
Estrategia para potabilización de agua en las cuencas de los ríos Yautepec y Cuautla, Morelos, con un enfoque holístico (Segunda etapa). PROYECTO TC1503.1

Autores:

*Cap. 1, 2 y 6 Ana María Sandoval**

Cap 3, 4 y anexos

Pérez Castrejón Sara
Rivera Huerta María de Lourdes
Gelover Santiago Silvia Lucila
González Herrera Arturo
Javier García Antonio Javier

Cap 5 y anexos

Villegas Mendoza Iván Emmanuel

Cap 7

Cortes Muñoz Juana Enriqueta

Revisión

Piña Soberanis Martín

Colaboradores, por orden alfabético:

Aceves Zamudio Denise
Gómez Rojas Areli
Linares Ocampo José de Jesús
Montes Brito Agustín

*Jefe de Proyecto

ÍNDICE

1	ANTECEDENTES	1
2	OBJETIVOS	2
3	REMOCIÓN DE ARSÉNICO Y 17 β -ESTRADIOL MEDIANTE ELECTROCOAGULACIÓN.....	3
3.1	ANTECEDENTES	3
3.1.1	Relevancia de la presencia de arsénico en muestras de agua en fuentes de abastecimiento de las cuencas de los ríos Yautepec y Cuautla.	3
3.1.2	Relevancia de la presencia de hormonas en fuentes de abastecimiento en la zona de estudio.	4
3.2	INTRODUCCIÓN	5
3.3	METODOLOGÍA.....	7
3.3.1	Métodos analíticos y preparación de agua sintética	8
3.4	EXPERIMENTACIÓN.....	11
3.4.1	Primera etapa: selección de tamaño de grano para el filtro dual arena-antracita 12	
3.4.2	Segunda etapa: Diseño experimental para determinar el efecto de las variables pH, concentración de cloro y dosis de hierro en la remoción de arsénico por electrocoagulación.....	13
3.4.3	Etapas 3 y 4. Evaluación en continuo de la remoción de arsénico.	14
3.4.4	Etapas 3 y 4. Evaluación en continuo de la remoción de arsénico y 17 β -estradiol.	15
3.5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	15
3.5.1	Primera etapa: selección de tamaño de grano para el filtro dual arena-antracita.....	16
3.6	DISEÑO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR EL EFECTO DE LAS VARIABLES PH, CONCENTRACIÓN DE CLORO Y DOSIS DE HIERRO EN LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO POR ELECTROCOAGULACIÓN.	20
3.6.1	Acoplamiento electrocoagulación-floculación en pruebas de jarras.....	20
3.6.2	Electrocoagulación acoplada a la microfiltración (0.1 μ m)	23
3.6.3	Evaluación en continuo de la remoción de As.	27
3.6.4	Evaluación en continuo de la remoción de arsénico y de 17 β -estradiol.....	32
3.7	CONCLUSIONES.....	38
3.8	COMENTARIOS FINALES Y RECOMENDACIONES.....	40
4	TRATAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE LODOS GENERADOS EN LOS PROCESOS DE POTABILIZACIÓN	41
4.1	METODOLOGÍA.....	42
4.1.1	Generación de lodo	43
4.1.2	Selección de los mejores polímeros para el tratamiento de lodo de electrocoagulación.....	44

4.1.3	Tiempo a la filtración (TF).....	45
4.1.4	Determinación del porcentaje de humedad	47
4.1.5	Centrifugación	48
4.1.6	Sólidos suspendidos totales	48
4.2	RESULTADOS	49
4.2.1	Etapa A.....	49
4.2.2	Etapa B.....	62
4.3	CONCLUSIONES.....	67
5	EVALUACIÓN A ESCALA LABORATORIO DE PROCESOS DE NANOFILTRACIÓN Y ÓSMOSIS INVERSA PARA LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO Y DE LA HORMONA 17B-ESTRADIOL.....	69
5.1	INTRODUCCIÓN	69
5.2	APLICACIONES.....	72
5.2.1	Remoción de sólidos disueltos	72
5.2.2	Remoción de precursores DBP	72
5.2.3	Remoción de dureza.....	72
5.2.4	Remoción de color.....	73
5.2.5	Remoción de contaminantes inorgánicos	73
5.2.6	Remoción de patógenos.....	73
5.2.7	Remoción de contaminantes emergentes.....	73
5.3	JUSTIFICACIÓN	73
5.4	OBJETIVO	74
5.5	METODOLOGÍA.....	74
5.5.1	Evaluación de membranas de ósmosis inversa y nanofiltración a escala laboratorio.	74
5.5.2	Preparación de agua cruda	79
5.5.3	Calidad del agua cruda.....	79
5.5.4	Evaluación de dos técnicas de remineralización	80
5.5.5	Pruebas en contactores de calcita.....	83
5.6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	86
5.6.1	Evaluación de membranas de ósmosis inversa y nanofiltración a escala laboratorio.	86
5.6.2	Evaluación de dos técnicas de remineralización	88
5.6.3	Cálculo del costo del proceso de nanofiltración.....	93
5.7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	94
6	DETERMINACIÓN DE LA ESTROGENICIDAD DEL AGUA TRATADA MEDIANTE PROCESOS DE ELECTROCOAGULACIÓN, OSMOSIS INVERSA Y NANOFILTRACIÓN EN LOS PATRONES DE EXPRESIÓN GENÉTICA DEL PEZ <i>Danio rerio</i>	95
6.1	INTRODUCCIÓN	95

6.2	ANTECEDENTES	96
6.2.1	El Sistema Endócrino	96
6.2.2	Sustancias Químicas Disruptivas Endócrinas (CDEs).	97
6.2.3	Fuentes de EDCs en el Ambiente.....	98
6.2.4	Aspectos sobre disrupción endócrina	100
6.2.5	Sustancias de prueba como posibles CDEs	100
6.2.6	Exposición del pez cebrá.....	103
6.2.7	Disección de peces y extracción de ARN	104
6.2.8	Determinación de la concentración, pureza e integridad del ARN total	105
6.2.9	Retrotranscripción del ARN a ADNc	105
6.2.10	Análisis de los niveles de expresión genética por PCR tiempo real de las muestras de ADNc	106
6.3	RESULTADOS	109
6.3.1	Niveles de expresión de genes blanco en diversos órganos de peces expuestos a arsénico a una concentración de 200 µg L ⁻¹	109
6.3.2	Niveles de expresión de genes blanco en diversos órganos de peces expuestos a estradiol a una concentración de 70 ng L ⁻¹	112
6.3.3	Niveles de expresión de genes blanco en diversos órganos de peces expuestos a agua sintética contenido 200 µg L ⁻¹ de arsénico y 70 ng L ⁻¹ de 17β-estradiol.....	113
6.3.4	Niveles de expresión de genes blanco en diversos órganos de peces expuestos al agua producto del proceso Carbón Activado Granular (CAG).	116
6.3.5	Nivel de expresión de los genes blanco en diversos órganos de peces expuestos al agua producto del proceso arena-antracita.	118
6.3.6	Nivel de expresión de los genes blanco en diversos órganos de peces expuestos al agua producto del proceso de osmosis reversa.....	119
6.3.7	Niveles de expresión de genes blanco en diversos órganos de peces expuestos al agua producto del proceso de nanofiltración con la membrana nominal CM90. 120	
6.3.8	Niveles de expresión de genes blanco en diversos órganos de peces expuestos al agua producto del proceso de nanofiltración con la membrana nominal CM70. 122	
6.4	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	124
6.5	CONCLUSIONES.....	126
6.6	MECANISMOS DE REACCIÓN DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES ARSÉNICO Y 17β-ESTRADIOL.....	127
6.6.1	Mecanismos de reacción de los disruptores endócrinos.....	128
6.6.2	Modo de acción del arsénico en el sistema endocrino.....	129
6.6.3	Modo de acción del estradiol en el sistema endocrino.....	131

7	CARACTERIZACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A CONTAMINANTES INORGÁNICOS, ORGÁNICOS Y EMERGENTES.....	134
7.1	OBJETIVO	134
7.2	METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA EXPOSICIÓN Y EVALUACIÓN DE RIESGOS SANITARIOS.	134
7.2.1	Búsqueda y análisis de información	134
7.2.2	Análisis de las estadísticas de morbilidad y mortalidad	135
7.2.3	Tasas de morbilidad	135
7.2.4	Tasa de mortalidad.....	136
7.2.5	Evaluación del riesgo de exposición y efectos a la salud	137
7.2.6	Encuesta	140
7.3	PROBLEMÁTICA EN LA ZONA	141
7.4	ESTADÍSTICAS DE MORBILIDAD Y MORTALIDAD EN EL ESTADO DE MORELOS	144
7.4.1	Principales causas de enfermedad en el estado de Morelos	144
7.4.2	Principales causas de mortalidad general en la República Mexicana y el estado de Morelos.....	153
7.4.3	Estadísticas de mortalidad en los municipios de las cuencas de los ríos Cuautla y Yautepec	158
7.5	Evaluación de la exposición	165
7.5.1	Encuesta	165
7.5.2	Datos de monitoreo de contaminantes regulados y emergentes identificados en las fuentes de abastecimiento (2014)	168
7.5.3	Toxicidad del arsénico y contaminantes emergentes presentes en agua de consumo humano	173
7.6	MODELO CONCEPTUAL DE EXPOSICIÓN	176
8	BIBLIOGRAFÍA.....	182
9	ANEXOS	186
9.1	Determinación de 17 β -estradiol.....	186
9.1.1	Procedimiento del Ensayo	187
9.1.2	Evaluación.....	188
9.1.3	Desarrollo de la técnica	189
9.2	Resultados de análisis de arsénico en laboratorio acreditado.	193

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1 De izquierda a derecha: Mestranol, etinilestradiol, 17 β -estradiol y estrona ...	6
Figura 3-2 Medición y determinación de parámetros.....	9
Figura 3-3 Vista general de la planta semipiloto de electrocoagulación.	11
Figura 3-4 Toma de muestras para el análisis de toxicogenómica.....	15
Figura 3-5 Remociones de hierro (a) y arsénico (b) empleando dos diferentes tamaños de grano para el filtro de arena antracita.	18
Figura 3-6. Variación de la pérdida de carga para filtro grueso, fino y floculador.	19
Figura 3-7. Aspecto del floculador granular. Izq. Se observa una cama de lodos en la parte superior del filtro. Der. Se alcanzan a apreciar burbujas de gas provenientes de la electrocoagulación atrapadas entre las partículas del filtro.	20
Figura 3-8. Diagrama de Pareto, efectos estandarizados de Fe dosificado, pH y cloro libre sobre la remoción de As.	22
Figura 3-9. Superficie de respuesta estimada a pH 7 para remoción de arsénico.	23
Figura 3-10. Diagrama de Pareto, efectos estandarizados de Fe dosificado, pH y cloro libre sobre la remoción de As.	25
Figura 3-11.- Superficie de respuesta estimada para remoción de arsénico.....	26
Figura 3-12. Dosificación de hierro mediante reactor electroquímico, dosis teóricas y reales.....	27
Figura 3-13. Observación del clarificador granular durante la prueba.	28
Figura 3-14. Concentraciones de hierro y arsénico a la salida del clarificador granular.	29
Figura 3-15. Concentraciones de hierro y arsénico a la salida del filtro arena-antracita.	30
Figura 3-16. Concentraciones de hierro y arsénico a la salida del filtro de carbón activado granular.	31
Figura 3-17. Dosificación de hierro mediante reactor electroquímico, Dosis teóricas y reales (Fe LACC, concentraciones de hierro determinadas por AA en el laboratorio LACC y en el laboratorio de potabilización por el método HACH, Fe PT).	32
Figura 3-18. Comparación de la cuantificación de arsénico con método arsenator y el método de absorción atómica (generación de hidruros) para los efluentes de los filtros estudiados.	34
Figura 3-19. Concentraciones de Hierro y Arsénico en el clarificador granular.	35
Figura 3-20. Concentraciones de hierro y arsénico a la salida del filtro arena-antracita, segunda prueba.....	35
Figura 3-21. Concentraciones de hierro y arsénico a la salida del filtro de carbón activado granular.	36
Figura 3-22. Resultados de 17 β -estradiol a la salida de los filtros.....	37

Figura 3-23.- Pérdidas de carga clarificador y filtros.	38
Figura 2-1 Diagrama de flujo de pruebas para selección del polímero más eficiente para remover el agua del lodo.	43
Figura 4-2. Mezcla rápida y sedimentación de lodo en conos Imhoff.	45
Figura 4-3 Experimento para determinar el tiempo a la filtración del residuo espesado.	47
Figura 4-4 Determinación del porcentaje de humedad.	47
Figura 4-5 Centrifugación de lodos.	48
Figura 4-6 Imágenes de determinación de sólidos suspendidos totales.	49
Figura 4-7 Turbiedad del líquido clarificado empleando diferentes polímeros, dosis de 0.5 mg/L.	50
Figura 4-8 Lodo espesado con Bufloc 5426.	51
Figura 4-9 Variación de la turbiedad al aplicar diversas dosis de polímero Bufloc 5426.	52
Figura 4-10 Lodo sedimentado con Bufloc 5290.	53
Figura 4-11 Variación de la turbiedad al aplicar diversas dosis de polímero Bufloc 5290.	54
Figura 4-12 Lodo sedimentado con Bufloc 5631.	54
Figura 4-13 Variación de la turbiedad al aplicar diversas dosis de polímero Bufloc 5631.	55
Figura 4-14. Comparativo del desempeño de los tres mejores polímeros para el tratamiento de los residuos de EC.	56
Figura 4-15 Filtrados de cada polímero: a) Bufloc 5631, b) Bufloc 5426 y c) Bufloc 5290.	57
Figura 4-16 Porcentaje de humedad en el lodo de tres polímeros Bufloc.	60
Figura 4-17 Reducción del volumen del residuo (agua de lavado) con el tratamiento. .	63
Figura 4-18 Comparación gráfica del porcentaje de humedad de lodo sedimentado y centrifugado.	64
Figura 5-1 Típico sistema de membrana de nanofiltración u ósmosis inversa (AWWA, 2007).	71
Figura 5-2 Banco de pruebas de membranas.	75
Figura 5-3 Membrana de ósmosis inversa marca: CSM Modelo: CPA5-LD-4040.	76
Figura 5-4 Membrana de nanofiltración marca: CSM Modelo: NE4040-70.	77
Figura 5-5 Membrana de nanofiltración marca: CSM Modelo: NE4040-90.	78
Figura 5-6 a) Banco de pruebas para membranas de ósmosis inversa, b) Contactor de calcita utilizado para realizar las pruebas.	85
Figura 5-7 Diagrama de Pareto del diseño experimental realizado.	89
Figura 5-8 Gráfico de superficie de respuesta.	90

Figura 5-9 Costo del tratamiento mediante nanofiltración	93
Figura 6-1 Grupo de químicos de algunos disruptores potenciales.....	97
Figura 6-2 Fuentes de CDEs en fuentes de agua.	99
Figura 6-3 Estrógenos esteroides fisiológicos conteniendo anillo A aromatizado.	102
Figura 6-4 Disección de peces expuestos.....	104
Figura 6-5 Procedimiento para la síntesis de ADNc a partir de ARN.	105
Figura 6-6 Curva de amplificación de los genes <i>β-actina</i> , <i>cyp1a</i> , <i>fzr1</i> , <i>ahr2</i> , <i>hmox1</i> , <i>hsp70</i> , <i>mafg1</i> , <i>nfe2l2</i> , <i>gapdh</i> , <i>vtg1</i> , <i>mt2</i> y <i>ef1a</i> en los diferentes órganos de los peces expuestos de las diferentes muestras a) ojo, b) branquias, c) hígado, d) intestino, e) músculo y f) cerebro.	109
Figura 6-7 Expresión promedio de los genes blanco en diversos órganos de peces <i>Danio rerio</i> expuestos a arsénico a una concentración de 200 µg/L.	111
Figura 6-8 Expresión promedio de los genes blanco en diversos órganos de peces <i>Danio rerio</i> expuestos a estradiol a una concentración de 70 ng/L.	113
Figura 6-9 Expresión promedio de los genes blanco en diversos órganos de peces <i>Danio rerio</i> expuestos a agua sintética contenido 200 µgL ⁻¹ de arsénico y 70 ngL ⁻¹ de 17β-estradiol.....	115
Figura 6-10 Expresión promedio de genes blanco en peces <i>Danio rerio</i> expuestos a la muestra al agua producto del proceso Carbón Activado Granular (CAG).	117
Figura 6-11 Expresión promedio de los genes blanco en diversos órganos de peces <i>Danio rerio</i> expuestos al agua producto del proceso arena-antracita.....	118
Figura 6-12 Expresión promedio de genes blanco en peces <i>Danio rerio</i> expuestos al agua producto del proceso de osmosis reversa.	120
Figura 6-13 Expresión promedio de genes blanco en peces <i>Danio rerio</i> expuestos al agua producto del proceso de nanofiltración con la membrana CM90.....	121
Figura 6-14 Expresión promedio de genes blanco en peces <i>Danio rerio</i> expuestos al agua producto del proceso de nanofiltración con la membrana CM70.....	123
Figura 6-15 Mecanismo de acción de disruptores endocrinos (Shanle & Xu, 2011). ..	129
Figura 6-16 Sitios potenciales para interferencia de arsénico con expresión génica mediada por ER. Esta figura resume los puntos donde el arsénico puede ejercer efectos en rutas de señalización dando lugar a la inhibición de expresión génica resultante de exposición a E2. PI3K, fosfoinositol-3 cinasa; MAPK, proteínas cinasas activadas por mitógenos (Watson, 2007).....	131
Figura 6-17 Mecanismo de acción de receptores de hormona esteroide simplificado. El ligando unido a la proteína receptora (R) estimula la disociación de las proteínas de choque térmico (hsps), causando cambios de conformación en el receptor y promoviendo la dimerización del receptor. Esto le permite unirse como un dímero a sitios de ADN nuclear específicos, llamados elementos sensibles a hormona (HRE).	

