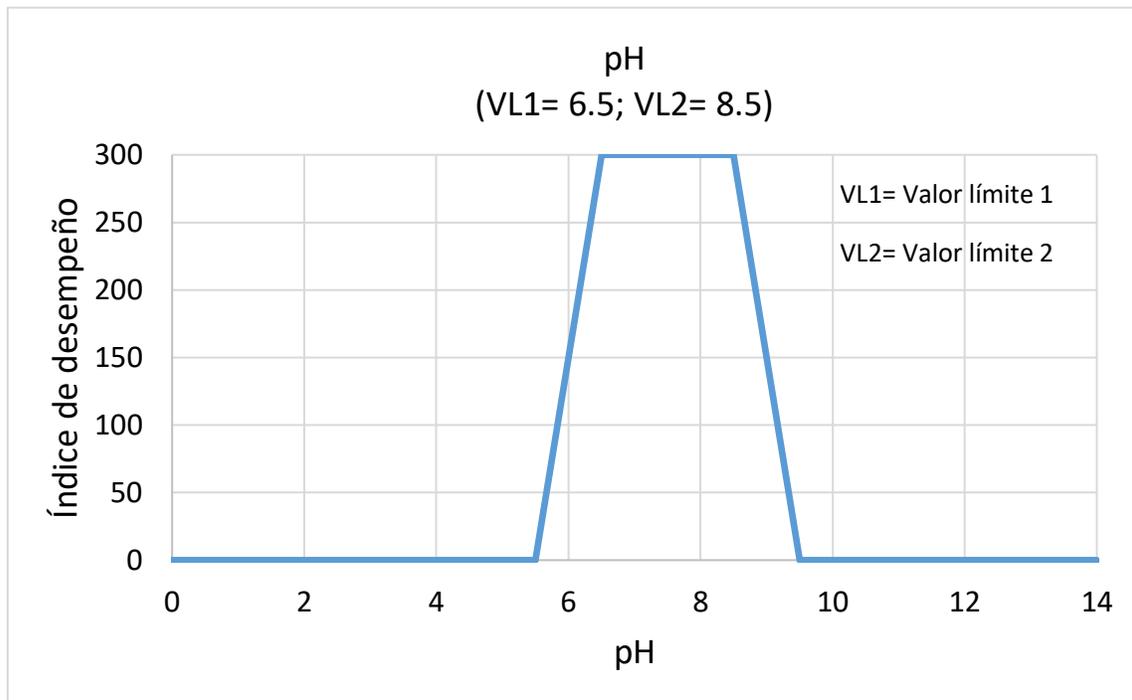


Figura 6. 5. Función de desempeño para la evaluación del desempeño en términos de la calidad del agua tratada del parámetro de pH (Adaptado de Vieira, 2009)

Parámetros microbiológicos

El resultado óptimo de los análisis de tipo microbiológico practicados al efluente de la PTA se trata de la ausencia de microorganismos, tal como refiere la NOM-014-CONAGUA-2003 y la modificación del 2000 de la NOM-127-SSA1-1994. Cuando el tratamiento se encuentra funcionando correctamente, esta situación ideal es fácilmente alcanzable. Por lo anterior, las funciones de desempeño establecen que un desempeño “**excelente**” [ÍnD= 300] se alcanza sólo cuando el valor de concentración del microorganismo en el agua tratada es **cero** (por ejemplo: 0 UFC/100 ml).

Cuando se realiza la técnica de conteo en placa para bacterias coliformes totales, bacterias coliformes fecales y bacterias heterotróficas las concentraciones iguales o superiores a 1 UFC/100 ml de estos microorganismos patógenos en el agua representarán un desempeño “**nulo**” del tratamiento [ÍnD= 0]. La función de desempeño para estos indicadores de contaminación puede ser consultada en la Figura 6. 6.

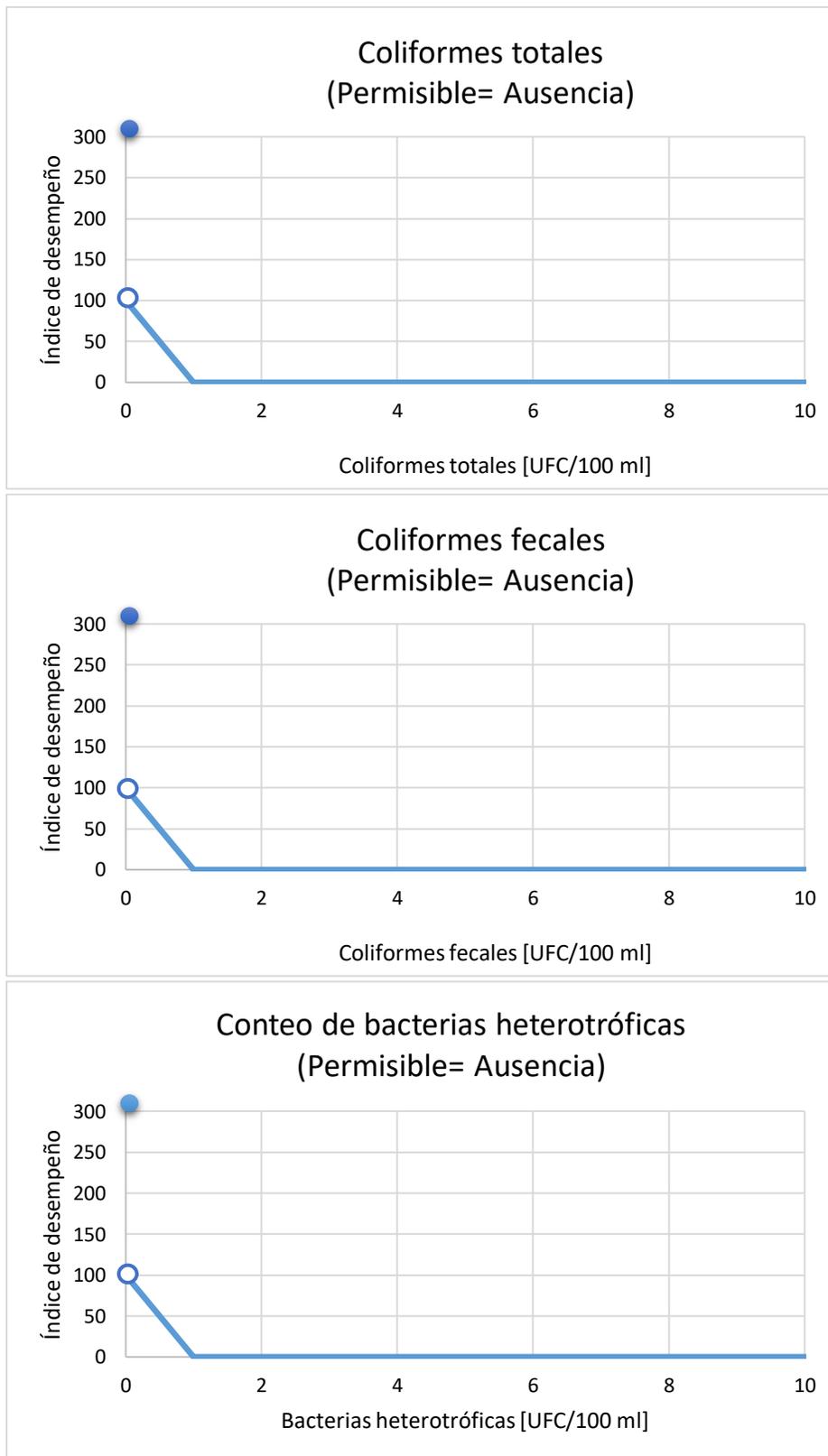


Figura 6. 6. Funciones de desempeño para la evaluación del desempeño en términos de la calidad del agua tratada de los parámetros microbiológicos

Parámetros especiales

En esta categoría se consideran los parámetros de calidad del agua en los cuales el LC es igual al LMP de la NOM-014-CONAGUA-2003. Por lo cual, la función de desempeño de los parámetros físicos o químicos es ligeramente modificada, quedando como se enuncia a continuación: el desempeño se considera “**excelente**” [ÍnD= 300] para concentraciones menores al LC, es decir, aquellas que se encuentren fuera del rango de detección; el desempeño de tratamiento se considera “**mínimo**” [ÍnD= 100] cuando el efluente posea una concentración igual al LMP o al LC (cabe recordar que son iguales). A concentraciones mayores del LMP no se alcanzan los objetivos planteados de calidad del ART, por lo que el rendimiento es “**insatisfactorio**” [ÍnD= (0,100)]. Los valores de concentración que excedan en un 50% al LMP se les atribuye un rendimiento “**nulo**” [ÍnD= 0].

Los parámetros que sigan esta condición están en función de las técnicas de análisis empleadas en la PTA. El parámetro que en el caso de estudio se reportó (SACMEX, 2020a; 2020b; 2020e) con el mismo valor del LC y del LMP (en el efluente) es el plomo, por lo cual se propuso esta nueva categoría de funciones de desempeño. En la Figura 6. 7 se puede consultar la función de desempeño correspondiente.

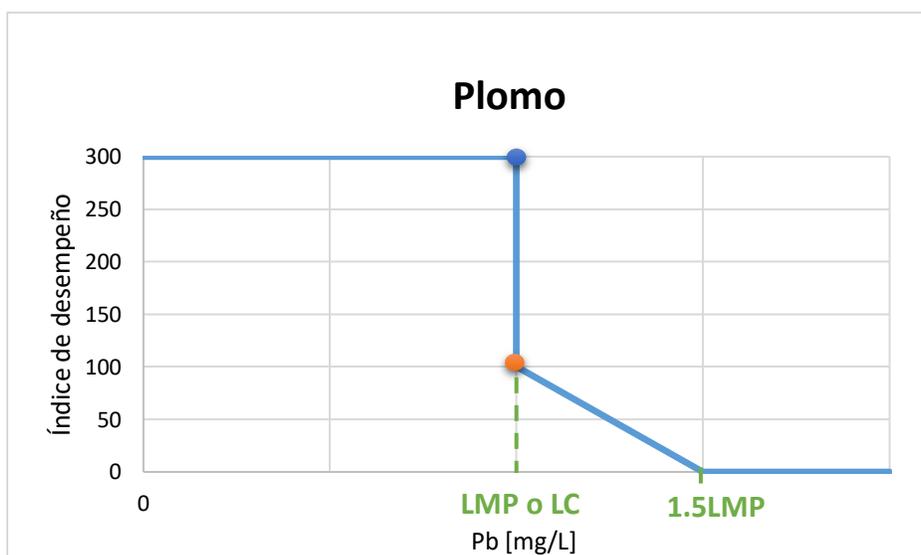


Figura 6. 7. Función de desempeño para la evaluación del desempeño en términos de la calidad del agua tratada de parámetros especiales

(d) Definición de una clasificación global y/o índice global de desempeño **Clasificación global en términos de desempeño**

La aplicación de las funciones de desempeño de la calidad del agua tratada a los parámetros físicos, químicos y microbiológicos dará distintos resultados de índices de desempeño, por lo cual, con el fin de facilitar su interpretación en la Tabla 6. 4 se presenta la clasificación de los parámetros de calidad del agua tratada en términos de desempeño por medio de diversas categorías establecidas, así como la descripción correspondiente y el semáforo asociado a cada categoría.

Tabla 6. 4. Clasificación de los parámetros de calidad del agua tratada en términos de desempeño.

Parámetros químicos (excepto pH) y físicos (color, turbiedad)			
Semáforo	ÍnD	Categoría de desempeño	Descripción
	0	Nulo	Parámetro con concentración igual o mayor a un 50% de exceso del límite máximo permisible (LMP).
	0-100	Insatisfactorio	Parámetro con concentración mayor al LMP, pero menor a un 50% de exceso del LMP.
	100	Mínimo	Parámetro con concentración igual al LMP.
	100-200	Aceptable	Parámetro con concentración cercana-menor al LMP y lejana-mayor al límite de cuantificación (LC) del método analítico.
	200-300	Bueno	Parámetro con concentración lejana-menor al LMP y cercana-mayor al LC del método analítico.
	300	Excelente	Parámetro con concentración igual o menor al LC del método analítico.
Parámetro: pH			
Semáforo	ÍnD	Categoría de desempeño	Descripción
	0	Nulo	Valor de pH con variación igual o mayor a una unidad de pH fuera del rango de pH permisible para agua potable.
	0-300	Insatisfactorio	Valor de pH con variación menor a una unidad de pH fuera del rango de pH permisible para agua potable.
	300	Excelente	Valor de pH dentro del rango de pH permisible para agua potable.
Parámetros microbiológicos			
Semáforo	ÍnD	Categoría de desempeño	Descripción
	0	Nulo	Valor del parámetro no permisible para agua potable.
	300	Excelente	Valor del parámetro permisible para agua potable.
Parámetro especial: plomo			
Semáforo	ÍnD	Categoría de desempeño	Descripción
	0	Nulo	Parámetro con concentración igual o mayor a un 50% de exceso del LMP.
	0-100	Insatisfactorio	Parámetro con concentración mayor al LMP, pero menor a un 50% de exceso del LMP.
	100	Mínimo	Parámetro con concentración igual al LMP y al LC.
	300	Excelente	Parámetro con concentración menor al LC del método analítico.

Semáforo: Código de color asignado a las concentraciones de parámetros de calidad del agua para su identificación como parte de una categoría de desempeño, Índ: Índice de desempeño.

Índice global de desempeño

En primera instancia, la evaluación del desempeño en cuanto a la calidad del agua tratada se realiza parámetro a parámetro (de forma individual), de manera posterior, el análisis del desempeño puede ejecutarse en términos globales, generando un solo índice global de desempeño a partir de la agregación de la información que brindan los distintos parámetros.

1) Selección de parámetros

Se propone obtener un índice de desempeño global de la PP que incluya criterios de calidad del agua normados por la NOM-014-CONAGUA-2003 para (1) parámetros clave de pruebas operativas utilizados en la Nueva planta de recuperación de Goreangab (NGRP) en Windhoek, Namibia y (2) parámetros clave monitoreados en el Sistema de Reabastecimiento de Agua Subterránea del Condado de Orange, California, E.U.A. Estos constituyentes considerados para el índice global son presentados en la Tabla 6. 5, en la cual se excluyeron aquellos que no son regulados en la NOM-014-CONAGUA-2003, y los no aplicables al caso de estudio (como algunos subproductos de desinfección).

Tabla 6. 5. Parámetros clave de monitoreo de calidad del agua

Clase	Parámetro específico
Físicos y organolépticos	pH ^b
	Color ^{a b}
	Sólidos disueltos totales ^a
	Turbiedad ^{a b}
	Dureza total ^b
Macroelementos	Aluminio ^{a b}
	Nitrógeno amoniacal ^a
	Cloruro ^a
	Fluoruro ^b
	Hierro ^{a b}
	Manganeso ^{a b}
	Nitrato ^{a b}
	Nitrito ^a
	Sulfato ^{a b}
Zinc ^b	
Indicadores microbiológicos	Conteo de bacterias heterotróficas ^a
	Coliformes totales ^{a b}
	Coliformes fecales ^{a b} o <i>Escherichia Coli</i> ^a
	Virus entéricos ^a
Biológicos	<i>Giardia</i> ^a
	<i>Cryptosporidium</i> ^a

^a Pisani y Menge, 2013; ^b Onyango y Wood, 2014b

2) Subíndices de desempeño

La transformación de los parámetros de distinta naturaleza, diferentes dimensiones y unidades en una sola escala común, se debe realizar como se explicó en el apartado 3 – Definición de funciones de desempeño – de la Evaluación del desempeño operativo. Así, los 21 parámetros de calidad previamente seleccionados serán convertidos y nombrados *subíndices de desempeño*, los cuales se utilizarán para la construcción del índice global.

3) Agregación de subíndices para producir una puntuación final en el índice global de desempeño

Para la obtención de una visión global del desempeño operativo a nivel planta en términos de la calidad del agua tratada, el método de Vieira (2009) obtiene la media aritmética (no ponderada) de los valores promedio anuales de los subíndices de desempeño, obteniendo como resultado un índice promedio de desempeño en la PTA que, para el caso de estudio, evaluará el cumplimiento de los objetivos de calidad alcanzados en el ART. Ante la falta de registros para la construcción de algún subíndice correspondiente a un parámetro, en el cálculo de la media aritmética (no ponderada) a ese subíndice se le asignará un valor de 0.

(e) Eficiencias de remoción de los parámetros críticos

En la propuesta de Clasificación global en términos de desempeño, se identificaron los parámetros que son objeto de incumplimiento de la NOM-014-CONAGUA-2003, los cuales tienen asociado un desempeño “**insatisfactorio**” y “**nulo**”. En esta investigación, los parámetros con estas categorías de desempeño son considerados como **críticos**. Los parámetros **críticos** son los que tendrán un seguimiento particular por medio de las eficiencias de remoción teóricas y reales correspondientes a las barreras múltiples de la PTA.

Conocer el porcentaje de remoción de una variable de calidad del agua permitirá evaluar el rendimiento de un tren de tratamiento de agua o parte de él. Para una PTA, el grado de remoción de un contaminante a lo largo del tiempo presenta incertidumbre debido a las oscilaciones de concentración del contaminante en el agua a tratar (influyente), así como del óptimo funcionamiento de las unidades que componen el sistema de tratamiento.

Las variables necesarias para la ejecución de esta evaluación en las barreras múltiples son los valores de media aritmética del período de evaluación que toman los parámetros **críticos** en la entrada y salida de cada OPU, los cuales serán tomados como referencia para obtener las eficiencias de remoción del parámetro indicador de contaminación de acuerdo con el cálculo especificado en la Ecuación 1.

$$\text{Eficiencia de remoción (\%)} = \frac{\text{Valor entrada} - \text{Valor de salida}}{\text{Valor de entrada}} \times 100$$

Ecuación 1.

Se llevará a cabo el análisis y discusión de los resultados obtenidos sobre los porcentajes de disminución de los contaminantes críticos conforme a la remoción teórica esperada para cada OPU, la cual fue consultada en diferentes referencias (WHO y OECD, 2003; Metcalf y Eddy, 2007; Qasim, 1999; Margeta *et al.*, 2013; Farhat *et al.*, 2013). Por su parte, la información referente a las configuraciones y operación de la PP Cerro de la Estrella (SACMEX, 2020a; 2020b; 2020c; 2020d; 2020f) servirá como apoyo para el planteamiento de algunas propuestas de mejora operativas.

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 Evaluación del desempeño global

La NOM-014-CONAGUA-2003 en su apartado 6.4 – Monitoreo – plantea que todo proyecto de recarga al acuífero debe ejecutar un programa de monitoreo de la calidad del agua de recarga cuya frecuencia debe ser quincenal. Se estipula que este monitoreo periódico debe realizarse de manera previa y durante las actividades de recarga del acuífero.

Los parámetros que deben ser monitoreados para las obras de recarga directa, superficial y subsuperficial con ART son las características de calidad para un agua destinada a consumo humano referidas por la modificación del 2000 de la NOM-127-SSA1-1994, así como microorganismos enteropatógenos, COT y, debido al origen del ART, de manera adicional ciertos parámetros microbiológicos, químicos y radiactivos; la totalidad de parámetros de monitoreo exigidos por la NOM-014-CONAGUA-2003 son referidos en la Tabla 5. 8. Adicionalmente, las obras de recarga superficial y subsuperficial deben de cumplir con el valor de DBO_5 referido en la norma.

La aplicación de los ID propuestos en la evaluación del desempeño en cuanto al monitoreo y cumplimiento de calidad del efluente se encuentra limitada a los datos históricos analizados en la PP Cerro de la Estrella que fueron proporcionados por el SACMEX para los períodos de evaluación de 2010-2013 y 2017-2019.

7.1.1 Indicadores de parámetros de calidad del agua

La NOM-014-CONAGUA-2003 exige una frecuencia de monitoreo quincenal para un total de 115 parámetros obligatorios, de los cuales 8 son microbiológicos, 3 son parámetros físicos y organolépticos, 100 son componentes químicos y 4 son características de radiactividad.

Indicador 1

La Figura 7. 1 presenta el resumen de resultados del porcentaje de pruebas de agua tratada exigidas y ejecutadas en los años evaluados. Los resultados obtenidos de 0.9 a 1.0% para el **ID1** – Pruebas de calidad realizadas – demuestran la insuficiencia de monitoreo de los 115 parámetros de calidad del agua para los 7 períodos de evaluación conforme a lo establecido en la NOM-014-CONAGUA-2003. Lo anterior indica que para todos los años en estudio ciertos parámetros obligatorios no son analizados en la PP (mismos que serán puntualizados en los ID2 a ID5) y que aquellos que sí son analizados no respetan la frecuencia exigida por la NOM-014-CONAGUA-2003. Así, se puede afirmar que de acuerdo con los datos reportados por el SACMEX se incumple con la frecuencia de monitoreo establecida por la NOM-014-CONAGUA-2003 en 7 años de operación de la PP, por lo que se debe de

considerar el mejoramiento del actual programa interno de monitoreo y vigilancia de calidad del agua de recarga.

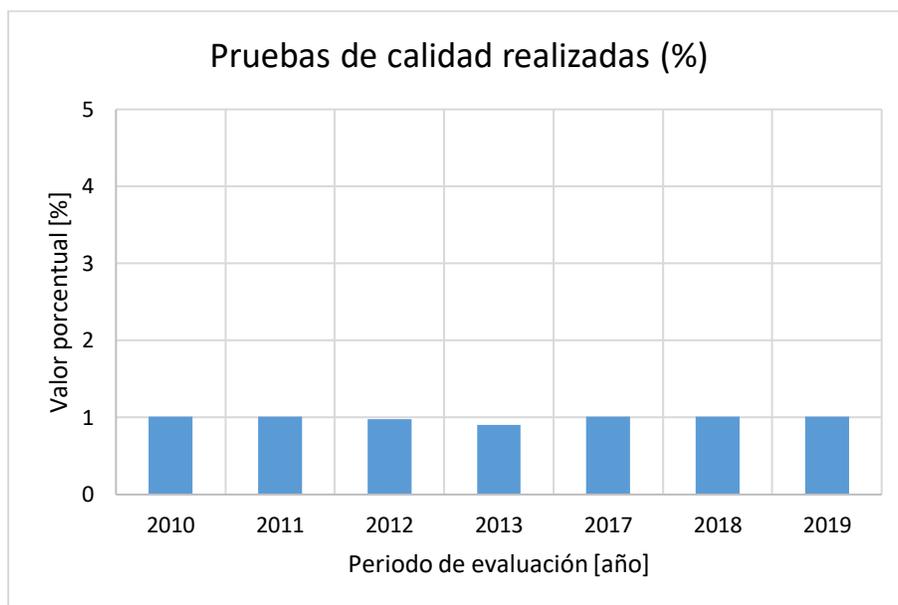


Figura 7. 1. Resumen de resultados – ID1

Indicador 6

La evaluación del cumplimiento de los LMP para la totalidad de parámetros que fueron monitoreados a lo largo de los años por medio del **ID6** (Figura 7. 2) reflejó una conformidad que va del 82.1% al 92.9% de las concentraciones de los parámetros reportados con los establecidos por la NOM-014-CONAGUA-2003. Lo anterior indica que en ninguno de los períodos de evaluación se tiene un desempeño excelente en el tratamiento de los parámetros analizados, es decir, no se tiene una total conformidad de la calidad del ART con la normatividad de recarga de acuíferos; lo cual refleja deficiencias en la operación de la coagulación-floculación-clarificación-filtración, ozonación-filtración, ósmosis inversa y la desinfección UV en la remoción de los 28 contaminantes físicos, químicos y microbiológicos hasta los niveles máximos permitidos.

En los ID7 a ID10 se discutirán los resultados de cumplimiento particulares para cada categoría de calidad del agua.

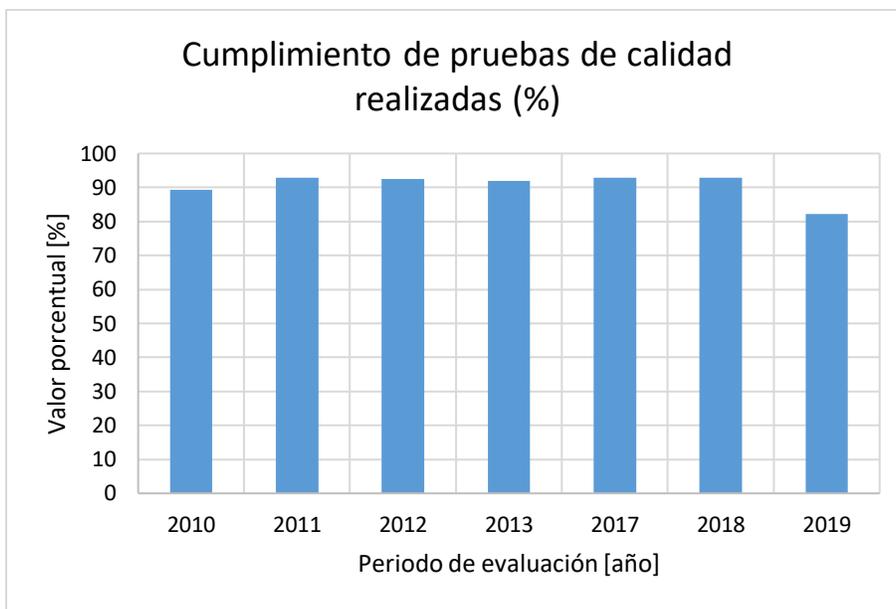


Figura 7. 2. Resumen de resultados – ID6

7.1.2 Indicadores de parámetros físicos y organolépticos

De acuerdo con lo consultado en WHO (2017) y EPA (2009) esta categoría refiere a las características que afectan la aceptabilidad del agua por parte de los consumidores de agua, las cuales se tratan del olor-sabor, color y turbiedad. Los LMP para estos parámetros son estipulados por la NOM-127-SSA1-1994 (modificación del 2000) en la categoría físicos y organolépticos.

Indicador 2

Los reportes indican que se ejecutan pruebas de análisis para los parámetros de color verdadero y turbiedad para los 7 períodos de evaluación, con un solo dato reportado por año y se omiten las de olor-sabor. Los resultados de 2.78% del **ID2** (Figura 7. 3) reflejan la falta de monitoreo frecuente exigido para todos los años bajo evaluación para el color verdadero y la turbiedad, así como la omisión de análisis del olor-sabor.

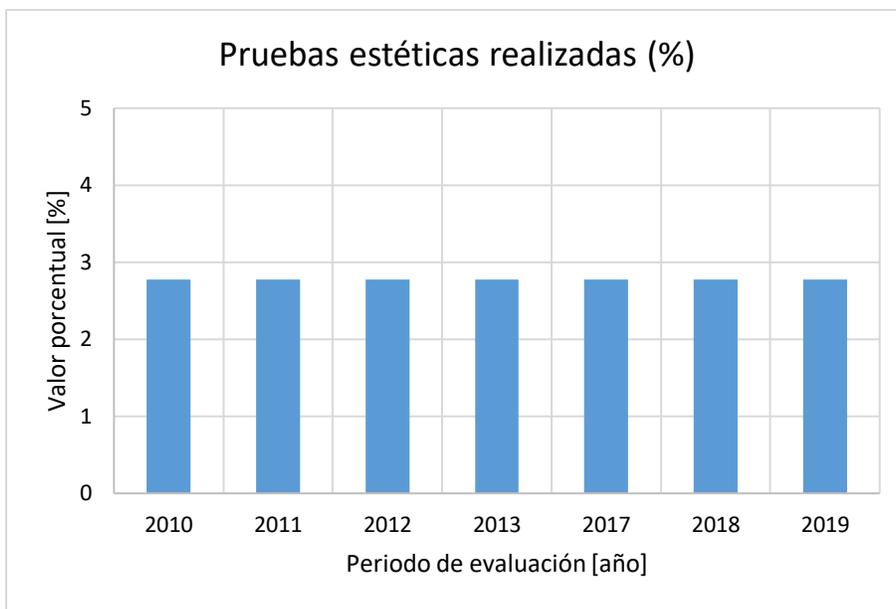


Figura 7. 3. Resumen de resultados – ID2

WHO (2017) considera que el sabor y el olor pueden ser generados por la presencia de contaminantes químicos orgánicos e inorgánicos naturales, así como de químicos sintéticos y de tipo biológico como microorganismos acuáticos. Por lo anterior, es posible que debido a la asociación entre estos contaminantes con el sabor y el olor en la PP Cerro de la Estrella se omita el monitoreo de estas características organolépticas y en su caso, se ejecute el monitoreo de los compuestos que las generan. Asimismo, otra de las posibles consideraciones sobre la omisión de monitoreo de las pruebas de olor y sabor es referente a la falta de infraestructura y/o personal para su realización.

Se puede suponer que si los constituyentes químicos orgánicos e inorgánicos naturales, químicos sintéticos y microbiológicos son controlados, no se tendrán problemas de olor y sabor en el ART.

Indicador 7

Por su parte, con un valor de 100% el ID7 refiere que se cumplió en su totalidad con los valores establecidos por la NOM-127-SSA1-1994 para las características de color verdadero y turbiedad en el efluente de la PP Cerro de la Estrella para los 7 años de evaluación (Figura 7. 4). De acuerdo con los resultados y a lo establecido en la Tabla 5. 6, se puede afirmar que la coagulación-floculación-clarificación-filtración fue eficiente en la remoción de turbiedad y color del efluente secundario y, que la ósmosis inversa también contribuyó a la disminución de la turbiedad hasta valores con los que se dió cumplimiento al LMP.

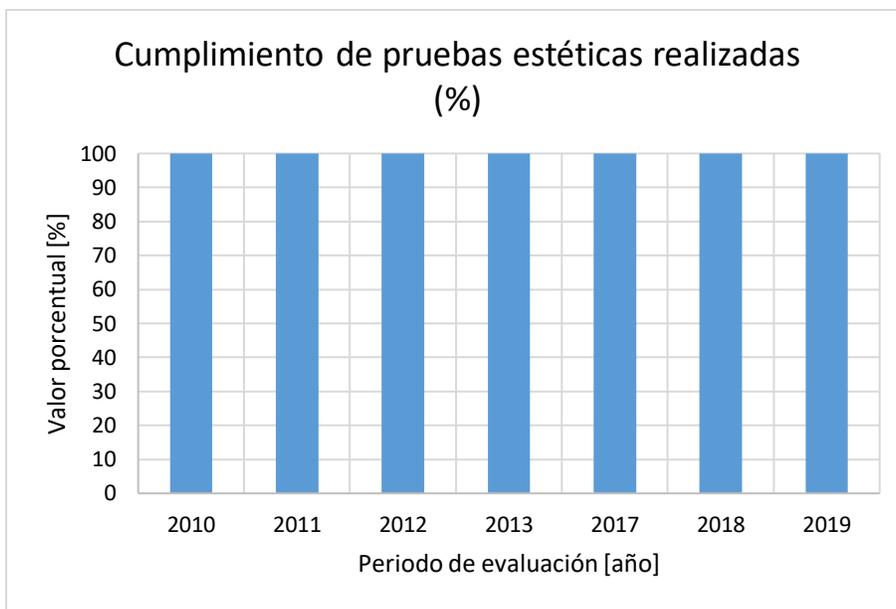


Figura 7. 4. Resumen de resultados – ID7

7.1.3 Indicadores de parámetros microbiológicos

La normatividad para la recarga de acuíferos con ART exige la remoción total o inactivación de agentes enteropatógenos, los cuales de acuerdo con la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA, s.f.) se tratan de microorganismos transmitidos vía fecal-oral que bajo ciertas circunstancias pueden producir enfermedades en los humanos a nivel del sistema digestivo. La normatividad no los delimita, pero debido a la naturaleza de los enlistados en la NOM-127-SSA1-1994 (modificación del 2000) y en la Tabla 3 del anexo de la NOM-014-CONAGUA-2003, los parámetros que se consideran obligatorios de análisis se tratan de: (1) organismos coliformes totales, (2) *Escherichia coli* o coliformes fecales u organismos termotolerantes, (3) *Cryptosporidium*, (4) *Vibrio Cholerae*, (5) *Giardia lamblia*, (6) enterovirus y (7) conteo de bacterias heterotróficas (HPC). Asimismo, la Tabla 3 de la NOM-014-CONAGUA-2003 establece el análisis obligatorio de (8) *Legionella*.