Posteriormente, ocurre la unión de ADN a HRE para producir un complejo que puede desencadenar o suprimir la transcripción de un conjunto selecto de genes (Weigel, 1996).	132
Figura 7-1. Metodología de evaluación de riesgos a la salud.....	138
Figura 7-2. Modelo conceptual del procedimiento para la evaluación de riesgos sanitarios.	139
Figura 7-3. Evaluación de la exposición a contaminantes emergentes y no regulados a través del agua para uso y consumo humano.	141
Figura 7-4. Incidencia de Diabetes mellitus no insulino dependiente (tipo II) e hipertensión arterial para el período 2005-2014	151
Figura 7-5. Incidencia de diabetes mellitus no insulino dependiente (tipo II) por grupos quinquenales de edad en el año 2014.....	152
Figura 7-6. Incidencia de hipertensión arterial por grupos quinquenales de edad en el año 2014.....	153
Figura 7-7. Efectos a la salud humana asociados con la exposición a arsénico a través del agua de consumo	174
Figura 7-8. Destino y transporte de productos farmacéuticos en el ambiente	178
Figura 7-9. Modelo conceptual de ingreso de contaminantes al ambiente acuático....	179
Figura 7-10. Modelo conceptual de transformación y transporte de acuerdo con las características fisicoquímicas de los contaminantes emergentes.	180
Figura 7-11. Modelo conceptual de las principales rutas de exposición potencial a contaminantes emergentes y no regulados.	181

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Propiedades fisicoquímicas del mestranol y moléculas relacionadas.	6
Tabla 3-2. Niveles de las variables para cada una de las pruebas.....	13
Tabla 3-3. Valores de las variables del diseño 2^k	14
Tabla 3-4. Resultados del diseño de experimentos 2^3 de las pruebas de electrocoagulación acopladas a clarificación en jarras.....	21
Tabla 3-5. Análisis de varianza del diseño 2^3 de las pruebas de electrocoagulación acopladas a la clarificación en jarras.....	21
Tabla 3-6. Resultados del diseño de experimentos 2^3 de las pruebas de electrocoagulación acopladas a la microfiltración con membranas de 0.1 μm	24
Tabla 3-7. Análisis de varianza del diseño 2^3 de las pruebas de electrocoagulación acopladas a la microfiltración (0.1 μm).	24
Tabla 2-1. Listado de polímeros que se utilizaron en este estudio.	44
Tabla 4-2. Valores de turbiedad para cada polímero evaluado, con dosis de 0.5 mg/L.	50
Tabla 4-3 Valores de turbiedad logrados con diferentes dosis de polímero Bufloc 5426.	52
Tabla 4-4 Características del sobrenadante logrados por el polímero Bufloc 5290.....	53
Tabla 4-5. Valores de turbiedad logrados por el polímero Bufloc 5631.	55
Tabla 4-6 Valores de turbiedad en la prueba de resistencia a la filtración.	56
Tabla 4-7 Porcentaje de humedad y sólidos para el Bufloc 5631.....	57
Tabla 4-8 Porcentaje de humedad y sólidos para el Bufloc 5426.....	58
Tabla 4-9 Porcentaje de humedad y sólidos para el Bufloc 5290.....	59
Tabla 4-10 Concentración de sólidos suspendidos totales para cada polímero evaluado.	61
Tabla 4-11 Turbiedad después de centrifugar el lodo.	61
Tabla 4-12 Concentración de sólidos totales (ST) en el lodo centrifugado.....	63
Tabla 4-13 Porcentaje de humedad de lodo centrifugado.	64
Tabla 4-14 Resultados del análisis Espectrofotómetro de Emisión Óptica- Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) al lodo centrifugado.	65
Tabla 4-15 Comparación de los parámetros de interés antes y después de las pruebas con polímeros.	67
Tabla 5-1 Contaminantes que se remueven mediante procesos de membrana (AWWA, 2007).	70
Tabla 5-2. Características de las membranas utilizadas.	75
Tabla 5-3. Calidad del agua cruda (agua sintética).....	79

Tabla 5-4. Descripción de los índices de saturación de Langelier.....	82
Tabla 5-5 Niveles de los factores sujetos a estudio.....	83
Tabla 5-6. Matriz experimental del diseño 2 ³ empleado.....	84
Tabla 5-7 Condiciones promedio de operación de las membranas evaluadas.	86
Tabla 5-8 Calidad del efluente producido por las membranas.	87
Tabla 5-9 Análisis de varianza para el índice de Langelier	88
Tabla 5-10 Correlación entre la dosis de cloruro de calcio y su aporte en dureza, pH, alcalinidad e índice de saturación de Langelier.	91
Tabla 5-11. Correlación entre la dosis de bicarbonato de sodio y su aporte en dureza, pH, alcalinidad e índice de saturación de Langelier.	92
Tabla 5-12. Datos de calidad de agua obtenida con la mezcla de cloruro de calcio y bicarbonato de sodio.	92
Tabla 6-1 Reactivos utilizados para la retrotranscripción.	106
Tabla 6-2 Componentes de reacción para PCR.....	107
Tabla 7-1. Servicios en la vivienda y grado de marginación de los municipios de las cuencas de los ríos Cuautla y Yauatepec.	146
Tabla 7-2. Principales causas de enfermedad en la República Mexicana y el estado de Morelos (2007-2014).	147
Tabla 7-3. Principales causas de mortalidad en la República Mexicana y el estado de Morelos en el período 2000 a 2013.	154
Tabla 7-4. Tasa de mortalidad general por 100,000 habitantes en población general.	158
Tabla 7-5. Tasa de mortalidad por 100,000 habitantes debida a enfermedades infecciosas intestinales en población general.....	159
Tabla 7-6. Tasa de mortalidad por 100,000 habitantes debida a leucemias en población general.....	160
Tabla 7-7. Tasa de mortalidad por 100,000 habitantes debida a diabetes mellitus en población general.	161
Tabla 7-8. Tasa de mortalidad por 100,000 habitantes debida a enfermedades hipertensivas en población general.	162
Tabla 7-9. Tasa de mortalidad por 100,000 habitantes debida a enfermedades isquémicas del corazón en población general.	164
Tabla 7-10. Tasa de mortalidad por 100,000 habitantes debida a enfermedades cerebrovasculares en población general.	164
Tabla 7-11. Descripción de la muestra.	165
Tabla 7-12. Principales padecimientos manifestados por los participantes en la encuesta.....	166
Tabla 7-13. Fármacos que consumen algunos participantes en la encuesta, por prescripción médica.....	167

Tabla 7-14. Fármacos, hormonas y productos para el cuidado personal identificados en las fuentes de abastecimiento seleccionadas (ng/L).	170
Tabla 7-15. Fármacos, hormonas y productos para el cuidado personal identificados en fuentes de abastecimiento y agua de consumo humano en la zona de interés.....	172
Tabla 7-16. Uso terapéutico y posibles impactos negativos a la salud de los fármacos y hormonas identificados en aguas residuales.....	175
Tabla 7-17. Cocientes de peligro estimados a partir del consumo promedio de agua y la dosis aceptable diaria para cada contaminante emergente.....	177

RESUMEN

En el año 2014 se realizó la primera etapa de este estudio, en ella se identificaron contaminantes inorgánicos y emergentes en fuentes de abastecimiento y plantas potabilizadoras de las cuencas de los ríos Cuautla y Yautepec.

La evaluación de exposición humana a la gama de contaminantes identificados en el agua de consumo humano mostró que el arsénico (As) y la hormona sintética mestranol son altamente relevantes por su concentración (el As superó el límite de 25 µg/L establecido en la normativa vigente, en tanto que el mestranol superó los 2.5 ng/L propuestos en las guías australianas para reciclamiento de agua con fines potables), así que, posiblemente, la población esté ingiriendo dosis superiores a las aceptables, el riesgo es aún mayor considerando que ambos contaminantes son carcinógenos de humanos y disruptores endócrinos.

Para esta segunda etapa del año 2015, se planteó dar continuidad a la evaluación de riesgos sanitarios, y evaluar dos tecnologías de tratamiento para potabilización del agua a fin de remover As y *17β-estradiol* (molécula modelo de la movilidad y degradabilidad del mestranol).

Una de las tecnologías utilizadas para la remoción de arsénico (As) y *17β-estradiol* fue el tratamiento semipiloto en el que se acopló la electrocoagulación a la floculación en gravas gruesas y filtración. La filtración se realizó en dos filtros en paralelo, el primer filtro fue empacado con arena:antracita y el segundo con carbón activado granular.

La planta semipiloto se trabajó a un flujo continuo de 2.6 L/min. Para cada ensayo se preparó agua sintética empleando agua del pozo IMTA a la cual se añadieron: una sal de arsénico para obtener una concentración de As total de 200 µg/L y estradiol, 70 ng/L, inicialmente disuelto en metanol. Se hizo un ajuste de conductividad con sal común a valores del orden de los 400 µS/cm. Al agua cruda, previo a su ingreso al tratamiento, se adicionó hipoclorito de sodio; equivalente a 5-6.5 mg/L de cloro libre, para provocar la oxidación completa del hierro y favorecer la remoción de arsénico. Con base en los

resultados de las pruebas de tratabilidad se demostró que se puede remover hasta un 98% de arsénico con el filtro de arena:antracita y un 92 % en el filtro de carbón activado. Las concentraciones de arsénico y de hierro se mantuvieron por debajo de los límites establecidos en la modificación 2000 a la NOM-127-SSA1-1994. Fue posible mantener esta eficiencia, al menos, durante 6 horas sin necesidad de retrolavar los filtros. Mientras que el hierro producido in situ en la etapa de electrocoagulación también se removió eficazmente durante la filtración y no hubo cambios sustanciales en el pH (7 a 8) ni incremento en los sólidos disueltos totales (390 a 400 mg/L). La relación en masa hierro: arsénico osciló en 53 ± 7.5 . El cloro libre en el efluente del tratamiento fue menor a 0.05 mg/L.

Considerando ofrecer un tratamiento integral, los residuos del proceso de la planta semipiloto generados por la remoción arsénico y 17β -estradiol del agua de lavado de los filtros y del clarificador granular fueron sometidos a tratamiento fisicoquímico para su compactación. El tratamiento integral de estos residuos consistió en concentrar el lodo tanto como fuera posible con la finalidad de manejarlo y disponerlo adecuadamente; así como retornar el agua retirada del lodo nuevamente a tratamiento. Se efectuaron pruebas a escala de laboratorio en las que se evaluaron diferentes tipos y dosis de polímeros para aglomerar el lodo y retirar el agua sobrenadante mediante sedimentación, determinándose que los polímeros con carga aniónica dan mejores resultados. Con las condiciones de tratamiento: dosis de 0.4 mg de polímero/L de lodo, un gradiente de velocidad en el mezclado, G , de 300 s^{-1} y un tiempo de sedimentación de 30 minutos, se logró reducir el volumen del agua de lavado de 55 L a 5 L de lodo con un porcentaje de humedad del 99.4%. El agua retirada del lodo contenía 540 $\mu\text{g/L}$ de arsénico y 14.5 mg/L de hierro, concentraciones altas para retornarlas al tratamiento. El lodo después de acondicionamiento químico se centrifugó empleando un equipo a escala laboratorio, el volumen de lodo centrifugado se redujo a 500 mL con un porcentaje de humedad del 94%. Este contenido de humedad es alto por lo que es recomendable buscar otros polímeros que pudieran hacer más eficiente el acondicionamiento químico. La composición del lodo centrifugado revela que los

elementos químicos que formaron la mayor parte del lodo fueron: hierro (412 mg/L), silicio (102 mg/L), calcio (91.23 mg/L), fósforo (45.84 mg/L) arsénico (35.88 mg/L) y aluminio (19.36 mg/L).

El sistema de osmosis inversa, es otra de las tecnologías aplicadas también para la remoción de la mezcla arsénico-*17βestradiol*, se evaluaron tres membranas presentando un elevado rechazo de arsénico (100% para la membrana de ósmosis inversa y 99.99% para ambas membranas de nanofiltración). Cada una de ellas rechazó en diferente proporción las sales, y requirió diferente presión para obtener un mismo caudal de agua producto. Determinándose que la mejor membrana para llevar a cabo el proceso es la de nanofiltración que tiene un porcentaje nominal de rechazo de sales divalentes moderado (45-70%), y requiere de una menor presión en comparación con las otras dos evaluadas, y además, tiene el menor costo energético.

De las dos técnicas de remineralización evaluadas (contactor de calcita y adición de cloruro de calcio y bicarbonato de sodio) se determinó que la más adecuada es el uso de contactores de calcita, siendo una técnica económica, práctica de utilizar y con menos riesgos en caso de una sobredosificación. De los factores estudiados que afectan al proceso, se determinó que únicamente el pH del influente es el que tiene un efecto estadísticamente significativo en el índice de langelier del agua producto, asimismo, se determinó que la velocidad del agua en el contactor puede ser de 8 m/h y el tiempo de residencia de 10 min. Estos criterios de diseño permiten construir contactores más pequeños y, por lo tanto, con un menor costo de inversión.

Por otro lado, el agua tratada de los procesos antes descritos (electrocoagulación y membranas) se expuso a pruebas de biología molecular empleando como modelo biológico el pez *Danio rerio* con el objetivo de evaluar la expresión genética en peces cebras expuestos al agua preparada con la mezcla arsénico (200 µg/L) y estradiol (70 ng/L). Los diferentes lotes de peces se expusieron al agua tratada de los siguientes procesos: 1) filtración mediante carbón activado; 2) filtración con arena antracita; 3) osmosis inversa; 4) Nano filtración con la membrana con CSM90 y 5) Nanofiltración con

la membrana con CSM70. Cada lote de peces fue expuesto durante 30 días y después sacrificados y disectados para la extracción de seis órganos (ojo, branquias, hígado, intestino, músculo y cerebro), se realizó extracción de RNA de cada órgano, posteriormente fueron transcritos a cDNA y finalmente se llevó a cabo el análisis de PCR-tiempo real para determinar la expresión genética. Los genes analizados fueron *cyp1a*, *fzr1*, *hmox*, *hsp70*, *gapdh*, *mafg1*, *vtg1* y *ef1a*.

Como resultado de la exposición, se obtuvo que los genes que se expresaron en la mayoría de los órganos estudiados fueron *ef1a*, *cyp1a*, *fzr1*, *hmox* y *hsp70*, de los cuales ya se cuenta con información sobre su función celular. El gen *cyp1a* tiene actividad de oxido-reductasa, aromatasa, entre otras; y está involucrado en el metabolismo de compuestos aromáticos. El gen *hmox* responde a estímulos por xenobióticos y sustancias tóxicas, además está involucrado en diversas reacciones del metabolismo por su actividad hemo-oxigenasa. Los genes *ef1a* y *hsp70*, están involucrados en la biosíntesis y correcto plegamiento de las proteínas, respectivamente. Cabe mencionar que el gen *hsp70* se sobreexpresa en respuesta a estrés térmico o en presencia de sustancias tóxicas, la actividad de las proteínas *hsp70* son de suma importancia en la fisiología celular. El gen *fzr1* está involucrado en la regulación de la división celular.

Las pruebas de biología molecular confirman la expresión de genes debido a la estimulación recibida por los xenobióticos expuestos. Vale la pena mencionar, que de los genes que se expresaron o reprimieron, la expresión del gen *vtg1* se mostró únicamente en los lotes de peces expuestos durante 30 días a las tres aguas sintéticas de arsénico, de estradiol y de la mezcla de ambos, atribuyéndoseles una actividad estrogénica, mientras que, en las aguas producto de todos los procesos analizados no mostraron la expresión de este gen.

Esta investigación se ubica en la línea de acción de seguridad hídrica, dado que los procesos de electrocoagulación y nanofiltración para la remoción de compuestos emergentes mostraron una eficiencia de remoción superior al 92% por lo que el agua

tratada cumple con la modificación del año 2000 a la NOM-127 SSA1-1994 para el caso del arsénico.

Es importante señalar que, el Área de Cromatografía del Laboratorio de Calidad del Agua quien realizó la determinación analítica de mestranol en muestras del agua sintética, así como del agua producto de cada uno de los procesos acepta que su método presenta una interferencia, lo que impidió la adecuada cuantificación de esta hormona.

En cuanto a los riesgos sanitarios encontrados en las zonas de interés, las principales causas de morbilidad y mortalidad explican el consumo de antibióticos, antihipertensivos, hipoglucemiantes, analgésicos no esteroideos, corticosteroides y antihistamínicos.

Los 22 contaminantes identificados en las aguas y aguas para consumo humano, fueron consistentes con los fármacos de mayor consumo.

Considerando la frecuencia, magnitud e intensidad de la exposición, solamente el mestranol representa en la actualidad un riesgo potencial para la salud humana. Se desconocen los riesgos a mediano y largo plazos asociados con la exposición a otros contaminantes emergentes.

Asimismo, en la actualidad, se identificó riesgo significativo a la salud asociado con la exposición a arsénico, en las poblaciones que se abastecen del manantial Huautla, pozo Huaxtla, Rancho Viejo, Quilamula, pozo San José de Pala y el pozo de la Unidad Paseo Tezoyuca.

1 ANTECEDENTES

En el año 2014, se realizó la primera etapa de este estudio, en ella se identificaron contaminantes inorgánicos, orgánicos y emergentes en fuentes de abastecimiento subterráneas y superficiales de las cuencas de los ríos Cuautla y Yautepec del estado de Morelos, así como en plantas potabilizadoras. De acuerdo con la evaluación de exposición humana a la gama de contaminantes regulados y emergentes identificados en el agua de consumo humano, el arsénico y la hormona sintética mestranol tuvieron alta relevancia sanitaria; el primero estuvo presente en concentraciones superiores al límite de 25 µg/L establecido en la modificación del año 2000 de la NOM-127-SSA1-1994 en tanto que el mestranol, superó al valor de 2.5 ng/L propuesto en las guía australianas para reciclamiento de agua con fines potables (2008), de tal manera que en la actualidad la población está ingiriendo dosis superiores a las que se consideran aceptables. Ambos contaminantes poseen un alto grado de peligrosidad para la salud humana: son carcinógenos de humanos y tienen potencial para alterar el sistema endócrino. En paralelo a la evaluación de calidad del agua de consumo humano en sitios seleccionados de las cuencas, se trabajó con el pez *Danio rerio* como organismo modelo para evaluar la presencia de disruptores endócrinos en muestras ambientales. Las mezclas de productos químicos estrogénicos han revelado su capacidad para actuar de manera singular o en combinación, de acuerdo con los principios de adición-concentración. Esto significa que, colectivamente, pueden representar un riesgo ambiental y sanitario significativo, incluso cuando cada componente está presente en concentraciones traza y podría no tener efecto individualmente. Por lo anterior, para esta segunda etapa, se propone trabajar con los dos contaminantes de mayor toxicidad en cuatro vertientes: a) Como una propuesta de solución, evaluar dos tecnologías de tratamiento para potabilización del agua, a fin de remover los dos contaminantes identificados como prioritarios por su concentración y potencial toxicológico b)

Caracterización y evaluación a escala laboratorio, de un tratamiento de lodos y residuos de los procesos de potabilización probados c) Propuesta de posibles mecanismos de estrogenicidad asociada a los dos contaminantes identificados como prioritarios d) Caracterización de la exposición humana a contaminantes regulados, emergentes y no regulados (diferentes escenarios de exposición)

2 OBJETIVOS

1. Evaluar a escala piloto los procesos de electrocoagulación (EC) y nanofiltración (NF) para la remoción de arsénico y la hormona 17 β -estradiol en agua.
2. Caracterizar el lodo producido por la EC, determinar su deshidratabilidad mediante tratamientos fisicoquímicos a escala laboratorio, así como analizar la estabilidad del lodo deshidratado en relación a los contaminantes removidos del agua.
3. Determinar la estrogenicidad del agua tratada mediante EC y NF en los patrones de expresión genética del pez *Danio rerio*.
4. Caracterizar la exposición a contaminantes inorgánicos, orgánicos y emergentes en municipios de las cuencas de los ríos Yautepec y Cuautla.

3 REMOCIÓN DE ARSÉNICO Y 17 β -ESTRADIOL MEDIANTE ELECTROCOAGULACIÓN

3.1 ANTECEDENTES

3.1.1 Relevancia de la presencia de arsénico en muestras de agua en fuentes de abastecimiento de las cuencas de los ríos Yautepec y Cuautla.

La EPA publicó en 1999 algunos criterios sobre el contenido de arsénico en agua. Un criterio de máxima concentración (CMC, por sus siglas en inglés) de 340 $\mu\text{g/L}$ y el criterio de concentración continua (CCC) de 150 $\mu\text{g/L}$ para ecosistemas de agua dulce (Tišler y Zagorc-Končan, 2002).

El CMC es un estimado de la concentración más alta de una sustancia en agua superficial a la cual puede estar expuesta una comunidad acuática durante un corto lapso, sin que resulte en un efecto inaceptable.

Por su parte el CCC se refiere a un nivel al que dicha comunidad estará expuesta indefinidamente.

El valor de arsénico presente en el agua de la presa de Huautla, de 178 $\mu\text{g/L}$, está un 25% por arriba del CCC. Al estar por encima del CCC, se desconocen los efectos que pudieran presentarse en la comunidad acuática. Adicionalmente, esta concentración rebasa en más de siete veces el límite permisible establecido en la Modificación 2000 de la NOM-127, por lo que no debiera ser ingerida por la población.

El pez *Danio rerio*, considerado una buena referencia para estudios de toxicidad (Prieto *et al.*, 2006), fue utilizado para evaluar los efectos debidos a la presencia de arsénico a las concentraciones encontradas en el agua de pozo Zimapán.

La toxicidad del arsénico a peces es bien conocida. El arsénico no está entre las sustancias más tóxicas, la toxicidad comienza a concentraciones superiores a 1 mg/L (Dojlido y Best 1993). En general la LC_{50} para trióxido de arsénico y arsenito de sodio

para diferentes peces está entre 0.05 y 59 mg/L dependiendo de la edad, especie y condiciones de prueba.

3.1.2 Relevancia de la presencia de hormonas en fuentes de abastecimiento en la zona de estudio.

En 2014 se realizó el análisis de compuestos emergentes en muestras de las fuentes de abastecimiento de la Cuenca. Uno de los compuestos que apareció en al menos dos fuentes de abastecimiento fue el mestranol. Esta hormona esterooidal sintética ha sido utilizada ampliamente como anticonceptivo y también en terapia de reemplazo hormonal.

Respecto a los estrógenos esteroidales 17β -estradiol, 17α -etinilestradiol y la estrona, relacionados estructuralmente con el mestranol, fueron estudiadas por Schenck *et al.* (2012), quienes evaluaron el efecto sobre la estrogenicidad de muestras sintéticas sometidas a los procesos típicos de potabilización, encontrando que las moléculas son sensibles al ataque por cloro generando subproductos. El análisis de estrogenicidad del agua antes y después del tratamiento mostró una disminución significativa que se relaciona a la desaparición de las moléculas originales e indica que los subproductos de la cloración no contribuyen a la estrogenicidad. Por su parte el tratamiento de coagulación no es capaz de remover este tipo de contaminantes, sea que se empleen hidróxidos de aluminio o de hierro. De acuerdo con estos autores, sólo la aplicación de carbón activado, posterior a la coagulación, mostró remociones en el orden de 20 a 80% para concentraciones de los estrógenos de 0.5 y 1 $\mu\text{g/L}$; los autores atribuyeron la variabilidad observada tanto a diferencias en la calidad del agua utilizada como a la diferente hidrofobicidad de las moléculas. La cloración resultó más efectiva que los otros procesos estudiados.

Previamente, Bundy *et al.*, 2007, habían informado que un tren convencional de coagulación, floculación, filtración por gravedad en un medio dual (arena-antracita) a nivel semipiloto podía remover solamente de 6.9 a 12% de una concentración inicial de

1 µg/L de estradiol. Esta remoción se incrementó a más del 93% cuando el efluente del tren pasó por carbón activado granular.

Estos datos cobran relevancia pues la presencia ambiental de arsénico podría estar combinada a la presencia de 17β-estradiol.

En la literatura hay evidencia de que estas dos sustancias, arsénico y 17β-estradiol son capaces de inducir el desarrollo de cáncer en células epiteliales de próstata en humanos (Treas *et al.*, 2013). Estudios sugieren que la exposición crónica al arsénico y/o estrógeno (17β-estradiol) causa daño en el ADN, y el aumento de la supervivencia a través de la inhibición de la respuesta de apoptosis (muerte celular programada). Se ha mostrado también que la exposición crónica tanto a arsénico como a estrógeno provoca la interrupción de los procesos epigenéticos normales mediante la alteración de la expresión de genes implicados en la metilación del ADN y la modificación de histonas. Ahora bien, el mecanismo exacto a través del cual estos cambios epigenéticos inducidos por el arsénico y/o estrógeno causan mayor crecimiento y la supervivencia celular aún no se han dilucidado. Más aún, los efectos combinados de arsénico y estrógeno en los procesos epigenéticos y sus consecuencias sobre el crecimiento celular y la transformación son desconocidos. En su estudio Treas *et al.*, investigaron los efectos del arsénico (arsenito), el estrógeno (17β-estradiol), y su combinación en el crecimiento celular, transformación, y cómo los cambios epigenéticos inducidos por arsénico y/o estrógeno podrían estar involucrados en la inhibición de la respuesta MMR-apoptótica que podría dar lugar a un aumento de la supervivencia celular.

3.2 INTRODUCCIÓN

Con base en la caracterización de las fuentes de abastecimiento de la cuenca del río Yautepec-Cuautla que realizó el IMTA en el 2014, en dos de las once fuentes de abastecimiento seleccionadas se detectó arsénico (As), la concentración más alta la presentó el Manantial de Huautla con 0.187 mg/L y la otra fue el pozo de

abastecimiento de la unidad Paseo Tezoyuca con 0.0755 mg/L de As total. En cuanto a los contaminantes emergentes, se detectaron 22 (entre fármacos y hormonas), de éstos, solo el Mestranol presentó un cociente de peligro de 1.6×10^{-2} de acuerdo con la Dosis Diaria Ingerida (ADI) 0.071 ng/Kg/d. Sin embargo, debido a que en el IMTA actualmente no se cuantifica esta hormona, se buscó una molécula que pudiera servir como modelo de movilidad y degradabilidad del mestranol y que además pudiera cuantificarse en el laboratorio de calidad del agua del IMTA.

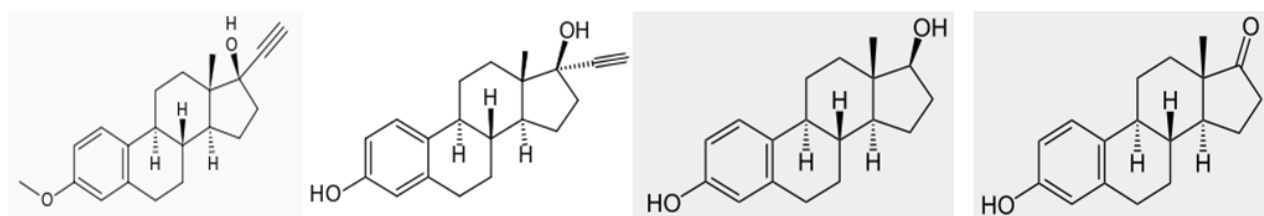


Figura 3-1 De izquierda a derecha: Mestranol, etinilestradiol, 17β-estradiol y estrona

Después de analizar las estructuras (Figura 3-1) y la información sobre propiedades fisicoquímicas de distintas hormonas, se seleccionó el 17β-estradiol, como modelo del posible comportamiento del mestranol.

Tabla 3-1 Propiedades fisicoquímicas del mestranol y moléculas relacionadas.

Molécula	Fórmula	P.M. (g/gmol)	Solubilidad en agua (mg/L)	log K_{ow}
Mestranol	$C_{21}H_{26}O_2$	310.43	3.77	4.61
17 α etinilestradiol	$C_{20}H_{24}O_2$	296.4	11.3	3.67
17β- estradiol	$C_{18}H_{24}O_2$	272.4	13	4.01
Estrona	$C_{18}H_{22}O_2$	270.4	13	3.13

En este contexto, los niveles de concentración de arsénico total y 17 β -estradiol en el agua cruda que se establecieron para esta etapa del estudio fueron 0.2 mg/L (200 μ g/L) de As total y 70 ng/L de 17 β -estradiol.

El IMTA desde hace varios años ha diseñado plantas potabilizadoras de filtración directa utilizando cloruro férrico como coagulante - el hierro es un catión muy efectivo para remover arsénico. Sin embargo, para aquellas fuentes de abastecimiento donde las concentraciones de arsénico sean mayores a 100 μ g/L se requerirá incrementar la dosis del coagulante, esta acción incrementaría al mismo tiempo la concentración del coagulante (cloruros en este caso) en el agua tratada y con ello elevaría los sólidos disueltos totales; aunado a esto, se tendría que modificar la operación de los filtros por el incremento en la dosificación del coagulante. Es por eso que en este estudio se propuso el uso de la electrocoagulación, en donde únicamente se dosifica el catión coagulante (hierro) seguido de una clarificación granular como pretratamiento a la filtración para incrementar la eficiencia en la separación de los hidróxidos metálicos que remueven el arsénico y a su vez alargar las carreras de filtración.

Por otro lado, la remoción de contaminantes emergentes como fármacos y hormonas comienza a ser prioritaria. Algunos reportes (Snyder *et al.*, 2003) señalan que el uso de carbón activado disminuye la concentración de 17 β -estradiol, alcanzando remociones superiores al 85% para una concentración de 100 ng/L. Por esta razón, se propuso evaluar la remoción del 17 β -estradiol utilizando un filtro convencional de arena: antracita y uno de carbón activado granular (CAG).

3.3 METODOLOGÍA

En esta sección se presentan varios aspectos que comprenden: las determinaciones analíticas, cómo se preparó el agua sintética empleada en las pruebas y las condiciones experimentales en que se realizaron las pruebas, principalmente.

3.3.1 Métodos analíticos y preparación de agua sintética

Para todas las pruebas se ajustó la conductividad eléctrica (CE) a valores de 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ o cercanos a él con NaCl; la (CE) se midió con un conductímetro marca Hach, modelo Sension 5.

El arsénico se midió mediante una técnica fotométrica con el equipo Arsenator. El método se basa en una variación del método Gutzeit, y consiste en transformar el arsénico presente en el agua, en gas arsina (AsH_3) con la ayuda del ácido sulfámico y la tableta de borohidruro de sodio que luego reacciona con bromuro mercuríco contenido en un filtro del equipo, el cual muestra una coloración marrón proporcional a la concentración de arsénico (en $\mu\text{g}/\text{L}$) en la muestra, el equipo que se utilizó en estas pruebas fue un Arsenator marca Palintest modelo Digipass. Algunas muestras también se enviaron a un laboratorio acreditado ante la EMA (Entidad Mexicana de Acreditación) para su análisis por absorción atómica y validación de los métodos rápidos.

El hierro se determinó mediante una técnica colorimétrica con el método FerroVer, para realizar una cuantificación correcta del hierro es necesario agregar una gota de HNO_3 a un volumen de 40 mL de muestra para disolver las partículas que se hayan aglomerado, posteriormente se hace la preparación de la disolución y se vierte a una celda el volumen de 25 mL, se agrega un sobre del reactivo FerroVer que reacciona con el hierro disuelto y la mayoría de las formas insolubles del hierro presentes en la muestra para producir hierro ferroso soluble, el hierro ferroso reacciona con la fenantrolina 1,10 (reactivo FerroVer) para formar un color naranja proporcional a la concentración de hierro, después de transcurridos 3 minutos de haber disuelto el reactivo las muestras se midieron a 510 nm en un espectrofotómetro de la marca Hach modelo DR 2800. Esta técnica utiliza agua desionizada como blanco. Algunas muestras también se enviaron a un laboratorio acreditado ante la EMA (Entidad Mexicana de Acreditación) para su análisis por absorción atómica y validación de los métodos rápidos.

Para aquellos experimentos en los que se requirió la presencia de cloro libre se adicionó hipoclorito de sodio de marca comercial, el pH se modificó mediante la adición de ácido clorhídrico o hidróxido de sodio según el valor requerido. El cloro se analizó por la técnica colorimétrica de DPD -Cloro libre, el cloro presente en la muestra en forma de ácido hipocloroso y/o de ión hipoclorito (cloro libre o cloro libre disponible) reacciona inmediatamente con el DPD (N,N-dietil p-fenileno-diamina) para formar un color rosa proporcional a la concentración de cloro, las muestras se miden a 530 nm inmediatamente después de disolver el reactivo en un espectrofotómetro de la marca Hach modelo DR 2800. Para las mediciones de pH se utilizó el potenciómetro Orión modelo 420 A+.



Figura 3-2 Medición y determinación de parámetros.

Las determinaciones de la hormona se realizaron al día siguiente de las pruebas de tratabilidad utilizando la técnica de ELISA con un KIT de la Marca Abraxis, las

mediciones se realizaron por triplicado para todas las muestras (agua cruda, agua tratada y blancos). (

Para preparar las muestras sintéticas se utilizó agua del grifo (agua del pozo del IMTA), caracterizada por su conductividad baja ($270 \mu\text{S}/\text{cm}$). La conductividad eléctrica (CE) se ajustó a un valor cercano a $400 \mu\text{S}/\text{cm}$ con cloruro de sodio. Para todas las pruebas se adicionó arsenato de sodio marca Spectrum lote S1130 para obtener una concentración de arsénico total de $0.2 \text{ mg}/\text{L}$ ($200 \mu\text{g}/\text{L}$). El agua se homogenizó con la recirculación de la misma con ayuda de una bomba centrífuga, cada vez que se preparó se caracterizó para verificar que las concentraciones tuvieran los valores requeridos. Cabe recordar que estas concentraciones fueron definidas con base en la caracterización de las fuentes de abastecimiento que se realizó en el 2014.

En el caso de la hormona, para incrementar la concentración de 17β -estradiol (E_2) en el agua sintética se preparó una disolución madre con una concentración de $100 \times 10^6 \text{ ng}/\text{L}$, para lo cual se pesaron 10 mg de E_2 (de la marca Sigma Lote SLBL7310V) y se disolvieron en 100 mL de metanol grado HPLC. A partir de esta disolución se prepararon las siguientes según la concentración y volumen requerido en la prueba. Para preparar $10\,000 \text{ L}$ de agua sintética para la prueba de membranas y electrocoagulación en la planta semipiloto, de la solución madre se tomó una alícuota de 10 mL y se diluyó en 1 litro de metanol grado reactivo, de esta disolución se tomó un volumen de 700 mL y se adicionó al volumen de $10\,000 \text{ L}$ de agua contenidos en la cisterna, para homogenizar el reactivo se recirculó el agua con una bomba sumergible y se mantuvo una aeración durante 15 min .

Cabe señalar que estas concentraciones fueron definidas con base en la caracterización de las fuentes de abastecimiento que se hizo en el 2014.

3.4 EXPERIMENTACIÓN

Las pruebas se realizaron en la planta semipiloto del laboratorio de Potabilización del IMTA. En la que se puede apreciar una vista general de dicha planta.

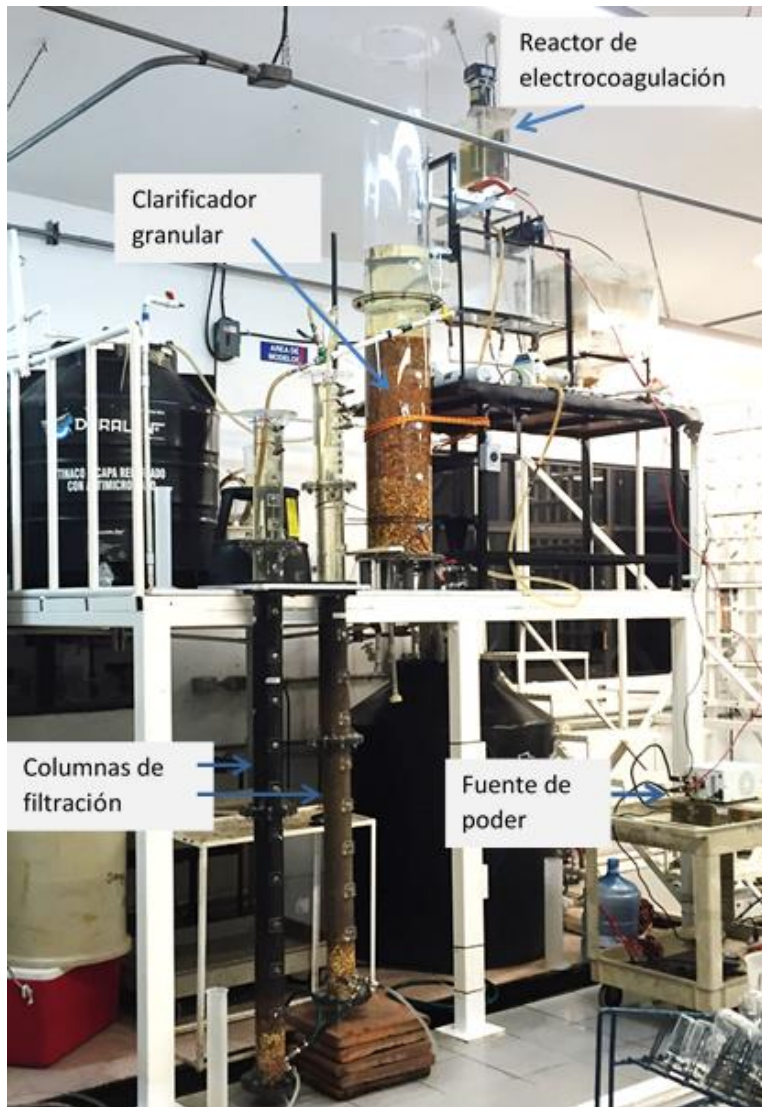


Figura 3-3 Vista general de la planta semipiloto de electrocoagulación.