Indicador 3

De los anteriores, en el caso de estudio solo se ejecuta el monitoreo de los organismos coliformes totales, los organismos coliformes fecales y el conteo de bacterias heterotróficas con una frecuencia de monitoreo que en ningún año cumple con lo exigido por la normatividad, ya que solo se reportó un dato anual y que aunado a la falta de análisis de 5 microorganismos genera un valor del 1.56% del ID3 en el monitoreo de las pruebas microbiológicas (Figura 7. 5).

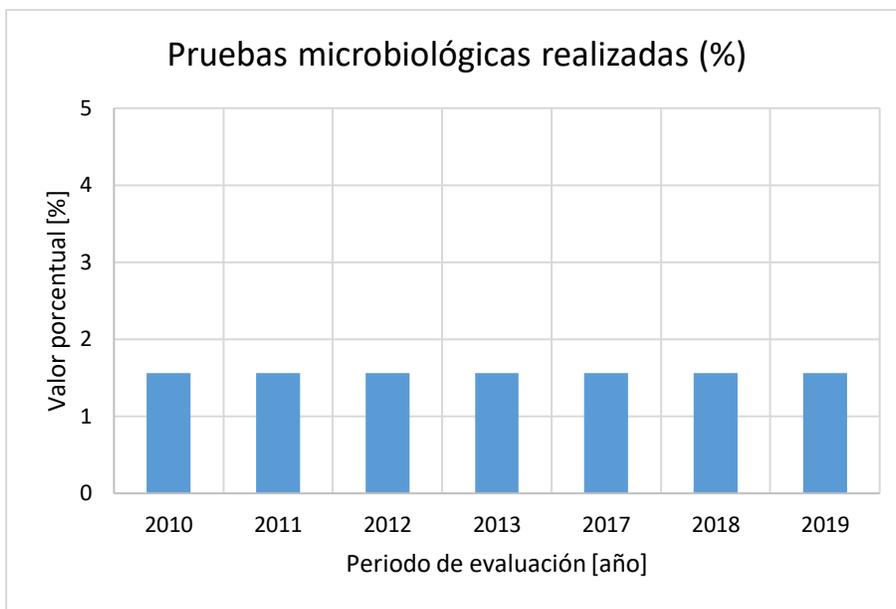


Figura 7. 5. Resumen de resultados – ID3

En su modificación del año 2000, la NOM-127-SSA1-1994 sólo exige el monitoreo de 2 parámetros microbiológicos, coliformes totales y *Escherichia coli*/coliformes fecales/organismos termotolerantes; los cuales de acuerdo con Sámano (2020) son monitoreados junto con el HCP en plantas potabilizadoras a cargo del SACMEX en la alcaldía Iztapalapa. Se considera que en la PP Cerro de la Estrella solo se ejecutan estos ensayos debido a que solo se cuenta con el equipamiento existente para los análisis exigidos para plantas potabilizadoras de agua con origen de fuentes convencionales.

La mayoría de los microorganismos patógenos que son transmitidos por el agua se introducen vía heces fecales humanas o animales, estos inician una infección en el tracto gastrointestinal después de su ingestión (WHO, 2017). La fuente de descarga de *Cryptosporidium*, *Giardia lamblia*, Enterovirus, *Vibrio Cholerae* y *Legionella* son las aguas residuales domésticas crudas (USEPA, 2012) que tras ser ingeridos vía oral provocan enfermedades gastrointestinales (excepto *Legionella*) junto con otros efectos a la salud, así como posibles afectaciones en la calidad del agua del acuífero; por lo que es imperante la necesidad de adoptar el monitoreo **diario** de estos contaminantes en las barreras múltiples encargadas de su remoción con el propósito de asegurar un efluente libre de patógenos.

Indicador 8

Los resultados de análisis para bacterias coliformes totales, bacterias coliformes fecales y HPC cumplieron de manera parcial, del 33 al 67% con la normatividad de recarga de acuíferos en los años de evaluación, tal como lo demuestra el **ID8**. En la Figura 7. 6 pueden ser consultados los resultados de este ID para cada uno de los años bajo estudio. Es de considerar que las barreras implicadas en la remoción o inactivación de bacterias se tratan de la coagulación-floculación-clarificación-

filtración, la ósmosis inversa y la desinfección con luz UV, por lo que posiblemente se presentaron deficiencias operativas en estas unidades que dieron como resultado el incumplimiento de los LMP para las bacterias coliformes totales, bacterias coliformes fecales y HPC.

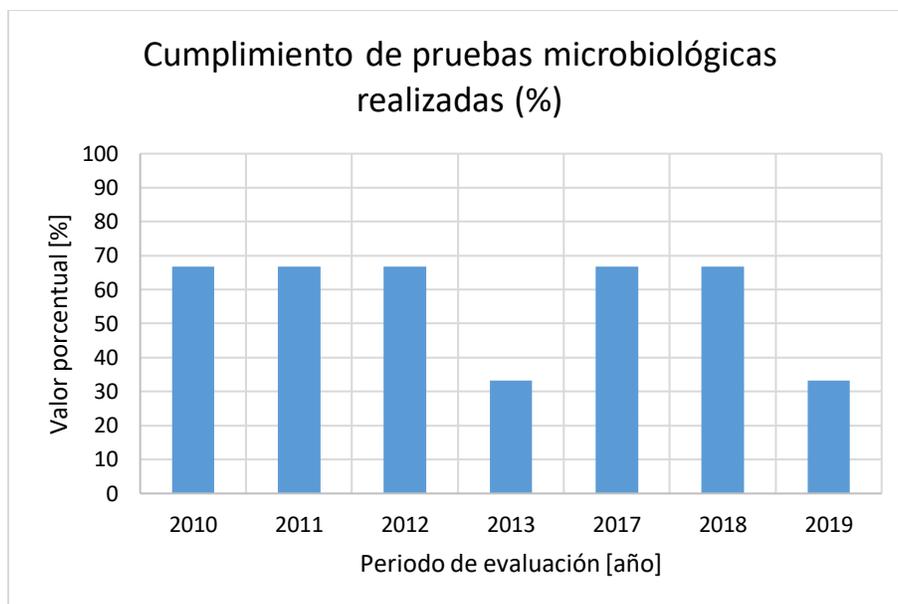


Figura 7. 6. Resumen de resultados – ID8

7.1.4 Indicadores de parámetros químicos

Se deben de monitorear 100 parámetros de naturaleza química en el ART, de los cuales en los diferentes períodos de evaluación se analizaron entre 20 a 23. En la Tabla 7. 14. Parámetros químicos obligatorios vs analizados de Anexos se presentan los parámetros químicos obligatorios frente a los datos reportados por el SACMEX (2020a; 2020b) en los períodos de evaluación.

Indicador 4

De acuerdo con los datos disponibles en ningún año bajo estudio se cumple con el monitoreo exigido de parámetros ni con la frecuencia de monitoreo obligatoria, ya que solo se monitorean de 20 a 23 constituyentes en el agua y, además, solo se reportó un dato anual para cada uno de los parámetros analizados. Por las razones anteriores, es claro que el desempeño obtenido en el monitoreo de parámetros químicos para la planta bajo estudio por medio del **ID4** es bajo, con resultados que van del 0.83 al 0.96% para todos los años evaluados (mismos que pueden ser consultados en la Figura 7. 7).

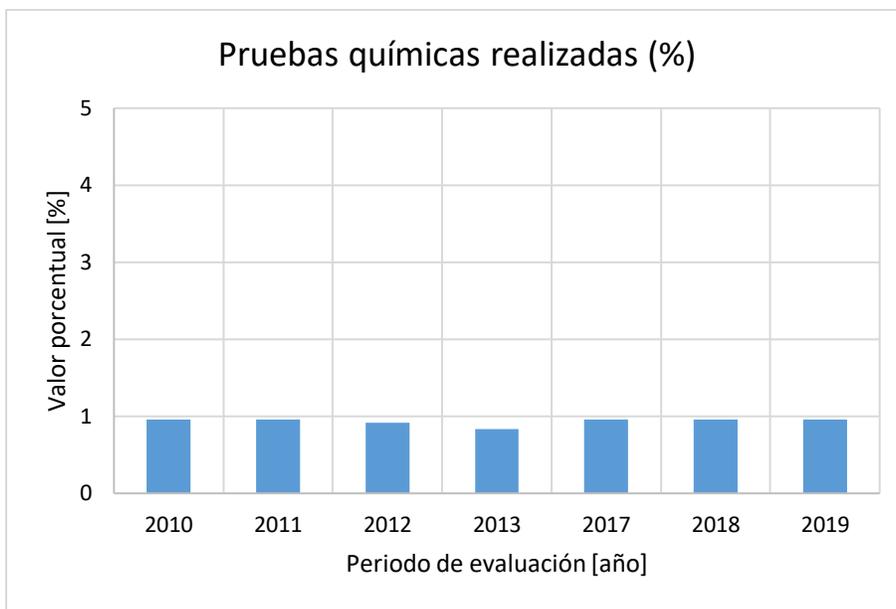


Figura 7. 7. Resumen de resultados – ID4

En la PP se ejecuta el análisis correspondiente para la mayoría de los compuestos inorgánicos regulados por la NOM-014-CONAGUA-2003, no obstante, no se realizan ensayos para la detección de compuestos orgánicos naturales (excepto SAAM) ni orgánicos sintéticos. Lo anterior, es coincidente con lo reportado por Sámano (2020) para las plantas potabilizadoras administradas por el SACMEX. Por lo que se considera que la PP Cerro de la Estrella carece de equipo para la detección de todos los constituyentes requeridos por la NOM-014-CONAGUA-2003.

Se considera que puede ser omitido el análisis de los agentes desinfectantes (cloraminas y dióxido de cloro) estipulados en la NOM-014-CONAGUA-2003, debido a que no son empleados en el proceso de tratamiento. De igual manera, se considera que los subproductos de desinfección (cloro residual, yodo residual, trihalometanos totales, cloritos y ácidos haloacéticos) pueden ser omitidos de monitoreo debido a que su presencia se debe a la reacción generada entre la materia orgánica y las sustancias químicas (cloro y yodo) empleadas en la desinfección, tal como lo mencionan Orozco *et al.* (2005). Debido a que no son empleados cloro, yodo, cloraminas y dióxido de cloro como agentes desinfectantes, los parámetros de desinfectantes y subproductos de desinfección establecidos en la NOM-014-CONAGUA-2003 podrían cumplir con los LMP.

Sin embargo, no se descarta la presencia en el ART del resto de 69 compuestos inorgánicos y orgánicos que no son monitoreados (Tabla 7. 14. Parámetros químicos obligatorios vs analizados de Anexos) ya que como lo establece Orozco *et al.* (2005) la incorporación de diversos compuestos en agua se debe a actividades antropogénicas como fumigaciones agrícolas y descargas industriales; asimismo, los compuestos podrían ser constituyentes de materiales o infraestructura en contacto con el agua y, además, podrían ser añadidos por el uso de ciertos agentes

en la potabilización. Se sabe que la PTAR Cerro de la Estrella da tratamiento a descargas de tipo municipal, empero, no se descarta la posibilidad de que también sean tratados efluentes de otros sectores, por lo que se considera que en la PP debería implementarse el monitoreo de los parámetros químicos inorgánicos y orgánicos establecidos en la NOM-014-CONAGUA-2003 preferentemente de manera quincenal o trimestral como mínimo.

Indicador 9

En cuanto al cumplimiento de los parámetros químicos analizados conforme a la normatividad para la recarga de acuíferos, se alcanzaron valores del 87% al 100% para el **ID9** para los años bajo evaluación (Figura 7. 8). Donde solo en el año 2013 se logró obtener un desempeño excelente (100%) en el tratamiento de 20 parámetros monitoreados. De acuerdo con lo recopilado en la Tabla 5. 6, las barreras encargadas de la remoción de ciertos químicos inorgánicos, así como metales y metaloides se tratan de la coagulación-floculación-clarificación-filtración, la ozonación, la filtración con zeolita y la ósmosis inversa. Por lo que es probable que alguno de los tratamientos antes mencionados presentó anomalías en su operación por las que no se diera cumplimiento a los LMP de la NOM-014-CONAGUA-2003 en 6 de los años reportados.



Figura 7. 8. Resumen de resultados – ID9

7.1.5 Indicadores de parámetros de radiactividad

Dentro de los parámetros regulados por la NOM-127-SSA1-1994 (modificación del 2000) se encuentran las características radiactivas, las cuáles refieren a los parámetros de: (1) radiactividad alfa global, (2) radiactividad beta global. Por su parte, la NOM-014-CONAGUA-2003 refiere (3) radio 226 y radio 228 (combinados) y (4) uranio.

Indicador 5

En ninguno de los años bajo estudio se tienen datos sobre el monitoreo de los parámetros radiactivos, por lo anterior, el ID5 (Figura 7. 9) conserva un 0% de pruebas realizadas frente a las obligatorias para cada uno de los períodos de evaluación.

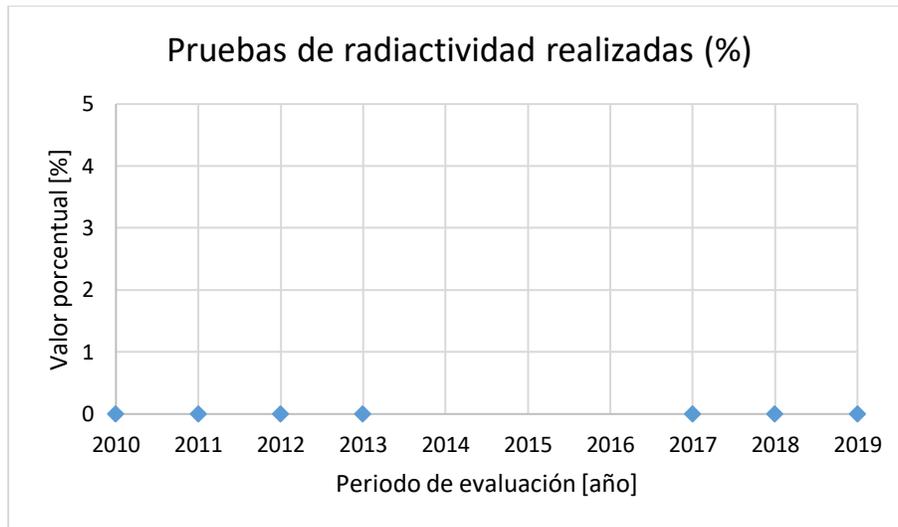


Figura 7. 9. Resumen de resultados – ID5

En las 12 plantas de tratamiento de agua para consumo humano administradas por el SACMEX y estudiadas por Sámano (2020) no se reportaron estudios de aspectos radiológicos, por lo que se considera que los laboratorios de análisis de calidad del agua carecen de infraestructura y equipo necesario para su detección.

De acuerdo con WHO (2017) la protección radiológica considera el supuesto de que cualquier exposición a la radiación implica algún nivel de riesgo. Por lo que se sugiere que no debería descartarse el monitoreo en el ART de radiactividad total presente en forma de radiación alfa y beta, y en caso de ser necesario, debería realizarse un análisis más específico de radioisótopos establecidos por WHO (2017) en las *Directrices para la calidad del agua potable*; y, se recomienda que por lo menos se realice un análisis por año para este tipo de parámetros.

Indicador 10

Debido al nulo monitoreo de la calidad del agua en cuanto a pruebas radiactivas y, consecuentemente, de no contar con disponibilidad de datos para su obtención, el ID10 referente al cumplimiento de los LMP para este tipo de parámetros no pudo ser obtenido.

De acuerdo con Metcalf y Eddy (2007) la coagulación-floculación-clarificación-filtración eliminarían del efluente secundario uranio y, por su parte, la filtración con zeolita y la ósmosis inversa son etapas que remueven radio y uranio del medio; por lo que la PP Cerro de la Estrella si se encuentra dotada de unidades para el

tratamiento de compuestos radiactivos. Sin embargo, no se puede asegurar que se cumplan con los LMP de estos elementos dictados en la NOM-014-CONAGUA-2003.

7.2 Evaluación del desempeño operativo

El análisis del desempeño operacional fue desarrollado para el conjunto de barreras múltiples por medio de la calidad del efluente de la planta de tratamiento para el total de 28 parámetros de calidad del agua monitoreados.

Las representaciones gráficas obtenidas después de la aplicación de las funciones de desempeño correspondientes a los valores que toman los parámetros de calidad del agua identificaron en el tiempo por medio de los Índices de Desempeño (ID) en qué medida se lograron o no se lograron los objetivos preestablecidos. Aquellos que resultaron objeto de incumplimiento se presentan como parámetros críticos, considerados además como oportunidades de mejora.

Al igual que la evaluación del desempeño global, este apartado también se limita al uso de los datos anuales de calidad del ART proporcionados por el SACMEX. No obstante, el análisis del desempeño operativo puede llevarse a cabo tan frecuentemente como la periodicidad de los datos lo permita, por lo que, si se cuenta con los datos disponibles, es posible realizar la evaluación del desempeño operativo semanalmente, diariamente o cada hora, como lo plantea Silva *et al.* (2014a).

Debido a que el SACMEX (2020a; 2020b) solo reportó un valor por parámetro de calidad del agua para cada año y se desconoce la fecha de ejecución del monitoreo, en esta investigación no se puede establecer la influencia de la variabilidad estacional en los resultados de análisis del desempeño operativo.

7.2.1 Índices de parámetros físicos

Los parámetros de **turbiedad** y **color verdadero** presentaron un desempeño **bueno** y **excelente** a lo largo de los años de evaluación (Figura 7. 10 y Figura 7. 11), alcanzando en todas las ocasiones el objetivo de cumplimiento de la NOM-014-CONAGUA-2003, reafirmando así el resultado obtenido en el ID7. Además, se alcanzó el LC de la técnica analítica en 3 años de evaluación para la turbiedad y en 4 años para el color verdadero. Por lo cual, se puede afirmar que la barrera de coagulación-floculación-sedimentación-filtración (configuración 1 y 2) y la de ósmosis inversa resultaron eficientes en cuanto a la remoción de la turbiedad. Asimismo, la coagulación-floculación-sedimentación-filtración (configuración 1 y 2) resultó eficiente en la remoción del color.

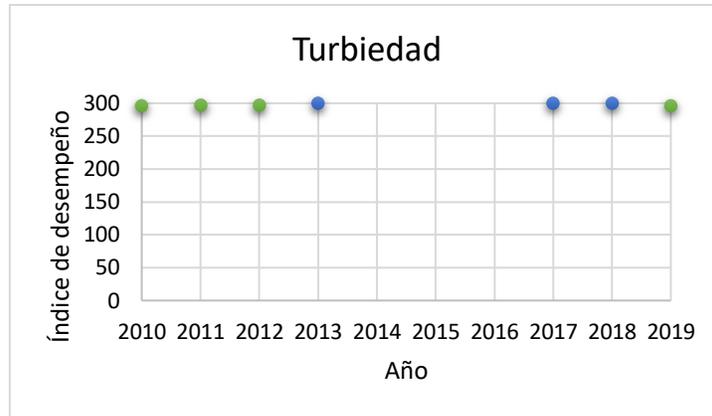


Figura 7. 10. Índice de calidad del agua tratada – Turbiedad

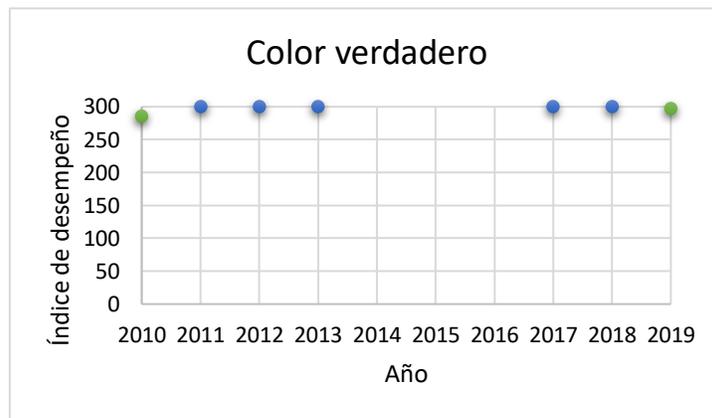


Figura 7. 11. Índice de calidad del agua tratada – Color verdadero

7.2.2 Índices de parámetros microbiológicos

La función de desempeño para parámetros microbiológicos no da tolerancia en cuanto a la presencia de bacterias coliformes totales, coliformes fecales o heterotróficas en el ART. Así, los resultados muestran que se obtuvo un desempeño **excelente** para los **coliformes fecales** para todos los años de evaluación (Figura 7. 12).

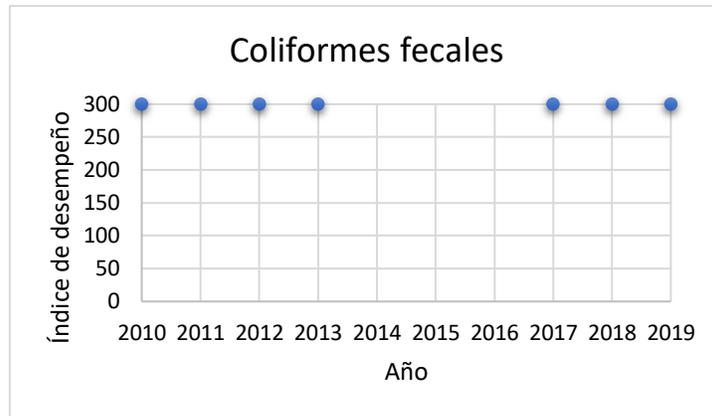


Figura 7. 12. Índ calidad del agua tratada – Coliformes fecales

Los **coliformes totales** para los años 2013 y 2019 son objeto de incumplimiento al presentar un desempeño **nulo**. Por su parte, para los años 2010, 2011, 2012, 2017 y 2018 se obtuvo un desempeño **excelente** en la remoción de éstos (Figura 7. 13).

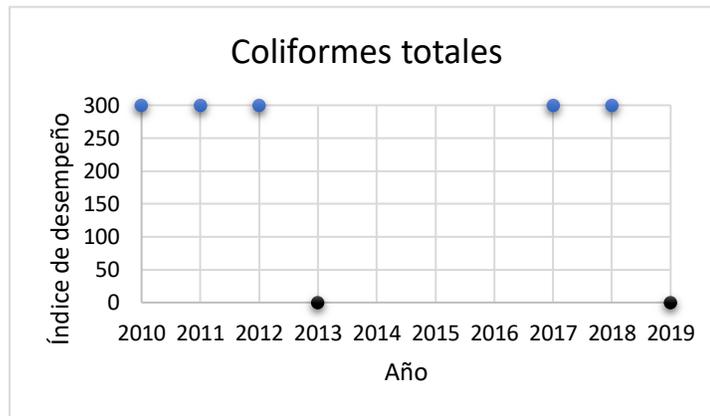


Figura 7. 13. Índ calidad del agua tratada – Coliformes totales

Por su parte, el **conteo de bacterias heterotróficas** no logró el cumplimiento de la normatividad de recarga de acuíferos para ninguno de los 7 años evaluados, donde mostró un desempeño **nulo** (Figura 7. 14).

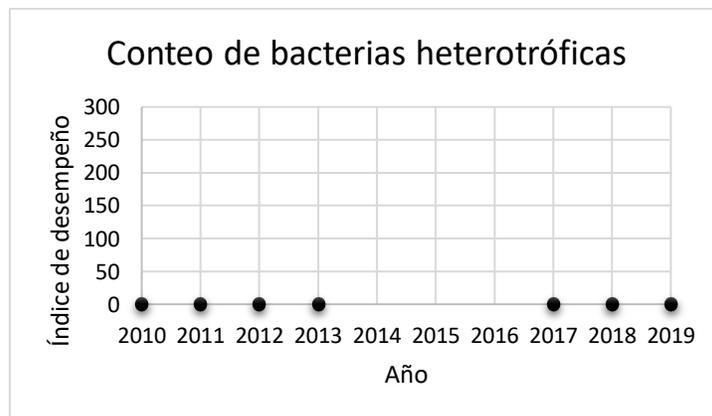


Figura 7. 14. Índ calidad del agua tratada – Conteo de bacterias heterotróficas

Tal como se estableció en la propuesta metodológica, todo parámetro que tenga un desempeño **nulo** se considera un parámetro crítico, por lo cual, los coliformes totales y el conteo de bacterias heterotróficas entran en esta clasificación.

Es de mencionar que las dos últimas rehabilitaciones que se hicieron en la PP Cerro de la Estrella se realizaron en el año 2013 y 2019, lo cual presumiblemente se atribuye al bajo desempeño de las barreras múltiples en la remoción de parámetros microbiológicos en estos dos años.

7.2.2.1 Eficiencias de remoción

La discusión de las eficiencias de remoción se realizó por conjunto de procesos u operaciones (barrera 1, barrera 2, barrera 3 y barrera 4), debido a que así son ejecutados los muestreos en la PP Cerro de la Estrella. Asimismo, se ve limitada a los datos de calidad del agua tratada proporcionados y a la falta de datos operativos específicos de cada unidad de tratamiento al momento del muestreo. No obstante, en esta investigación por medio de las concentraciones de los parámetros de calidad del agua en cada etapa, las eficiencias de remoción teóricas y los principios de funcionamiento de las OPU se estableció un posible panorama que representara el comportamiento de la PP Cerro de la Estrella en dos de sus configuraciones, el cual a su vez se considera como punto de partida para el planteamiento de propuestas de gestión y operación de la planta.

Para trabajos futuros, se considera ideal que los sitios de muestreo se ubiquen en cada etapa de tratamiento y que se mantenga una mayor frecuencia de monitoreo de parámetros (descrita en el apartado 7.3.3), que en conjunto con la información detallada sobre las condiciones operativas de cada OPU facilitarían la interpretación del comportamiento de las barreras múltiples a lo largo del tiempo, lo cual a su vez fortalecería la discusión de los resultados de las eficiencias de remoción obtenidas.

Es relevante mencionar que, otra de las principales limitaciones de aplicación de la metodología con datos históricos de calidad del agua es el desconocimiento sobre la fiabilidad y exactitud de los datos. Por lo que los resultados de las eficiencias de remoción reales presentarán esta incertidumbre asociada a la fuente de información de datos.

Eficiencias de remoción - Coliformes totales

De acuerdo con lo consultado en WHO y OECD (2003) y en Metcalf y Eddy (2007), se asocia una remoción o inactivación de bacterias para las barreras de coagulación-floculación-sedimentación-filtración, ozonación, ósmosis inversa y desinfección con luz UV. La remoción obtenida de este parámetro de contaminación biológica para cada barrera en los diferentes años de evaluación, así como la remoción teórica asociada pueden ser consultadas en la Tabla 7. 1.

Tabla 7. 1. Remoción teórica vs real de coliformes totales

Fecha	Valor inicial [UFC/100 mL]	Coagulación-floculación-sedimentación-filtración (Barrera 1)		Ozonación-filtración (Barrera 2)		Ósmosis inversa (Barrera 3)		Desinfección con luz UV (Barrera 4)	
		Teórica [log]	Real [log]	Teórica [log]	Real [log]	Teórica [log]	Real [log]	Teórica [log]	Real [log]
2010	100	0.2 – 2 ^a	0.00	2 ^{b, d}	0.00	4 – 7 ^b	11.00	4 – 8 ^{a, c}	-
2011	98		0.00		0.01		11.00		-
2012	99		-0.01		0.04		11.00		-
2013	100		0.00		0.02		0.28		0.85
2017	85		-0.06		0.01		11.00		-
2018	95		-0.02		0.01		11.00		-
2019	98		0.00		0.01		0.35		> -11.00
Fecha	Valor inicial [UFC/100 mL]	Teórica [%]	Real [%]	Teórica [%]	Real [%]	Teórica [%]	Real [%]	Teórica [%]	Real [%]
2010	100	36.90 – 99 ^a	1.00	99 ^{b, d}	1.01	99.99 – 99.99999 ^b	100.00	99.99 – 99.99999 ^{a, c}	-
2011	98		0.00		2.04		100.00		-
2012	99		-3.03		9.80		100.00		-
2013	100		0.00		5.00		47.37		86.00
2017	85		-15.29		3.06		100.00		-
2018	95		-4.21		2.02		100.00		-
2019	98		0.00		2.04		55.21		-113.95

^a WHO y OECD (2003); ^b Metcalf & Eddy (2007); ^c Dosis = 400 J/m²; ^d C_{RT}: 3-4 mg min/l l

En 4 de 7 años de evaluación, en la barrera 1 no se removieron coliformes totales, mientras que en los otros 3 años se generó un incremento de estos al finalizar la etapa, lo cual no corresponde con el propósito de remoción asociado a la coagulación-floculación-sedimentación-filtración que establece la literatura. Considerando los resultados de la barrera ozonación-filtración, presumiblemente se presentó un mínimo efecto de inactivación o remoción de coliformes totales. Por su parte, la barrera de ósmosis inversa alcanza una remoción desde 0.28-log (47.37%) hasta más de 11-log (100%) de coliformes totales; esta última eficiencia de remoción que asegura la remoción completa de los microorganismos se presentó en 5 años de evaluación. De acuerdo con lo reportado, la ausencia de coliformes totales se presenta en 5 años a partir de la ósmosis inversa y en esos mismos años la etapa de desinfección mantiene la ausencia de este tipo de bacterias. En 2013 y 2019, cuando se obtuvo un tratamiento con desempeño **nulo**, la etapa de ósmosis inversa tiene una reducción baja de coliformes totales con 0.28-log (47.37%) y 0.35-log (55.21%); la desinfección con luz UV solo inactiva las bacterias en una ocasión,

alcanzando una eficiencia menor respecto de la teórica y, en otra ocasión aumentó el número de coliformes totales en el ART.