Las pruebas de tratabilidad se realizaron en cuatro etapas:

A) Acoplamiento de planta semipiloto y selección de tamaño de grano para filtro dual arena-antracita.

B) Diseño experimental para determinar el efecto de las variables pH, concentración de cloro y dosis de hierro en la remoción de arsénico por electrocoagulación.

B1.- Acoplamiento electrocoagulación-floculación en jarras

B2.- Acoplamiento electrocoagulación-microfiltración

C) Evaluación en continuo de la remoción de As.

D) Evaluación en continuo de la remoción de arsénico y de 17 β -estradiol.

3.4.1 Primera etapa: selección de tamaño de grano para el filtro dual arena-antracita

La primera etapa consistió en el acoplamiento del reactor de electrocoagulación con electrodos de acero a un clarificador granular de flujo ascendente seguida por la filtración dual arena-antracita. Se compararon dos granulometrías de arena-antracita. La primera de ellas fue con unas características de grano que el IMTA ha implementado ya en los sistemas de filtración directa para la comarca Lagunera, y la otra granulometría fue de tamaño de grano más grueso. Ambos se compararon en cuanto a la eficiencia de remoción de hierro, arsénico e incremento en la pérdida de carga.

Para estas pruebas el agua sintética se preparó únicamente con ajuste de conductividad a 400 μ S/cm y concentración inicial de arsénico a 200 μ g/L. En el reactor de electrocoagulación se variaron las concentraciones de hierro y cloro dosificado, en general se verificó el funcionamiento del acoplamiento y se realizaron los ajustes necesarios para su buen desempeño.

Con los resultados de esta etapa se seleccionó el filtro dual para etapas posteriores.

El agua sintética se pasó a través de un reactor electroquímico con electrodos de sacrificio de acero, al que se aplicó una corriente continua. La corriente fue calculada, según la Ley de Faraday, para obtener una dosis teórica de hierro de 8.5 mg/L. La corriente fue suministrada con una fuente marca Sorensen DLM 40-15 con cambios de polaridad realizados manualmente cada hora.

3.4.2 Segunda etapa: Diseño experimental para determinar el efecto de las variables pH, concentración de cloro y dosis de hierro en la remoción de arsénico por electrocoagulación.

Con el objetivo de conocer el efecto del pH, la concentración de cloro libre y de la dosis de hierro sobre la remoción de arsénico en el sistema de trabajo, compuesto por el reactor abierto de electrocoagulación a flujo continuo, seguido de una etapa de mezcla rápida, floculación y finalmente sedimentación, se realizaron experimentos aplicando la matriz de un diseño factorial 2^k con tres valores centrales, siendo $k=3$.

Las variables se exploraron a dos niveles y las condiciones de prueba se establecieron de acuerdo a la matriz de prueba que se ilustra en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2. Niveles de las variables para cada una de las pruebas.

$2^3 + 3$ centros = 11 pruebas			
Prueba	pH	Cl ₂	Dosis de Fe
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0

Los valores máximo, mínimo y medio que se trabajaron fueron (

Tabla 3-3):

Tabla 3-3. Valores de las variables del diseño 2^k

	Mínimo	Máximo	Medio
pH	6	8	7
Cl₂	0.5	6.5	3.5
Dosis Fe	2	8	5

Las variables de respuesta estudiadas fueron: la concentración de arsénico removida, la concentración de hierro removida así como la concentración de cloro removida.

Las concentraciones de estas especies fueron medidas en dos tipos de efluentes. Por un lado en muestras obtenidas del acoplamiento de la electrocoagulación a clarificación en jarras y por otro de aquellas obtenidas del acoplamiento de la electrocoagulación a microfiltración (a través de una membrana de 0.1 µm).

3.4.3 Etapa 3. Evaluación en continuo de la remoción de arsénico.

En esta etapa se realizó una corrida de 6 horas, la finalidad de esta prueba fue evaluar el desempeño del sistema durante un mayor periodo de tiempo, bajo las condiciones de prueba sugeridas por los resultados encontrados en las etapas anteriores y también evaluar dos tipos de material filtrante.

Para la etapa de filtración en esta corrida se emplearon dos filtros en paralelo, uno de ellos dual (arena-antracita) seleccionado a partir de los resultados de la Primera etapa (3.5.1), y el otro, empacado únicamente con carbón activado granular.

3.4.4 Etapa 4. Evaluación en continuo de la remoción de arsénico y 17 β -estradiol.

Esta prueba fue realizada con agua sintética conteniendo una concentración de 0.2 mg/L de arsénico y 70 ng/L de la hormona 17 β -estradiol, a la que se ajustó la conductividad a aproximadamente 400 μ S/cm y la concentración de cloro entre 5.5 – 6 mg/L como cloro libre. Las condiciones de proceso se seleccionaron para tener: hierro dosificado teórico de 8.5 mg/L, concentración de cloro a la entrada del reactor \geq 5 mg/L, y pH lo más próximo a 7.

El tren de tratamiento fue exactamente el mismo que se utilizó en la etapa 3, es decir: reactor de electrocoagulación, mezcla rápida, clarifloculador de gravas y filtros de arena-antracita y carbón activado granular, en paralelo.

Los efluentes de los filtros (Figura 3-4) fueron enviados a análisis de toxicogenómica.



Figura 3-4 Toma de muestras para el análisis de toxicogenómica.

Los resultados de estos análisis serán presentados y discutidos en el Capítulo 6 de este informe.

3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En este capítulo se presentan los resultados para cada prueba, analizando los parámetros relevantes del proceso de acuerdo a la secuencia en que circula el agua en el sistema. Es decir, se presentan los resultados relevantes obtenidos en el reactor

(esencialmente producción de hierro, en su caso valores de la remoción de arsénico alcanzada al filtrar el efluente del reactor o de la mezcla rápida, a través de membranas de $0.1 \mu\text{m}$), posteriormente se presentan valores medidos a la salida del floculador y finalmente las concentraciones y valores de interés medidos a la salida del filtro o filtros utilizados.

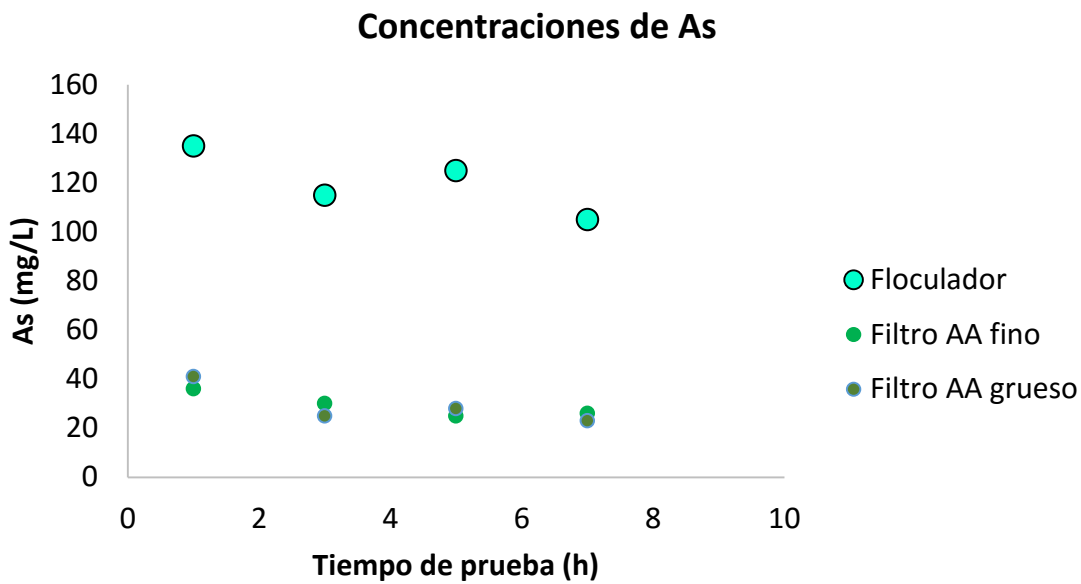
3.5.1 Primera etapa: selección de tamaño de grano para el filtro dual arena-antracita.

Experiencia previas realizadas por Martín *et al.*, (2008) mostraron que es posible realizar la remoción de arsénico por electrocoagulación empleando reactores cerrados, gradientes dentro del reactor electroquímico muy altos ($G > 8000 \text{ s}^{-1}$) y tiempos de residencia muy bajos (< 20 segundos). En este proyecto se decidió explorar el uso de un reactor abierto ya que es mucho más fácil de construir y controlar, a sabiendas de que el gradiente de mezcla sería muy diferente.

Pruebas realizadas con el reactor abierto cuya salida se conectaba directamente al clarifloculador o se filtraba usando membranas de $0.1 \mu\text{m}$, mostraron que al parecer una combinación del tiempo de residencia dentro del reactor y/o los gradientes alcanzados, no permitían la asociación entre los iones de arsénico y los de hierro, por lo que fue necesario incorporar un paso de mezcla rápida mediante una cámara colocada a la salida del reactor. De esta manera, muestras tomadas a la salida de la mezcla rápida que fueron filtradas a través de membranas de $0.1 \mu\text{m}$ mostraron valores de arsénico soluble por debajo del límite establecido en la normatividad (valores no mostrados).

Una vez adaptado el paso de mezcla rápida y verificado su efecto en la remoción de arsénico, se procedió a realizar una serie de pruebas a fin de determinar el efecto de la granulometría en la remoción de los flóculos de hierro y por ende en la remoción de arsénico.

Las pruebas realizadas para evaluar el efecto del tamaño de grano para el filtro dual arena-antracita, mostraron que el tamaño de grano no tenía un efecto sobre el resultado final de la remoción de arsénico ni de hierro alcanzadas. La Figura 3-5 da cuenta de ello.



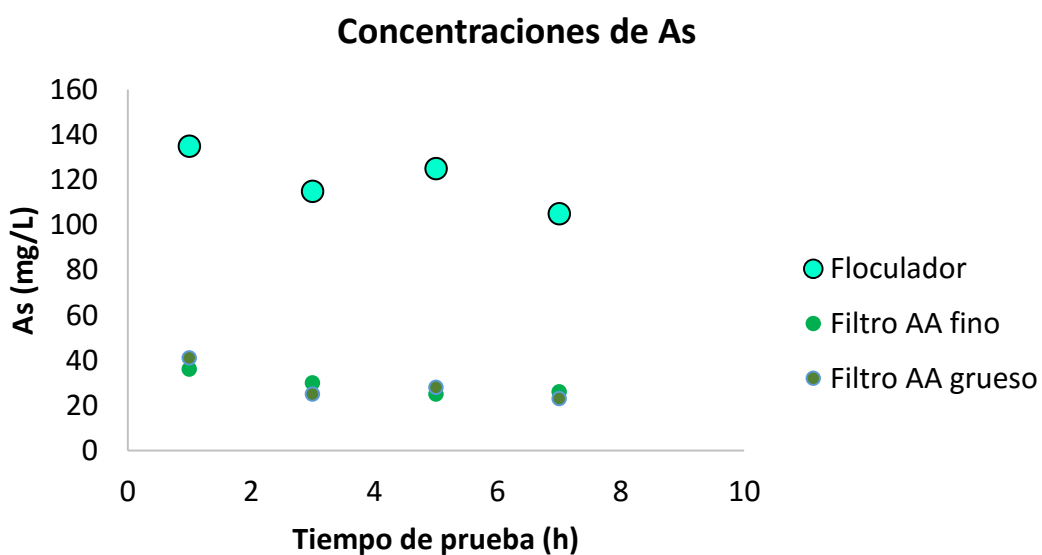
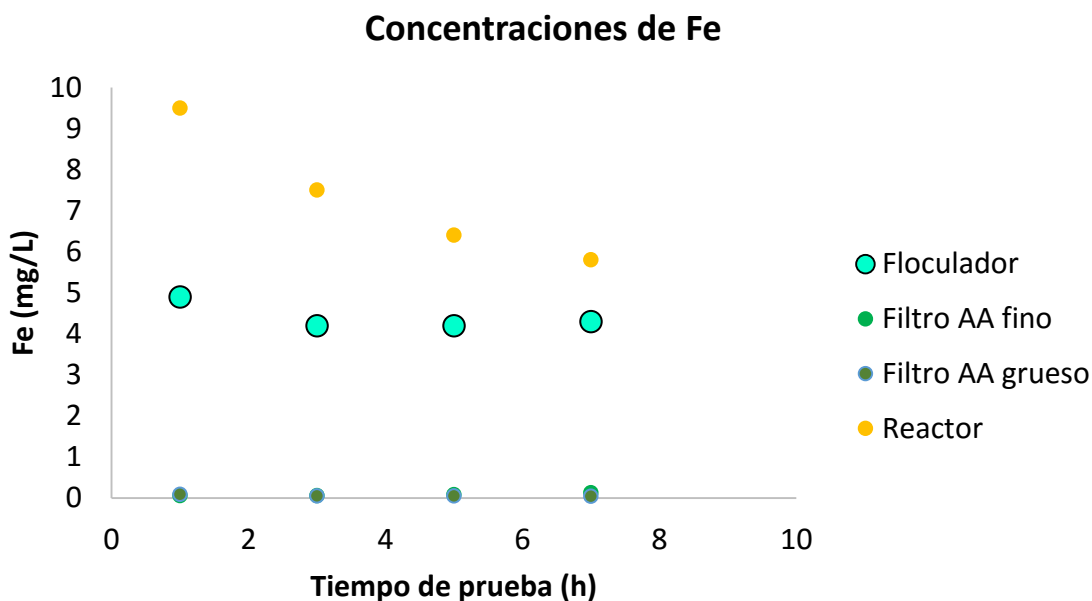


Figura 3-5 Remociones de hierro (a) y arsénico (b) empleando dos diferentes tamaños de grano para el filtro de arena antracita.

En lo que respecta a la pérdida de carga observada si se notaron diferencias, véase la (Figura 3-6).

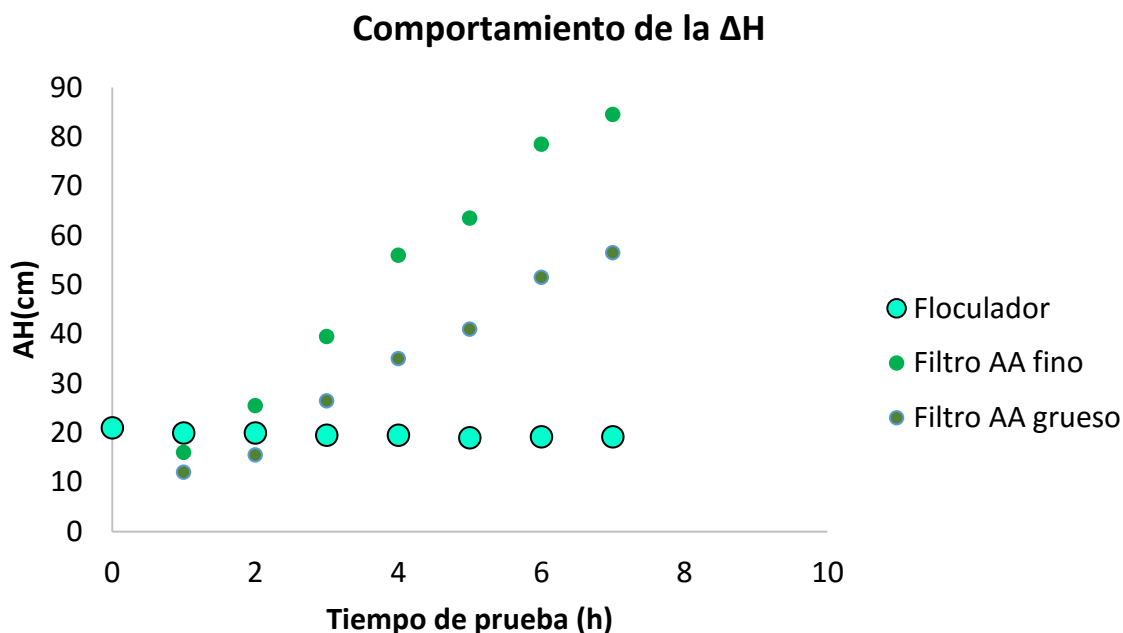


Figura 3-6. Variación de la pérdida de carga para filtro grueso, fino y floculador.

Lo que revelan las gráficas es una alta remoción de arsénico y de hierro en ambos filtros, es decir desde el punto de vista de la eficiencia de remoción no se observan diferencias; donde si es clara la diferencia es en la pérdida de carga.

De acuerdo con estos resultados resulta energéticamente más conveniente el empleo de filtros arena-antracita de granulometría grande (Filtro AA grueso).

El clarificador de gravas logra una remoción limitada del arsénico, lo que indica que gran parte de los flóculos no son retenidos en esta etapa, a pesar de que se observa la formación de una cama de lodos en la parte superior de las gravas (Figura 3-7). En esta unidad se retiene el gas proveniente del reactor y se acumula formando burbujas que son perceptibles a simple vista.



Figura 3-7. Aspecto del floculador granular. Izq. Se observa una cama de lodos en la parte superior del filtro. Der. Se alcanzan a apreciar burbujas de gas provenientes de la electrocoagulación atrapadas entre las partículas del filtro.

3.6 DISEÑO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR EL EFECTO DE LAS VARIABLES PH, CONCENTRACIÓN DE CLORO Y DOSIS DE HIERRO EN LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO POR ELECTROCOAGULACIÓN.

3.6.1 Acoplamiento electrocoagulación-floculación en pruebas de jarras.

En la Tabla 3-4 se observan los resultados obtenidos del diseño de experimentos 2^3 con tres valores al centro. La única condición en la que el clarificado presentó una concentración menor a la establecida en la NOM 127 ($25 \mu\text{g/L}$) fue a pH de 6, cloro libre de 6.5 mg/L y 8 mg/L de hierro dosificado. La otra condición favorable, pero que no

cumple con dicha norma, fue cuando se trabajó a pH 7, cloro libre de 3.5 mg/L y dosis de hierro de 5 mg/L.

Tabla 3-4. Resultados del diseño de experimentos 2³ de las pruebas de electrocoagulación acopladas a clarificación en jarras.

			Variables de operación (valores teóricos)			Variables de operación (valores reales)			Concentraciones en el sobrenadante			Remoción (%)		
			pH	Cl ₂	Fe	pH	Cl ₂	Fe	As	Fe	Cl ₂	As	Fe	Cl ₂
pH	Cl ₂	Fe		mg/L	mg/L		mg/L	mg/L	µg/L	mg/L	mg/L	As	Fe	Cl ₂ removido
-	-	-	6	0.5	2	5.97	0.62	2.04	166	1.91	0.05	10.02	6.37	91.94
+	-	-	8	0.5	2	8.22	0.62	1.93	172	1.9	0.05	6.77	1.55	91.94
-	+	-	6	6.5	2	6.14	6.5	1.92	89	1.59	4.5	51.76	17.19	30.77
+	+	-	8	6.5	2	7.98	6.55	2.03	90	1.26	4.65	51.22	37.93	29.01
-	-	+	6	0.5	8	6.06	0.56	8.3	41	3.32	0.01	77.77	60.00	98.21
+	-	+	8	0.5	8	7.89	0.34	8.35	95	4.4	0.01	48.5	47.31	97.06
-	+	+	6	6.5	8	6.12	6.4	8.4	10	0.33	0.53	94.5	96.07	91.72
+	+	+	8	6.5	8	8.03	6.8	8.4	49	0.01	1.85	73.44	99.88	72.79
0	0	0	7	3.5	5	7.1	3.43	5.32	39	0.92	0.05	78.86	82.71	98.54
0	0	0	7	3.5	5	6.93	3.54	5.16	39	0.88	0.27	78.86	82.95	92.37
0	0	0	7	3.5	5	7.09	3.48	5.18	32	0.79	0.32	82.65	84.75	90.80

Para el análisis de los resultados, los datos se procesaron en el software Statgraphics Centurion versión XV y se estableció un intervalo de confianza del 95 %. En la Tabla 3-5 se muestra el análisis de varianza (ANOVA). La única variable que tuvo efecto significativo fue el hierro dosificado.

Tabla 3-5. Análisis de varianza del diseño 2³ de las pruebas de electrocoagulación acopladas a la clarificación en jarras.

Variabes	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:pH	366.122	1	366.122	0.83	0.4145
B:Cl ₂	2043.52	1	2043.52	4.62	0.0981
C:Fe Dosif	3803.66	1	3803.66	8.60	0.0427
AB	14.9058	1	14.9058	0.03	0.8633
AC	270.746	1	270.746	0.61	0.4778
BC	247.754	1	247.754	0.56	0.4959
Error total	1770.13	4	442.533		
Total	8516.85	10			

(corr.)

El modelo de regresión obtenido para calcular el porcentaje de arsénico removido (Y) bajo las condiciones estudiadas fue: $Y = -26.8382 + 2.93083 \cdot \text{pH} + 8.41917 \cdot \text{Cl}_2 + 23.0067 \cdot \text{Fe Dosif} - 1.93917 \cdot \text{pH} \cdot \text{Fe Dosif} - 0.618333 \cdot \text{Cl}_2 \cdot \text{Fe Dosif}$. El error estándar del modelo fue de 18.89 con un coeficiente de correlación de 79.04.

En la Figura 3-8 se muestra el diagrama de Pareto en donde se ilustra que el hierro dosificado fue la única variable con efecto significativo sobre la remoción de arsénico; mejora si la dosis de hierro y cloro aumentan y el pH se mantiene en un nivel bajo.

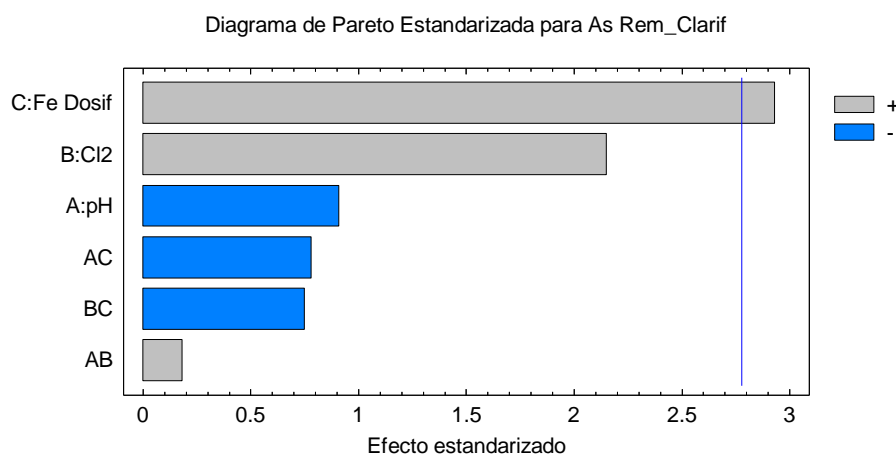


Figura 3-8. Diagrama de Pareto, efectos estandarizados de Fe dosificado, pH y cloro libre sobre la remoción de As.

En la Figura 3-9 se muestra el gráfico de superficie de respuesta estimada, la cual sugiere que, manteniendo un pH de 7 se puede obtener una remoción de arsénico entre 90 y el 100 %, si se dosifican 8 mg/L de hierro y 6.5 mg/L de cloro libre. De tal forma que estas condiciones se establecieron en la siguiente etapa de pruebas en flujo continuo a nivel semipiloto.

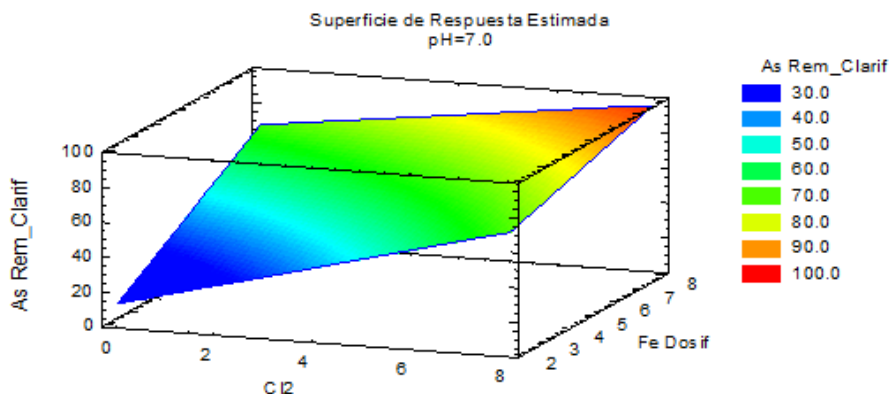


Figura 3-9. Superficie de respuesta estimada a pH 7 para remoción de arsénico.

3.6.2 Electrocoagulación acoplada a la microfiltración (0.1 μm)

En la Tabla 3-6 se muestran los resultados obtenidos del diseño de experimentos 2^3 con tres valores al centro para los casos en los que el agua electrocoagulada se pasó directamente a una membrana con tamaño de poro de 0.1 μm . Se observa que dos distintas combinaciones de variables, teniendo en común una dosis alta de hierro y valores de pH cercanos a 6, así como la combinación de los valores de las variables en el punto central del diseño, cumplen con concentraciones menores a 25 $\mu\text{g/L}$ en el agua filtrada. Sin embargo, para el caso donde el pH es de 6, el cloro libre de 0.5 mg/L y el hierro de 8 mg/L, todavía se presenta hierro disuelto en el agua filtrada, es decir que esta condición resultó poco favorable.

Las remociones en este caso de estudio fueron más altas comparadas con la clarificación convencional (simulada en jarras). La remoción mínima con la microfiltración fue de 24 %, mientras que para la remoción con jarras fue de 6.77 %.

No se tiene muy claro cuál sería el proceso para optimizar la remoción del arsénico, por lo que se tendrán que realizar pruebas adicionales que permitan determinar adecuadamente las condiciones para lograr una eficiente remoción a un menor costo.

Tabla 3-6. Resultados del diseño de experimentos 2³ de las pruebas de electrocoagulación acopladas a la microfiltración con membranas de 0.1 µm.

			Variables de operación (valores teóricos)			Variables de operación (valores reales)			Concentraciones en el agua filtrada			Remoción (%)		
pH	Cl ₂	Fe	pH	Cl ₂	Fe	pH	Cl ₂	Fe	As	Fe	Cl ₂	As	Fe	Cl ₂ removido
				mg/L	mg/L		mg/L	mg/L	µg/L	mg/L	mg/L			
-	-	-	6	0.5	2	5.97	0.62	2.04	50	0.65	0.02	72.9	68.14	96.77
+	-	-	8	0.5	2	8.22	0.62	1.93	140	0.03	0.07	24.12	98.45	88.71
-	+	-	6	6.5	2	6.14	6.5	1.92	52	0.01	4.45	71.82	99.48	31.54
+	+	-	8	6.5	2	7.98	6.55	2.03	57	0.01	4.65	69.11	99.51	29.01
-	-	+	6	0.5	8	6.06	0.56	8.3	8	1.66	0.01	95.66	80.00	98.21
+	-	+	8	0.5	8	7.89	0.34	8.35	95	0.02	0.01	48.51	99.76	97.06
-	+	+	6	6.5	8	6.12	6.4	8.4	0	0.02	0.52	100	99.76	91.88
+	+	+	8	6.5	8	8.03	6.8	8.4	35	0.84	1.78	81.03	90.00	73.82
0	0	0	7	3.5	5	7.1	3.43	5.32	0	0.01	0.03	100	99.81	99.13
0	0	0	7	3.5	5	6.93	3.54	5.16	5	0.01	0.35	97.29	99.81	90.11
0	0	0	7	3.5	5	7.09	3.48	5.18	0	0.01	0.3	100	99.81	91.38

Al igual que en el diseño anterior, para el análisis de los resultados los datos se procesaron en el software Statgraphics Centurion versión XV y se estableció un intervalo de confianza del 95 %. En la Tabla 3-7 se muestra el análisis de varianza (ANOVA), y se observa que ninguna de las variables tuvo efecto significativo sobre la remoción de arsénico. Esto se explica ya que hay tres combinaciones de valores en las variables analizadas que dan valores entre el 95 y el 100% de remoción de As.

Tabla 3-7. Análisis de varianza del diseño 2³ de las pruebas de electrocoagulación acopladas a la microfiltración (0.1 µm).

Variables	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:pH	1729.01	1	1729.01	3.75	0.1247
B:Cl ₂	815.474	1	815.474	1.77	0.2541
C:Fe Dosif	951.57	1	951.57	2.07	0.2240
AB	689.133	1	689.133	1.50	0.2884
AC	26.7546	1	26.7546	0.06	0.8214
BC	6.21281	1	6.21281	0.01	0.9131
Error total	1842.41	4	460.602		
Total (corr.)	6060.57	10			

Con los datos se obtuvo el modelo de regresión para calcular el porcentaje de arsénico removido (Y) bajo las condiciones estudiadas: $Y = 203.922 - 22.4815 \cdot \text{pH} - 17.8013 \cdot \text{Cl}_2 + 8.24521 \cdot \text{Fe Dosif} + 3.09375 \cdot \text{pH} \cdot \text{Cl}_2 - 0.609583 \cdot \text{pH} \cdot \text{Fe Dosif} - 0.0979167 \cdot \text{Cl}_2 \cdot \text{Fe Dosif}$. El error estándar del modelo fue de 21.46 con un coeficiente de correlación de 69.6.

En la Figura 3-10 se muestra el diagrama de Pareto asociado a este análisis. En él se observa que ninguna de las variables tuvo un efecto significativo; sin embargo, muestra el grado de importancia y la dirección en la que las variables afectan la remoción de arsénico, pH bajo, hierro alto y cloro alto mejoran la remoción.

Las condiciones óptimas que arroja el análisis por el software son: pH de 6, cloro de 0.5 mg/L y hierro de 8 mg/L, pero, como ya se comentó antes, esta condición no es aplicable en la realidad debido a que todavía hay hierro disuelto en el agua filtrada; es decir no se cumple la NOM-127 Modificación 2000, para hierro.

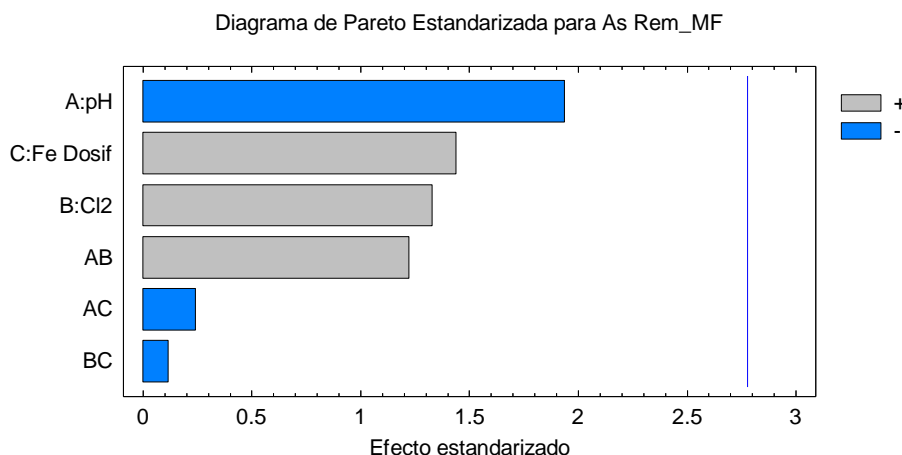


Figura 3-10. Diagrama de Pareto, efectos estandarizados de Fe dosificado, pH y cloro libre sobre la remoción de As.

En la Figura 3-11 se muestra el gráfico de superficie de respuesta estimada, la cual sugiere que, manteniendo un pH de 7 se puede obtener una remoción de arsénico entre el 90 y el 100%, si se dosifican 8 mg/L de hierro y 6.5 mg/L de cloro libre. Sin embargo, las condiciones de los ensayos al centro (pH= 7, hierro =5 mg/L, cloro= 3.5 mg/L) también resultan favorables para la remoción de arsénico y de hierro, del 97 al 100% para As y del 99.8% para hierro.

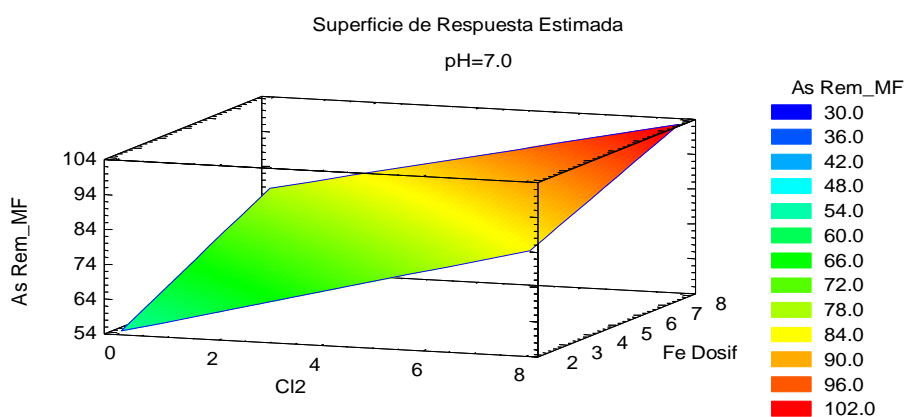


Figura 3-11.- Superficie de respuesta estimada para remoción de arsénico.

La importancia de estas pruebas radica en la posibilidad de ofrecer una alternativa de tratamiento en la que, en principio, es posible alcanzar altas remociones del metaloide empleando bajas dosis de coagulante (Fe) y que los flóculos de los hidróxidos metálicos, que adsorben al contaminante, se puedan retener en una membrana de microfiltración. Es necesario realizar pruebas complementarias para determinar la viabilidad de esta opción.

3.6.3 Evaluación en continuo de la remoción de As.

- **Reactor de electrocoagulación**

Figura 3-12 muestra los resultados teóricos y medidos para la concentración de hierro obtenidos de la prueba en continuo realizada para remover arsénico.

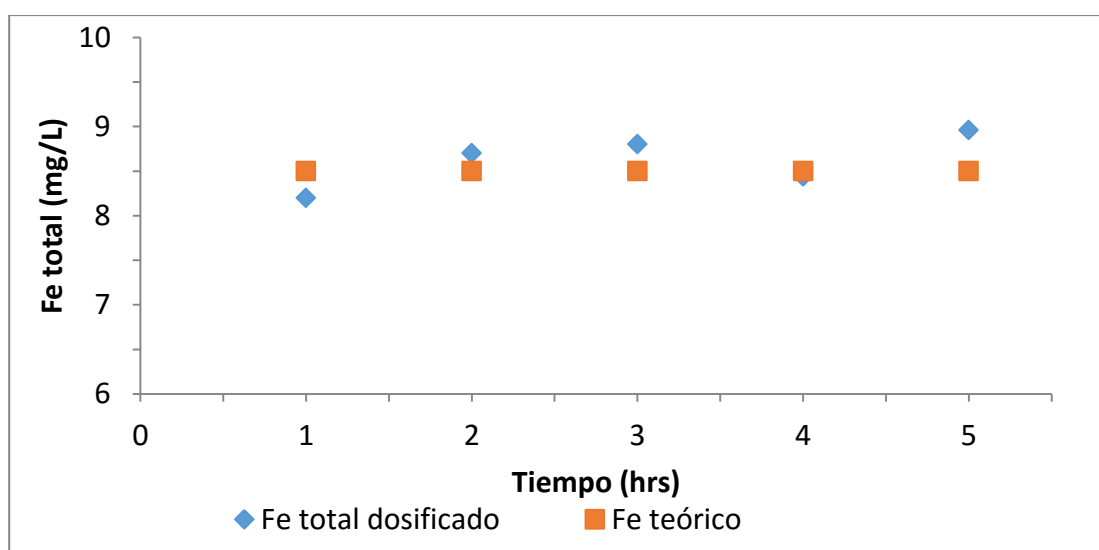


Figura 3-12. Dosificación de hierro mediante reactor electroquímico, dosis teóricas y reales.