Se considera que la nula remoción en la coagulación-floculación-sedimentación-filtración se debe a que no son utilizados coagulantes ni floculantes en la etapa, tal como lo reportó el SACMEX (2020d); por lo que en la barrera 1 solo se tiene aporte de las operaciones de clarificación y filtración. Además, es posible que se haya generado la acumulación y reproducción de bacterias, y el posterior barrido de depósitos con bacterias coliformes totales en las barreras que presentaron eficiencias de remoción negativas como la filtración (barrera 1); lo cual se encuentra estrechamente ligado al deficiente mantenimiento de las unidades de filtración. Las bajas eficiencias de tratamiento en la ozonación, posiblemente se deban a que la dosis de ozono aplicada, el consumo de ozono y el tiempo de contacto en el reactor no se encuentran en el rango recomendado con fines de desinfección, sino que pudiesen conservar valores en la etapa cuyo posible propósito sea oxidar compuestos inorgánicos.

Por su parte, en la ósmosis inversa posiblemente el ensuciamiento de las membranas por partículas, sales poco solubles o microorganismos, generó eficiencias de remoción bajas de coliformes totales.

En la desinfección UV, en 2013, la baja eficiencia de remoción obtenida posiblemente se debió a la aplicación de una dosis inadecuada de radiación UV en el ART. Mientras que la eficiencia de remoción negativa obtenida en 2019 fue una posible consecuencia de la fotoreactivación de las bacterias coliformes totales.

Eficiencias de remoción – Conteo de bacterias heterotróficas

De manera análoga a las bacterias coliformes totales, las bacterias heterotróficas deben de ser removidas o inactivadas en las etapas de coagulación-floculación-sedimentación-filtración, ozonación, ósmosis inversa y desinfección con luz UV, tal como lo plantean WHO y OECD (2003) y, Metcalf y Eddy (2007). Las eficiencias de reducción del parámetro HPC a lo largo de las barreras múltiples fueron obtenidas para todos los años en estudio y son comparadas con la remoción teórica esperada en la Tabla 7. 2.

Tabla 7. 2. Remoción teórica vs real de bacterias heterotróficas

Fecha	Valor inicial [UFC/100 mL]	Coagulación-floculación-sedimentación-filtración (Barrera 1)		Ozonación-filtración (Barrera 2)		Ósmosis inversa (Barrera 3)		Desinfección con luz UV (Barrera 4)	
		Teórica [log]	Real [log]	Teórica [log]	Real [log]	Teórica [log]	Real [log]	Teórica [log]	Real [log]
2010	5518	0.2 – 2 ^a	-0.03	2 ^{b, d}	0.02	4 – 7 ^b	0.58	4 – 8 ^{a, c}	0.57
2011	5775		-0.02		0.04		0.50		0.41
2012	5768		-0.01		0.10		0.58		0.55
2013	5827		0.00		-0.04		0.35		0.78
2017	4379		-0.15		0.04		2.35		1.40
2018	5732		-0.02		0.02		2.36		1.40
2019	4048		-0.07		0.01		0.73		0.33
Fecha	Valor inicial [UFC/100 mL]	Teórica [%]	Real [%]	Teórica [%]	Real [%]	Teórica [%]	Real [%]	Teórica [%]	Real [%]
2010	5518	36.90 – 99 ^a	-7.27	99 ^{b, d}	4.07	99.99 – 99.99999 ^b	73.53	99.99 – 99.99999 ^{a, c}	73.19
2011	5775		-4.80		9.10		68.28		61.03
2012	5768		-3.22		20.29		73.89		71.99
2013	5827		-0.53		-10.57		55.64		83.54
2017	4379		-40.40		7.95		99.56		96.00
2018	5732		-3.73		4.64		99.56		96.00
2019	4048		-18.31		3.34		81.34		53.13

^a WHO y OECD (2003); ^b Metcalf & Eddy (2007); ^c Dosis = 400 J/m²; ^d C_{RT}: 3-4 mg min/l

En los 7 años bajo evaluación, se obtuvo un desempeño **nulo** en la remoción de bacterias heterotróficas del ART. Los resultados indican que en la barrera 1 se obtuvo una eficiencia negativa en 6 de los 7 años, lo que indica que esta etapa no contribuyó a la reducción de bacterias heterotróficas sino que contraviene lo que la teoría indica, al provocar un incremento en el número de bacterias en el agua tratada que, posiblemente fue resultado de su acumulación y reproducción en depósitos del lecho filtrante y su posterior desprendimiento; además, es importante mencionar que SACMEX (2020d) referenció que no hace uso de coagulantes, ni floculantes en la barrera 1.

Por su parte, a lo largo de los años la barrera de ozonación-filtración no presenta una inactivación o remoción significativa de bacterias heterotróficas. Lo anterior se puede asociar a los parámetros operacionales que conserva la etapa de ozonación que, posiblemente no guarden el propósito de eliminación de microorganismos sino el de oxidación de compuestos inorgánicos.

Es posible que, en la ósmosis inversa el ensuciamiento de las membranas por la acumulación de diversas partículas o por la colonización de microorganismos, provocó que las eficiencias de remoción de la barrera [0.35-log (55.64%) a 2.36-log (99.56%)] se encontraran por debajo del rango de remoción teórico.

Finalmente, se considera que en la desinfección UV posiblemente la dosis de agente desinfectante aplicada no produce efectos germicidas en las bacterias heterotróficas, por lo que el desempeño de la etapa resultó menor al establecido por la teoría e insuficiente para la ausencia de bacterias heterotróficas en el efluente.

7.2.3 Índices de parámetros químicos

Los parámetros químicos donde el tratamiento alcanzó un desempeño **excelente** para todos los años de evaluación reportados y que cumplen con los objetivos de conservar un valor en el ART tal que sea menor al LMP y alcance el LC de su técnica de análisis, fueron los sulfatos y el manganeso, como lo muestran la Figura 7. 15 y la Figura 7. 16.

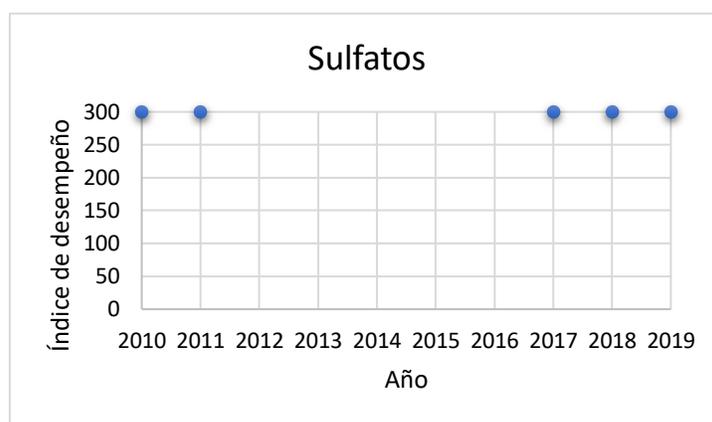


Figura 7. 15. Índ calidad del agua tratada – Sulfatos

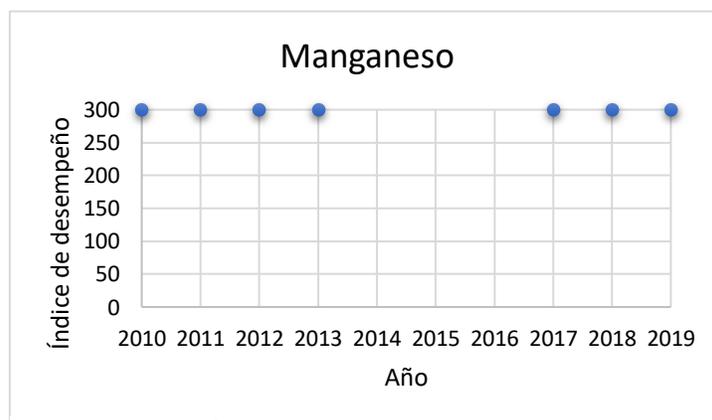


Figura 7. 16. Índ calidad del agua tratada – Manganeso

El proceso de tratamiento además alcanzó un desempeño **excelente** y **bueno** a lo largo de los años de evaluación para las características químicas de **SAAM, dureza total, cloruros, fluoruros, aluminio, arsénico, bario, zinc, cobre, cromo, hierro y selenio** (Figura 7.17 a Figura 7.28). Cumpliendo en algunos años con el objetivo 2 de conservar los valores del LC y en la totalidad de años con el objetivo 1 de no sobrepasar el LMP dictado por la NOM-014-CONAGUA-2003.



Figura 7. 22. Índ calidad del agua tratada – SAAM

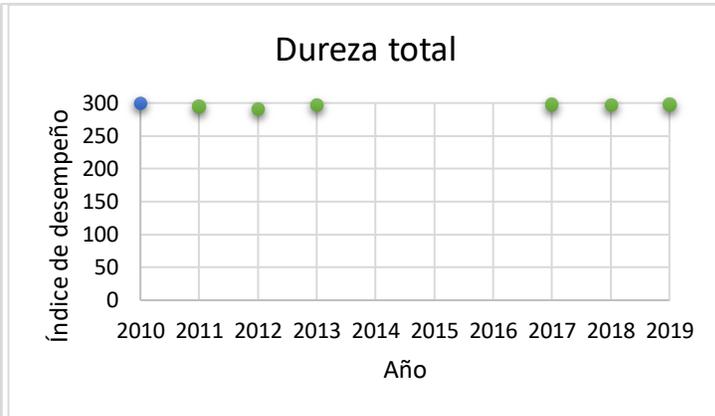


Figura 7. 17. Índ calidad del agua tratada – Dureza

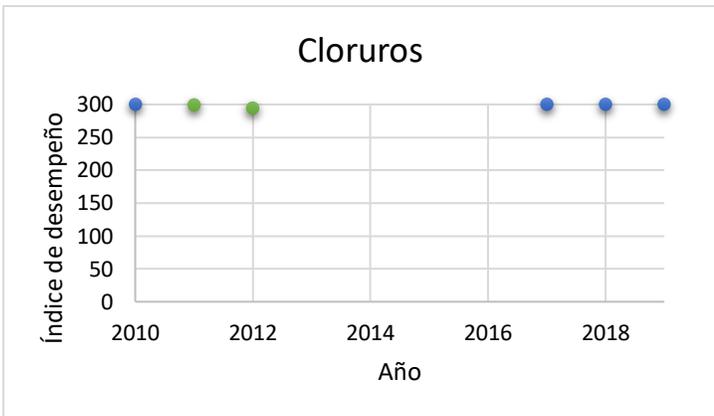


Figura 7. 20. Índ calidad del agua tratada – Cloruros

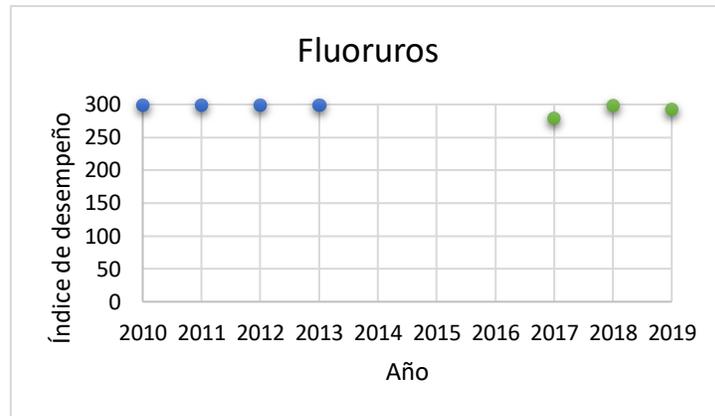


Figura 7. 19. Índ calidad del agua tratada – Fluoruros

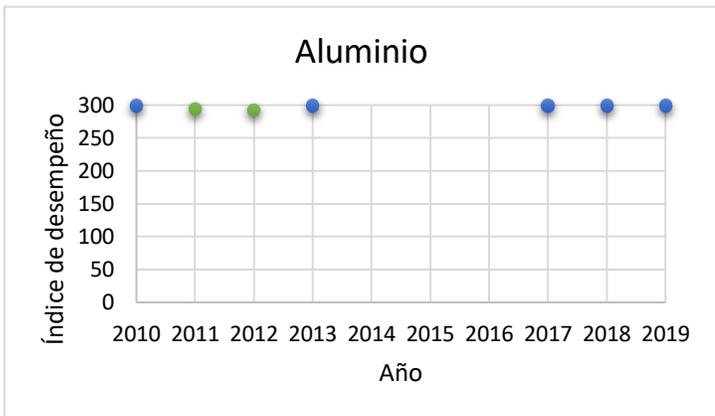


Figura 7. 21. Índ calidad del agua tratada – Aluminio

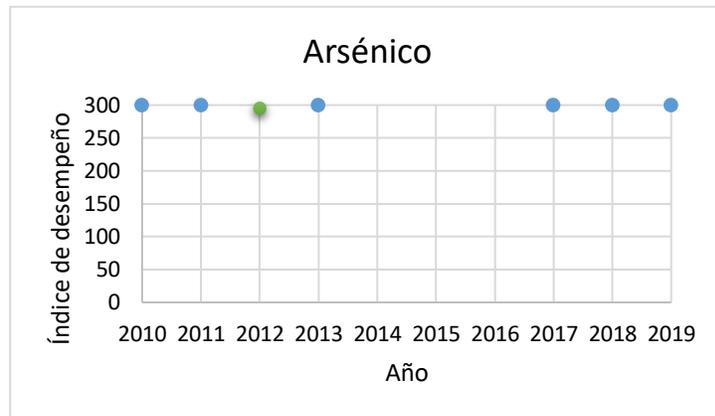


Figura 7. 18. Índ calidad del agua tratada – Arsénico

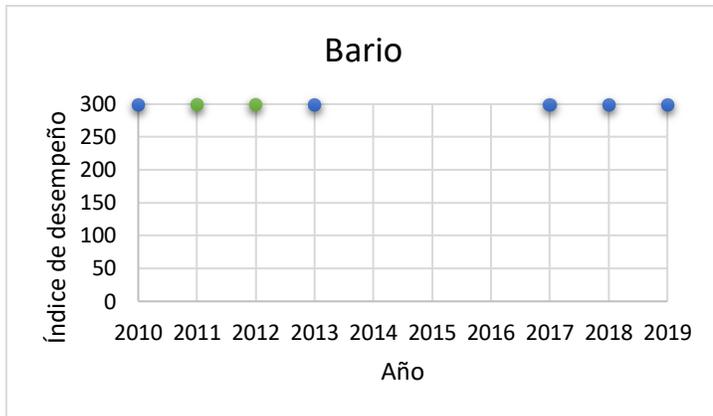


Figura 7. 28. Índ calidad del agua tratada – Bario

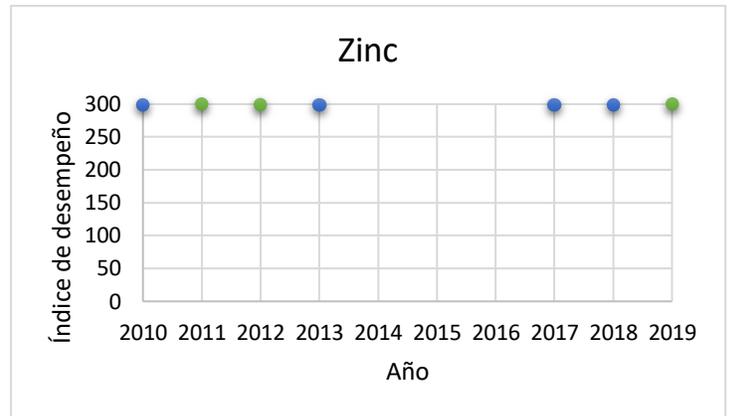


Figura 7. 27. Índ calidad del agua tratada – Zinc

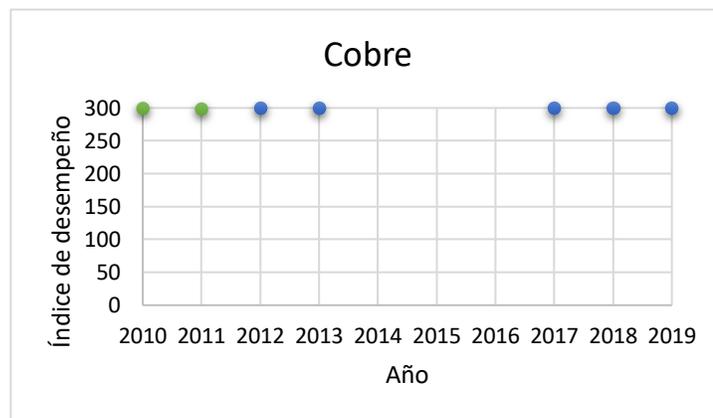


Figura 7. 25. Índ calidad del agua tratada – Cobre

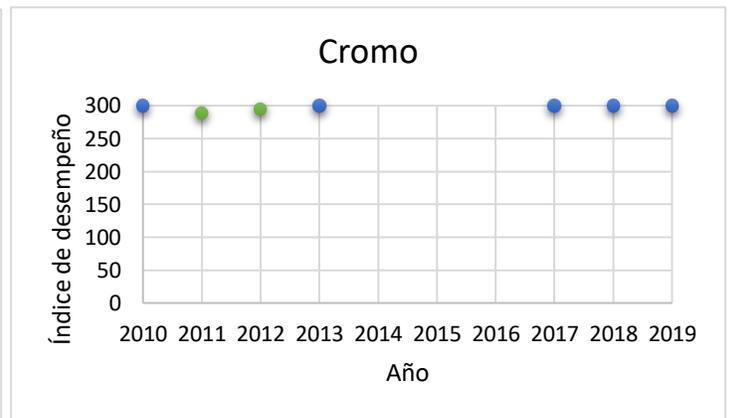


Figura 7. 26. Índ calidad del agua tratada – Cromo

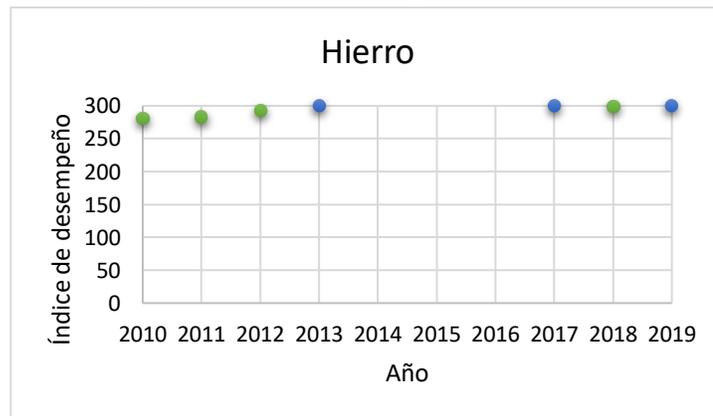


Figura 7. 23. Índ calidad del agua tratada – Hierro

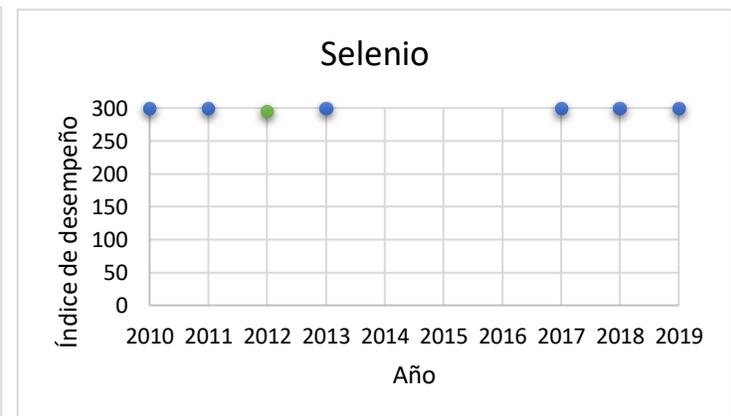


Figura 7. 24. Índ calidad del agua tratada – Selenio

Por su parte, los parámetros que durante los 7 años alcanzaron un tratamiento con desempeño **bueno** y que también lograron el objetivo de mantener sus valores conforme a los LMP de la NOM-014-CONAGUA-2003, fueron nitratos, nitritos, sodio y SDT (Figura 7. 29 a Figura 7. 32).

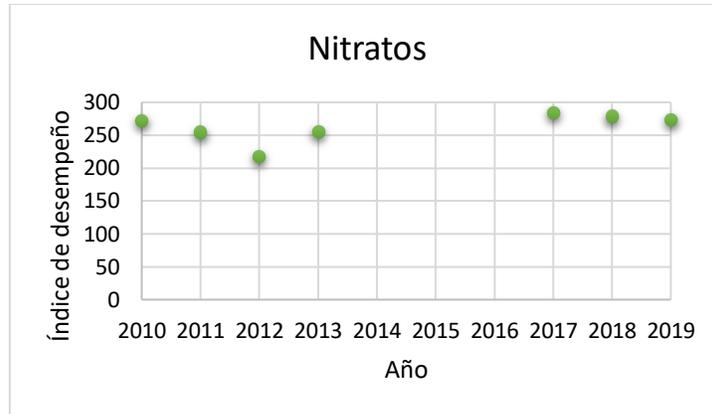


Figura 7. 29. Índ calidad del agua tratada – Nitratos

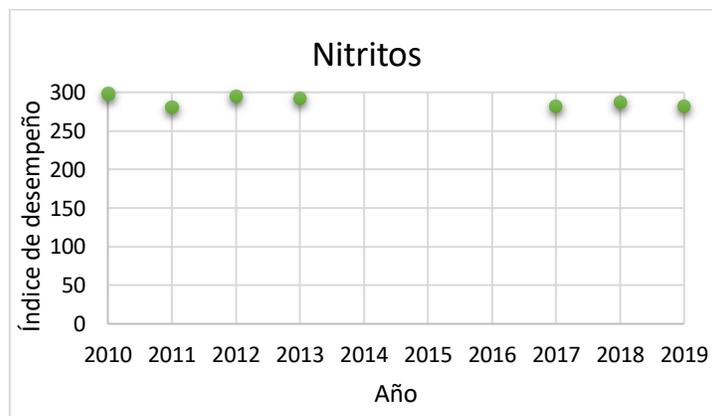


Figura 7. 30. Índ calidad del agua tratada – Nitritos

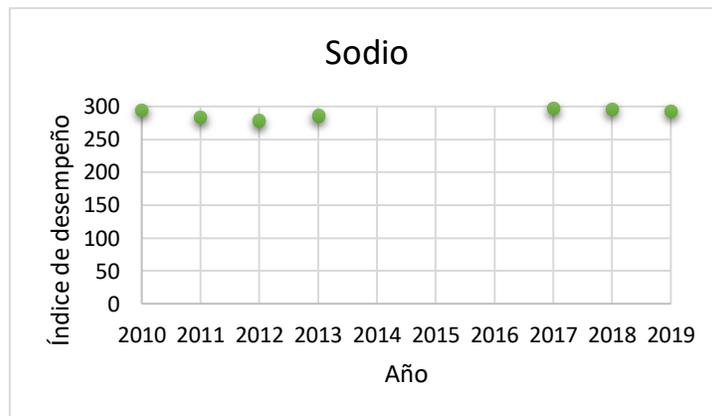


Figura 7. 31. Índ calidad del agua tratada – Sodio

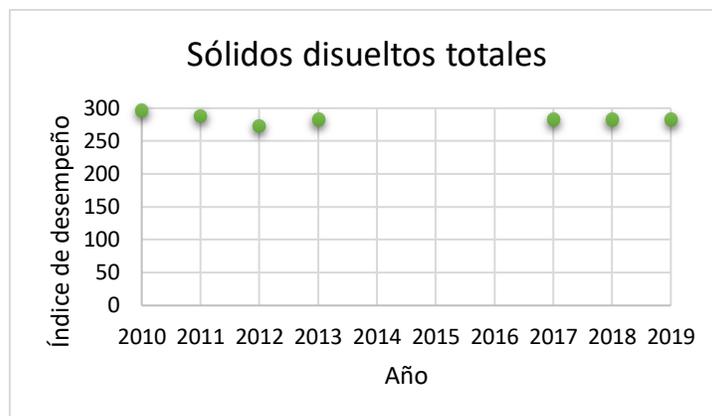


Figura 7. 32. Índ calidad del agua tratada – Sólidos disueltos totales

En cuanto a la remoción de **plomo**, se alcanzaron valores en el efluente de tratamiento tal que reflejaron un rendimiento **excelente** y **mínimo** de las OPU (Figura 7. 33). Al ser un caso especial, es de recordar que el desempeño **excelente** solo toma en cuenta los valores menores al LC. Mientras que el desempeño **mínimo** refleja que se tiene en el efluente una concentración igual al LMP y al LC de la técnica analítica; por lo tanto, se puede decir que en ambos casos se cumple con los objetivos 1 y 2 de evaluación del desempeño operativo.

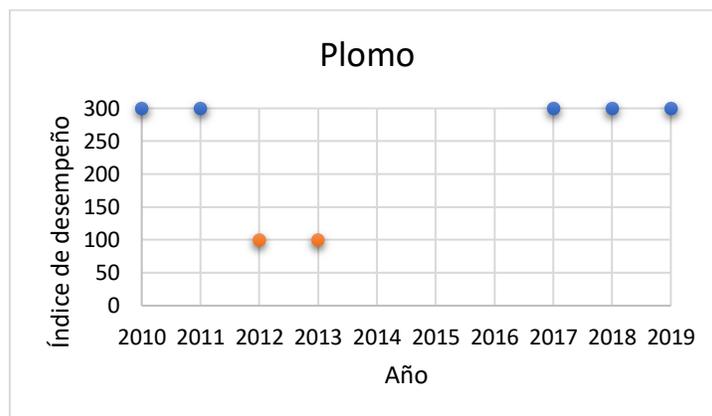


Figura 7. 33. Índ calidad del agua tratada – Plomo

Las características químicas de calidad del efluente de la PTA que en alguno de los años reportados alcanzaron un desempeño **insatisfactorio** o **nulo** fueron el **pH**, **nitrógeno amoniacal**, **cadmio** y **boro**. De acuerdo con lo establecido en la propuesta metodológica, estos parámetros son considerados **críticos**.

El **pH** presentó en el año 2010 un valor fuera del rango de pH permitido por la NOM-127-SSA1-1994 (modificación del 2000) debido a lo cual al tren de tratamiento se le atribuye un desempeño **insatisfactorio**; mientras que en 6 años se conservó en el rango permisible, por lo que se mantuvo un desempeño **excelente** (Figura 7. 34). WHO (2017) considera que no es posible determinar una asociación entre el valor de pH del agua para consumo humano y algún daño a la salud. Sin embargo, existen

efectos indirectos relacionados con el valor de pH como el incremento en la ingesta de metales pesados, debido a que este parámetro permite prever la posible corrosión de metales de plomería y tuberías en el sistema de distribución. Además, como se menciona en el apartado 7.3.1 Medidas correctivas para el tratamiento de los parámetros críticos (*Medidas correctivas para el tratamiento de los parámetros críticos*), el control del pH es necesario debido a que es uno de los parámetros operacionales con influencia en el desempeño de las etapas de coagulación, filtración, oxidación con ozono, ósmosis inversa y desinfección UV.

Es de mencionar que, sería incorrecto evaluar la eficiencia de remoción de pH en las barreras múltiples, ya que, ninguna de las barreras tiene como objetivo su control, y además de que se tienen dos valores límite como puntos de referencia. Por lo anterior, el pH no será discutido en el apartado correspondiente de *Eficiencias de remoción*.

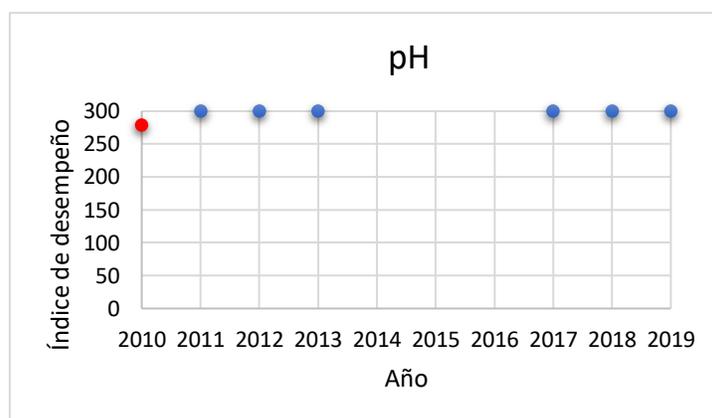


Figura 7. 34. Índ calidad del agua tratada – pH

El **nitrógeno amoniacal** en el año 2019 alcanzó una concentración en el efluente que reflejó un rendimiento **insatisfactorio** del tratamiento, mientras que en 5 años reportados mantuvo un desempeño **bueno** y en un año en particular obtuvo un desempeño **excelente** (Figura 7. 35). WHO (2017) y WHO y OECD (2003) indican que el amoníaco en su forma no ionizada (NH_3) así como el catión amonio (NH_4^+) no representan una amenaza para la salud. No obstante, la presencia de amoníaco en el agua es un indicador de posible contaminación fecal y en caso de aplicar, el alto consumo de oxígeno en las reacciones de nitrificación puede comprometer el adecuado funcionamiento de filtros de eliminación de manganeso, generando consigo un agua mohosa y con sabor a tierra.

Es de mencionar que, debido al desempeño nulo e insatisfactorio en el tratamiento de bacterias heterotróficas, coliformes totales y nitrógeno amoniacal es altamente probable que, aunque los parámetros organolépticos no se hayan analizado, no dieron cumplimiento a la NOM-014-CONAGUA-2003, al menos en el año 2019.

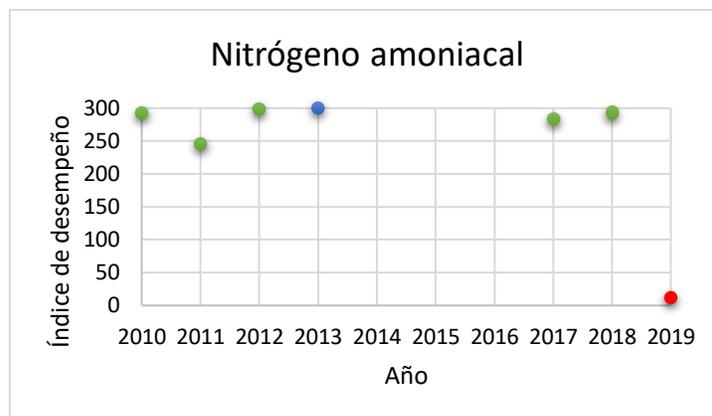


Figura 7. 35. ÍnD calidad del agua tratada – Nitrógeno amoniacal

El **cadmio** en 2019 presentó un valor asociado a un rendimiento **nulo** del proceso de tratamiento (Figura 7. 36). Este desempeño, además de no cumplir con los objetivos de tratamiento del efluente secundario, se considera una falta a considerar, dado que WHO (2017) reporta que, a pesar de aún no contar con evidencia de ser carcinogénico por la vía oral, es importante advertir que el cadmio tiende a acumularse en los riñones y cuenta con una vida media biológica en humanos de entre 10 a 35 años. En 2 de los años evaluados, la remoción de cadmio por parte de las barreras múltiples obtuvo un desempeño **mínimo** y en 4 años el rendimiento resultó ser **excelente**.