Como se puede observar, durante las cinco horas que duró la prueba, la producción real de hierro, en general, se mantuvo cercana, aunque ligeramente por arriba, del valor esperado predicho por la Ley de Faraday.

- **Clarificador Granular**

El agua a la salida del reactor se envió, mediante una bomba peristáltica, al clarificador granular. El flujo en el clarificador fue ascendente, es decir, el agua pasaba a través de los diferentes lechos, de la mayor granulometría hacia la menor (Figura 3-13). Se esperaba que en el trayecto, el tiempo de residencia fuera suficiente para permitir la

formación de flóculos de hidróxidos de hierro con tamaño considerable para la adsorción de las especies a remover; en este caso arsénico. Sin embargo, lo que se observa en la Figura 3-16 es que la concentración de hierro disuelto se va incrementando y con ello, se espera que también se incremente el arsénico en el efluente.



Figura 3-13. Observación del clarificador granular durante la prueba.

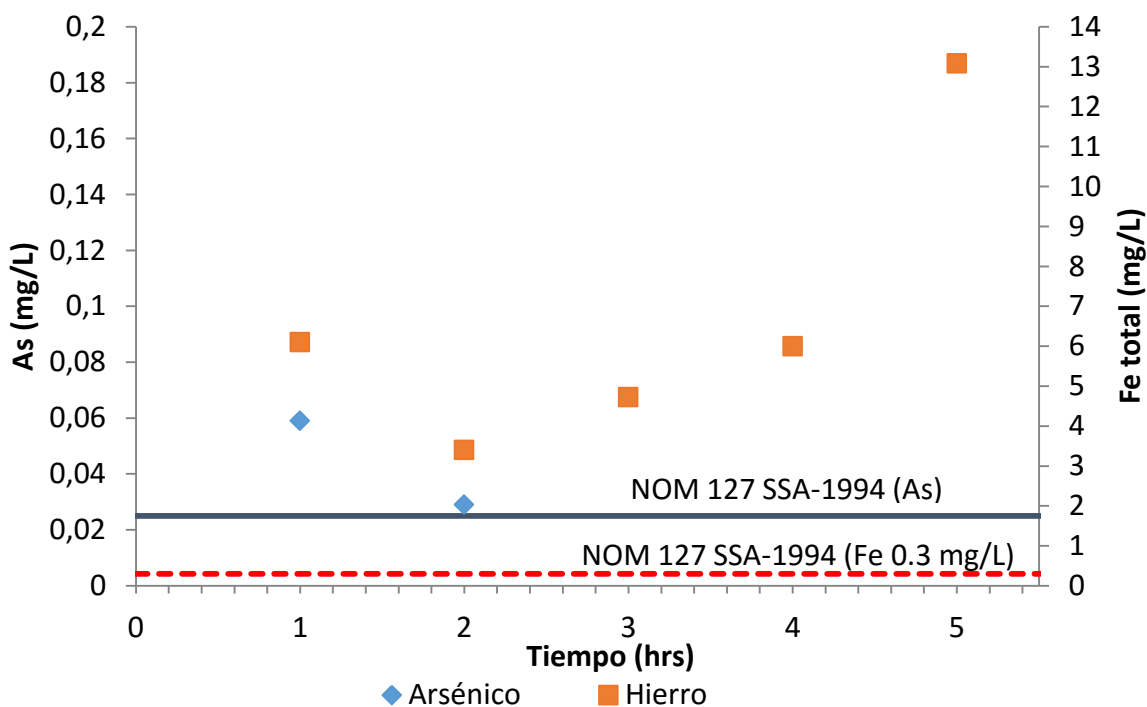


Figura 3-14. Concentraciones de hierro y arsénico a la salida del clarificador granular.

De hecho al realizar la medición a la tercera hora y observar que la concentración de hierro era casi de 5 mg/L se decidió continuar la prueba pero ya sin medir el arsénico que a la segunda hora ya había quedado fuera de norma. Sólo un porcentaje bajo de hierro, y arsénico, se retuvo en el clarificador.

- **Filtros**

Después del clarificador el agua se hizo pasar, por gravedad, a un flujo de 1.3 L/min, a cada uno de los filtros, empleando una tasa de filtración de 12.3 m/hr.

En la Figura 3-15 se muestran los valores obtenidos para las mediciones de hierro y arsénico, durante las 5 h que duró la prueba, a la salida del filtro de arena-antracita, y se contrastan con los valores obtenidos en muestras colectadas a la salida del reactor (después de la mezcla rápida) y filtradas con membrana de 0.1 μm , porque estos

valores se consideran como el mejor escenario que se puede esperar, considerando como cierta la hipótesis de que a la salida del reactor se ha asociado al hierro, producido electroquímicamente, la máxima cantidad de arsénico posible.

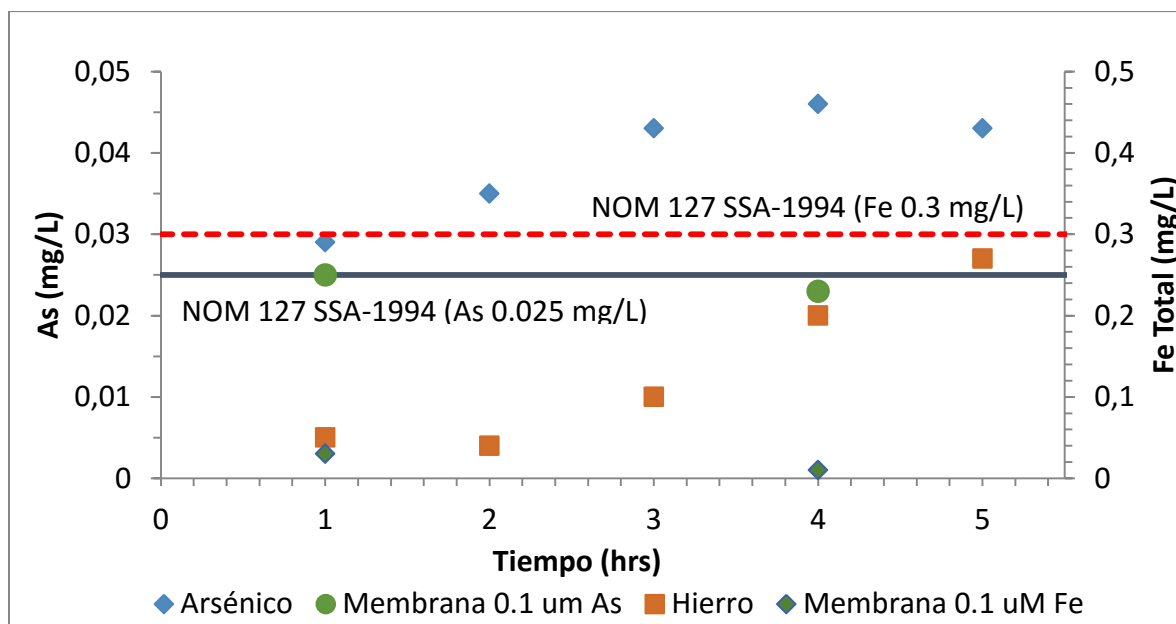


Figura 3-15. Concentraciones de hierro y arsénico a la salida del filtro arena-antracita.

Se observa que la concentración tanto de arsénico remanente como de hierro remanente se incrementaron conforme avanzó la prueba. Estos parámetros están correlacionados, al haber una mayor concentración de hierro soluble se observa una concentración mayor de arsénico en disolución. Un hecho importante es que en las condiciones en que se realizó esta prueba no fue posible cumplir con el límite permisible establecido en la NOM-127 Modificación 2000 para arsénico.

Sólo se tomaron dos muestras a la salida del reactor que fueron filtradas a través de membrana de 0.1 μm ; las muestras corresponden a 1 y 4 horas del tratamiento. Las muestras tomadas a la salida del filtro arena-antracita después de la primera hora mostraron valores similares en ambos parámetros (As, Fe) a sus similares filtradas por 0.1 μm . Inesperadamente los valores de Fe y As para el efluente del filtro después de 4

h mostró valores muy diferentes de los medidos para la muestra del efluente del reactor filtrada por 0.1 μm .

Si se comparan los valores de arsénico y de hierro para las dos muestras filtradas en la membrana de 0.1 μm se puede observar que son muy cercanos entre sí: después de una hora el As tenía un valor de 0.025 mg/L, y a la 4h de 0.023 mg/L, en tanto que el hierro medido después de una hora fue de 0.03 mg/L y a la 4 h de 0.01 mg/L.

De lo anterior se concluye que bajo las condiciones empleadas en el sistema semipiloto en continuo, el hierro no retenido incrementa a su vez la concentración de arsénico en solución. Estos resultados indicaron la necesidad de buscar condiciones diferentes que permitan una adecuada remoción del contaminante.

En la Figura 3-16 se muestran los resultados para las concentraciones de hierro y arsénico medidas en el efluente del filtro de carbón activado.

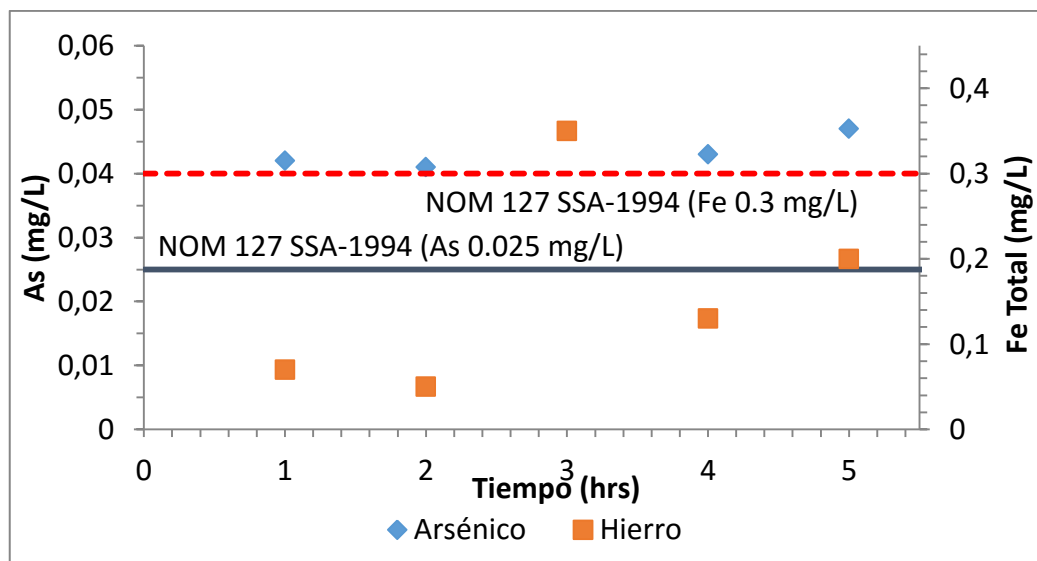


Figura 3-16. Concentraciones de hierro y arsénico a la salida del filtro de carbón activado granular.

En este caso, se observa que la concentración de arsénico en el efluente, aunque se mantuvo bastante constante, rebasa la NOM-127 Modificación 2000, por lo que el tratamiento no se puede considerar satisfactorio. Además, se alcanza a notar una pequeña, aunque muy ligera, tendencia hacia valores mayores a medida que avanza la prueba, que se correlaciona con la tendencia también ligeramente creciente de hierro soluble en el efluente. Esto sería relevante si la concentración de As en el efluente estuviera cumpliendo la normatividad; en este caso resulta casi sin importancia.

3.6.4 Evaluación en continuo de la remoción de arsénico y de 17 β -estradiol.

La Figura 3-17 muestra los valores de la concentración de hierro teóricamente dosificado, medidos utilizando métodos rápidos (rombos azules) y los obtenidos por absorción atómica (AA) en un laboratorio acreditado (triángulos verdes). Los puntos morados corresponden a los valores medidos por HACH para el hierro en una réplica de la producción de hierro para la primera hora, son estos valores los que se deben cotejar con los verdes, es decir corresponden a las mismas muestras.

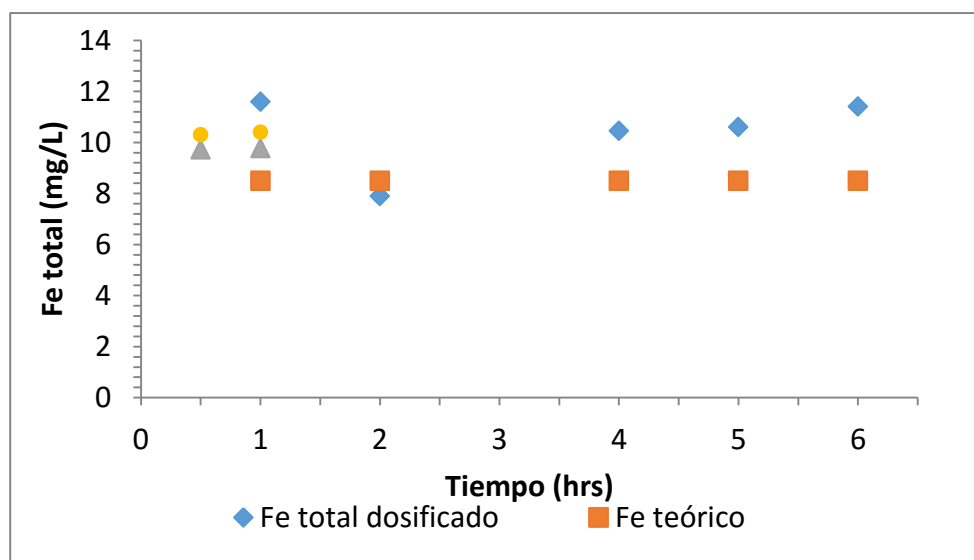


Figura 3-17. Dosificación de hierro mediante reactor electroquímico, Dosis teóricas y reales (Fe LACC, concentraciones de hierro determinadas por AA en el laboratorio LACC y en el laboratorio de potabilización por el método HACH, Fe PT).

En ambos casos la concentración medida por el método HACH resultó apenas un 6% superior a la determinada por el método de AA. Estos valores permiten realizar la discusión de los resultados de manera confiable, pues se sabe que si todas las mediciones se realizaran por AA, las tendencias observadas serían las mismas que se están obteniendo con los valores determinados con los métodos rápidos.

Asimismo, se tomaron muestras de los efluentes del filtro de arena- antracita y del de carbón activado granular, las cuales se enviaron a un laboratorio acreditado para su análisis en el contenido de arsénico por absorción atómica (generación de hidruros), éstos se compararon contra los obtenidos con el método rápido arsenator.

Para el filtro de arena antracita y carbón activado granular con el método de absorción atómica se obtuvo un promedio de $4.86 \pm 0.456 \mu\text{g/L}$ y $10.6 \pm 2.30 \mu\text{g/L}$ respectivamente, mientras que para el filtro de arena antracita y carbón activado granular por el método de arsenator, se obtuvo $11.6 \pm 9.12 \mu\text{g/L}$ y $15.8 \pm 2.77 \mu\text{g/L}$ respectivamente. Estos valores permiten realizar la discusión de los resultados de manera confiable, pues se sabe que si todas las mediciones se realizaran por AA, las tendencias observadas serían las mismas que se están obteniendo con los valores determinados con los métodos rápidos e incluso se pueden esperar valores más bajos de arsénico que los cuantificados con el arsenator como se puede observar en la Figura 3-18, donde se muestran que los valores de arsénico en los efluentes de los filtros son menores a la NOM-127 SSA-1994 (modificación del año 2000).

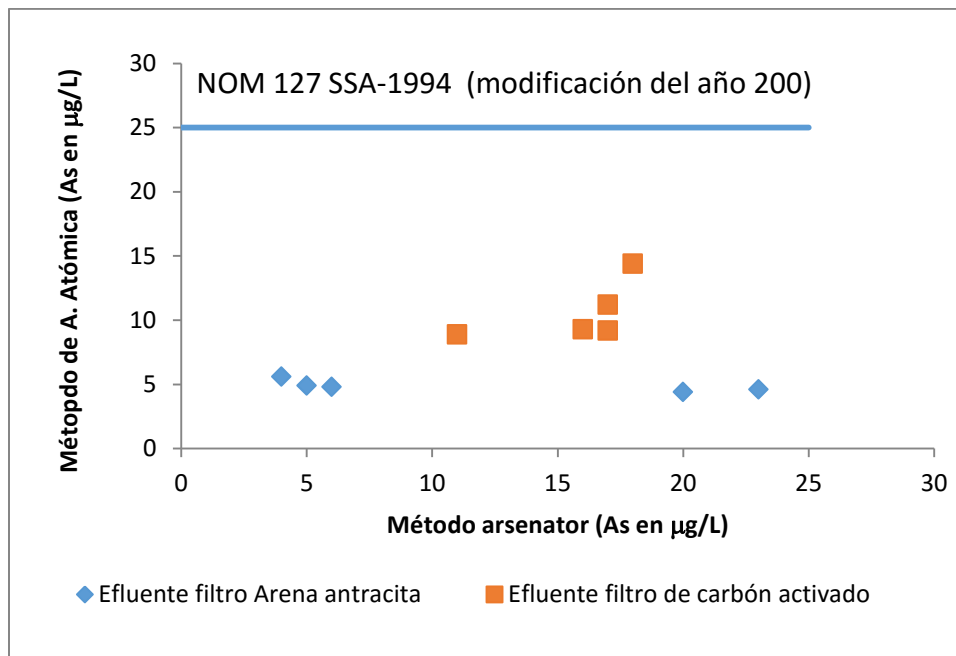


Figura 3-18. Comparación de la cuantificación de arsénico con método arsenator y el método de absorción atómica (generación de hidruros) para los efluentes de los filtros estudiados.

Las concentraciones de hierro y arsénico determinadas a la salida del clarificador granular se ilustran en la Figura 3-19. Ninguna de ellas cumple con la normatividad. Sin embargo, al analizar la Figura 3-20, que muestra las concentraciones medidas a la salida del filtro de arena-antracita, es posible reconocer que ambos, As y Fe cumplen con la NOM-127 Modificación 2000.

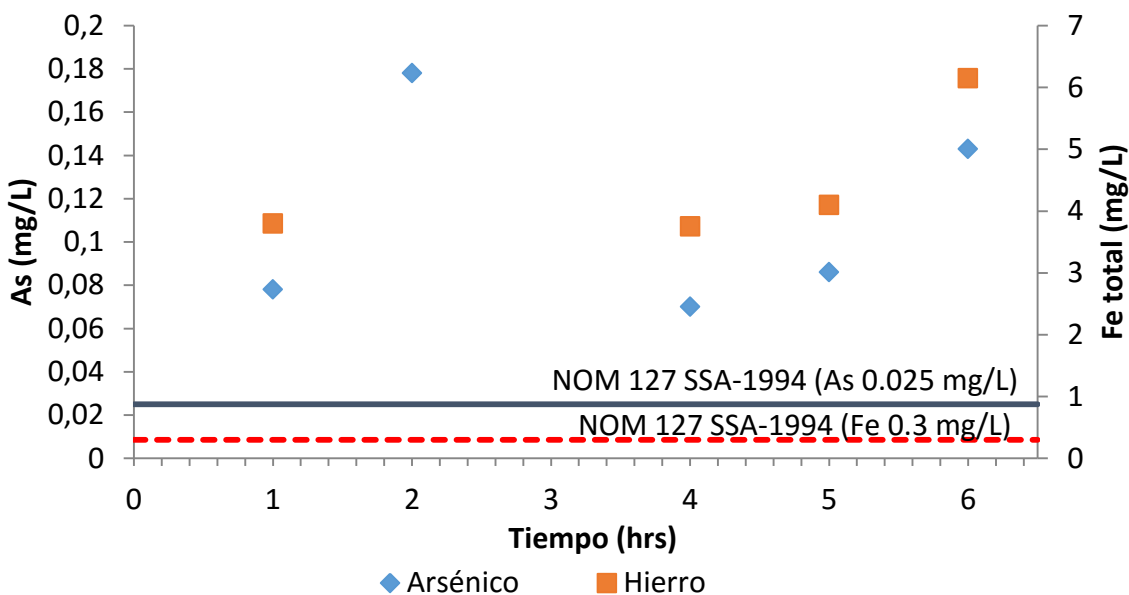


Figura 3-19. Concentraciones de Hierro y Arsénico en el clarificador granular.

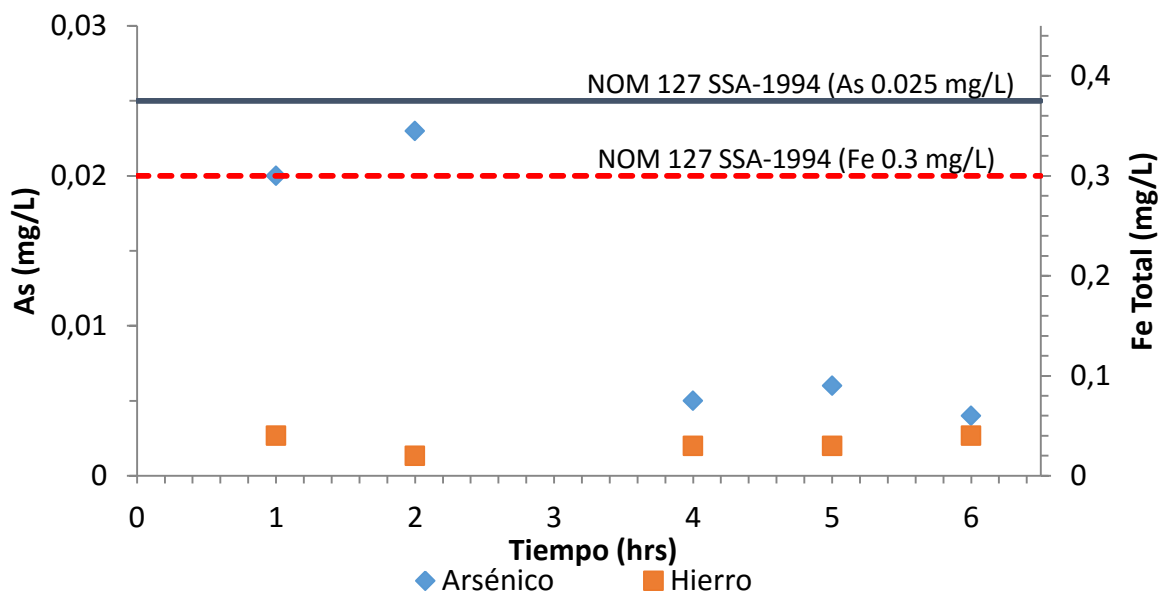


Figura 3-20. Concentraciones de hierro y arsénico a la salida del filtro arena-antracita, segunda prueba.

De hecho, ambos parámetros quedan muy por debajo de los límites permisibles. En cuanto al filtro de carbón activado, el efluente también cumple la normatividad, como se puede apreciar en la Figura 3-21.

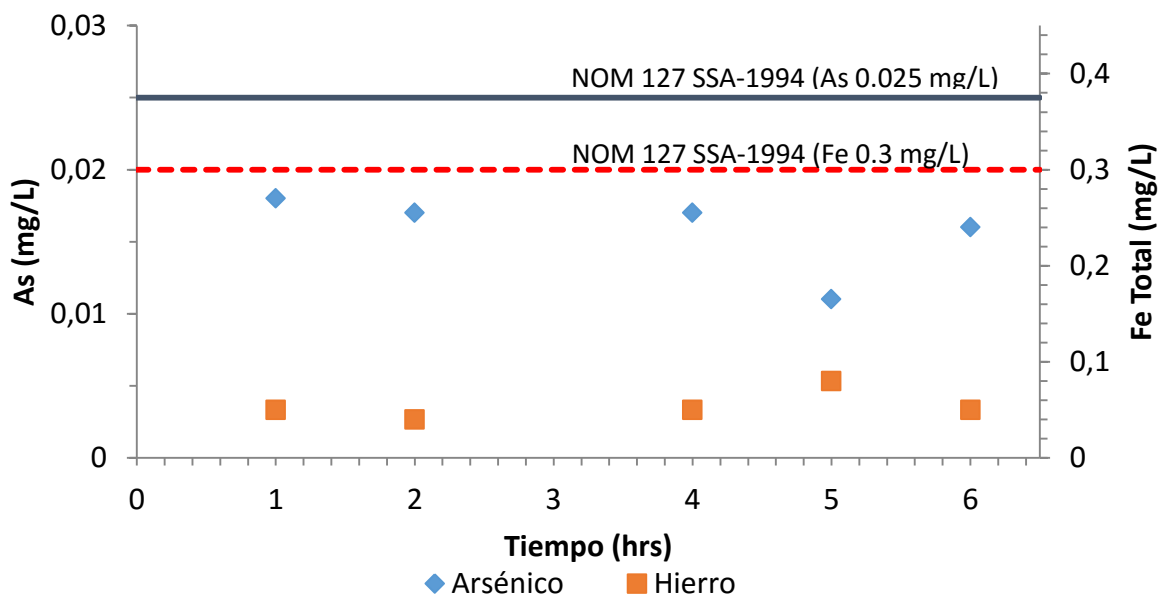


Figura 3-21. Concentraciones de hierro y arsénico a la salida del filtro de carbón activado granular.

Respecto a la remoción de 17β -estradiol, la Figura 3-22 muestra las concentraciones de la hormona determinadas mediante un ensayo inmunológico. Se observa que la concentración disminuye apreciablemente, para alcanzar un porcentaje de remoción de aproximadamente 78 % en el caso del filtro de arena-antracita y mayor al 93% en el caso del filtro de carbón activado.

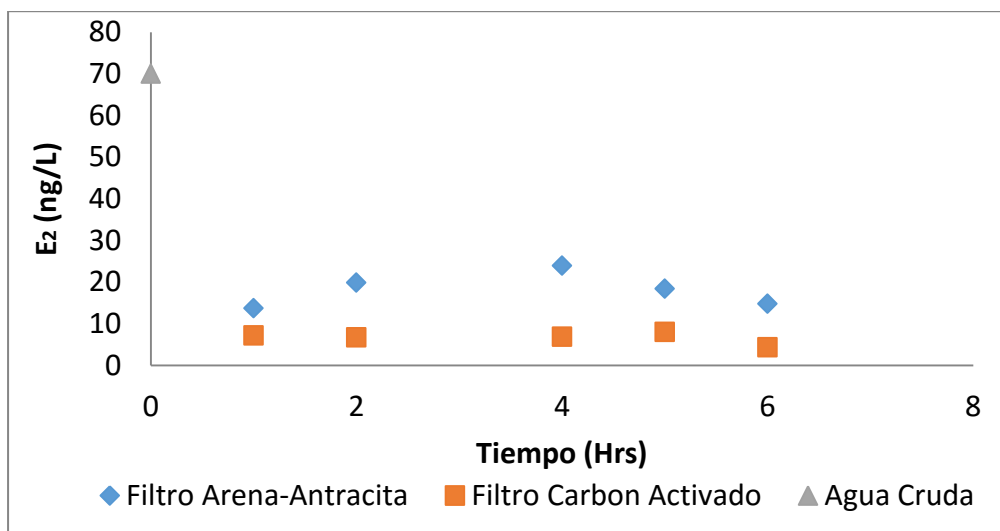


Figura 3-22. Resultados de 17β -estradiol a la salida de los filtros.

No fue el objetivo del presente trabajo determinar los mecanismos que permiten la remoción de la hormona, sino más bien, determinar la factibilidad del uso de la electrocoagulación como opción para la remoción de esta hormona y similares, considerando que su comportamiento puede ser tomado como modelo, particularmente para la remoción de mestranol.

Vale la pena comentar que el laboratorio que realizó la determinación analítica de mestranol en muestras de agua de la cuenca acepta que su método presenta una interferencia, lo que ha impedido la adecuada cuantificación de esta hormona en las muestras colectadas en las Cuencas de este estudio y otras relacionadas.

Respecto a las pérdidas de carga asociadas al proceso, éstas se ilustran para el floculador y filtros en la Figura 3-23.

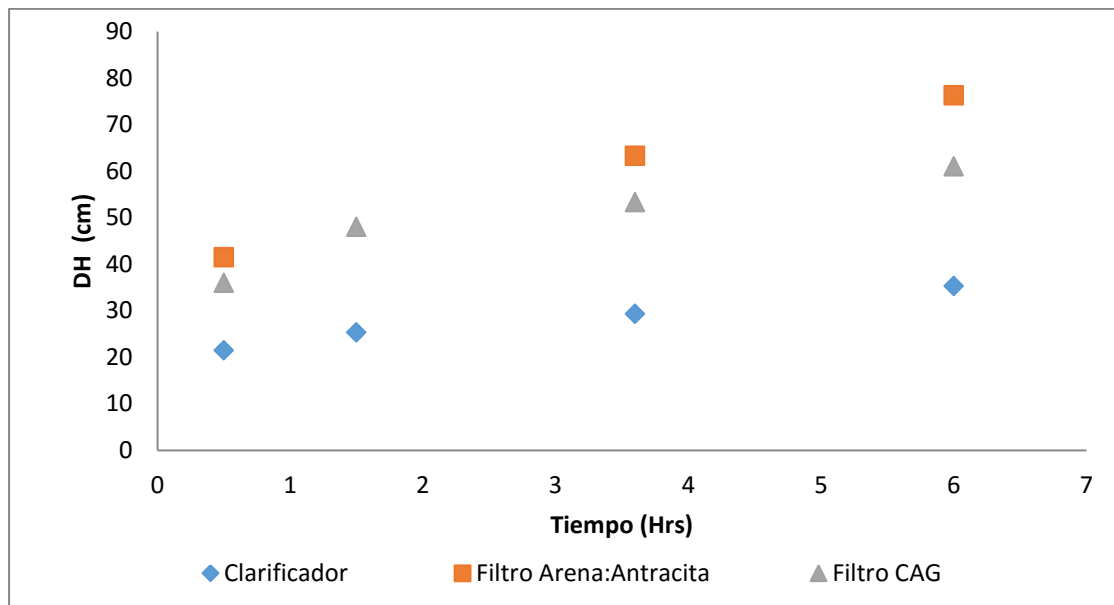


Figura 3-23.- Pérdidas de carga clarificador y filtros.

La pérdida de carga en el clarificador no se ha evaluado lo suficiente para determinar los tiempos de trabajo recomendados antes de retrolavado. Este y otros aspectos relativos al manejo y tratamiento de lodos tendrán que ser abordados en la siguiente etapa del proyecto.

3.7 CONCLUSIONES

Sobre la remoción de arsénico mediante electrocoagulación acoplada a floculación granular y filtración a través de dos diferentes medios, se establecieron las siguientes conclusiones:

1. Es posible realizar el tratamiento de agua conteniendo hasta 200 $\mu\text{g/L}$ de arsénico para cumplir la normatividad para agua potable, a condición de acoplar un paso de mezcla rápida inmediatamente a la salida del reactor electroquímico.
2. El uso de un clarificador de gravas resultó adecuado para realizar simultáneamente floculación y desgasificación de una corriente proveniente de un reactor de

electrocoagulación, aunque en sí no representó un elemento importante para retirar ni el hierro ni el arsénico del agua electrocoagulada.

3. El uso de granulometrías mayores a las convencionales para filtros arena-antracita resultó adecuado para la retención de flóculos de hidróxidos de hierro conteniendo arsénico.

4. El empleo de carbón activado granular también permite una adecuada remoción de arsénico. Los efluentes de este filtro cumplen con el límite permisible establecido en la norma.

5. En las pruebas en continuo fue posible alcanzar el límite establecido en la normatividad para arsénico al tratar con el tren propuesto agua cuya concentración inicial de arsénico era de 200 µg/L, tanto cuando estuvo solo como cuando el agua contenía 70 ng/L de 17β-estradiol.

6. El tren de tratamiento propuesto permitió la remoción en más de 78% de 17β-estradiol.

7. Del análisis de los resultados obtenidos en el diseño experimental en que se evaluó el efecto del pH, dosis de hierro y concentración de cloro en el influente al reactor, se establecen las siguientes conclusiones preliminares.

8. Para el acoplamiento electrocoagulación-clarificación en pruebas de jarras: La única variable que tuvo efecto significativo fue el hierro dosificado. La remoción de arsénico mejora si la dosis de hierro y cloro aumentan y el pH se mantiene en un nivel bajo. Tener un pH cercano a 7 y dosis de hierro mayor o igual a 8, favorece la remoción del metaloide.

9. En el acoplamiento electrocoagulación-clarificación por microfiltración, en general se obtuvieron buenas remociones y resultó difícil discriminar el efecto de las variables.

3.8 COMENTARIOS FINALES Y RECOMENDACIONES.

El uso del clarificador de gravas resultó adecuado para los fines de estas pruebas. Sin embargo, se recomienda realizar una evaluación más amplia que permita conocer sus potencialidades y limitaciones.

Con respecto a la remoción de la hormona, es necesario profundizar en el estudio de la electrocoagulación como alternativa para su eliminación en agua potable.

En las pruebas en continuo fue posible alcanzar el límite establecido en la normatividad para arsénico al tratar con el tren propuesto agua cuya concentración inicial de arsénico era de 200 µg/L. Es altamente recomendable realizar la validación del proceso para lo que se recomienda realizar corridas más largas, de preferencia con aguas que contengan el metaloide de manera natural y aún mejor que se desarrollen en sitio.

4 TRATAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE LODOS GENERADOS EN LOS PROCESOS DE POTABILIZACIÓN

El estudio de caracterización y tratamiento de residuos se realizó con el obtenido en el proceso experimental compuesto por electrocoagulación, clarificación en lecho de gravas y filtración, descrito en el capítulo 3.

El residuo o subproducto de dicho proceso de tratamiento es el hidróxido hidratado de hierro obtenido del proceso de electrocoagulación que contiene a los contaminantes removidos que fueron adsorbidos o coprecipitados en este.

Dicho residuo se obtiene al lavar el clarificador granular y los filtros por lo que es completamente líquido y los hidróxidos están presentes en muy bajas concentraciones, por lo que para su manejo es imprescindible quitarle el mayor porcentaje de humedad con la finalidad de facilitar y disminuir los costos de transporte y disposición final.

Los tratamientos más comunes empleados para reducir el volumen de los lodos mediante la eliminación del agua son a) espesamiento por gravedad, b) acondicionamiento físico o químico para mejorar sus características de deshidratación de tal forma que sean drenables, filtrables o centrifugables, y c) deshidratación proceso mediante el que se incrementa la concentración de sólidos en el lodo mediante la remoción de la porción líquida pueden emplearse métodos naturales o mecánicos.

Dado que el residuo en estudio es agua turbia por el contenido de flóculo, con alrededor de 40 UTN, se empleó la adición de un polímero con el objetivo de aglutinar los flóculos y permitir su separación del agua, la sedimentación por gravedad, y la centrifugación para reducir la cantidad de agua de los residuos.

4.1 METODOLOGÍA

Debido al poco volumen de agua, conteniendo arsénico y 17β -estradiol, que se sometió al proceso experimental de tratamiento se obtuvo una cantidad muy pequeña de agua de lavado y más aún de lodo por lo que se decidió trabajar en dos etapas:

Etapa A.- Con el residuo producido en el tratamiento de agua que contenía sólo arsénico. Dado que el residuo obtenido con el agua que contenía tanto arsénico como 17β -estradiol era muy poca cantidad, esta primera etapa tenía la finalidad de emplear agua semejante al agua problema para seleccionar el polímero que brindara el mejor desempeño para aglutinar el residuo (lodo) y eliminar la mayor cantidad de agua. La Figura 2-1 muestra la secuencia que se siguió en esta fase.

Etapa B.- Se trabajó con lodos obtenidos del tratamiento de agua con arsénico y la hormona 17β -estradiol, el lodo fue espesado con el mejor polímero encontrado en la primera etapa y posteriormente fue sometido a centrifugación.

El trabajar en estas dos etapas se fundamenta en que el residuo obtenido del proceso que trata agua con o sin hormona, no debe tener diferencia en sus características fisicoquímicas (excepto la presencia o no de la hormona 17β -estradiol).