Se considera que la última rehabilitación de la PP Cerro de la Estrella (en 2019) se debió a que se obtuvo un desempeño nulo en el tratamiento del cadmio, aunado al desempeño insatisfactorio y nulo en la remoción de nitrógeno amoniacal, las bacterias heterotróficas y los coliformes totales.

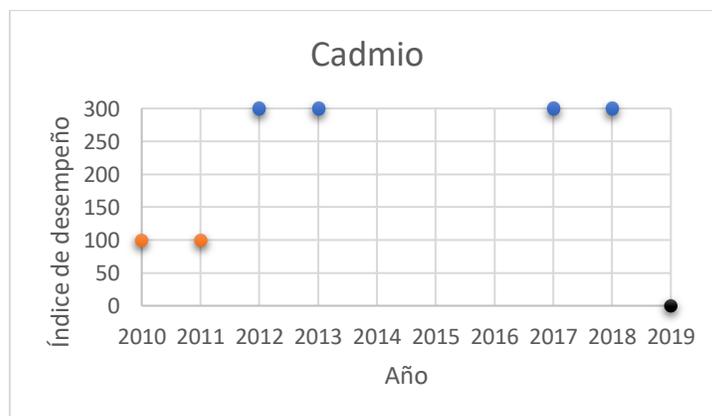


Figura 7. 36. ÍnD calidad del agua tratada – Cadmio

El **boro** es un parámetro que en los 7 años de evaluación mostró un desempeño **insatisfactorio** en su tratamiento por parte de las barreras múltiples, lo que indica que en todos los años mantuvo su concentración por encima del LMP de la NOM-014-CONAGUA-2003 (Figura 7. 37). Es de considerar que, dentro de los efectos a la salud por su ingesta, USEPA (2014) reporta que una sobredosis aguda de boro provoca en bebés diarrea, vómitos, signos de irritabilidad, una secreción o una leve congestión del ojo, entre otros; en adultos, genera náuseas, vómitos, diarrea, enrojecimiento de la piel y dificultad para tragar por la presencia de úlceras en la garganta.

Es posible que el desempeño insatisfactorio en el tratamiento del boro haya influido en la toma de decisiones sobre la ejecución de las rehabilitaciones de la PP en 2013 y 2019.

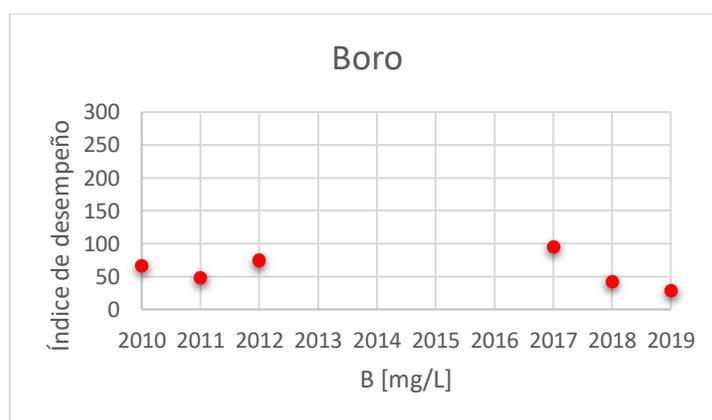


Figura 7. 37. Índ calidad del agua tratada – Boro

7.2.3.1 Eficiencias de remoción

Eficiencias de remoción - Nitrógeno amoniacal

Qasim (1999) establece que las OPU que remueven nitrógeno amoniacal ($N-NH_3$) en agua se tratan del intercambio iónico selectivo y la ósmosis inversa. Por su parte, López (2009) reporta que el intercambio iónico con el uso de zeolitas naturales ha mostrado ser eficiente en el tratamiento de nitrógeno amoniacal. La remoción obtenida para este parámetro de contaminación en cada barrera a lo largo de los años de evaluación, así como la remoción teórica asociada pueden ser consultadas en la Tabla 7. 3.

Tabla 7. 3. Remoción teórica vs real de nitrógeno amoniacal

Fecha	Valor inicial [mg/L]	Coagulación-floculación-sedimentación-filtración Barrera 1		Ozonación-filtración Barrera 2		Ósmosis inversa Barrera 3		Desinfección con luz UV Barrera 4
		Teórica [%]	Real [%]	Teórica [%]	Real [%]	Teórica [%]	Real [%]	Real [%]
2010	0.717	NA	23.85	90 — 95 ^{a, b}	40.11	60 — 90 ^a	64.22	2.56
2011	2.328		17.87		33.16		64.08	55.12
2012	0.149		20.81		9.32		0.93	3.77
2013	0.1		0		3.00		-3.09	3
2017	1.69	90 — 95 ^{a, b}	10.41		-47.09		94.84	-14.78
2018	1.647		25.99		41.10		81.89	13.85
2019	11.123		15.98		30.51		92.10	-40.55

^a Qasim, 1999; ^b Zeolita como medio filtrante; NA: No aplica, arena como medio filtrante.

Las eficiencias de remoción resultantes indican que la barrera 1 y 2 de filtración con zeolita, así como la ósmosis inversa contribuyeron a la disminución del nitrógeno amoniacal del medio en los años de evaluación, con algunas excepciones en los años 2013 y 2017.

En particular, en 2019, cuando el tratamiento tuvo un desempeño insatisfactorio para el nitrógeno amoniacal, el influente tuvo la concentración más alta de todos los datos referidos, con 11.123 mg/L N-NH₃. Por su parte, las eficiencias de remoción para la filtración con zeolita se consideran bajas en comparación con la teórica para el intercambio iónico selectivo, por lo que es posible que la zeolita utilizada como medio de empaque se encontraba saturada o en su caso, la pérdida de la capacidad de remoción del nitrógeno amoniacal de la zeolita indicaba que finalizó su ciclo de vida útil. La ósmosis inversa presentó una eficiencia mayor a la reportada por Qasim (1999), lo cual reitera que es un proceso sumamente eficiente en la eliminación de N-NH₃. A pesar de que no se esperaría una reducción en la concentración de nitrógeno amoniacal por parte de la desinfección con luz UV, tampoco se esperaría un incremento en la concentración del parámetro, lo cual indica alguna deficiencia relacionada al mantenimiento inadecuado del sistema ante la posible presencia de coliformes fecales.

Eficiencias de remoción - Cadmio

Margeta *et al.* (2013) reportaron las eficiencias de eliminación de iones metálicos de aguas residuales utilizando métodos físicos, químicos y zeolitas naturales, así en la Tabla 7. 4 se presentan las eficiencias teóricas que se alcanzan para los procesos de coagulación-floculación, la filtración con escolecita y clinoptilolita, así como de la ósmosis inversa. Además, se presentan las eficiencias correspondientes a las concentraciones reportadas en el caso de estudio para los conjuntos de las barreras de tratamiento.

Tabla 7. 4. Remoción teórica vs real de cadmio

Fecha	Valor inicial [mg/L]	Coagulación-floculación-sedimentación-filtración Barrera 1		Ozonación-filtración Barrera 2		Ósmosis inversa Barrera 3		Desinfección con luz UV Barrera 4
		Teórica [%]	Real [%]	Teórica [%]	Real [%]	Teórica [%]	Real [%]	Real [%]
2010	0.005	58 - 89 a, b, c, d	0	59 — 90 ^{a, c}	0	93 — 99 ^a	0.40	-0.40
2011	0.005		-11.20		10.07		0	0
2012	0.0024		-18.75		12.28		0	0
2013	0.0025		3.60		-3.73		0	0
2017	0.0025	99 ^{a, b}	0		0		0	0
2018	0.0025		0		0		0	0
2019	0.003		16.67		0		-527.20	0.01

^a Margeta *et al.* (2013); ^b Coagulación-Floculación; ^c Zeolita como medio filtrante (59% escolecita, 90% clinoptilolita); ^d Eficiencia de remoción global= Eficiencia coagulación/floculación * Eficiencia filtración con zeolita.

Las eficiencias de remoción del cadmio para los años de evaluación se prestan a una mala interpretación de resultados, es claro que se requiere un mayor número de datos para establecer un patrón de comportamiento. Por ello, se procedió a consultar los datos de concentración reportados, donde gran parte de los valores iniciales del cadmio en las barreras son iguales o menores al LC y debido a que en los cálculos se mantiene el mismo valor del LC a la salida, se tiene como resultado eficiencias de remoción del 0%. Lo anterior, no compromete el desempeño del tratamiento para 6 años reportados.

Sin embargo, es en 2019 cuando una eficiencia de remoción negativa indica que se presentó un gran aumento de concentración del cadmio en el efluente de ósmosis inversa. Posiblemente a lo largo de los años haya tenido lugar el ensuciamiento de la membrana por medio de la formación de una capa catiónica superficial que contenía sales de Cd²⁺, que posteriormente se desincrustó, por lo que el cadmio apareció en la corriente que se muestreó. Si las membranas no se reemplazaron y no se les otorgó un mantenimiento preventivo oportuno, la probabilidad de acumulación de las sales aumenta.

Eficiencias de remoción - Boro

Se delimitaron los estudios referidos por Farhat *et al.* (2013) sobre el desempeño de la ósmosis inversa en la remoción de boro en plantas piloto y a pequeña escala para diferentes tipos de membrana y con distintas condiciones experimentales. En

la Tabla 7. 5 se presentan las eficiencias mínima y máxima en la remoción de boro reportadas en la investigación de Farhat *et al.* (2013). Adicionalmente, se presentan las eficiencias de remoción obtenidas en la PP Cerro de la Estrella para los 6 años reportados para el metaloide.

Tabla 7. 5. Remoción teórica vs real de boro

Fecha	Valor inicial [mg/L]	Coagulación-floculación-sedimentación-filtración Barrera 1	Ozonación-filtración Barrera 2	Ósmosis inversa Barrera 3		Desinfección con luz UV Barrera 4
		Real [%]	Real [%]	Teórica [%]	Real [%]	Real [%]
2010	0.448	-0.89	-1.99	40 — 80 ^a	24.08	0.20
2011	0.497	7.04	7.58		11.94	-0.16
2012	0.465	2.15	0.00		26.15	-0.54
2017	0.403	0.00	1.24		20.60	2.78
2018	0.531	3.01	-0.58		20.08	6.47
2019	0.493	-1.62	0.60		20.08	-2.14

^a De acuerdo con datos recopilados por Farhat *et al.* (2013) para plantas piloto de OI.

En todos los años de evaluación reportados se tuvo un desempeño insatisfactorio en el tratamiento del boro por parte de las barreras múltiples. En la PP Cerro de la Estrella, la ósmosis inversa es la única etapa de tratamiento que debería remover boro del agua residual. Entre los factores importantes que regulan el rechazo de boro en la OI se encuentra el pH de la solución. Considerando que el pH del agua de alimentación de OI va de 7.3 a 7.6, se favorece la presencia de ácido bórico (H_3BO_3) frente al borato ($B(OH)_4^-$), lo que podría explicar porque en las corridas experimentales se alcanzan remociones entre 11.94 a 26.15%, eficiencias que distan de las reportadas por Farhat *et al.* (2013).

7.2.4 Índice global de desempeño

Bajo una situación ideal se debería obtener un desempeño “**excelente**” (ÍnD=300) que indique que los parámetros clave de monitoreo de la calidad del agua en la PP son medidos en el efluente y dan cumplimiento a los objetivos 1 y 2 de la evaluación del desempeño operativo. En caso de alcanzar un desempeño “**mínimo**” (ÍnD=100), los subíndices refieren que se cumple con el objetivo 1 de cumplimiento de la NOM-014-CONAGUA-2003.

Los resultados arrojan Índ globales con valores entre 197 a 240 (Figura 7. 38), donde en los años 2013 y 2019, la PP obtuvo el menor desempeño de los períodos evaluados con un Índ global de 197 y 211, respectivamente.

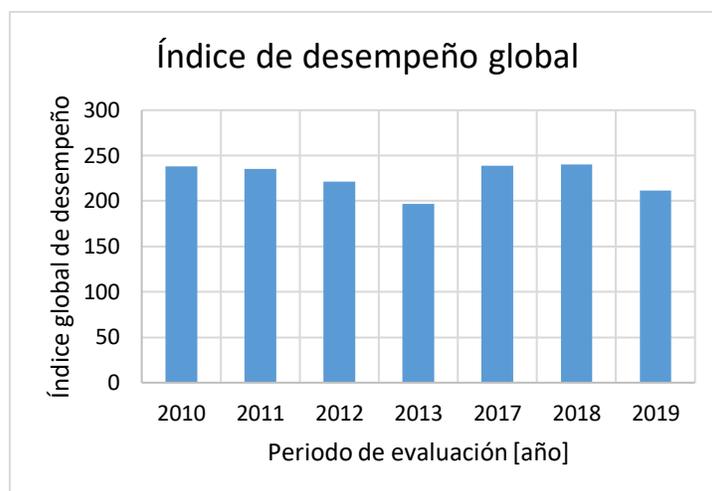


Figura 7. 38. Índ global

A primera instancia parecería que en los años evaluados los 21 criterios de calidad del agua dan cumplimiento a la NOM-014-CONAGUA-2003, ya que obtuvieron un Índ global mayor de 100; sin embargo, virus entéricos, *Giardia* y *Cryptosporidium* no cuentan con registro de monitoreo en la planta; cloruros y sulfatos carecen de datos en ciertos períodos y en algunos años se obtienen subíndices cuyo resultado refleja un incumplimiento de la norma.

Por lo anterior, se considera que el método de agregación para la obtención de un Índ global por media aritmética (no ponderada) no es confiable, dado que sus resultados no presentan concordancia con el verdadero comportamiento de los subíndices de desempeño. De acuerdo con Abbasi y Abbasi (2012) los métodos de agregación de índices de calidad del agua presentan esta tendencia llamada *eclipsamiento*, donde el valor final del índice no excede el nivel crítico (valor inaceptable) a pesar de que uno o más de los subíndices sí sobrepasan dicho nivel.

Debido al enfoque que conserva esta investigación, se considera que los subíndices de desempeño son una potencial herramienta de evaluación, ya que aportan la información necesaria para un análisis amplio y preciso del rendimiento de una PTA en el alcance de sus objetivos de calidad del agua. Finalmente, se recomienda desarrollar una investigación que dentro de sus propósitos específicos determine cuál de los posibles métodos de agregación podría adaptarse para obtener un índice global de desempeño cuyos subíndices se desarrollen conforme a la metodología desarrollada por Vieira (2009).

7.3 Propuestas de gestión y operación

7.3.1 Medidas correctivas para el tratamiento de los parámetros críticos

Este apartado recopila y presenta algunas medidas consultadas en diferentes referencias (por ejemplo, Metcalf y Eddy, 2007; Chillón, 2009; WHO y OECD, 2003; USEPA, 1999) con el propósito de ser consideradas como propuestas para la mejora del desempeño de las unidades de tratamiento de la PP Cerro de la Estrella, mismas que beneficien el apropiado control de los parámetros críticos resultantes de la evaluación del desempeño operativo. Se recomienda que, para trabajos futuros, estas medidas se refuercen con el conocimiento de las condiciones operativas actuales que sean reportadas en cada muestreo de las OPU.

Bacterias

Debido a que SACMEX (2020d) reportó que en la barrera 1 (coagulación-floculación-clarificación-filtración) no se hace uso de coagulantes ni floculantes, se sugiere considerar el **empleo de estas sustancias químicas** para la obtención de un mejor desempeño por parte de estas unidades; con ello el aporte en la remoción de bacterias no solo será dependiente de las operaciones de clarificación y filtración. El empleo de sustancias químicas en la coagulación deberá cubrir aspectos sobre su **selección** (pruebas de tratabilidad) las cuáles son detalladas por De Vargas (2004c) en el capítulo *Criterios para la selección de los procesos y de los parámetros óptimos de las unidades*. Por otro lado, los criterios a considerar para el manejo, el almacenamiento y la dosificación respectiva de las sustancias son detallados por CEPIS (2006) en *Evaluación de plantas convencionales y de tecnología apropiada*.

WHO y OECD (2003) consideran indispensable la **operación y el mantenimiento** adecuado en los filtros rápidos para evitar el deterioro de su rendimiento en la remoción microbiológica. Los filtros con mantenimiento deficiente pueden presentar fisuras cerca de las paredes, por donde escapa agua sin filtrar, lo que genera una mala calidad bacteriológica en el efluente de la etapa. Además, los cambios en la velocidad del flujo pueden desprender depósitos con microorganismos provocando que estos pasen entre las cavidades del lecho y estén presentes en el efluente.

De acuerdo con De Vargas (2004b) los filtros rápidos se colmatan en promedio entre las 40 a 50 horas posteriores a su operación, por lo que cada que transcurra ese período, la unidad de filtración debe de ser sometida a retrolavado entre 5 a 15 minutos, lo que le devolverá la porosidad al medio filtrante. La necesidad de lavado de los filtros en la PP Cerro de la Estrella puede diferir y puede ser determinada cuando la caída de presión del filtro aumenta hasta el nivel máximo permitido por el fabricante, como respuesta a la saturación del filtro con partículas, como lo indican Donaldson Latinoamérica (2014) y Maldonado (2004). SACMEX (2020d) reportó

que el retrolavado de los filtros se realiza cuando se tiene una caída de presión de 0.2 a 0.3 kg/cm², regularmente después de las 24 a 36 horas de operación.

Es de considerar que se tiene una mala calidad en cuanto a turbiedad y número de bacterias justo después del retrolavado de un filtro, debido al desplazamiento del agua residual de retrolavado y a la eficiencia del lecho limpio; para lo que se debe de retornar el filtrado a la primera unidad de tratamiento alrededor de 30 minutos (WHO y OECD, 2003).

CONAGUA (2019c) establece que, si el objetivo es la eliminación de microorganismos del medio, el ozono puede ser aplicado en la desinfección primaria o como etapa final del tratamiento. Por su parte, si se desea oxidar los compuestos inorgánicos de hierro y manganeso a un estado en el cual formen complejos insolubles, la ozonación precede a la etapa de filtración. Debido a lo anterior y a las configuraciones que guardó la PP Cerro de la Estrella en los años en estudio, se considera que este último objetivo es el que se pretendió lograr en la etapa de ozonación.

La dosis de ozono está en función del objetivo de la ozonización y es considerada el parámetro más importante en el diseño del generador de ozono y del reactor de contacto con ozono (CONAGUA, 2019c). Por lo que, si se pretende alcanzar un propósito de **tratamiento múltiple** en la **ozonación**, se deberá considerar la aplicación de un rango de dosificación adecuada de ozono (Metcalf y Eddy, 2007) para lograr la oxidación de hierro y manganeso, así como la lisis celular de las bacterias. Para ello, como lo establece CONAGUA (2019c), se deben de ejecutar **pruebas** específicas **a nivel laboratorio** en las cuáles se definan la dosis de ozono, el consumo de ozono y el tiempo de contacto del ozono.

En los procesos de filtración por membrana, como la ósmosis inversa, debe de realizarse un **pretratamiento adecuado** del agua de alimentación con el objetivo de evitar el ensuciamiento de la membrana. Este ensuciamiento se debe a la acumulación de sustancias químicas, partículas, así como al crecimiento de una biopelícula en la superficie de la membrana. Consecuentemente, el desempeño del sistema se reduce hasta bajos niveles de retención de contaminantes, por lo que el sistema debe de limpiarse mediante la adición de químicos con el fin de restaurar su productividad (WHO y OECD, 2003). Cuando en la superficie de la membrana la concentración de materia orgánica y nutrientes es alta se crean condiciones que benefician el crecimiento de microorganismos. Conforme se coloniza la superficie, decrece la permeabilidad al agua por parte de la membrana. En casos donde la ósmosis se opera de forma intermitente, no solo se disminuye más la permeabilidad, sino que se presenta un crecimiento de microorganismos en los poros de la membrana (Metcalf y Eddy, 2007). Es de destacar que, la PP Cerro de la Estrella si opera bajo un proceso de tratamiento intermitente, ya que SACMEX (2020a) reportó que trabaja alrededor de 4 horas/día; por lo que, para evitar los problemas

ocasionados por este tipo de operación, en medida de lo posible se recomienda operar las barreras múltiples de forma continua.

Por su parte, Metcalf y Eddy (2007) en *Water Reuse* proponen algunos pretratamientos que podrían ser aplicados para la eliminación de componentes específicos que pudieran afectar el desempeño del proceso de OI en el tratamiento de agua (Tabla 7. 6).

Tabla 7. 6. Métodos de pretratamiento para sistemas de nanofiltración y ósmosis inversa (Metcalf y Eddy, 2007)

Constituyentes por remover	Método de pretratamiento	Descripción o discusión
Hierro y manganeso	Intercambio iónico	La eliminación de hierro y manganeso disminuirá el potencial tratamiento químico para la eliminación de incrustaciones.
Materia particulada	Filtración a profundidad o superficial, microfiltración o ultrafiltración	El material particulado se puede eliminar mediante varios métodos de filtración. Los agentes incrustantes pueden pasar a través de estos sistemas de filtración, por lo que el potencial de ensuciamiento de la membrana se debe verificar mediante pruebas piloto.
Partículas y material coloidal	Filtros de cartucho (incluida la ultrafiltración)	Los filtros de cartucho son filtros accionados por presión con tamaños de poro que varían de 5 a 15 μm y se instalan comúnmente antes de las membranas de OI. Los filtros de cartucho proporcionan un nivel final de protección contra la intrusión de sólidos relativamente grandes en el sistema de OI. Los filtros no eliminan sustancias disueltas. La mayoría se tratan de cartuchos enrollados de polipropileno de 800 a 1000 mm de longitud alojados dentro de un recipiente vertical u horizontal de acero inoxidable o fibra de vidrio. Generalmente, la caída de presión a través de un filtro de cartucho limpio está entre 0 y 35 kPa. A medida que los sólidos se acumulan y la caída de presión alcanza un rango de umbral de 70 a 80 kPa, el cartucho debe retirarse y reemplazarse.
Formación de escamas	Ajuste de pH	Para inhibir la formación de incrustaciones, se requiere un ajuste del pH del agua de alimentación dentro del rango de 4.0 a 7.5. Un pH bajo, mejora la conversión de carbonato en especies de bicarbonato, que son mucho más solubles. Las membranas de OI de acetato de celulosa tienen un rango de pH óptimo de 5 a 7. Las membranas de poliamida se pueden usar en un rango de pH más amplio de 2 a 11.
Formación de escamas	Antiincrustantes	Los antiincrustantes son compuestos poliméricos que previenen la formación de escamas por completo o permiten la formación de escamas que pueden eliminarse fácilmente durante la limpieza. Sin embargo, ciertos antiincrustantes pueden aumentar el ensuciamiento por ácidos húmicos en las membranas de OI.
Microorganismos	Desinfección	La desinfección del agua de alimentación se puede lograr usando cloro, ozono o radiación UV para limitar la actividad bacteriana. La ultrafiltración también se puede utilizar para reducir el número de microorganismos presentes en el agua a tratar.
Sales poco solubles	Tratamiento químico	El tratamiento químico puede incluir la adición de óxidos de aluminio y hierro, cloruro de zinc, óxido de magnesio, ozono (cuando se utilizan membranas resistentes al ozono) y clarificación ultra alta con cal. Sin embargo, la clarificación con cal puede no ser tan eficaz como otros métodos de pretratamiento para eliminar

		materiales que ensucian las membranas de OI, por lo que se deberá ejecutar una limpieza más frecuente de las membranas.
--	--	---

De acuerdo con WHO y OECD (2003), en la desinfección con luz UV se requiere aplicar al agua una **dosis** de 400 J/m² (40 mWs/cm²) de radiación UV para la inactivación eficaz de las bacterias, ya que de lo contrario solo se reduciría momentáneamente la capacidad de formación de colonias bacterianas sin surtir efecto en su supervivencia. Por su parte, Metcalf y Eddy (2007) reportan que para alcanzar un resultado menor o igual a 2.2 NMP de coliformes totales o *Escherichia coli* en el tratamiento de 100 mL de un efluente de lodos activados, se requiere suministrar una **dosis** de radiación UV de 900 a 1100 J/m² y para coliformes fecales una dosis de 810 a 1100 J/m².

Los rangos de dosificación mencionados anteriormente son una guía para la estimación inicial de la dosis de radiación requerida en la desinfección UV (Metcalf y Eddy, 2007). Cada tipo de agua posee diferente transmitancia UV (WHO y OECD, 2003) y las variaciones en la transmitancia influyen en la eficiencia de la desinfección (Metcalf y Eddy, 2007).

Metcalf y Eddy (2007) reportan que la capacidad de los microorganismos para revertir el daño causado por los rayos UV se reduce cuando estos son expuestos a dosis más altas de radiación UV. Por todo lo anterior, se considera sumamente importante que en esta etapa se realicen pruebas de tratabilidad para redefinir un ajuste en el sistema UV que asegure la aplicación de la **dosis adecuada de desinfectante** con efectos germicidas en las bacterias para el ART que ingresa a la etapa de desinfección. El fenómeno de fotoreactivación disminuye significativamente si el agua sometida a radiación UV se mantiene posteriormente en la oscuridad alrededor de 3 horas (Metcalf y Eddy, 2007), lo cual se podría garantizar con la inyección directa y continua del agua regenerada al acuífero.

El mantenimiento apropiado del sistema de desinfección asegura que se transmita la radiación suficiente a los microorganismos con la finalidad de ser inactivados; por lo que las superficies (balastos, lámparas de cuarzo y reactor) entre la radiación emitida y el medio deben de encontrarse limpios (USEPA, 1999). Es necesario el empleo de un **sistema de limpieza** de las lámparas UV de baja presión, media presión y alta intensidad debido a que las temperaturas de operación altas pudiesen precipitar sales con solubilidad inversa, manchando la manga de cuarzo, por lo que se disminuiría la transferencia de rayos UV al medio acuoso. Otra consideración que debe tomarse en cuenta para el correcto funcionamiento de la desinfección con luz UV es que el sistema eléctrico de las lámparas UV debe de estar lastrado con el fin de que se limite la corriente que transita a la lámpara (Crittenden *et al.*, 2012).

En suma, las propuestas de mejora en la operación de la PP para la remoción/inactivación de bacterias en el agua residual incentivan a la adopción de mejores prácticas, como el mantenimiento adecuado de las unidades de filtración,

el pretratamiento apropiado del agua que ingresará a la ósmosis inversa y la adopción de un sistema de limpieza para las lámparas UV. Además, se sugiere importante la realización de pruebas de tratabilidad para el empleo de sustancias en la etapa de coagulación-floculación-clarificación-filtración y la determinación de la dosis adecuada de agente desinfectante para la inactivación de bacterias en la ozonación y la radiación UV. Finalmente, se considera importante la operación continua de las barreras múltiples.

Nitrógeno amoniacal

Un proceso de **intercambio iónico selectivo** con el uso de zeolitas naturales es recomendado para la remoción de nitrógeno amoniacal en aguas residuales (López, 2009). Las zeolitas han sido utilizadas como resina para la eliminación de nitrógeno amoniacal en ART con aplicaciones para reúso, siendo la clinoptilolita una de las resinas naturales con mayor afinidad por el ion amonio (NH_4^+). Cuando la resina se satura de NH_4^+ debe ser objeto de **regeneración** por medio de la adición de cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$); el NH_4^+ a pH básico se convierte en gas amoniaco (NH_3), que finalmente se elimina por extracción con aire (Metcalf y Eddy, 2007). Si de manera posterior a la ejecución de las regeneraciones correspondientes del empaque decrece la capacidad de remoción del parámetro, se debe de considerar la **sustitución** del medio sólido, ya que probablemente la resina llegó al término de su vida útil. Al llevar a cabo el reemplazo se recomienda el uso de zeolitas selectivas de nitrógeno amoniacal. De acuerdo con López (2009), las zeolitas selectivas, ordenadas de mayor a menor afinidad se tratan de: philipsita>chabazita>erionita>clinoptilolita>mordenita.

De acuerdo con SACMEX (2020d) se reportó que el retrolavado en las unidades filtrantes es ejecutado regularmente después de las 24 a 36 horas de operación; sin embargo, se desconoce si se realizó la regeneración del empaque en las unidades de filtración con zeolita.

WHO (2017) y WHO y OECD (2003) establecen que la presencia de amoníaco en el agua es un posible indicador de contaminación bacteriana fecal, por lo que posiblemente la etapa de desinfección sea ineficiente en el tratamiento de agua debido a que no se ejecuta una limpieza adecuada de los componentes del sistema UV. USEPA (1999) establece que las mangas de cuarzo/tubos de teflón requieren de limpieza de manera regular, la cual puede ser ejecutada mediante limpiadores mecánicos, de ultrasonido o químicos.

Así, las propuestas de mejora en la operación de la PP para la remoción de nitrógeno amoniacal del ART sugieren ejecutar las regeneraciones correspondientes de la zeolita en las unidades de filtración, ya que presumiblemente se encontró saturada; o en su caso, evaluar la sustitución de la resina gastada preferentemente por una zeolita con mayor selectividad por el nitrógeno amoniacal.

Además, se reitera la necesidad de una limpieza regular de los componentes del sistema de desinfección UV.

Cadmio

La selectividad es la propiedad de una resina de intercambio iónico que muestra su preferencia por ciertos iones; en el caso de las zeolitas, estas presentan una selectividad hacia cationes. La clinoptilolita tiene selectividad hacia cationes de metales pesados, la cual se presenta de mayor a menor grado de la siguiente manera: $Pb^{2+} > Cd^{2+} > Cu^{2+} > Co^{2+} > Cr^{2+} > Zn^{2+} > Mn^{2+} > Hg^{2+}$. Con esta zeolita se alcanzan remociones hasta del 90% de Cd^{2+} . Otra zeolita natural que presenta afinidad por el Cd^{2+} se trata de la escolecita, con la cual se reportan remociones de Cd^{2+} del 59% (Margeta *et al.*, 2013).

Se desconoce el tipo de zeolita utilizada en las unidades filtrantes y además no se tiene una tendencia en la remoción del cadmio en las unidades de prefiltración y posfiltración, sin embargo, se recomienda optar por un **mantenimiento preventivo** por medio del retrolavado de las unidades filtrantes tal que asegure su óptima operación en la remoción de Cd^{2+} .

Se considera probable que el aporte de Cd^{2+} por parte de la OI en el agua tratada se debe al ensuciamiento de los filtros de membrana. Calderón *et al.* (2012) establecen que el potencial de incrustación en los procesos de membrana está asociado a la presencia de sustancias disueltas y por su parte, Kheriji *et al.* (2015) reportaron que el incremento de la concentración de soluto alimentado en la OI genera la formación de una capa catiónica superficial en la membrana con sales de Cd^{2+} (como cloruro de cadmio, nitrato de cadmio y sulfato de cadmio), que neutraliza cargas negativas de la membrana y que al generar la reducción de las fuerzas de repulsión entre la membrana y el anión (NO_3^-), este último traspasa con facilidad la membrana y el catión (Cd^{2+}) es menos rechazado. Se considera que el mantenimiento de las membranas por medio de su **limpieza** es esencial en las unidades de filtración por membrana, sin olvidar que la prevención siempre es la solución viable (Guerrero, 2014).

Metcalf y Eddy (2007) recomiendan que para evitar la acumulación de partículas en la superficie de la membrana se realice un **lavado hidráulico** de la membrana a intervalos de tiempo definidos, se ejecute un adecuado **pretratamiento del agua** de alimentación para evitar el ensuciamiento por sales disueltas, material coloidal o microorganismos (Tabla 7. 6) y, además, se efectúe una **limpieza química** con soluciones a pH ácido o básico para eliminar los componentes que no se eliminan con el lavado hidráulico como las incrustaciones (escamas).

En resumen, para evitar la acumulación de sales de cadmio en la superficie de la membrana y prolongar la vida útil de las membranas de OI, se recomienda que se realice el adecuado pretratamiento del agua de alimentación de la etapa, así como ejecutar periódicamente la limpieza hidráulica y química de las membranas de OI.

Además, habrá que efectuar el mantenimiento preventivo de las unidades de filtración.

Boro

Chillón (2009) y Health Canada (2020) establecen que la eficacia de la OI en la remoción de boro está asociada a las características del agua residual (pH, temperatura, SDT), al tipo de membrana empleada (composición y eficiencia) así como al diseño del sistema y la operación del proceso (flujo de permeado promedio, recuperación, presión de operación y limpieza).

Shenvi *et al.* (2015) considera que la eficacia de la OI en la eliminación de **boro** es insuficiente y atribuye como causa principal de este rendimiento a la naturaleza del constituyente en el agua. La fuerza iónica y el **pH** de la solución son factores que regulan el rechazo de boro en la OI. De acuerdo con Health Canada (2020), cuando la fuente de agua tiene un pH mayor a 9.2, el boro está presente en forma de borato (B(OH)_4^-) y es rechazado de manera eficaz (remoción >95%); sin embargo, cuando el agua de alimentación conserva un pH menor a 9.2, el rechazo es menor (remoción del 40-70%) debido a que el boro se encuentra predominantemente como ácido bórico (H_3BO_3). El ácido bórico es una especie neutra y más pequeña, por lo que se presenta mayor dificultad para su rechazo y por ello atraviesa las membranas de OI.

Health Canada (2020) reportó que plantas a gran escala con OI de una sola etapa con diferente tipo de membrana y tasa de recuperación solo han logrado reducir influentes con 5 mg/L de boro, a efluentes con 0.9 a 1.8 mg/L. Y debido a que la NOM-014-CONAGUA-2003 exige ART con un LMP de 0.3 mg/L de boro, se recomienda evaluar la viabilidad de una OI de dos etapas con ajuste de pH. Chillón (2009) plantea como alternativa realizar una previa acidificación para la primera etapa, que reduciría el mayor porcentaje de sales, y si se aumenta el pH del agua permeada en una segunda etapa se favorece la eliminación de boro como (B(OH)_4^-) por medio de la membrana de OI.

De igual manera, Chillón (2009) considera importante el **pretratamiento exhaustivo** del agua que es alimentada a la etapa de OI, con lo que se evita el ensuciamiento y la degradación de las membranas. Como se menciona en la Tabla 7. 6, diferentes tipos de membranas conservan un rango de pH óptimo en su operación, por lo que, aunado a la presencia de compuestos de boro a diferente pH en el medio, resulta doblemente importante el **control del pH** previo al proceso de membrana.

En suma, las propuestas de mejora de la OI para la remoción de boro promueven el pretratamiento adecuado del agua de alimentación en función de la variable de pH para la OI de una etapa o dos etapas, considerando esta última como una alternativa para cumplir con el valor límite de boro en la NOM-014-CONAGUA-2003.

pH

El pH es un parámetro que debe mantenerse bajo control debido al cumplimiento de los valores límite exigidos en el ART por la NOM-014-CONAGUA-2003 y, a su vez, por su influencia en el desempeño de las OPU, tal como lo muestra la Tabla 7.7. Parámetros y criterios de control operativo.

En la coagulación, el pH es considerada la variable más importante. Para que ocurra una coagulación rápida y efectiva se debe de conservar un rango óptimo de pH en el medio, el cual es dependiente del tipo de coagulante a emplear y de la naturaleza del agua a tratar (Cardenas, 2000). En la filtración, el pH tiene influencia en la capacidad de intercambio iónico entre las partículas suspendidas y los granos del material filtrante (Maldonado, 2004). En la oxidación con ozono, el valor del pH influye en el mecanismo de reacción y a su vez, en el tipo de productos generados (Sumegová *et al.*, 2013). En la OI, el pH del agua de alimentación tiene un rol importante en la formación de incrustaciones de sales poco solubles en diferentes tipos de membrana. En la desinfección UV, las variaciones en el pH pueden modificar la solubilidad de metales que pudiesen absorber la radiación UV (Metcalf y Eddy, 2007).

Por lo anterior, se recomienda considerar la posibilidad de que, en función del pH, el sistema sea flexible en la dosificación de sustancias ácidas o básicas, con el fin de reducir o incrementar el pH del agua de alimentación de las OPU correspondientes o en su caso del efluente de la PP Cerro de la Estrella.

7.3.2 Parámetros y criterios de control operativo

De acuerdo con los tipos monitoreo establecidos en la fase 1 de las *Directrices australianas para el reciclaje de agua: gestión de riesgos para la salud y el medio ambiente* (Natural Resource Management Ministerial Council *et al.*, 2006) el propósito de un monitoreo **Operacional** es ejecutar mediciones planificadas de parámetros de control para evaluar la implementación de una medida preventiva en conformidad con las especificaciones de diseño y su control.

Se considera necesario establecer los parámetros y criterios operativos que deben de mantenerse bajo control y monitoreo periódico en la coagulación-floculación-sedimentación-filtración, ozonación, filtración, ósmosis inversa y desinfección con luz UV; los cuáles podrían formar parte del Programa interno de control y vigilancia de la calidad del agua que de acuerdo con Ávila y colaboradores (2017) se ejecutaba en la PP Cerro de la Estrella.

A continuación, en la Tabla 7.7 se presenta una recopilación de los criterios operativos típicos y parámetros de calidad del agua que de acuerdo con las referencias consultadas (CONAGUA, 2019b; 2019c; Vieira, 2009; Metcalf y Eddy, 2007; Natural Resource Management Ministerial Council *et al.*, 2006; entre otras) influyen en el óptimo desempeño de las unidades de tratamiento. Se desconoce si

todos estos criterios y parámetros han sido obtenidos a lo largo de los años en las pruebas de tratabilidad realizadas en la PP, sin embargo, se considera primordial su **establecimiento**, lo que incentivará su medición y seguimiento, y posteriormente, a la aplicación de medidas correctivas adecuadas en caso de que los resultados de la evaluación del desempeño reflejen que los procesos u operaciones no funcionan de manera eficiente.

Tabla 7. 7. Parámetros y criterios de control operativo

Unidad de tratamiento	Criterios de control operativo	Parámetros de control operativo	Referencia
Coagulación- floculación- sedimentación- filtración ¹	Tiempo de retención hidráulica en la coagulación ^o Intensidad de mezcla en la coagulación ^o Tiempo de retención hidráulica en floculación ^o Intensidad de mezcla en la floculación ^o Tipo y dosis de coagulante ^a Uso de floculantes ^b Concentración residual de coagulante ^o Potencial Zeta ^o	pH ^o Alcalinidad ^o Turbiedad ^o Color ^o Conductividad ^o Temperatura ^o Recuento de partículas en la salida ^o Sólidos suspendidos totales ^o	^o Vieira, 2009. ^a Cardenas, 2000. ^b De Vargas, 2004a.
Ozonación	Uso de catalizadores ^e Tiempo de contacto del ozono ^{e g} Punto de aplicación de ozono ^g Dosis de ozono ^g Consumo de ozono ^g	Temperatura ^e pH ^e	^e Sumegová <i>et al.</i> , 2013. ^g CONAGUA, 2019c.

Filtración	Tasa de flujo durante el ciclo de filtración [°] Pérdida de carga [°] Flujo de lavado [°] Duración del ciclo de lavado [°] Volumen de agua utilizado para lavar los filtros [°] Volumen de agua filtrada [°] Tiempo óptimo de funcionamiento del filtro ^d Período óptimo de maduración ^d Potencial Zeta de la suspensión ^c Características del medio filtrante ^c Carga hidráulica disponible para la filtración ^c Método de control de filtros ^c	Turbiedad [°] Recuento de partículas en la salida ^d Parámetros microbiológicos (al menos <i>Escherichia coli</i> , idealmente colifagos y esporas de clostridios) ^d	[°] Vieira, 2009. ^d Natural Resource Management Ministerial Council <i>et al.</i> , 2006. ^c Maldonado, 2004.
Ósmosis inversa	Selección de la membrana ^h Pérdida de carga ^d Requisitos de pretratamiento y postratamiento ^h Tasa de flujo transmembrana correlacionada con el tiempo de operación ^h Presión transmembrana ^h Tasa de recuperación ^h Requisitos de agua de lavado ^h Relación de recirculación ^h Frecuencia de limpieza, incluido el protocolo y los requisitos químicos ^h	Turbiedad ^{d h} Parámetros microbiológicos (al menos <i>Escherichia coli</i> , idealmente colifagos y esporas de clostridios ^d , recuento de bacterias heterotróficas ^h) Recuento de partículas en la salida ^{d h} Carbono orgánico total ^h Nutrientes ^h Metales pesados ^h Contaminantes orgánicos prioritarios ^h Sólidos disueltos totales ^h pH ^h Temperatura ^h Componentes específicos que pueden limitar la recuperación, como bario, calcio, fluoruro, y sulfato. ^h Biotoxicidad ^h	^d Natural Resource Management Ministerial Council <i>et al.</i> , 2006. ^h Metcalf y Eddy, 2007.

Desinfección con luz UV ²	Flujo ⁱ Transmitancia UV ^{d i} Dosis de luz UV ^{d i} Tasa de flujo (para calcular los tiempos de retención) ^d Funcionalidad de balasto, potencia de la lámpara y estado de la lámpara ^d	Turbiedad ^d Temperatura ^e pH ^e Parámetros microbiológicos (al menos <i>Escherichia coli</i> , idealmente colifagos y esporas de clostridios) ^d Sólidos disueltos totales ⁱ Sólidos suspendidos totales ⁱ	^e Vieira, 2009. ^d Natural Resource Management Ministerial Council <i>et al.</i> , 2006. ⁱ CONAGUA, 2019b.
--------------------------------------	--	---	--

¹ Debido al origen del ART se sugiere omitir la prueba de sabor y olor; así como la de algas. En la unidad de filtración se mencionan más parámetros de validación y operacionales exclusivos de esta etapa.

² Debido a que la intensidad UV es utilizada para el cálculo de la dosis de luz UV, se omitió su mención.

7.3.3 Monitoreo de parámetros de control operativo

Se obtuvo una matriz (Tabla 7. 8) que asocia los parámetros teóricos de control operativo (Tabla 7. 7) y los parámetros críticos resultantes de la evaluación del desempeño operativo con las OPU; y que, a su vez, presenta las frecuencias de monitoreo recomendadas para los distintos parámetros de calidad del agua.

Debido a su influencia en el desempeño óptimo de las etapas de tratamiento para la remoción de contaminantes se considera que aquellos parámetros que deben de ser analizados con mayor frecuencia con el propósito de ser mantenidos bajo control se tratan del: pH, temperatura, turbiedad, bacterias, recuento de partículas, SDT y SST. Por lo que se propone que el pH, temperatura, turbiedad, SDT, SST y el recuento de partículas pueden ser monitoreados de manera **continua** en las barreras múltiples con influencia por medio de instrumentos de medición y control **en línea**.

Es de mencionar que SACMEX (2020d) refirió que la PP cuenta con equipos de monitoreo de la calidad en línea y en tiempo real para la determinación de pH, conductividad eléctrica, temperatura y COT en el influente a la planta, la entrada y salida del sistema de OI y en el efluente de la planta; los cuales no se encuentran en funcionamiento. Si bien no se contaría con la totalidad de puntos cubiertos para las etapas, se considera importante la rehabilitación, calibración y mantenimiento de estos instrumentos de medición. Es importante considerar la adquisición de analizadores de turbiedad/sólidos suspendidos totales y sólidos disueltos totales en los mismos sitios de medición; los cuales coadyuvarían a la gestión de las actividades de mantenimiento preventivo, así como al control de riesgos en las unidades de tratamiento.

Debido a los tiempos de ejecución de las técnicas analíticas aplicadas en la PP para la obtención de valores de los parámetros microbiológicos, asimismo a que su ejecución necesariamente debe realizarse en laboratorio se propone realizar la medición **diaria** de estos parámetros. La medición **diaria** para coliformes totales es recomendada por USEPA (2012); mientras que Natural Resource Management Ministerial Council *et al.* (2006) recomiendan la medición de *Escherichia coli*, idealmente colifagos y esporas de clostridios; y, Metcalf y Eddy (2007) el recuento de bacterias heterotróficas para la OI. Considerando lo anterior, así como los resultados de desempeño nulo en su tratamiento, se propone el seguimiento **diario** de *Escherichia coli*, los coliformes totales y el recuento de bacterias heterotróficas a lo largo de las barreras múltiples encargadas de su remoción o inactivación.

De acuerdo con lo que establece la USEPA (2012) se recomienda el monitoreo **trimestral** de los parámetros de la norma de agua potable en el agua regenerada destinada a la recarga por inyección en acuíferos potables; sin embargo, la NOM-14-CONAGUA-2003 establece una medición **quincenal** de calidad del efluente. Es por lo anterior que los parámetros físicos, microbiológicos y químicos medidos en el

efluente de la planta de tratamiento que obtuvieron desempeño excelente, bueno, aceptable y mínimo se recomiendan ser monitoreados por lo menos en el influente y en las unidades encargadas de su remoción preferentemente de manera **quincenal** o en su caso **trimestral**, como mínimo.

Los parámetros con incumplimiento de los objetivos de evaluación con un desempeño insatisfactorio y nulo en su respectivo tratamiento deben de ser monitoreados con mayor frecuencia una vez aplicadas medidas correctivas correspondientes, por lo que con el fin de conocer si se logró una mejora significativa en la remoción del parámetro se proponen análisis **semanales** a lo largo de las barreras múltiples.

Tabla 7. 8. Frecuencia recomendada para el monitoreo de parámetros de control operativo

Parámetros de control operativo teóricos							
	Influyente	Coagulación- floculación- sedimentación- filtración	Ozonación	Filtración	Ósmosis inversa	Desinfección luz UV	Frecuencia de monitoreo recomendada
pH	✓	✓	✓		✓	✓	Continua
Turbiedad	✓	✓		✓	✓	✓	
Temperatura	✓	✓	✓		✓	✓	
Recuento de partículas en la salida	✓	✓		✓	✓		
Sólidos disueltos totales	✓				✓	✓	
Sólidos suspendidos totales	✓	✓				✓	
Bacterias (<i>Escherichia coli</i>)	✓		✓	✓	✓	✓	Diaria
Carbono orgánico total	✓				✓		Semanal
Color	✓	✓					Quincenal
Conductividad	✓	✓					
Nutrientes	✓				✓		
Metales pesados	✓	✓		✓ ^a	✓		
Contaminantes orgánicos prioritarios	✓				✓		
Componentes específicos (bario, calcio, fluoruro y sulfato)	✓				✓		

Biotoxicidad					✓	✓	
Parámetros con desempeño insatisfactorio y nulo							
	Influente	Coagulación- floculación- sedimentación- filtración	Ozonación	Filtración	Ósmosis inversa	Desinfección luz UV	Frecuencia de monitoreo recomendada
Coliformes totales	✓	✓	✓		✓	✓	Diaria
Conteo de bacterias heterotróficas (HPC)	✓	✓	✓		✓	✓	
Nitrógeno amoniacal	✓	✓ ^a		✓ ^a	✓		Semanal
Boro	✓				✓		
Cadmio	✓			✓ ^a	✓		

^a Para las configuraciones con zeolita como medio filtrante.

Después de la consulta respectiva de lo exigido por la normatividad nacional y por las *Directrices para la reutilización de agua recuperada con inyección directa en acuíferos potables* de USEPA (2012) se sugiere que en lo referente a las frecuencias de monitoreo de los parámetros que no son medidos en la PP de tratamiento de agua:

(1) el **COT** sea analizado de manera **semanal** por lo menos en el influente, las etapas de OI y desinfección con luz UV (efluente);

(2) los parámetros sin registros previos con una frecuencia **quincenal** en el influente y efluente: cianuros (CN⁻), mercurio, benceno, etilbenceno, tolueno, xileno, clordano, lindano, hexaclorobenceno, heptacloro, epóxido de heptacloro, metoxicloro, el 2,4-D, antimonio, asbesto (fibra >10 m), berilio, bromatos, acrilamida, alacloro, aldicarb, atrazina, benzo(a)pireno (PAHs), bifenilos policlorados (PCBs), carbofurano, cloruro de vinil, dalapon, 1,2-Dibromo-3-cloropropano (DBCP), o-Diclorobenceno, p-Diclorobenceno, 1,2-Dicloroetano, 1,1-Dicloroetileno, cis-1,2-Dicloroetileno, trans-1,2-Dicloroetileno, diclorometano, 1,2-Dicloropropano, di(2-etilhexil)adipato, di(2-etilhexil) ftalato, dinoseb, dioxina (2,3,7,8-TCDD), diquat, endothall, endrin, epiclorohidrina, epóxido de heptacloro, estireno, glifosato, heptacloro y epóxido de heptacloro, hexaclorobenceno, hexaclorociclopentadieno, metoxicloro, oxamil (vidato), pentaclorofenol, picloram, simazina, tetracloroetileno, tetracloruro de carbono, toxafeno, 2,4,5-TP (silvex), 1,2,4-triclorobenceno, 1,1,1-tricloroetano, 1,1,2-tricloroetano, tricloroetileno;

(3) *Cryptosporidium*, *Giardia lamblia*, *Legionella* y los enterovirus podrían no ser monitoreados como lo sugieren las Directrices, sin embargo, son exigidos por la NOM-014-CONAGUA-2003 y deben ser monitoreados **quincenalmente** en el agua para recarga del acuífero;

(4) el olor y la plata no son exigibles de monitoreo a nivel federal en E.U.A (USEPA, 2018) pero la normatividad nacional considera deben ser analizados **quincenalmente** en el ART;

(5) *Vibrio Cholerae*, sabor, fenoles o compuestos fenólicos, aldrín y dieldrín (separados o combinados), diclorodifeniltricloroetano (DDT), clorobenceno, dibromoetileno, metil-terbutil-éter, no son contemplados en las normas de agua potable y de recarga de acuíferos con agua regenerada en E.U.A., empero la normatividad mexicana considera su cuantificación **quincenal**;

(6) la radiactividad alfa total, radiactividad beta total, radio 226 y radio 228 (combinados) y uranio se sugieren que sean monitoreados por lo menos de manera **anual**;

(7) para el cloro libre residual, trihalometanos totales, yodo libre residual, cloraminas, bióxido de cloro, cloritos y ácidos haloacéticos, se considera que la normatividad de recarga de acuíferos y agua potable deberían de permitir la omisión

de monitoreo debido a que su presencia está asociada al empleo de agentes desinfectantes y la generación de subproductos no aplicables al método de desinfección con luz UV empleado en la PP Cerro de la Estrella.

7.3.4 Propuestas para la gestión de residuos del proceso

Debido a la limitación de datos públicos sobre los residuos generados en la PP Cerro de la Estrella, las propuestas están encaminadas a la identificación de las diferentes tecnologías disponibles para su tratamiento, así como de las alternativas referentes a su uso y disposición final, las cuáles servirán como punto de partida para la fase de definición de un proyecto de manejo de lodos. Se consideran los residuos generados en la configuración 3 de la PP Cerro de la Estrella (Figura 5.10), al tratarse de las corrientes residuales generadas a partir de la rehabilitación de 2019-2020.

Lodos de clarificación

En las plantas de clarificación convencional (coagulación-floculación- clarificación-filtración en medio granular-desinfección con cloro), la mayoría de los coagulantes, polímeros sintéticos y los constituyentes indeseables del agua se remueven y se depositan en el fondo de los tanques de sedimentación como **lodos de clarificación**, los cuales son denominados lodos de sulfato de aluminio, de hierro y/o poliméricos, en función del coagulante primario utilizado (Cornwell & Roth, 2011; CONAGUA, 2007).

Un proyecto de manejo de lodos parte de la determinación del uso o disposición final que se les dará. A partir de ello, se establecen posibles alternativas tecnológicas junto a las ventajas o desventajas de su selección e implementación (CONAGUA, 2019e).

Una de las principales consideraciones para la elección del tratamiento de lodos es el cumplimiento de la calidad exigida por la NOM-004-SEMARNAT-2002 para el lodo estabilizado conforme a su uso y disposición final.

De acuerdo con Amador-Díaz *et al.* (2015), la caracterización de los lodos típicamente incluye la medición de DBO, DQO, nitrógeno total, fósforo total, SST, SSV, pH y coliformes fecales; así como de metales pesados como cadmio, cobre, níquel, plomo, zinc, mercurio, cromo, arsénico, selenio y molibdeno. Con lo anterior, se podrá conocer el contenido de nutrientes y la necesidad de un tratamiento adecuado de los contaminantes.

Si se considera emplear los lodos de clarificación como mejorador de suelo, primeramente, se deberán caracterizar en lo referente a su composición química y microbiológica; así como realizar la estimación del volumen de lodo generado para la etapa del proyecto de diseño. Por su parte, se determinó emplear esta opción de aprovechamiento por lo que se planteará un proceso de tratamiento para los lodos de clarificación y del ARFG reportado por CONAGUA (2019e) para la PTAR Sur

ubicada en El Pueblito, Querétaro, México, el cual consiste en el espesamiento de lodos, la deshidratación por prensado, y finalmente, una estabilización alcalina.

Los lodos retirados del clarificador (hidrociclón) pueden someterse a espesamiento, método cuyo objetivo es reducir el volumen de lodo y los costos de inversión y operación de los sistemas de tratamiento de lodos (CONAGUA, 2019e; Cornwell y Roth, 2011). El espesamiento disminuye el volumen del lodo hasta en un 35% del valor inicial (CONAGUA, 2019e) y genera un lodo más concentrado, mismo que será sometido al proceso de deshidratación.

La industria del agua emplea ampliamente tanques de concentración por gravedad. El espesamiento por gravedad se considera económico, funge como una unidad de compensación para inyección de cargas uniformes a la deshidratación y puede emplearse como un sistema en continuo o por lotes (Cornwell y Roth, 2011), sin embargo, reduce de manera mínima la cantidad del agua debido a que el lodo espesado alcanza un contenido de agua del 97-98%. Al considerar el empleo de un espesador de gravedad por lotes en la PP Cerro de Estrella, las variables necesarias para su dimensionamiento parten de la carga másica de lodos y de la carga hidráulica superficial. Los requerimientos y los cálculos específicos correspondientes al diseño del espesador son desarrollados por CONAGUA (2019e).

La deshidratación de lodos tiene como objetivo principal la reducción de su volumen (CONAGUA, 2007). Dentro de los métodos mecánicos de desaguado se incluye el filtro prensa, el cual se propone ser empleado en la PP Cerro de la Estrella. El filtro prensa de placas genera una torta de lodos más deshidratada frente a otros métodos de desaguado, puede alcanzar una concentración de sólidos del 35 al 45% para lodos de hidróxido (aluminio y hierro) y del 55 al 70% para lodos de ablandamiento. Es importante destacar que su operación se lleva a cabo por lotes (CONAGUA, 2019e; CONAGUA, 2007). Algunas de las ventajas y desventajas asociadas a su uso se mencionan en la Tabla 7. 9. De acuerdo con Toro (s.f.) las variables para la selección de un filtro prensa horizontal comercial se tratan de: volumen del lodo producido diariamente, masa de materia seca del lodo y ciclos de operación del filtro.

Tabla 7. 9. Ventajas y desventajas de deshidratación por filtro prensa de placas (Adaptado de CONAGUA, 2019e; CONAGUA, 2007)

Ventajas	Desventajas
Contenido de sólidos de la torta mayor al 35%.	Altos costos del equipo y de la mano de obra.
Esta tecnología es adaptable a un amplio rango de lodos (con diferentes características).	Requiere de un espacio amplio para la instalación del equipo y de personal capacitado para su mantenimiento.
Baja concentración de sólidos suspendidos en el filtrado.	En caso de la adición de acondicionadores químicos, se incrementa la cantidad de sólidos.

Debido a su calidad, el agua filtrada puede recircularse a la planta de tratamiento.	La adherencia de la torta al filtro requiere remoción manual o en su caso, el uso de materiales de recubrimiento.
Existen filtros prensa de placas de volumen fijo y de volumen variable.	

De manera posterior a la deshidratación y previamente al aprovechamiento o disposición de lodos puede llevarse a cabo una estabilización. La estabilización de lodos es un proceso que reduce la masa y volumen de lodos, así como el contenido de organismos patógenos, olores y atracción de vectores. Existe una variedad amplia de métodos de estabilización, no obstante, los más comunes son las siguientes: la digestión anaerobia, la digestión aerobia, el composteo y la alcalina (Limón, 2013).

La alternativa que se considera podría ser empleada en la PP Cerro de la Estrella se trata de la estabilización alcalina de los lodos. La estabilización alcalina comúnmente emplea la adición de cal (hidratada o viva) al lodo residual como pretratamiento o postratamiento a su deshidratación (Morales, 2005) y finalmente, su aplicación en suelo o relleno sanitario. Tiene los objetivos de reducción de microorganismos patógenos y olores, de mejora de las condiciones de desaguado, y de producción de un lodo estabilizado tipo B, que de acuerdo con la clasificación de la NOM-004-SEMARNAT-2002 puede ser empleado para usos urbanos sin contacto público directo, como mejorador de suelo ácido o para uso forestal y agrícola. En caso de aplicar una estabilización alcalina avanzada se produciría un lodo estabilizado tipo A, que de acuerdo con la NOM-004-SEMARNAT-2002 de manera adicional a las aplicaciones del tipo B puede aprovecharse en usos urbanos con contacto público directo (CONAGUA, 2019e; SEMARNAT, 2003).

La estabilización alcalina es comúnmente empleada en plantas de tratamiento pequeñas, con baja producción de lodo y en casos en que el lodo estabilizado es almacenado por un tiempo y finalmente, es transportado al lugar de aprovechamiento. El equipo requerido incluye silos para almacenamiento de cal, equipo de mezclado y sistemas de dosificación (CONAGUA, 2019e). Algunas de las ventajas y desventajas puntuales sobre este tipo de estabilización se mencionan en la Tabla 7. 10.

Tabla 7. 10. Ventajas y desventajas de la estabilización con cal (CONAGUA, 2019e)

Ventajas	Desventajas
El proceso de encalado implica bajos costos de capital y es más fácil de operar frente a otros procesos de estabilización de lodo.	La cal es considerada menos efectiva frente al cloro en la conversión del lodo en un producto estable.
Por medio de la adición de cal, se reducen de manera significativa olores y microorganismos patógenos del lodo.	Bajas dosis de cal añadidas podrían generar una caída del pH durante el almacenamiento del lodo estabilizado, desencadenando olores y el posible recrecimiento de microorganismos.

El lodo estabilizado puede aplicarse bajo condiciones controladas en suelos agrícolas o suelos ácidos.	La masa de lodo incrementa debido a la adición de cal y a los productos químicos formados, por lo que aumentan los costos de transporte.
La estabilización alcalina fija o inmoviliza iones metálicos y, además, reduce la posible acumulación de metales por las plantas.	El lodo estabilizado no es apropiado para usarse en suelos alcalinos.
La cal es más segura, barata y más fácil de manejar que el cloro.	El producto de estabilización alcalina tiene menores concentraciones de nitrógeno y fósforo soluble frente a un lodo estabilizado por tratamiento anaerobio.

Morales (2005) establece que el postratamiento con cal tiene como propósito elevar el pH de la mezcla y consiste en el mezclado del lodo deshidratado y la cal por medio de mezcladores de paleta o transportadores de tornillo. CONAGUA (2019e) reporta que además de los mezcladores mecánicos pueden emplearse difusores de aire para garantizar una mezcla homogénea del lodo con la cal. Un mezclado eficiente tendrá como resultado un lodo estabilizado compuesto por pequeñas partículas que puede almacenarse por largos períodos de tiempo o disponerse en el suelo. Debido a las ventajas asociadas a su uso, se recomienda ampliamente el empleo de cal viva (CaO) para el postratamiento de los lodos (Morales, 2005).

Es de considerar que, como lo establece la NOM-004-SEMARNAT-2002, para que los lodos estabilizados puedan ser almacenados por días sin que el pH descienda y se eviten condiciones que favorezcan la putrefacción y la atracción de vectores, se debe recurrir a elevar el pH ≥ 12 (a 25 °C) y mantener el lodo 2 horas sin más adición de cal; así como asegurar un pH ≥ 11.5 en el lodo estabilizado sin la adición de cal por 22 horas más. Para alcanzar los objetivos anteriores se tendría que calcular la dosis de cal que deberá ser añadida al lodo en el tanque de mezclado, así como el dimensionamiento de los tanques de mezclado, de los silos de almacenamiento de cal y de los dosificadores-apagadores de cal, como parte de los criterios de diseño, los cálculos para su determinación son detallados por CONAGUA (2019e).

Agua de retrolavado de filtros gastada

En las plantas de tratamiento de agua, el ARFG es regularmente la corriente residual con mayor volumen (CONAGUA, 2007) y se considera la descarga de agua de desecho más limpia (Cornwell y Lee, 1994). El volumen generado de ARFG se encuentra en función del tiempo y la frecuencia de retrolavado, la velocidad del agua de lavado y el número de filtros empleados. Los contaminantes que se eliminan en la filtración y que están retenidos en el lecho son los constituyentes que conforman al ARFG (Cornwell y Roth, 2011). Por lo que la calidad del ARFG depende de la calidad del agua cruda, las sustancias químicas que son adicionadas y de los procesos de tratamiento previos a la etapa y su respectiva eficiencia (CONAGUA, 2007).

El ARFG se produce de manera discontinua debido a que los filtros se limpian a contracorriente cada 1 a 4 días. Asimismo, en cada filtro es generada en períodos aproximados de 15 minutos con un alto caudal de agua suministrado, el cual representa un volumen que va del 3 al 10% del agua tratada a nivel planta (Cornwell y Roth, 2011).

Se considera que la PP Cerro de la Estrella pudiese implementar el reciclaje de agua reintegrando corrientes al inicio del tren de tratamiento, por lo que uno de los métodos con los cuales se podría tratar el ARFG se trata de la clarificación por gravedad. De acuerdo con Cornwell y Lee (1994), las plantas de tratamiento de agua Bangor y Moshannon Valley de E.U.A aplicaron la sedimentación de corrientes residuales de manera previa a su reciclaje. Algunas de las ventajas y desventajas del uso de espesadores gravitacionales de tanque fijo se mencionan en la Tabla 7. 11.

Tabla 7. 11. Ventajas y desventajas del espesamiento por gravedad (CONAGUA, 2019e)

Ventajas	Desventajas
Proporciona capacidades mayores de almacenamiento de los lodos.	Puede contribuir a la producción de olores.
Método con costos de operación y mantenimiento bajos, sobre todo de energía eléctrica.	Requiere grandes espacios de tierra.
Requiere menores habilidades operativas por parte del personal.	El porcentaje de separación de sólidos puede presentar variaciones. Y el lodo es más delgado y menos concentrado.

Cornwell y Roth (2011) reportan que mediante la eliminación de los sólidos contenidos en el ARFG se pueden remover muchos contaminantes del agua como metales (manganeso), COT y precursores de subproductos de desinfección, lo cual se consigue con tratamientos por gravedad como la sedimentación, acompañada o no del uso de polímero. Para la sedimentación del agua de retrolavado no es necesario una unidad de amortiguamiento de flujo previo al tratamiento, el sobrenadante de la etapa será la corriente que será reciclada. Por su parte, la adición de polímeros puede mejorar la eficiencia en la remoción de sólidos del ARFG.

Es de considerar que no toda el agua clarificada es reciclada, Cornwell y Roth (2011) reportaron estudios en los cuáles se recicla del 5 al 20% del agua al influente de las plantas, lo cual está asociado a la eficiencia de eliminación de contaminantes en la sedimentación y esta eficiencia a su vez es dependiente de la tasa de desbordamiento y al uso de polímeros. Por lo anterior, no toda el agua clarificada podrá ser integrada al influente de la PP Cerro de la Estrella, por lo que el porcentaje de agua restante se podría dirigir al dren descarga que conecta al influente de la PTAR Cerro de la Estrella.

Uno de los parámetros por considerar en la corriente de reciclaje es la turbiedad, el valor objetivo para aguas crudas con turbiedad baja podría ser menor de 5 UNT o incluso menor de 1 UNT; y, por su parte para aquellas con turbiedad alta, el valor objetivo de turbiedad puede establecerse a partir de la eliminación de ciertos contaminantes en el agua clarificada. Algunos contaminantes de interés en la corriente de reciclado se tratan del COT, metales, SST, quistes de *Giardia* y *Cryptosporidium*, entre otros (Cornwell y Roth, 2011).

Cornwell y Roth (2011) reportaron que la sedimentación sin la aplicación de coagulantes o polímeros fue eficiente en un 70 a 80% en la reducción de partículas de tamaño de 3 a 10 μm en ARFG a tasas de desbordamiento bajas (menores de 0.12 m/h).

Dentro de las variables que se deben establecer para dar paso a la etapa de diseño de un clarificador (espesador) por gravedad en tanque fijo se tratan de la tasa de desbordamiento (carga superficial) y la carga másica de sólidos. Los cálculos correspondientes para el diseño de un espesador gravitacional fijo son establecidos por CONAGUA (2019e).

Se propone conjuntar el lodo espesado de clarificación con el lodo espesado de ARFG; así, esta corriente de lodo podría ser deshidratada en un filtro prensa de placas. Como anteriormente se mencionó, Toro (s.f.) refiere que la selección de un dispositivo de prensado comercial contempla las variables de volumen del lodo producido por día, la masa de materia seca del lodo y los ciclos de operación del filtro.

El lodo desaguado se propone ser estabilizado por medio de la adición de cal. Es de considerar que, se deberán realizar los cálculos correspondientes de la masa de cal requerida para que el lodo estabilizado cumpla con los requisitos de pH establecidos en la NOM-004-SEMARNAT-2002. Este cálculo y los correspondientes al dimensionamiento de unidades (tanques de mezclado, silos de almacenamiento de cal y dosificadores-apagadores de cal) considerados en los proyectos de diseño son detallados por CONAGUA (2019e).

Concentrado de membrana

El concentrado residual de membrana generado en las tecnologías de reúso de aguas residuales requiere de procesamiento y eliminación especial. Si las condiciones ambientales y de ubicación lo permiten, se podría optar por el uso de estanques de evaporación solar o de la disposición del concentrado residual en un medio salado (Metcalf y Eddy, 2004) como mares o esteros. Sin embargo, estas prácticas generan impactos como eutrofización o cambios en el pH y salinidad del medio (Panagopoulos, 2021).

Para definir una posible alternativa de tratamiento del concentrado de membrana se debe de partir por conocer, como lo indica Metcalf y Eddy (2007): (1) la calidad del

concentrado, (2) el volumen de concentrado generado y (3) la clasificación y las regulaciones ambientales aplicables.

Las características del concentrado de membrana están determinadas por la naturaleza del agua cruda alimentada a la etapa de tratamiento. La concentración de los constituyentes que forman el concentrado es dependiente de dos factores: las características de rechazo propias de la membrana y del porcentaje de recuperación de agua. Si el agua de alimentación de OI presenta una turbiedad menor a 1 UNT, el concentrado de membrana conservará bajas concentraciones de SST (<10 mg/L). Sin embargo, generalmente tiene concentraciones elevadas de SDT, con constituyentes como metales pesados y radioisótopos; por lo que el tratamiento y disposición del concentrado representa un desafío (Cornwell y Roth, 2011).

El volumen de concentrado generado es dependiente del agua de alimentación sometida a tratamiento y del porcentaje de recuperación de agua. Metcalf y Eddy (2007) reportan que el volumen del concentrado (retenido) va del 15 al 50% del volumen de agua alimentada a la etapa de tratamiento.

En México no existe una norma ambiental que establezca especificaciones y LMP de contaminantes del concentrado proveniente de sistemas de membrana, por lo que no se cuentan con requerimientos regulatorios previos a la disposición final del concentrado. Sin embargo, Metcalf y Eddy (2007) consideran que debido a su alta salinidad el retenido no puede ser reciclado ni reutilizado y, además, esta característica lo convierte en tóxico para diversas plantas y animales, por lo que se restringen algunas opciones como su disposición en la tierra y en aguas superficiales. Por su parte, la USEPA, considera al concentrado de membrana como un residuo industrial (Metcalf y Eddy, 2007), por lo que su eliminación sigue los lineamientos regulatorios de desechos industriales.

De acuerdo con Metcalf y Eddy (2004) las tecnologías de concentración y de solidificación de estos residuos se consideran costosas y complejas. Por su parte, las alternativas de disposición final no requieren de un tratamiento adicional (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2009a). En caso de que la ubicación geográfica y las regulaciones lo permitan, las opciones de disposición más deseables se tratan de la descarga a aguas residuales o superficiales. Alrededor del 30% de las plantas desalinizadoras de E.U.A. optaron por la descarga del retenido en sistemas de aguas residuales (Mackey y Seacord, 2008).

Debido principalmente a que la generación de concentrado de membrana es constante y a la cercanía de la PP con la PTAR Cerro de la Estrella, la alternativa de disposición propuesta considera la descarga del concentrado y su mezcla con la corriente de alimentación de la PTAR. De acuerdo con lo reportado por SACMEX (2020e) la disposición actual del concentrado precisamente se basa en esta alternativa, donde este se direcciona a un dren de descarga que conecta al influente de la PTAR.

La mezcla involucra la descarga de todo el volumen del concentrado o una proporción de éste junto al efluente secundario o final de una PTAR (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2009a). Para lo cual, se debe transportar el concentrado por medio de una tubería a la línea de tratamiento de aguas residuales (Mackey y Seacord, 2008). Por su parte, en la PP Cerro de la Estrella se implementa la disposición del concentrado a la línea de alimentación de la PTAR (SACMEX, 2020e).

La dilución del concentrado con el agua residual evita que este sea sometido a tratamiento, siempre y cuando se cumplan los valores límite de descarga de la PTAR, lo cual dependerá directamente del flujo y la calidad del concentrado y de las aguas residuales, así como de los límites permisibles de contaminantes asociados al destino de la corriente combinada (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2009a).

En caso de ser necesario, se podrán establecer condiciones en la descarga del concentrado con el fin de evitar declives en el desempeño del proceso de tratamiento y la calidad del efluente, así como afectaciones en el sistema de tratamiento de aguas residuales e infraestructura (Mackey y Seacord, 2008). En la Tabla 7. 12, se presentan algunas de las ventajas y restricciones de la disposición de concentrado de OI en aguas residuales.

Tabla 7. 12. Ventajas y restricciones de la disposición de concentrado en aguas residuales (Mackey y Seacord, 2008; U.S Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2009b)

Ventajas	Restricciones
Práctica de disposición establecida y bien aceptada con aplicabilidad en tratamientos de aguas residuales como subterráneas.	Las aguas residuales tratadas con concentraciones altas de sal limitan: su reutilización a cultivos con alta tolerancia a SDT y la obtención de permisos de descarga a cuerpos receptores.
Alternativa de bajo costo. Los costos de instalación dependen de una tarifa de conexión inicial y los costos operativos dominantes son referentes a la energía eléctrica para el bombeo del concentrado al punto de mezcla.	Los permisos de descarga a aguas residuales a menudo limitan el volumen de concentrado que se puede descargar, lo que podría restringir una expansión futura.
Tecnología muy simple. La descarga de concentrado incluye tuberías hasta la línea de tratamiento de aguas residuales. No suele ser una estructura compleja de desagüe.	Se deberá de evaluar la capacidad de la PTAR para dar cumplimiento con su permiso de descarga debido al impacto de la corriente del concentrado descargado. En caso de incumplimiento, se impide la disposición del concentrado por esta vía.
Requerimientos energéticos bajos.	Se recomienda determinar la biotoxicidad generada por el concentrado.
Conserva una calificación buena en los criterios de desempeño, flexibilidad e implementación del diseño, huella tecnológica, cantidad de	

minimización de residuos, uso/manejo de productos químicos y seguridad, requisitos de mantenimiento y mano de obra, facilidad de uso, entre otras.	
--	--

El sistema de tratamiento de aguas residuales deberá ser capaz de aceptar agua con altas concentraciones de SDT (concentrado). De acuerdo con Mackey y Seacord (2008) previo a la descarga de la corriente de concentrado es recomendable ajustar el pH, lo cual evitaría la formación de incrustaciones por precipitación de calcio y SDT en tuberías del sistema de aguas residuales. Muller (2011) refiere que a un pH mayor de 7.9 se tiene una mayor probabilidad de formación de incrustaciones de carbonato de calcio (CaCO_3) en las tuberías de sistemas de distribución. Sin embargo, se considera que el ajuste de pH tendrá que ser evaluado conforme a las características de calidad y cantidad del concentrado generado en la PP, así como de las condiciones establecidas por el permiso de descarga del concentrado a la PTAR Cerro de la Estrella.

Cuando sea generada la SLG, puede considerarse como alternativa la combinación del concentrado de membrana junto con la SLG neutralizada; ejecutando la mezcla de la SLG neutra a caudal lento en el drenaje del concentrado, tal como lo establece Manguin y Corsin (2005).

Soluciones de limpieza gastadas

Con el fin de controlar el ensuciamiento de las membranas y restaurar la productividad del proceso, los sistemas de membranas son sometidos a métodos de limpieza química por medio del uso de soluciones ácidas y alcalinas. Como resultado de estos procedimientos se generan desechos químicos asociados (Cornwell y Roth, 2011).

De acuerdo con AWWA Membrane Residuals Management Subcommittee (2004), para la remoción de incrustaciones inorgánicas se hace uso de soluciones ácidas (mineral o cítrico) y para la eliminación de incrustaciones orgánicas y biopelículas, se utilizan soluciones alcalinas (sosa cáustica junto con detergentes/tensoactivos o quelantes).

La calidad de la SLG está relacionada con los productos químicos empleados, por lo que contienen altas concentraciones de estas sustancias. Asimismo, debido a que se disolverán, aflojarán y removerán diversas incrustaciones de la membrana, la SLG contendrá a estos constituyentes eliminados en el proceso de limpieza (AWWA Membrane Residuals Management Subcommittee, 2004).

AWWA Membrane Residuals Management Subcommittee (2004) establece que el volumen de las soluciones empleadas en la limpieza y su residual, la SLG, está determinado por los siguientes factores: (1) el proceso de membrana y las características del sistema, (2) el número de unidades sometidas a limpieza, (3) los

parámetros de diseño del sistema (como flujo, recuperación y distribución), (4) los volúmenes del sistema de limpieza (del recipiente a presión vacío que contiene los módulos de membrana y de la tubería) y, (5) la frecuencia de limpieza.

La frecuencia del procedimiento de limpieza se encuentra en función de la calidad del agua de alimentación, así como de las condiciones operativas de la filtración por membranas, sin embargo, regularmente son ejecutadas cada 6 a 12 meses. Por lo general, el volumen de la SLG representa menos del 0.1% del flujo de ART, y en nanofiltración y OI asciende a los 1.2 L/m² (3 gal/100 ft²), sin incluir el agua de enjuague (Cornwell y Roth, 2011).

Las soluciones antiincrustantes son preparadas en tanques por lotes y posteriormente son inyectadas y recirculadas en el sistema de membranas. Debido a las reacciones que tienen lugar, el pH de las soluciones en contacto con las incrustaciones se modifica. Así, el pH de las ácidas tiende a incrementar mientras que el de las básicas tiende a disminuir (AWWA Membrane Residuals Management Subcommittee, 2004). Una vez transcurrido el tiempo de recirculación establecido, la SLG es bombeada de regreso a los tanques donde será tratada o en su caso, será conducida al sitio de disposición (Cornwell y Roth, 2011).

El tratamiento de la SLG puede llevarse a cabo en la misma unidad sometida a limpieza o en tanques independientes, en este último caso se reduciría el tiempo de inactividad del sistema de membranas. El tratamiento de la SLG consiste en la neutralización del pH, dependiendo de la solución empleada se adicionará un ácido (por ejemplo, ácido sulfúrico) o una base (por ejemplo, hidróxido de sodio) al fluido en recirculación hasta alcanzar un pH neutro (Cornwell y Roth, 2011).

Es de mencionar que, SACMEX (2020e) reportó que empleaba dos soluciones limpiadoras de membranas, una ácida (Hydrex 4503) y una alcalina (Hydrex 4506). La limpieza química consiste en recircular una solución seguida de la otra. Así, con el propósito de lograr la neutralización de las soluciones, Manguin y Corsin (2005) recomiendan realizar la descarga de ambas SLG en un tanque agitado, cuyas dimensiones se encuentran en función de los volúmenes de ambas SLG.

Considerando que la SLG neutralizada no desencadenará reacciones no deseadas como lo establece AWWA Membrane Residuals Management Subcommittee (2004), se propone que esta SLG neutra sea combinada a caudal lento con el concentrado de membrana como lo plantea Manguin y Corsin (2005). Este tipo de disposición de SLG es aplicado por 7 plantas de OI en los E.U.A., donde la mezcla final es dispuesta del mismo modo que el concentrado residual (AWWA Membrane Residuals Management Subcommittee, 2004). Por lo anterior, y en concordancia con el método de disposición ejecutado por la PP Cerro de la Estrella para el concentrado de membrana (SACMEX, 2020e), la corriente resultante será direccionada a la línea de alimentación de la PTAR Cerro de la Estrella.

Configuración propuesta para el manejo de residuos

En los párrafos anteriores se describieron los métodos de pretratamiento, tratamiento y disposición final respectivos para las 4 corrientes residuales generadas en las etapas de clarificación, filtración y ósmosis inversa de la PP Cerro de la Estrella. En este apartado se resume la configuración propuesta para un proyecto de manejo de residuos y se presenta un diagrama de flujo asociado, mismo que puede ser consultado en la Figura 7. 39.

Se propone que cuando se realice la limpieza respectiva de los filtros, la corriente de ARFG se conjunte a la corriente continua de los lodos de clarificación. Estas corrientes individuales o conjuntas pueden direccionarse a un espesador de gravedad por lotes, en el cual un porcentaje del sobrenadante podría reciclarse al influente de la PP y el resto podría inyectarse al dren de descarga del área de procesos que conecta al influente de la PTAR Cerro de la Estrella. Los sólidos espesados pueden deshidratarse por medio de un filtro prensa de placas, generando un filtrado que podría dirigirse al influente de la PP y una torta de lodos que puede estabilizarse por medio de la adición de cal, para cumplir con los lineamientos de la NOM-004-SEMARNAT-2002, debido a que se planteó su aprovechamiento como mejorador de suelo. Con el proceso anteriormente descrito, se considera que se pueden cubrir los objetivos establecidos por CONAGUA (2020e) para el manejo de lodos: reducir su contenido de agua y de microorganismos patógenos, estabilizarlos y asignarles un uso o disposición adecuada.

De acuerdo con el permiso de descarga y los valores de pH, es posible que sea necesario el ajuste del pH del concentrado de membrana previo a su disposición. Cuando las SLG sean generadas pueden neutralizarse en un tanque destinado a este propósito y de manera posterior podrían combinarse con la corriente del concentrado de membrana. Así, la corriente de concentrado (con o sin ajuste de pH) y la corriente de SLG neutralizada podrían conducirse al dren de descarga de procesos, para finalmente ser bombeadas a la línea de alimentación de la PTAR Cerro de la Estrella. Con esta alternativa de tratamiento se podría cubrir con los objetivos de neutralizar y disponer los residuos de OI. Sin embargo, debido a la adición de estas corrientes residuales se considera importante evaluar el desempeño de la PTAR en el cumplimiento de la NOM-003-SEMARNAT-1997.

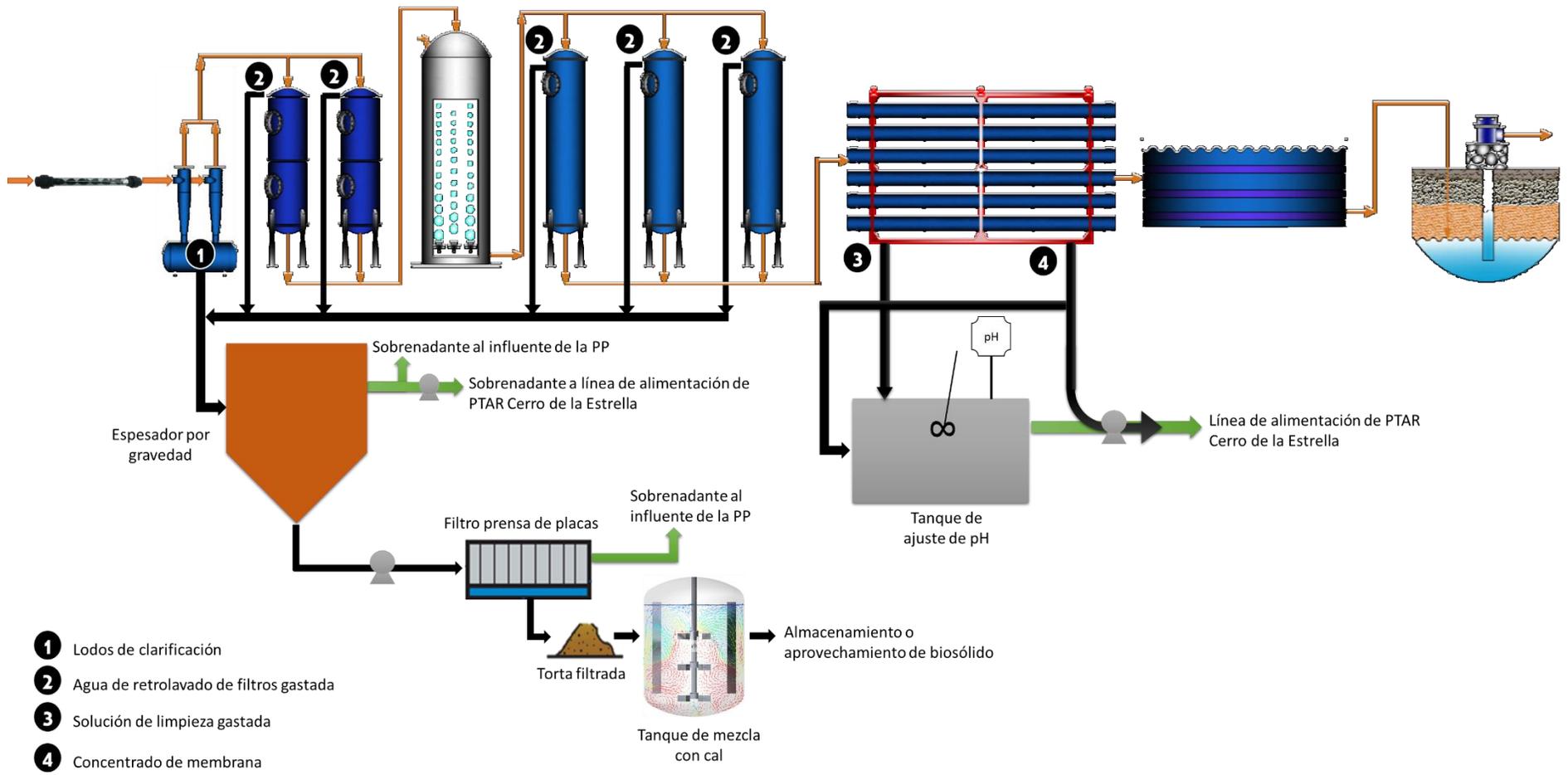


Figura 7. 39. Configuración propuesta para el manejo de residuos de la PP Cerro de la Estrella

8. CONCLUSIONES

El proyecto de investigación logró adaptar y aplicar un Sistema de evaluación del desempeño (SED) como una herramienta estandarizada y objetiva para la evaluación del rendimiento de una planta piloto (PP) en el cumplimiento de la frecuencia de monitoreo y de las concentraciones de parámetros de calidad del agua exigidas por la normatividad mexicana para la recarga de acuíferos con agua residual tratada (ART), la NOM-014-CONAGUA-2003. El SED propuesto pretende ser una herramienta de apoyo para la toma de decisiones sobre la gestión y operación de la PP Cerro de la Estrella. A su vez, puede aplicarse a otras plantas tratadoras de agua residual con fines de recarga de acuíferos. No obstante, la información de contexto y la metodología propuesta cuentan con la flexibilidad de desarrollarse y adaptarse para la evaluación del desempeño de plantas de tratamiento de agua (PTA) de fuentes convencionales.

Para la evaluación del desempeño global del SED, se seleccionaron y desarrollaron indicadores de desempeño (ID), con los cuales se analizó el rendimiento de la planta en el logro de aspectos de monitoreo y de calidad del agua para estándares de diferente naturaleza establecidos en la NOM-014-CONAGUA-2003. Se aplicaron 9 ID a datos anuales reportados por SACMEX (2020a; 2020b). Para los 7 años bajo análisis, 5 ID reflejaron que la actual gestión de monitoreo infringe la frecuencia establecida por la NOM-014-CONAGUA-2003 para 115 parámetros de calidad del agua (físicos y organolépticos, químicos, microbiológicos y de radiactividad). Por su parte, los 4 ID sobre cumplimiento de la calidad del agua indicaron la posible presencia de anomalías operativas en las operaciones y procesos cuyo objetivo es la remoción de microorganismos y elementos químicos del ART, por lo que se incumplió con la calidad microbiológica y química del agua regenerada exigida por la NOM-014-CONAGUA-2003.

En la evaluación del desempeño operativo del SED, se adaptaron 28 índices de desempeño (ÍnD) en el dominio de calidad del agua que permitieron un análisis de la efectividad en el tiempo del proceso de tratamiento respecto de dos objetivos de evaluación. Los objetivos evaluados para cada parámetro de calidad fueron: (1) alcanzar un valor en el ART igual o menor al límite máximo permisible (LMP) de la NOM-014-CONAGUA-2003 y (2) conservar un valor que alcance el límite de cuantificación (LC) o límite de detección (LD) de la técnica de análisis. Adicionalmente, se propuso una clasificación global del desempeño para parámetros individuales por medio de categorías de desempeño (nulo, insatisfactorio, mínimo, aceptable, bueno y excelente) y la asociación de estas categorías con un semáforo. Por medio de la aplicación de esta evaluación a los datos históricos de calidad del efluente, se concluye que a lo largo de 7 años las configuraciones 1 y 2 de la PP Cerro de la Estrella obtuvieron desempeños **excelentes a buenos** en la remoción de color verdadero, turbiedad, coliformes fecales, sulfatos, manganeso, sustancias activas al azul de metileno, dureza total,

cloruros, fluoruros, aluminio, arsénico, bario, zinc, cobre, cromo, hierro, selenio, nitratos, nitritos, sodio y sólidos disueltos totales; **excelentes** y **mínimo** para el plomo. Por su parte, el pH, los coliformes totales, el conteo de bacterias heterotróficas, el nitrógeno amoniacal, el boro y el cadmio obtuvieron en su tratamiento desempeños **insatisfactorios** o **nulos** por lo menos en un período; por lo que, de acuerdo con lo establecido en la metodología, se les consideró parámetros **críticos**.

Por medio del empleo de las eficiencias de remoción obtenidas para 5 parámetros **críticos**, las eficiencias de remoción teóricas y los principios de funcionamiento de las unidades de tratamiento fue posible analizar el desempeño de las barreras múltiples de la PP Cerro de la Estrella en dos de sus configuraciones. Los años con desempeño nulo en el tratamiento de bacterias (coliformes totales y heterotróficas) presentaron eficiencias de remoción de bacterias más bajas a las teóricas, posiblemente por omitir el uso de coagulantes y floculantes, la acumulación y reproducción de bacterias en el lecho filtrante, el ensuciamiento de membranas de ósmosis inversa y el empleo de una dosis inadecuada de desinfectante. El desempeño insatisfactorio en la remoción de nitrógeno amoniacal se presentó en un año debido a la posible saturación o el final del ciclo de vida de la zeolita y al mantenimiento deficiente de la unidad de desinfección UV. El año con desempeño nulo en el tratamiento de cadmio posiblemente se debió al ensuciamiento y posterior desprendimiento de sales en la membrana de ósmosis inversa. En los 6 períodos con desempeño insatisfactorio en la remoción de boro, la ósmosis inversa presentó menores eficiencias respecto de las teóricas, siendo el pH que conserva el agua de alimentación un posible factor que influyó en la eficiencia obtenida.

Las propuestas de mejora en la gestión y operación de la PP Cerro de la Estrella se establecieron de manera posterior al análisis de resultados de la aplicación del SED. Por medio de la consulta en diferentes medios bibliográficos, se determinaron los parámetros operativos que deben ser mantenidos bajo control y monitoreo (continuo, diario, semanal o quincenal) en las operaciones y procesos unitarios (OPU) de la PP. Asimismo, se consideró que el desempeño en la remoción de bacterias, nitrógeno amoniacal, boro y cadmio del efluente secundario podría mejorar por medio de la implementación de mejores prácticas, como el mantenimiento adecuado de las unidades de filtración (retrolavado, regeneraciones o sustitución del empaque), el pretratamiento apropiado del agua de alimentación y la limpieza hidráulica-química de la ósmosis inversa y finalmente, la limpieza oportuna de las lámparas UV. Además, de considerar la realización de pruebas de tratabilidad para el uso de sustancias químicas en la coagulación-floculación-sedimentación-filtración y para la obtención de la dosis adecuada de agente desinfectante para la inactivación de bacterias en la ozonación y la radiación UV. Finalmente, se consideró importante mantener una operación continua de las barreras múltiples.

Las alternativas de tratamiento, uso y disposición final de las 4 corrientes residuales generadas en la PP Cerro de la Estrella se limitaron a la identificación de tecnologías sugeridas por diversos autores e implementadas en algunas PTA. Se sugirió que las corrientes individuales o conjuntas de lodos de clarificación y ARFG fueran direccionadas a un espesador de gravedad por lotes; se recomendó el reciclaje de un porcentaje del sobrenadante al influente de la PP y del porcentaje restante al influente de la PTAR Cerro de la Estrella. Los sólidos espesados podrían deshidratarse por medio de un filtro prensa de placas, generando una torta de lodos que con el fin de dar cumplimiento a la NOM-004-SEMARNAT-2002 podría estabilizarse por medio de la adición de cal. Previo a su disposición, podría ajustarse el pH del concentrado de membrana. Cuando las SLG sean generadas podrían neutralizarse y posteriormente, podrían combinarse con el concentrado de membrana. Finalmente, la corriente de concentrado y la corriente de SLG neutralizada podrían bombearse a la línea de alimentación de la PTAR Cerro de la Estrella.

9. REFERENCIAS

- Abbasi, T. y Abbasi, S. A. (2012). *Índices de calidad del agua*. Elsevier. Gran Bretaña.
- Actis, G.G. (2015). Tratamiento de las aguas residuales del teñido de textiles mediante ozonización [PhD thesis]. Torino, Departamento de Ciencia y Tecnología Aplicada, Politecnico di Torino, Turin, Italy.
- AG-ONU (2010). *Resolución A/RES/64/292*. Publicado el 3 de agosto de 2010. Asamblea General de las Naciones Unidas.
- Amador-Díaz, A., Veliz-Lorenzo, E., & Bataller-Venta, M. (2015). Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 46, 1–10. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181642434003>
- AMC (2010). *El agua en México: cauces y encauces*. Primera edición. Ciudad de México, México: Academia Mexicana de Ciencias.
- Alegre, H., Baptista, J. M., Cabrera, E., Cubillo, F., Duarte, P., Hirner, W., ... Parena, R. (2017). Indicadores de desempeño para servicios de abastecimiento de agua: Tercera edición. En *Water Intelligence Online* (Vol. 15). <https://doi.org/10.2166/9781780406336>
- Arreguín C., F. I., López P., M., Escolero, O. y Gutiérrez, C. (2017). Líneas de investigación y desarrollo tecnológico en materia de aguas subterráneas. En *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica* (pp. 47-63) / Escolero F., O, Carlos Gutiérrez O., C.; Mendoza C., E. Y. (Eds.). Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Ávila, F. A., Correa, L. A., Peralta, S. O. y Melchor, M. (2017). Recarga artificial del acuífero en el Cerro de la Estrella, Iztapalapa, Ciudad de México. En *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica* (pp. 383-429) / Escolero F., O, Carlos Gutiérrez O., C.; Mendoza C., E. Y. (Eds.). Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- AWWA Membrane Residuals Management Subcommittee (2004). Informe del Comité: Perspectivas actuales de la gestión de los residuos de las membranas de desalación. *Revista American Water Works Association*, 96(12). <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2004.tb10760.x>
- Banco Mundial (2013). *Agua urbana en el Valle de México: ¿un camino verde para mañana?* México: Banco Mundial.
- Bonilla, V., J. P. y Stefan, C. (2017). Manejo de la recarga de acuíferos. En *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica* (pp. 65-79) / Escolero F., O, Carlos Gutiérrez O., C.; Mendoza C., E. Y. (Eds.). Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Briseño-Ruiz, J.V., Escolero-Fuentes, O., Mendoza-Cázares., E.Y. y Gutiérrez-Ojeda C. (2017). Infiltración de agua de tormenta al acuífero de San Luis Potosí, México: Colector Salk. En *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica* (pp. 159-189) / Escolero F., O, Carlos Gutiérrez O., C.; Mendoza C., E. Y. (Eds.). Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Calderón, M., C. G., Linares, O. J.J. y Rojas, G., A. (2012). Disminución del costo de la remoción de metales en agua para consumo humano mediante el uso de membranas destinadas al ablandamiento del agua. Proyecto TC-1202.1. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Cambridge University Press (2021). Performance. En el *Diccionario Cambridge*. Recuperado el 5 de febrero de 2021, de <https://dictionary.cambridge.org/es/diccionario/ingles/performance>

Cárdenas, A., Y. (2000). Tratamiento de agua: Coagulación-Floculación. Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico. Lima, Perú: Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (SEDAPAL).

CEPIS (2006). Evaluación de plantas convencionales y de tecnología apropiada. Tratamiento de agua para consumo humano, En *Plantas de Filtración Rápida, Manual III: Evaluación de plantas de tecnología apropiada*. Capítulo 3 (pp. 93-217). Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS)/Organización Panamericana de la Salud (OPS).

Chillón Arias, M.F. (2009). Reducción de boro en aguas procedentes de la desalación. Universidad de Alicante, Alicante, España.

CONAGUA (2020). *Acuíferos por Región hidrológico-administrativa (2020)*. Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica. Recuperado de <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuiferos&ver=reporte>

CONAGUA (2019a). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Alternativas Tecnológicas de Tratamiento de Aguas Residuales Para la Recarga Artificial de Acuíferos*. No. 38. Ciudad de México, México: Comisión Nacional del Agua - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONAGUA (2019b). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Diseño de Plantas Potabilizadoras de Tecnología Simplificada*. No. 24. Ciudad de México, México: Comisión Nacional del Agua - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONAGUA (2019c). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Desinfección Para Sistemas de Agua Potable y Saneamiento*. No. 23. Ciudad de México, México: Comisión Nacional del Agua - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONAGUA (2019d). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Evaluación rápida de plantas potabilizadoras*. No. 45. Ciudad de México, México: Comisión Nacional del Agua - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONAGUA, 2019e. *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Tratamiento y disposición de Lodos*. No. 32. Ciudad de México, México: Comisión Nacional del Agua - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONAGUA (2018). *Estadísticas del Agua en México, edición 2018*. Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA (2014). *Estadísticas del Agua en México. Edición 2013*. Ciudad de México, México: Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA y IINGEN-UNAM (2014). *Identificación de proyectos y obras de infraestructura para recarga natural y artificial, directa o indirecta, de acuíferos con agua pluvial y residual tratada*. México: Comisión Nacional del Agua - Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, Instituto de Ingeniería – Universidad Nacional Autónoma de México.

CONAGUA (2013). *Estadísticas del Agua en la Región Hidrológico-Administrativa XIII. Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. Edición 2013*. Ciudad de México, México: Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA (2007). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Guía para el manejo, estabilización y disposición de lodos químicos*. Ciudad de México, México: Comisión Nacional del Agua - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONAGUA (2006). *Estadísticas del Agua en México, edición 2006*, cuarta edición. Ciudad de México, México: Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA (2000). *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero zona metropolitana de la Ciudad de México, Distrito Federal*. México: Comisión Nacional del Agua - Subdirección General Técnica - Gerencia de Aguas Subterráneas.

Cornwell, D. A., y Roth, D. K. (2011). Gestión de los residuos de las plantas de tratamiento de aguas. Capítulo 22. En *Calidad y tratamiento del agua: Un manual sobre el agua potable, sexta edición* (pp. 22.2-22.77). American Water Works Association/James Edzwald (Eds). McGraw-Hill.

Cornwell, D. A., y Lee, R. G. (1994). Waste stream recycling: its effect on water quality. *Journal - American Water Works Association*, 86(11), 50–63. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1994.tb06273.x>

CPEUM (2019). DOF el 5 de febrero de 1917, última reforma el 09 de agosto de 2019. México: Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., Tchobanoglous, G., y Borchardt, J. H. (2012). *Tratamiento del agua MWH: principios y diseño* (Tercera edición). John Wiley and Sons.

Cruz-Ayala, M. B., y Megdal, S. B. (2020). Una visión general de la recarga gestionada de acuíferos en México y su marco legal. *Water (Switzerland)*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/w12020474>

De los Cobos, G. (2017). La aplicación de mar en Ginebra (Suiza): todo un éxito desde hace 35 años debido a una técnica y una gobernanza adecuadas. En *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica* (pp. 501-526) / Escolero F., O, Carlos Gutiérrez O., C.; Mendoza C., E. Y. (Eds.). Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Donaldson Latinoamérica (2014). ¿Qué es caída de presión? ABC de Filtración Tomo 7. FABC1207 (09/14). Recuperado de https://marketingdonaldson.com/resources/abcs/donaldsonabc_07.pdf

De Vargas, Lidia (2004a). Floculación. En *Tratamiento de agua para consumo humano, Plantas de Filtración Rápida, Manual I: Teoría. Tomo I.* Capítulo 5 (pp. 263-204). Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS)/Organización Panamericana de la Salud (OPS).

De Vargas, Lidia (2004b). Procesos unitarios y plantas de tratamiento. En *Tratamiento de agua para consumo humano, Plantas de Filtración Rápida, Manual I: Teoría. Tomo I.* Capítulo 3 (pp. 103-150). Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS)/Organización Panamericana de la Salud (OPS).

De Vargas, Lidia (2004c). Criterios para la selección de los procesos y de los parámetros óptimos de las unidades. En *Tratamiento de agua para consumo humano, Plantas de Filtración Rápida, Manual I: Teoría. Tomo I.* Capítulo 11 (pp. 215-278). Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS)/Organización Panamericana de la Salud (OPS).

Escobar Ruiz, V. (2014). Análisis instrumental de la variabilidad climática y de la calidad del agua en plantas de tratamiento de agua residual. Caso de estudio [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

EPA (2009). *Lista de contaminantes del agua potable y MCL. Normativa nacional de agua potable primaria.* Mayo 2009. Estados Unidos de América: Environmental Protection Agency.

Evans (2018). Zeolita: Filtración granular con el mejor desempeño. Recuperado de <https://www.blogevans.com/zeolita-filtracion-granular/>

Farhat, A., Ahmad, F., Hilal, N., y Arafat, H. A. (2013). Eliminación de boro en membranas de ósmosis inversa (OI) de nueva generación mediante OI de dos pasos sin ajuste de pH. *Desalination*, 50–59. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.10.003>

Figuroa, M.G., Salazar, M., Venancio y F., Rubio, G. (2017). *Evaluación de las Plantas de Tratamiento de aguas residuales de la Cuenca Xochimilco, Tláhuac y Milpa Alta (CXTyMA)*. ATZIN: Acción para la Sostenibilidad del Territorio A.C., Comisión de Cuenca del río Amecameca y Compañía Jacobo Espinoza.

González, V. F., Mendoza, M. A. y Arriaga, M.J.A. (2017). *Memorias del taller Recarga artificial del acuífero del valle de México*. UNAM, Instituto de Ingeniería y Red del Agua UNAM, 8 junio de 2017. Recuperado de https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/10/Memoria_Taller-recarga-artificial-acuifero-valle-de-mexico.pdf

Guerrero Domínguez, A. J. (2014). Caracterización de membranas cerámicas de nanofiltración: eliminación de metales pesados [Tesis de Maestría]. Universidad de Cádiz, Cádiz, España.

Health Canada (2020). *Boro en el agua potable*. Documento técnico de orientación para consulta pública. Directrices para la calidad del agua potable en Canadá. Ottawa, Ontario, Canadá: Water and Air Quality Bureau & Health Canada.

Hernández-Aguilar, M.H. (2017). Recarga artificial en el acuífero del valle de San Luis Río Colorado a través de lagunas de infiltración. En *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica* (pp. 431-462) / Escolero F., O, Carlos Gutiérrez O., C.; Mendoza C., E. Y. (Eds.). Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Hutchinson, A. (2017). Manejo de recarga de acuíferos en el condado de Orange, California, Estados Unidos. En *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica* (pp. 697-744) / Escolero F., O, Carlos Gutiérrez O., C.; Mendoza C., E. Y. (Eds.). Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

IEMA (2010). Planta Piloto Cerro de la Estrella. Ingeniería Especializada de Medio Ambiente S.A. de C.V. Recuperado de https://issuu.com/iemasee/docs/plantapiloto_cerroestrella

Kheriji, J., Tabassi, D., & Hamrouni, B. (2015). Eliminación de iones Cd(II) de soluciones acuosas y efluentes industriales mediante membranas de ósmosis inversa y nanofiltración. *Water Science and Technology*, 72(7), 1206–1216. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.326>

Ley de Aguas Nacionales (2016). Gobierno Federal de México. Diario Oficial Federación el 24 de marzo de 2016.

López Vigil, M. (2009). *Efecto del ozono y la zeolita clinoptilolita en la remoción de 2,6-dinitrotolueno y nitrógeno amoniacal* [Tesis de Doctorado]. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

Limón Macías, J.G. (2013). Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿problema o recurso? http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc_ingreso_gualberto_1imon_trabajo_de_ingreso.pdf

Mackey, E. D., y Seacord, T. (2008). *Soluciones regionales para la gestión de concentrados*. Alexandria, VA: WateReuse Foundation.

Magaña López, R. (2007). *Problemática del tratamiento de agua sometida a cloración y elaboración de un proceso complementario en la planta de tratamiento de agua residual Cerro de la Estrella Tláhuac, México* [Tesis de Licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

Maldonado, Y., Victor (2004). Filtración. En *Tratamiento de agua para consumo humano; Plantas de Filtración Rápida. Manual I: Teoría. Tomo II*. Capítulo 9 (pp. 81-119). Lima: Organización Panoamericana de la Salud (OPS) y Centro Panoamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS).

Margeta, K., Zabukovec, N., Siljeg, M., y Farkas, A. (2013). Las zeolitas naturales en el tratamiento del agua - ¿Qué eficacia tiene su uso? *Water Treatment* (Enero). <https://doi.org/10.5772/50738>

Martín, I., Salcedo, R. y Font, R. (2011). *Operaciones separación sólido-fluido*. Mecánica de fluidos. Universidad de Alicante. España.

Martínez Cirilo, Y. (2016). *Estado del arte del reúso indirecto y sus perspectivas de aplicación en México* [Tesis de Licenciatura]. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México.

Mauguin, G., & Corsin, P. (2005). Eliminación de concentrados y otros residuos de las plantas SWRO: Caracterización y reducción de su impacto ambiental. *Desalination*, 182(1–3), 355–364. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.02.033>

Medina Caballero, H. (1997). *Espesamiento de los lodos de un sedimentador primario por medio de hidrociclones en una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas* [Tesis de Maestría]. Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México.

Mendoza C., E. Y. (2017). Clasificación de tecnologías MAR. En *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica* (pp. 81-99) / Escolero F., O,

Carlos Gutiérrez O., C.; Mendoza C., E. Y. (Eds.). Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Mendoza-Cázares., E.Y., Ramírez-León, J.M. y Puerto-Piedra, Z. Y. (2017). Recarga utilizando agua de lluvia en la cuenca del río Magdalena, Ciudad de México. En *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica* (pp. 227-281) / Escolero F., O, Carlos Gutiérrez O., C.; Mendoza C., E. Y. (Eds.). Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Metcalf y Eddy, Inc., Asano, T., Burton, F. L., Leverenz, H. L., Tsuchihashi, R., y Tchobanoglous, G. (2007). *Reutilización del agua: cuestiones, tecnologías y aplicaciones*. McGraw-Hill.

Metcalf y Eddy, Inc. (2004). *Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento y reutilización* (Cuarta edición). McGraw-Hill.

Morales Rojo, P. M. (2005). *Digestión Anaerobia de Lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas y su aprovechamiento* [Tesis de Licenciatura]. Universidad de las Américas Puebla, San Andrés Cholula, Puebla.

Muller, J. (2011). Post-tratamiento de membranas. *American Membrane Technology Association*, 2(12), 1-5.

Murray, R., der Merwe, B., Peters I. y Louw D. (2017). Windhoek, Namibia: de la conceptualización a la operación y expansión de un esquema mar en un acuífero cuarcítico. En *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica* (pp. 627-653) / Escolero F., O, Carlos Gutiérrez O., C.; Mendoza C., E. Y. (Eds.). Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

National Drinking Water Clearinghouse (1999). *Tech Brief: Ozone*. Estados Unidos de América: National Drinking Water Clearinghouse. Recuperado de <https://www.nesc.wvu.edu/files/d/ddefc335-69c0-40f3-bcea-37119bcf29fd/ozone.pdf>

Natural Resource Management Ministerial Council, Environment Protection and Heritage Council y Australian Health Ministers' Conference (2006). *Directrices de Australia para el reciclaje de agua: gestión de los riesgos para la salud y el medio ambiente (fase 1). Estrategia nacional de gestión de la calidad del agua*. Biotext Pty Ltd, Canberra.

Ofwat (2013). *Orientación sobre los indicadores clave de rendimiento*. Recuperado de https://www.ofwat.gov.uk/wp-content/uploads/2015/12/prs_web_kpiprintable.pdf

Ojeda-Olivares, E. A., Belmonte-Jiménez, S. I. y Ladrón de Guevara-Torres, M.A. (2017). Evaluación de obras de recarga hídrica construidas por comunidades autóctonas en la subcuenca del valle de Ocotlán, Oaxaca, México. En *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica* (pp. 103-137) / Escolero F.,

O, Carlos Gutiérrez O., C.; Mendoza C., E. Y. (Eds.). Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

OMS (2010). *Ambientes Saludables y Prevención de Enfermedades*. Ginebra, Suiza: Organización Mundial de la Salud. Recuperado de https://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/chemicals_phc/en/

OMS (2006). *Guías para la calidad del agua potable. Primer apéndice. Vol. 1: Recomendaciones* (Tercera edición). Genève, Suiza: Organización Mundial de la Salud.

ONU (2018). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Nueva York, Estados Unidos de América: Organización de las Naciones Unidas.

ONU (2016). Agua limpia y saneamiento: Por qué es importante. Organización de las Naciones Unidas. Recuperado de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>.

ONU (2014). La escasez de agua. Organización de las Naciones Unidas. Recuperado de <https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/scarcity.shtml>

Orozco, B., C., Pérez, S., A y González, D., M.N. (2005). Importancia de los contaminantes orgánicos en el agua potable: Una preocupación creciente y tardía reflejada en la legislación (pp. 43-53). *Real Sociedad Española de Química*. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/1124059.pdf>

Page, D, Dillon, P, Vanderzalm, J, Bekele, E, Barry, K, Miotlinski, K y Levett, K. (2010). *Evaluación de riesgos de la recarga gestionada de acuíferos*. Australia: CSIRO, Water for a Healthy Country National Research Flagship.

Palma, A., Mendoza, A., Cruickshank, C., González, F., Salas M.A. y Val, R. (2014). *Inventario de la recarga artificial de México*. XXIII Congreso Nacional De Hidráulica. Jalisco, México.

Panachlor (2016). *Potencial de oxidación-reducción ORP (redox)*. Manizales, Colombia: Panachlor S.A. Recuperado de <http://panachlor.com/?p=803>

Panagopoulos, A. (2021). Evaluación tecno-económica de los sistemas de tratamiento de vertido mínimo de líquidos (MLD) para la gestión y el tratamiento de aguas residuales salinas (salmuera). *Seguridad de los procesos y protección del medio ambiente: Transacciones de la Institución de Ingenieros Químicos Parte B*, 146, 656–669. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.12.007>

PROFEPA (s.f.). Glosario. Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. Recuperado de

http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/v/766/1/mx/glosario.html?num_letra=8num_letra_siguiete=9

Qasim R. S. (1999). *Plantas de tratamiento de aguas residuales: Planificación, diseño y funcionamiento* (segunda edición). CRC Press. New York: Routledge.

Quadros, S., Rosa, M. J., Alegre, H., y Silva, C. (2010). Un sistema de indicadores de rendimiento para las plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas. *Water Science and Technology*, 62(10), 2398–2407. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.526>

Ramos Ramírez., I. A. (2021). *Uso de indicadores biológicos para garantizar la calidad y seguridad del agua renovada para uso directo, viabilidad económica, social y medioambiental del reúso de agua en Iztapalapa, CDMX* [Tesis de Maestría]. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México.

Riveros Olivares, B. (2013). *Tratamiento de aguas residuales municipales en la Ciudad de México* [Tesis de Licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

Rodríguez, A., Rosal, R., Perdigón-Melón, J. A., Mezcua, M., Agüera, A., Hernando, M. D., ... García-Calvo, E. (2008). Ozone-based technologies in water and wastewater treatment. *Handbook of Environmental Chemistry, Volume 5: Water Pollution*, 5 S2(February), 127–175. https://doi.org/10.1007/698_5_103

SACMEX (2020a). Respuesta a solicitud de información SACMEX/UT/0154/2020. Sistema de Aguas de la Ciudad de México. Ciudad de México, México.

SACMEX (2020b). Respuesta a solicitud de información SACMEX/UT/0291/2020. Sistema de Aguas de la Ciudad de México. Ciudad de México, México.

SACMEX (2020c). Respuesta a solicitud de información SACMEX/UT/0602/2020. Sistema de Aguas de la Ciudad de México. Ciudad de México, México.

SACMEX (2020d). Respuesta a solicitud de información SACMEX/UT/0896/2020. Sistema de Aguas de la Ciudad de México. Ciudad de México, México.

SACMEX (2020e). Respuesta a solicitud de información SACMEX/UT/0931/2020. Sistema de Aguas de la Ciudad de México. Ciudad de México, México.

SACMEX (2020f). Respuesta a solicitud de información SACMEX/UT/0956/2020. Sistema de Aguas de la Ciudad de México. Ciudad de México, México.

SACMEX (2011). Recarga artificial de acuíferos a partir de agua de lluvia y residual potabilizada. Sistema de aguas de la Ciudad de México: México. Recuperado de

http://www.agua.unam.mx/assets/acuiferos/pdfs/presentaciones/fernandoavila_sacm.pdf

Sámano Romero, G. (2020). *Metodología para la evaluación del cumplimiento del derecho humano al agua en Iztapalapa, Ciudad de México* [Tesis de Maestría]. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México.

Salvador Delgadillo, R. (2013). *Recarga artificial del acuífero como parte de la gestión integral de los recursos hídricos en el Valle de México* [Tesis de Licenciatura]. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México.

Santana, F., Almeida, G., Martins, S. (1998). *Metodología para evaluar el funcionamiento de las plantas de tratamiento de agua para abastecimiento público*. Instituto del Agua - Ministerio de Medio Ambiente, Universidad Nova de Lisboa - Instituto del Agua - Facultad de Ciencia y Tecnología. Lisboa, Portugal.

SEMARNAT (2016). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde*. Edición 2015. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

SEMARNAT (2009a). *Norma Oficial Mexicana NOM-014-CONAGUA-2003, Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. DOF el 18 de agosto de 2009.

SEMARNAT (2009b). *Norma Oficial Mexicana NOM-015-CONAGUA-2007, Infiltración artificial de agua a los acuíferos. Características y especificaciones de las obras y del agua*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. DOF el 18 de agosto de 2009.

SEMARNAT (2003). *Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental - lodos y biosólidos - especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final*. DOF el 15 de agosto de 2003.

SGO & Lesser y Asociados (1991). *Recarga artificial de agua residual tratada al acuífero del Valle de México*. Ingeniería Hidráulica en México. Secretaria General de Obras – Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Lesser y Asociados S.A. de C.V.

Shenvi, S. S., Isloor, A. M., y Ismail, A. F. (2015). Una revisión de la tecnología de membranas de ósmosis inversa: Desarrollos y desafíos. *Desalination*, 368, 10–26. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.12.042>

Silva-Hidalgo, H., González-Núñez, M. A., Pinales M., A. y Villalobos A., A. (2017). Proyecto de manejo de recarga de acuíferos en los ojos del Chuvíscar, Chihuahua, México. En *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica* (pp. 191-225) / Escolero F., O, Carlos Gutiérrez O., C.; Mendoza C., E. Y. (Eds.). Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Silva, C., y Rosa, M. J. (2020). Evaluación del rendimiento de 23 plantas de tratamiento de aguas residuales - un estudio de caso. *Revista Urban Water*, 17(1), 78–85. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1734634>

Silva, C., Quadros, S., Ramalho, P., y Rosa, M. J. (2014a). Una herramienta para una evaluación exhaustiva de la calidad de las aguas residuales tratadas. *Journal of Environmental Management*, 146, 400–406. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.03.028>

Silva, C., Quadros, S., Ramalho, P., Alegre, H., y Rosa, M. J. (2014b). Traducción de las eficiencias de remoción en índices de rendimiento operativo de las plantas de tratamiento de aguas residuales. *Water Research*, 57, 202–214. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.03.025>

Silva, C., Ramalho, P., Quadros, S., Alegre, H., y Rosa, M. J. (2012). Resultados de “PAST21” - La iniciativa portuguesa para la evaluación del rendimiento de las plantas de tratamiento de agua y aguas residuales. *Water Science and Technology: Water Supply*, 12(3), 372–386. <https://doi.org/10.2166/ws.2012.004>

SSA (2019). *Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-127-SSA1-2017, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua*. Secretaría de Salud. DOF el 06 de diciembre de 2019.

SSA (2000). *Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. Secretaría de Salud. DOF el 22 de noviembre de 2000.

SSA (1994). *Norma Oficial Mexicana NOM-014-SSA1-1993. Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano, en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados*. Secretaría de Salud. DOF el 12 de agosto de 1994.

Sumegová, L., Derco, J., Melicher, M. (2013). Influencia de las condiciones de reacción en el proceso de ozonización. *Acta Chimica Slovaca*, Vol. 6, No. 2, 2013, pp. 168-172, doi: 10.2478/acs-2013-0026

Toro (s.f.). Draco®, filtro prensa. Toro Wastewater Equipment Industries. <https://www.toroequipment.com/wp/wp-content/uploads/2015/10/Filtro-Prensa-FP-DRACO-Toro-Equipment-1.pdf>

UNESCO (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*. París, Francia: Programa Mundial de las Naciones Unidas de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP)/ONU-Agua/UNESCO.

USEPA (2018). *2018 Edición de las Tablas de Normas de Agua Potable y Avisos Sanitarios*. Estados Unidos de América: Oficina del Agua (OW) Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

USEPA (2014). *Documento de síntesis de la Asesoría Sanitaria para el Boro y sus Compuestos*. Estados Unidos de América: División de Criterios Sanitarios y Ecológicos (HECD), Oficina de Ciencia y Tecnología (OST), Oficina del Agua (OW) para la Oficina de Aguas Subterráneas/Agua Potable (OGWDW), OW, Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos..

USEPA (2012). *Directrices para la reutilización del agua*. 26(Septiembre), 252. Estados Unidos de América: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, Laboratorio Nacional de Investigación de Gestión de Riesgos y Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional. Recuperado de <http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/625r04108/625r04108.pdf>

USEPA (2009). *Tabla de la normativa nacional sobre agua potable primaria (mayo)*. Estados Unidos de América: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Recuperado de https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-06/documents/npwdr_complete_table.pdf

USEPA (1999). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales, Desinfección con luz ultravioleta*. Washington, E.U.A.: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (2009a). Informe sobre opciones de tratamiento y eliminación de salmuera concentrada. Estudio de gestión regional de salmuera-concentrado del sur de California - Fase I Región del Bajo Colorado. *Reclamation*, 1–114.

U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (2009b). Resumen ejecutivo. Estudio de gestión regional de salmueras concentradas del sur de California - Fase I Región del Bajo Colorado. *Reclamation*, 1–56.

Vieira, P., Rosa, M. J., Alegre, H., y Lucas, H. (2010). *Assessing the Operational Performance of Water Treatment Plants – Focus on Water Quality and Removal Efficiency*. Portugal: Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil y Águas do Algarve.

Vieira, P. (2009). *Avaliação de desempenho de estações de tratamento de água para consumo humano* [Tesis de Doctorado]. Universidad del Algarve, Faro, Portugal.

Vieira, P., Alegre, H., Rosa, M. J., y Lucas, H. (2008). Evaluación de las plantas de tratamiento de agua potable mediante indicadores de rendimiento. *Water Science and Technology: Water Supply*, 8(3), 245–253. <https://doi.org/10.2166/ws.2008.068>

WHO (2017). *Guías para la calidad del agua potable: Cuarta edición que incorpora la primera adenda*. Ginebra, Suiza: Organización Mundial de la Salud (WHO).

WHO y OECD (2003). Evaluación de la seguridad microbiana del agua potable - Mejora de los enfoques y métodos. *Water Intelligence Online*, 6. Organización Mundial de la Salud (WHO) y Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD). <https://doi.org/10.2166/9781780402192>

ANEXOS



Figura 5.20. Requisitos para proyecto de recarga artificial NOM-014-CONAGUA-2003 (Salvador, 2013)

Tabla 5. 8. Parámetros de calidad de agua regulados por la NOM-014-CONAGUA-2003 (SEMARNAT, 2009a; SSA, 2000)

Microbiológicos		
Contaminante	Referencia	LMP
<i>Cryptosporidium</i> *	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	Ausencia o no detectables
<i>Vibrio Cholerae</i> *	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	Ausencia o no detectables
<i>Giardia lamblia</i> *	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	Ausencia o no detectables
Enterovirus*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	Ausencia o no detectables
Organismos coliformes totales	Tabla 1 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	Ausencia o no detectables
<i>Escherichia coli</i> o coliformes fecales u organismos termotolerantes	Tabla 1 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	Ausencia o no detectables
Conteo de bacterias heterotróficas (HPC)*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	Ausencia o no detectables
Legionella *	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	Ausencia o no detectables
Físicos y organolépticos		
Contaminante	Referencia	LMP
Turbiedad	Tabla 2 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	5 UNT
Color verdadero	Tabla 2 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	20 UC Pt-Co
Olor y sabor	Tabla 2 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	Agradable
Químicos		
Contaminante	Referencia	LMP [mg/L]
Carbono orgánico total (COT)*	Tabla 1 NOM-014-CONAGUA-2003	Directa: <1 Superficial/subsuperficial: 16
pH	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	6.5-8.5
Sólidos disueltos totales	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	1000
Químicos inorgánicos		
Aluminio	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	0.2
Arsénico	Tabla 3 y Tabla 4 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	0.025*
Bario	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	0.7
Cadmio	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	0.005
Cianuros (CN-)	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	0.07
Cloro residual libre	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	0.2-1.5
Cloruros (Cl-)	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	250
Cobre	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	2
Cromo total	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	0.05
Dureza total (CaCO ₃)	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	500

Hierro	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000) y Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.3
Fluoruros (F-)	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	1.5
Manganeso	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	0.15
Mercurio	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	0.001
Nitratos (NO3-)	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	10
Nitritos (NO2-)	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	1
Nitrógeno amoniacal (NH3)	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	0.5
Plomo	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	0.01
Sodio	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	200
Sulfatos (SO42-)	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	400
Yodo libre residual	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	0.2-0.5
Zinc	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	5
Antimonio*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.006
Asbestos (fibra >10 m)*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	7 millones de fibras por litro
Berilio*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.004
Boro*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.3
Plata*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.1
Selenio*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.05
Químicos orgánicos		
Fenoles o compuestos fenólicos	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000) y Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.3
		LMP [µg/L]
Benceno	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	10
Etilbenceno	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	300
Tolueno	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	700
Xileno (tres isómeros)	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	500
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	500
Acrilamida*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.0005
Alacloro*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.02
Aldicarb*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.01
Atrazina*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.002
Benzo(a)pireno (PAHs)*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.0002
Bifenilos policlorados (PCBs)*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.0005
Carbofurano*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.005
Clorobenceno*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.1
Cloruro de vinil*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.002
Dalapon*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.2
Dibromoetileno*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.00005
1,2-Dibromo-3-cloropropano (DBCP)*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.001
o-Diclorobenceno*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.6
p-Diclorobenceno*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.075

1,2-Dicloroetano*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.005
1,1-Dicloroetileno*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.007
cis-1,2-Dicloroetileno*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.07
trans-1,2-Dicloroetileno*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.1
Diclorometano*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.005
1,2-Dicloropropano*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.005
Di(2-etilhexil)adipato*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.4
Di(2-ethylhexyl) ftalato*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.006
Dinoseb*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.007
Dioxina (2,3,7,8-TCDD)*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.00000003
Diquat*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.02
Endothall*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.1
Endrin*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.002
Epiclorohidrina*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.002
Epóxido de heptacloro*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.0002
Estireno*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.02
Glifosato*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.7
Heptacloro y epóxido de heptacloro	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.001
Hexaclorobenceno	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.001
Hexaclorociclopentadieno*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.05
Metil-terbutil-éter*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.03
Metoxicloro*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.02
Oxamil (vidato)*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.2
Pentaclorofenol*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.001
Picloram*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.5
Simazina*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.004
Tetracloroetileno*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.005
Tetracloruro de carbono*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.005
Toxafeno*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.003
2,4,5-TP(Silvex)*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.05
1,2,4-Triclorobenceno*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.07
1,1,1-Tricloroetano*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.2
1,1,2-Tricloroetano*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.005
Tricloroetileno*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.005
Químicos orgánicos sintéticos - Plaguicidas		
Contaminante	Referencia	LMP [µg/L]
Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	0.03
Clordano (total de isómeros)	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	0.2
DDT	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	1
Gamma-HCH (lindano)	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	2
Hexaclorobenceno	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	1
Heptacloro y epóxido de heptacloro	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	0.03

Metoxicloro	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	20
2,4-D	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	30
Productos de desinfección		
Contaminante	Referencia	LMP [mg/L]
Bromatos*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	0.01
Cloritos*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	1
Ácidos haloacéticos (HAA5)*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2004	0.06
Contaminante	Referencia	LMP [µg/L]
Trihalometanos totales	Tabla 3 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	200
Desinfectantes		
Contaminante	Referencia	LMP
Cloraminas (Cl ₂)*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	Ausencia o no detectable
Bióxido de cloro (ClO ₂)*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	Ausencia o no detectable
Radiactivos		
Contaminante	Referencia	Bq/L (Bequerel por litro)
Radiactividad alfa global	Tabla 4 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	0.56
Radiactividad beta global	Tabla 4 NOM-127-SSA1-1994 (2000)	1.85
Contaminante	Referencia	pCi/L
Radio 226 y Radio 228 (combinados)*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	5
Contaminante	Referencia	g/L
Uranio*	Tabla 3 NOM-014-CONAGUA-2003	30

* Parámetros no regulados por la NOM-127-SSA1-1994, cuya presencia se supone al origen del agua residual tratada.

Tabla 5. 9. Calidad del agua del efluente PP Cerro de la Estrella (SACMEX, 2020b; SSA, 2019; SEMARNAT, 2009a; SSA, 2000)

Fecha	pH	Turbidez	Conductividad	Color	Alcalinidad total	Cloruros	Fluoruros	Nitratos	Nitritos	Nitrógeno amoniacal
2010	6.43	0.588	73.086	6.08	11.34	6.754	0.114	1.713	0.017	0.114
2011	6.73	0.557	120.948	4.54	32.072	11.089	0.114	2.561	0.103	0.206
2012	6.94	0.565	182.179	4.657	36.367	16.188	0.137	4.342	0.036	0.102
2013	6.92	0.5	184.486	2.5	N.R.	N.R.	0.1	2.54	0.046	0.097
2017	7	<0.5	<75	<5	16.365	7.04	0.333	1.132	0.097	0.132
2018	6.94	<0.5	<75	<5	14.019	7.04	0.213	1.392	0.071	0.112
2019	7.02	0.591	76.657	5.196	15.702	7.04	0.248	1.629	0.096	0.721
Unidades	Unidades de pH	UTN	µS/cm (20°C)	Pt-Co (verdadero)	mg/L CaCO ₃	mg/L (como Cl ⁻)	mg/L (como F ⁻)	mg/L (como NO ₃ ⁻)	mg/L (como NO ₂ ⁻)	mg/L (como N -NH ₃)
NOM-127-SSA1-1994 (2000)	6.5-8.5	5	n.e.	20	n.e.	250	1.5	10	1	0.5
NOM-014-CONAGUA-2003	NOM-127-SSA1-1994	NOM-127-SS	n.e.	NOM-127-SS	n.e.	NOM-127-SS	NOM-127-SS	NOM-127-SSA1-1994	NOM-127-SSA1-1994	NOM-127-SSA1-1994
PROY-NOM-127-SSA1-2017	6.5-8.5	4 ¹	n.e.	15	n.e.	n.e.	1.5 ²	11	0.9	0.5

Fecha	Sulfatos	SAAM	DQO	Dureza total	Dureza al calcio	Dureza al magnesio	Conteo de bacterias heterotróficas	Coliformes totales	Coliformes fecales
2010	6.163	0.04	10.185	7.954	4.308	3.676	403	0	Negativo
2011	0.035	0.038	10.099	20.872	9.193	13.957	680	0	Negativo
2012	N.R.	0.035	10.093	30.464	14.599	15.943	347	0	Negativo
2013	N.R.	0.025	13.214	15.008	6.312	8.699	473	7	Negativo
2017	<10	<0.025	<10	12.433	7.309	9.887	1	0	Negativo
2018	<10	<0.025	<10	16.239	6.642	9.597	1	0	Negativo
2019	<10	0.025	10.429	13.331	4.891	8.24	405	92	Negativo
Unidades	mg/L como SO ₄ ²⁻	mg/L	mg/L de O ₂	mg/L como CaCO ₃	mg/L como CaCO ₃	mg/L como CaCO ₃	Ausencia o no detectable	Ausencia o no detectable	Ausencia o no detectable
NOM-127-SSA1-1994 (2000)	400	0.5	n.e.	500	n.e.	n.e.	Ausencia o no detectable	Ausencia o no detectable	Ausencia o no detectable
NOM-014-CONAGUA-2003	NOM-127-SSA	NOM-127-SS	n.e.	NOM-127-SSA1-1994	n.e.	n.e.	NOM-127-SSA1-1994	NOM-127-SSA1-1994	NOM-127-SSA1-1994
PROY-NOM-127-SSA1-2017	400	0.5	n.e.	500	n.e.	n.e.	n.e.	<1.1 - NMP/100 mL <1 - UFC/100 mL Ausencia - Ausencia o	<1.1 - NMP/100 mL <1 - UFC/100 mL Ausencia - Ausencia o

Tabla 5.9. Calidad del agua del efluente PP Cerro de la Estrella (continuación) (SACMEX, 2020b; SSA, 2019; SEMARNAT, 2009a; SSA, 2000)

Fecha	Sólidos totales	Sólidos totales volátiles	Sólidos totales fijos	Sólidos suspendidos totales	Sólidos suspendidos volátiles	Sólidos suspendidos fijos	Sólidos disueltos totales	Sólidos disueltos volátiles	Sólidos disueltos fijos
2010	40	13	26	3	2	2	36	11	25
2011	77	26	51	2	1	0	76	25	51
2012	152	74	130	12	12	11	151	73	130
2013	100	100	100	20	20	20	100	100	100
2017	<100	<100	<100	<20	<20	<20	<100	<100	100
2018	<100	<100	<100	<20	<20	<20	<100	<100	100
2019	103	100	102	20	20	20	102	100	102
Unidades	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
NOM-127-SSA1-1994 (2000)	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	1000	n.e.	n.e.
NOM-014-CONAGUA-2003	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	NOM-127-SSA1-1994	n.e.	n.e.
PROY-NOM-127-SSA1-2017	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	1000	n.e.	n.e.

Fecha	Aluminio	Arsénico	Bario	Cadmio	Calcio	Zinc	Cobre	Cromo	Hierro
2010	0.0147	0.00099	0.0035	0.005	2.494	0.008	0.041	0.004	0.055
2011	0.0351	0.00095	0.0075	0.005	3.612	0.014	0.042	0.0054	0.052
2012	0.0362	0.0055	0.0061	0.0025	5.845	0.016	0.03	0.0049	0.039
2013	<0.03	0.005	<0.005	0.0025	2.528	0.01	<0.03	<0.005	0.03
2017	<0.03	<0.005	<0.005	<0.0025	2.897	<0.01	<0.03	<0.005	0.03
2018	<0.03	<0.005	<0.005	<0.0025	2.016	<0.01	<0.03	<0.005	0.03015
2019	<0.03	<0.005	<0.005	0.015679	2.04	0.011	<0.03	<0.005	0.03
Unidades	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L CaCO3	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
NOM-127-SSA1-1994 (2000)	0.2	0.025	0.7	0.005	n.e.	5	2	0.05	0.3
NOM-014-CONAGUA-2003	NOM-127-SSA1	NOM-127-SS	NOM-127-SS	NOM-127-SS	n.e.	NOM-127-SS	NOM-127-SS	NOM-127-SS	0.3
PROY-NOM-127-SSA1-2017	0.2	0.025 ³	1.3	0.005 ^a	n.e.	n.e.	2	0.05	0.3

Tabla 5.9. Calidad del agua del efluente PP Cerro de la Estrella (continuación) (SACMEX, 2020b; SSA, 2019; SEMARNAT, 2009a; SSA, 2000)

Fecha	Magnesio	Manganeso	Plomo	Potasio	Selenio	Sodio	Boro
2010	0.888	0.019	0.002	1.2822	0.004	7.7853	0.3493
2011	3.566	0.027	0.002	2.9433	0.004	18.53	0.3766
2012	3.857	0.03	0.01	4	0.0111	23.136	0.3378
2013	2.113	0.03	0.01	2.4142	<0.01	15.969	N.R.
2017	2.121	0.03	<0.01	<2	<0.01	5.3185	0.3072
2018	2	0.03	<0.01	<2	<0.01	6.4065	0.3872
2019	2	0.03	0.01	2.0088	<0.01	9.05	0.4065
Unidades	mg/L CaCO3	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
NOM-127-SSA1-1994 (2000)	n.e.	0.15	0.01	n.e.	0.05	200	0.3
NOM-014-CONAGUA-2003	n.e.	NOM-127-SSA1-1994	n.e.	n.e.	n.e.	NOM-127-SSA1-1994	n.e.
PROY-NOM-127-SSA1-2017	n.e.	0.15	0.01	n.e.	0.04	n.e.	n.e.

N.R. = No reportado

¹ a partir del 2019, el LMP será de 3.0 UNT

² se deberá ajustar a 1 mg/L de acuerdo con la tabla de cumplimiento gradual de la Tabla 3 del punto 5.3 del PROY-NOM-127-SSA1-2017

³ se deberá ajustar a 0.01 mg/L de acuerdo con la tabla de cumplimiento gradual Tabla 3 del punto 5.4 del PROY-NOM-127-SSA1-2017

^a se deberá ajustar a 0.003 mg/L de acuerdo con la tabla de cumplimiento gradual Tabla 3 del punto 5.4 del PROY-NOM-127-SSA1-2017

Tabla 6. 6. Límites de detección y/o cuantificación de métodos analíticos empleados en análisis de calidad del agua (SACMEX, 2020e)

Parámetro	Unidad	Límites de cuantificación del método analítico	Norma y/o técnica de referencia	Método
pH	Unidades de pH	4	NMX-AA-008-SCFI-2011	Potenciométrico
Turbiedad	UTN	0.5	NMX-AA-038-SCFI-2001	Nefelométrico
Color verdadero	Pt-Co	5	AWWA-2120C-2012	Espectrofotométrico
Cloruros	mg/L (como Cl ⁻)	10	LACHAT 10-117-07-1-A	Análisis por inyección de flujo continuo
Fluoruros	mg/L (como F ⁻)	0.2	SM-4500 F,D 2012	Espectrofotométrico-SPADNS
Nitratos	mg/L (como NO ₃ ⁻)	0.4	SM-4500 NO3 B 2012	Espectrofotométrico
Nitritos	mg/L (como NO ₂ ⁻)	0.01	EPA 354.1 1971	Espectrofotométrico
Nitrógeno amoniacal	mg/L (como N -NH ₃)	0.1	SM 4500 NH ₃ 2005	Método Kjeldahl Modificado
Sulfatos	mg/L (como SO ₄ ²⁻)	10	NMX-AA-074-SCFI-2014	Espectrofotométrico
SAAM	mg/L	0.025	SM 5540 C 2005	Espectrofotométrico
Dureza total	mg/L como CaCO ₃	8.23	Cálculo - Método interno	Cálculo-Método interno
Coliformes totales	UFC/100 mL	0	SM-9222 B 2012	Filtro de membrana
Coliformes fecales	UFC/100 mL	0	SM-9222 B 2012	Filtro de membrana
Conteo de bacterias heterotróficas	UFC/100 mL	0	SM- 9215 A	Conteo en placa
Sólidos disueltos totales	mg/L	20	SM-2540 B,D	Cálculo
Aluminio	mg/L	0.03	EPA 6010-C	Plasma
Arsénico	mg/L	0.005	EPA 6010-C	Plasma
Bario	mg/L	0.005	EPA 6010-C	Plasma
Cadmio	mg/L	0.0025	EPA 6010-C	Plasma
Zinc	mg/L	0.01	EPA 6010-C	Plasma
Cobre	mg/L	0.03	EPA 6010-C	Plasma
Cromo	mg/L	0.005	EPA 6010-C	Plasma
Hierro	mg/L	0.03	EPA 6010-C	Plasma
Manganeso	mg/L	0.03	EPA 6010-C	Plasma
Plomo	mg/L	0.01	EPA 6010-C	Plasma
Selenio	mg/L	0.01	EPA 6010-C	Plasma
Sodio	mg/L	2	NMX-AA-051-SCFI-2001	Absorción atómica - Flama
Boro	mg/L	0.1	EPA 6010-C	Plasma

Funciones de desempeño

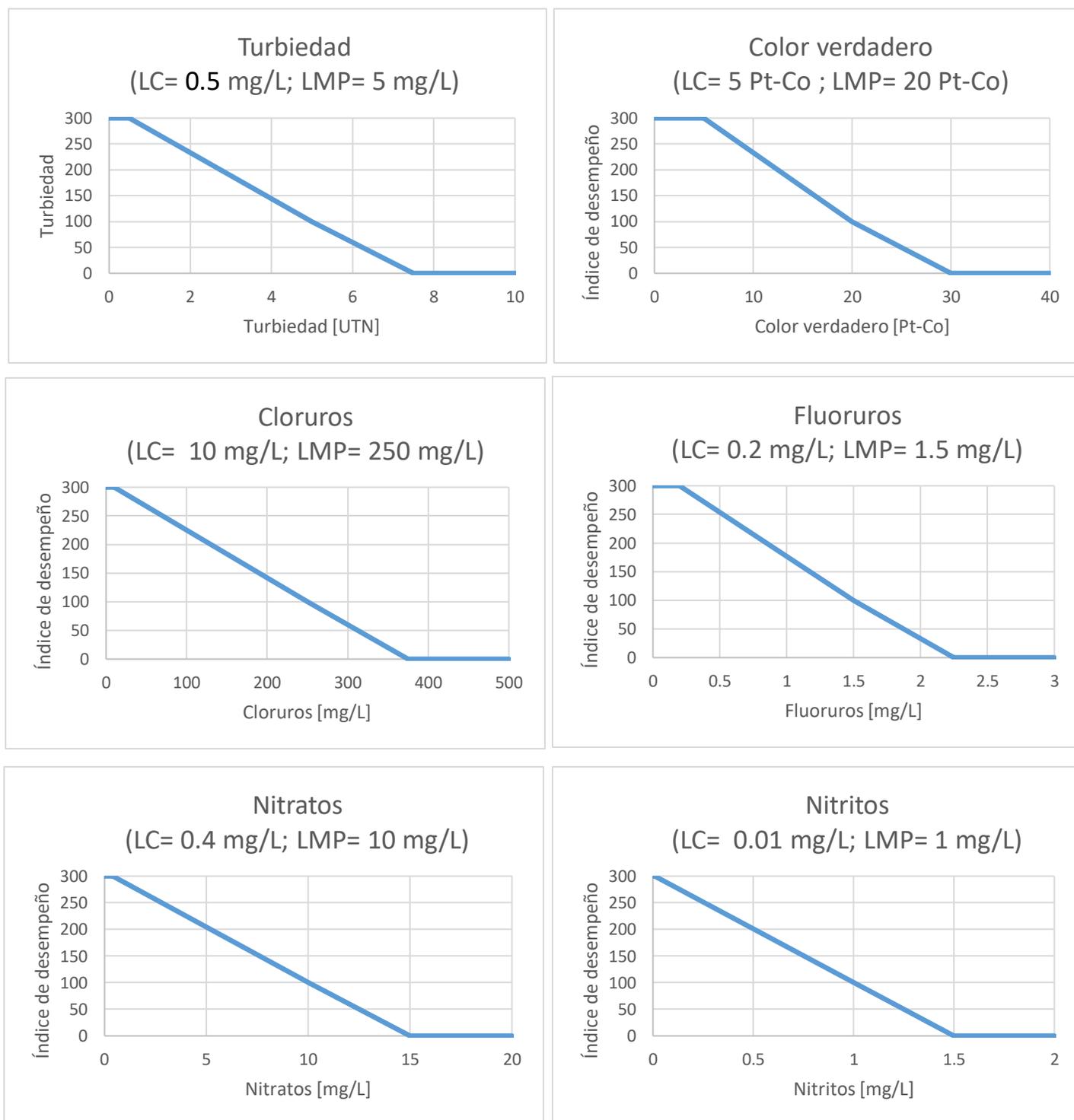


Figura 6. 8. Funciones de desempeño de parámetros químicos

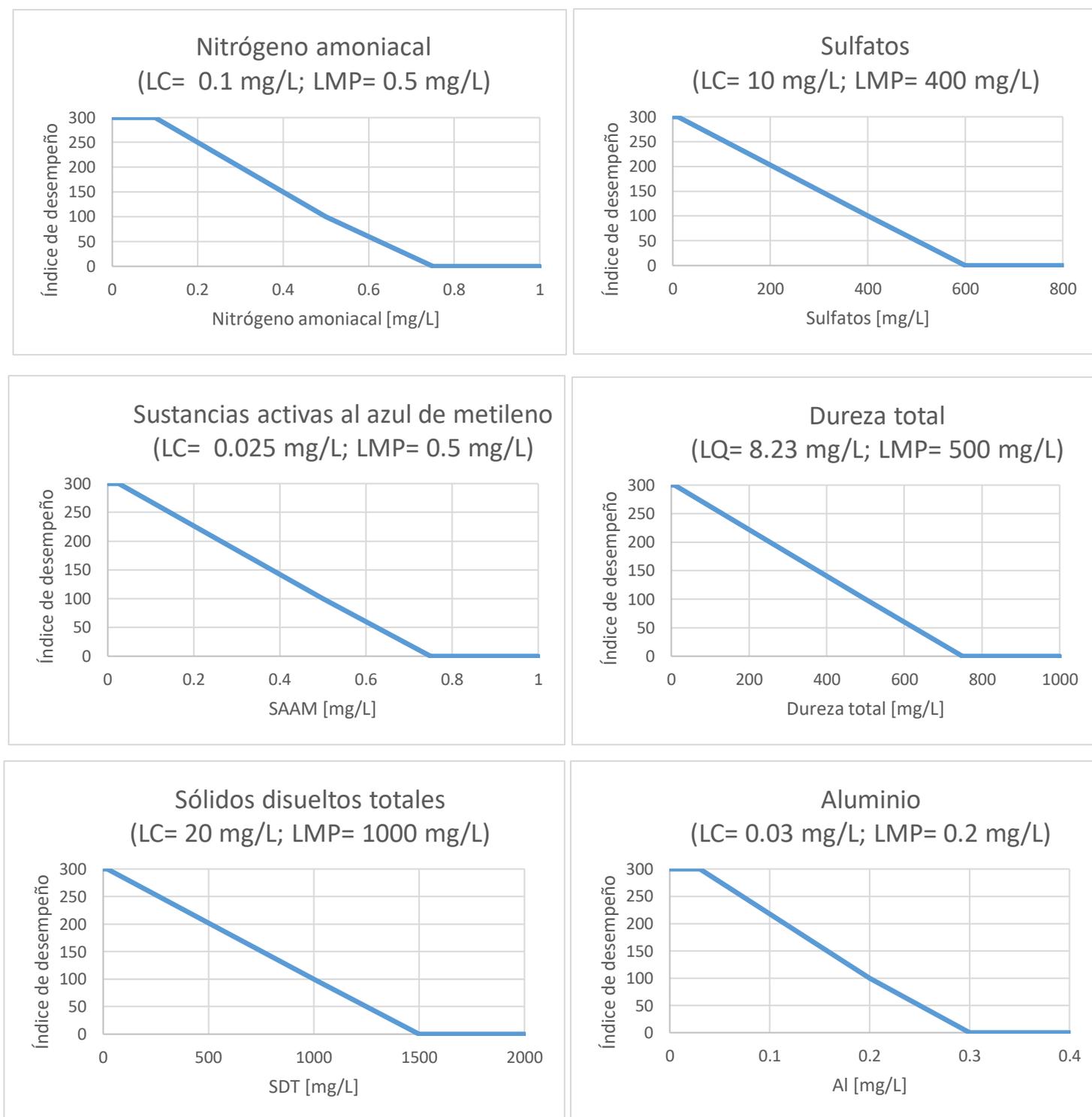


Figura 6. 9. Funciones de desempeño de parámetros químicos

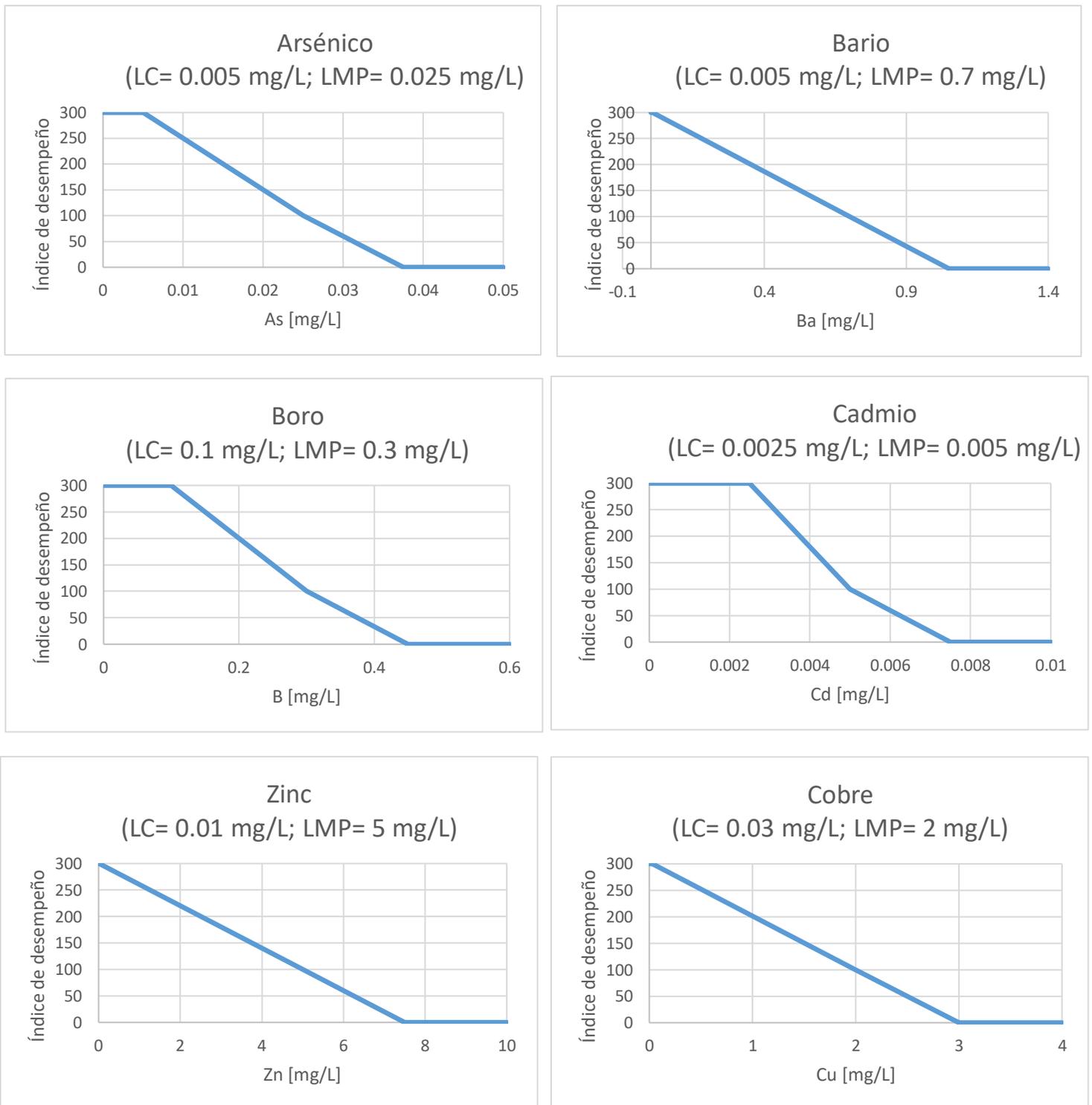


Figura 6. 10. Funciones de desempeño de parámetros químicos

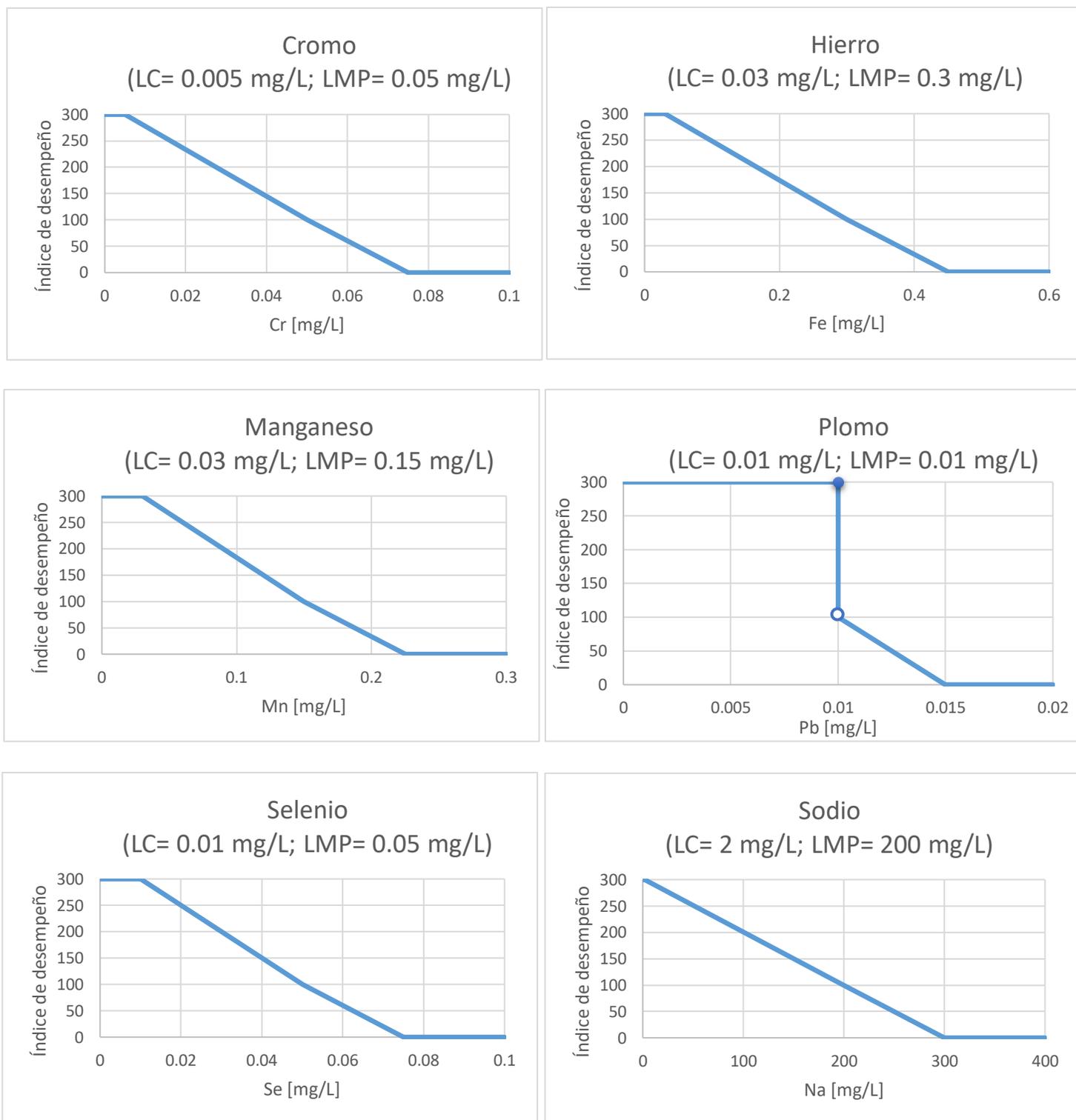


Figura 6. 11. Funciones de desempeño de parámetros químicos

Tabla 7. 13. Parámetros físicos y organolépticos, microbiológicos y radiactivos obligatorios vs analizados

Parámetros físicos y organolépticos obligatorios	Parámetros analizados (2010, 2011, 2012, 2013, 2017, 2018, 2019)
Turbiedad	✓
Color verdadero	✓
Olor y sabor	
Parámetros microbiológicos obligatorios	Parámetros analizados (2010, 2011, 2012, 2013, 2017, 2018, 2019)
<i>Cryptosporidium</i>	
<i>Vibrio Cholerae</i>	
<i>Giardia lamblia</i>	
Enterovirus	
Organismos coliformes totales	✓
<i>Escherichia coli</i> o coliformes fecales u organismos termotolerantes	✓
Conteo de bacterias heterotróficas (HPC)	✓
<i>Legionella</i>	
Parámetros radiactivos obligatorios	Parámetros analizados (2010, 2011, 2012, 2013, 2017, 2018, 2019)
Radiactividad alfa global	
Radiactividad beta global	
Radio 226 y Radio 228 (combinados)	
Uranio	

✓ - Parámetro monitoreado

Tabla 7. 14. Parámetros químicos obligatorios vs analizados

Parámetros químicos obligatorios	Parámetros analizados (2010, 2011, 2017, 2018 y 2019)	Parámetros analizados (2012)	Parámetros analizados (2013)
Carbono orgánico total (COT)			
pH	✓	✓	✓
Sólidos disueltos totales	✓	✓	✓
Aluminio	✓	✓	✓
Arsénico	✓	✓	✓
Bario	✓	✓	✓
Cadmio	✓	✓	✓
Cianuros (CN ⁻)			
Cloro residual libre			
Cloruros (Cl ⁻)	✓	✓	
Cobre	✓	✓	✓

Cromo total	✓	✓	✓
Dureza total (CaCO ₃)	✓	✓	✓
Fluoruros (F ⁻)	✓	✓	✓
Manganeso	✓	✓	✓
Nitratos (NO ₃ ⁻)	✓	✓	✓
Nitritos (NO ₂ ⁻)	✓	✓	✓
Nitrógeno amoniacal (NH ₃)	✓	✓	✓
Plomo	✓	✓	✓
Sodio	✓	✓	✓
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	✓		
Yodo libre residual			
Zinc	✓	✓	✓
Mercurio			
Boro	✓	✓	
Hierro	✓	✓	✓
Selenio	✓	✓	✓
Fenoles o compuestos fenólicos			
Benceno			
Etilbenceno			
Tolueno			
Xileno (tres isómeros)			
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	✓	✓	✓
Aldrín y dieldrín (separados o combinados)			
Clordano (total de isómeros)			
Diclorodifeniltricloroetano (DDT)			
Gamma-HCH (lindano)			
Hexaclorobenceno			
Heptacloro y epóxido de heptacloro			
Metoxicloro			
2,4-D			
Trihalometanos totales			
Antimonio			
Asbesto (fibra >10 m)			
Berilio			
Boro	✓	✓	
Plata			
Selenio	✓	✓	✓
Cloraminas (Cl ₂)			
Bióxido de cloro (ClO ₂)			
Bromatos			

Cloritos			
Ácidos haloacéticos (HAA5)			
Acrilamida			
Alacloro			
Aldicarb			
Atrazina			
Benzo(a)pireno (PAHs)			
Bifenilos policlorados (PCBs)			
Carbofurano			
Clorobenceno			
Cloruro de vinil			
Dalapon			
Dibromoetileno			
1,2-Dibromo-3-cloropropano (DBCP)			
o-Diclorobenceno			
p-Diclorobenceno			
1,2-Dicloroetano			
1,1-Dicloroetileno			
cis-1,2-Dicloroetileno			
trans-1,2-Dicloroetileno			
Diclorometano			
1,2-Dicloropropano			
Di(2-etilhexil)adipato			
Di(2-etilhexil) ftalato			
Dinoseb			
Dioxina (2,3,7,8-TCDD)			
Diquat			
Endothall			
Endrin			
Epiclorohidrina			
Epóxido de heptacloro			
Estireno			
Fenoles o compuestos fenólicos			
Glifosfato			
Heptacloro y epóxido de heptacloro			
Hexaclorobenceno			
Hexaclorociclopentadieno			
Metil-terbutil-éter			
Metoxicloro			
Oxamil (vidato)			
Pentaclorofenol			

Picloram			
Simazina			
Tetracloroetileno			
Tetracloruro de carbono			
Toxafeno			
2,4,5-TP(Silvex)			
1,2,4-Triclorobenceno			
1,1,1-Tricloroetano			
1,1,2-Tricloroetano			
Tricloroetileno			

✓ - Parámetro monitoreado