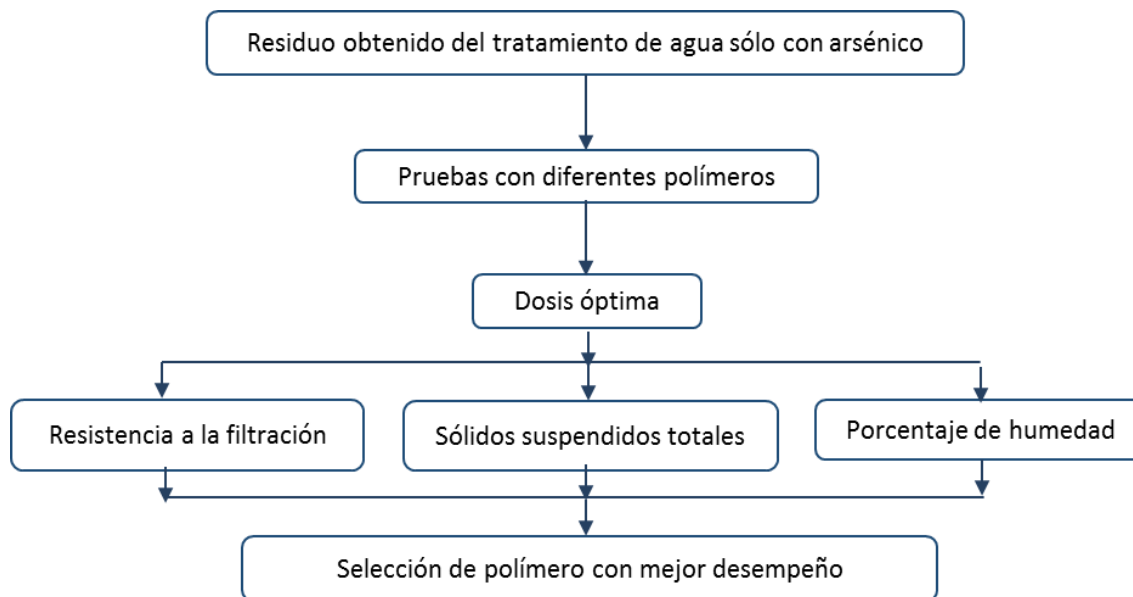


Figura 2-1 Diagrama de flujo de pruebas para selección del polímero más eficiente para remover el agua del lodo.

Una vez que se conoció el mejor polímero para el tratamiento del residuo objeto de este estudio, este producto se empleó para tratar el residuo proveniente del proceso de agua para remover arsénico y la hormona 17β -estradiol; al lodo sedimentado y centrifugado se le determinó la concentración de los sólidos totales (ST) y su porcentaje de humedad; se realizó un análisis de elementos, así como un análisis para cuantificación de la concentración de la hormona. Por otro lado, también se cuantificó el volumen de agua clarificada y se le determinó su concentración de hierro y arsénico para determinar si era posible su retorno al proceso de tratamiento de agua.

4.1.1 Generación de lodo

El proceso de tratamiento de agua mediante el cual fue generado el residuo que se utilizó en la Etapa A se describe en la sección Etapa 3. Evaluación en continuo de la remoción de arsénico. Mientras que el proceso de generación del residuo con el que se trabajó en la Etapa B se describe en la sección Etapa 4. Evaluación en continuo de la remoción de arsénico y 17β -estradiol.

En ambos casos, terminada la prueba se realizó el lavado de la columna de floculación y el retrolavado de los filtros (carbón activado y arena-antracita), ambos a flujo ascendente con agua limpia del grifo a una velocidad de 24.48 m/h mediante una bomba centrífuga.

4.1.2 Selección de los mejores polímeros para el tratamiento de lodo de electrocoagulación.

El tratamiento consistió en probar diversas dosis de polímero de cada uno de los mencionados en la Tabla 2-1 .

Los polímeros que se utilizaron fueron catiónicos SNF Floerger y aniónicos marca Buckman, se eligieron estos debido a la disponibilidad que se tiene en el mercado.

Tabla 2-1. Listado de polímeros que se utilizaron en este estudio.

Marca	Carga	Clasificación
Floerger	Catiónica	FO4490
Floerger	Catiónica	FO429055H
Floerger	Catiónica	FO465055H
Floerger	Catiónica	FO4805H
Buckman	Aniónica	Bulab 5112p
Buckman	Aniónica	Bufloc 5631
Buckman	Aniónica	Bufloc 5290
Buckman	Aniónica	Bulab 5255
Buckman	Aniónica	Bufloc 5372
Buckman	Aniónica	Bufloc 5426

Para hacer la prueba se empleó un equipo de jarras de 1 L de capacidad, con el propósito de proveer o simular la etapa de mezcla rápida. El procedimiento fue el siguiente: a un litro de residuo se le agregó una dosis de uno de los polímeros y se sometió a mezcla rápida con un gradiente de velocidad de 300 s^{-1} durante 15 segundos y posteriormente el agua se colocó en un cono Imhoff y se dejó sedimentar durante 30 minutos, al término de este lapso se le determinó la turbiedad al sobrenadante. Con

base en este parámetro se eligieron los tres polímeros con los que se obtuvieron en el sobrenadante las turbiedades más bajas. Estos polímeros se eligieron para tratar un volumen mayor de lodo con el que se pudiera realizar otras pruebas tales como: resistencia a la filtración, curvas de humedad, centrifugación y sólidos suspendidos totales. Los mejores polímeros para el tratamiento del lodo de electrocoagulación fueron Bufloc 5426, Bufloc 5631 y Bufloc 5290, con estos tres se realizó el resto de las pruebas mencionadas.



Figura 4-2. Mezcla rápida y sedimentación de lodo en conos Imhoff.

4.1.3 Tiempo a la filtración (TF)

El tiempo a la filtración es una simplificación de la resistencia específica a la filtración y es una medida de la facilidad de filtración del agua que contiene el lodo. Un proceso de acondicionamiento (químico o físico) tiene por objeto reducir la resistencia a la filtración, de tal forma que se acelere la filtración, por lo que el TF puede ser útil como herramienta para determinar la dosis del producto químico acondicionador.

La prueba de TF consiste en colocar una muestra de lodo en un embudo Buchner con un papel filtro, como soporte, aplicando vacío y midiendo el tiempo requerido para reducir el volumen al 50% de la muestra inicial (Greenbert *et al.*, 1992).

La prueba TF es simple, rápida y fácil de realizar; no obstante la concentración de sólidos suspendidos en el lodo tiene un efecto significativo en los resultados. En la evaluación de lodos acondicionados, los datos son comparables cuando las concentraciones de los sólidos suspendidos son semejantes. Sin embargo, se puede realizar una corrección aproximada para concentraciones diferentes de sólidos dividiendo el valor del tiempo de filtrado entre la concentración de sólidos correspondiente (Greenbert *et al.*, 1992).

Para realizar las pruebas de tiempo a la filtración se empleó el lodo acondicionado con cada uno de los polímeros que tuvieron mejor desempeño (Bufloc 5426, Bufloc 5631 y Bufloc 5290). Es necesario aclarar que el lodo aquí utilizado se obtuvo después del acondicionamiento químico y una vez terminada la etapa de sedimentación en los conos Imhoff, también denominado lodo espesado. Es decir, una vez transcurrido el tiempo de sedimentación en los conos Imhoff se retiró el líquido sobrenadante y el lodo se colocó sobre el papel filtro (Whatman no. 1) en el embudo Buchner. La filtración se realizó con ayuda de una bomba de succión (línea de succión), en todos los casos se utilizaron 100 mL de lodo sedimentado. En la prueba se registró el tiempo en el que el volumen filtrado correspondía al 50% del volumen inicial de la muestra. Como dato adicional se registraba el tiempo hasta que se logró tener la torta de lodo en el filtro, ver Figura 4-3.



Figura 4-3 Experimento para determinar el tiempo a la filtración del residuo espesado.

4.1.4 Determinación del porcentaje de humedad

Una fracción del lodo de espesado (10 mL de muestra) que se obtuvo de cada uno de los tres mejores polímeros evaluados fue puesta en una balanza de humedad a 105 °C donde se registró en intervalos de tiempo el porcentaje de sólidos y humedad del lodo.



Figura 4-4 Determinación del porcentaje de humedad.

4.1.5 Centrifugación

Los lodos espesados obtenidos con los tres polímeros que se han venido comentado fueron centrifugados a 3000 rpm durante 30 minutos cada uno, en una centrífuga IEC modelo HN-SII, el volumen de lodo inicial de cada uno fue de 125 mL. Finalizado el proceso, se determinó la turbiedad al agua centrifugada.

Para la etapa B y al lodo centrifugado además de la turbiedad del agua separada, a la fase sólida se le determinó el contenido de humedad.



Figura 4-5 Centrifugación de lodos.

4.1.6 Sólidos suspendidos totales

La determinación de sólidos suspendidos totales se realizó por duplicado en el lodo que se obtuvo después de utilizar el polímero y dejar sedimentar por 30 minutos (lodo espesado), también se determinó la concentración en el agua cruda, se utilizaron 5 mL de muestra para el caso del lodo espesado y 35 para el agua cruda. El procedimiento utilizado en esta técnica es el descrito en la norma NMX-AA-034-SCFI-2001.



Figura 4-6 Imágenes de determinación de sólidos suspendidos totales.

4.2 RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en las pruebas realizadas con la finalidad de disminuir el volumen de los residuos generados en el tratamiento de agua.

4.2.1 Etapa A.

La turbiedad en el agua clarificada fue el parámetro empleado para evaluar la eficiencia de los polímeros para aglutinar los flóculos y separar el lodo del líquido residuo del tratamiento de agua. Una menor turbiedad en el clarificado se consideró como una eficiencia mayor para el acondicionamiento del residuo. Los resultados de turbiedad del líquido clarificado empleando los diferentes polímeros se muestran en la Tabla 4-2, en dicha tabla los polímeros que tuvieron un mejor desempeño se muestran en celdas sombreadas en gris y corresponden a polímeros de carga negativa.

Tabla 4-2. Valores de turbiedad para cada polímero evaluado, con dosis de 0.5 mg/L.

Polímero (marca)	Carga	Clasificación	Turbiedad	pH
Floerger	Catiónica	FO4490	17.7	7.81
Floerger	Catiónica	FO429055H	18	7.8
Floerger	Catiónica	FO465055H	13.8	7.78
Floerger	Catiónica	FO4805H	20.7	7.73
Buckman	Aniónica	Bulab 5112p	15.5	7.7
Testigo (agua cruda)	NA	NA	42	7.63
Buckman	Aniónica	Bufloc 5631	9.07	7.65
Buckman	Aniónica	Bufloc 5290	8.21	7.61
Buckman	Aniónica	Bulab 5255	10.24	7.57
Buckman	Aniónica	Bufloc 5372	22.8	7.51
Buckman	Aniónica	Bufloc 5426	7.93	7.41

A continuación se muestra gráficamente los niveles de turbiedad de cada uno de los polímeros utilizados en este estudio, así como el testigo que corresponde a la prueba donde no se aplicó ningún reactivo y que fue trabajado bajo las mismas condiciones de operación a las que fue sometido el resto de las pruebas.

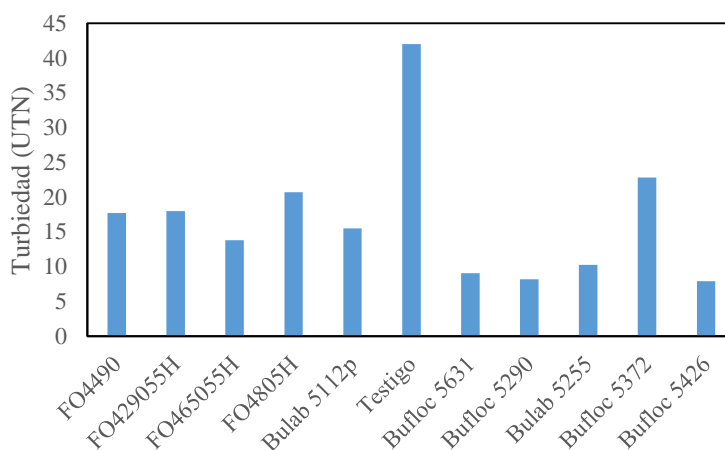


Figura 4-7 Turbiedad del líquido clarificado empleando diferentes polímeros, dosis de 0.5 mg/L.

4.2.1.1 Pruebas con los mejores polímeros para determinación de dosis óptima

Una vez conocidos los polímeros que dieron mejores resultados, se procedió a realizar pruebas con diferentes dosis con el objeto de conocer si era factible disminuir la dosis y obtener la misma o mayor eficiencia.

- **Prueba con *Bulfoc 5426***

Con la disminución de la dosis de polímero se tuvieron resultados desfavorables ya que los niveles de turbiedad aumentaron gradualmente conforme se disminuía la dosis, por lo que se consideró como dosis óptima 0.5 mg/L. La incorporación de sólidos disueltos totales al emplear este polímero es mínima, respecto al agua cruda que fue de 158.9 mg/L. En general, se tuvo un lodo bien formado con buena sedimentación en un periodo menor a 15 minutos.

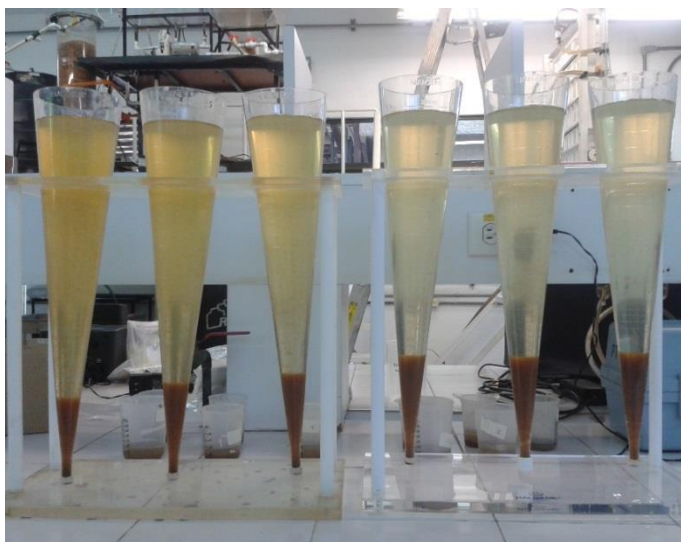


Figura 4-8 Lodo espesado con Bulfoc 5426.

Tabla 4-3 Valores de turbiedad logrados con diferentes dosis de polímero Bufloc 5426.

Dosis (mg/L)	SDT (mg/L)	Ce ($\mu\text{S/cm}$)	Turbiedad (UTN)
0.05	161	322	44
0.1	161.3	322	36.3
0.2	161	322	31.7
0.3	161.1	322	20.1
0.4	161	322	19.9
0.5	161	322	10.8

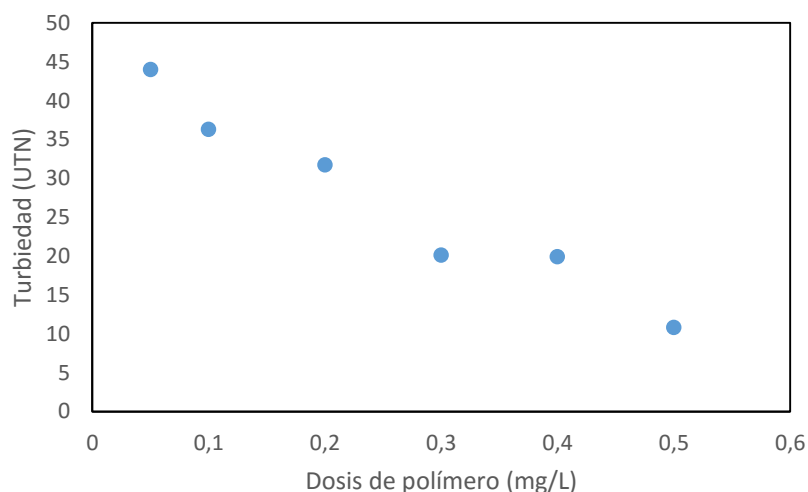


Figura 4-9 Variación de la turbiedad al aplicar diversas dosis de polímero Bufloc 5426.

- **Prueba con Bufloc 5290**

Al disminuir la dosis de polímero, los valores de turbiedad en el agua clarificada se incrementaron, se decidió utilizar la dosis 0.4 mg/L para pruebas posteriores dado que con esta se logró la mejor sedimentabilidad en el tiempo establecido para la prueba (30 minutos) sin presentar ruptura en el floc y por otro lado, con la dosis de 0.5 mg/L el floc quedó muy esponjoso, bofo y por lo tanto flotante, a pesar de mostrar el nivel más bajo de turbiedad.

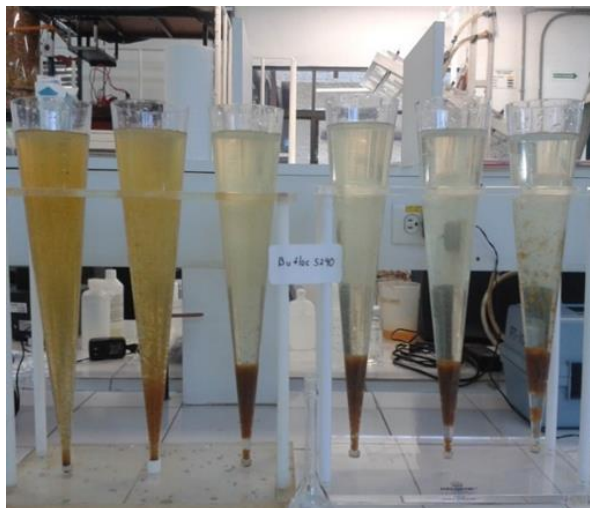


Figura 4-10 Lodo sedimentado con Bufloc 5290.

Tabla 4-4 Características del sobrenadante logrados por el polímero Bufloc 5290.

Dosis (mg/L)	SDT (mg/L)	Ce ($\mu\text{S/cm}$)	Turbiedad (UTN)
0.05	160.2	321	33.1
0.1	160.2	321	24.8
0.2	160.3	321	15.0
0.3	160.2	320	12.6
0.4	160.1	320	10.0
0.5	160.3	320	6.23

La siguiente imagen muestra gráficamente el comportamiento de la turbiedad en el líquido sobrenadante con respecto a la dosis de polímero aplicada, hay una clara evidencia que la dosis de 0.5 mg/L fue la que mejor resultado brindó, sin embargo debido a lo explicado anteriormente, esta dosis no fue la elegida como óptima.

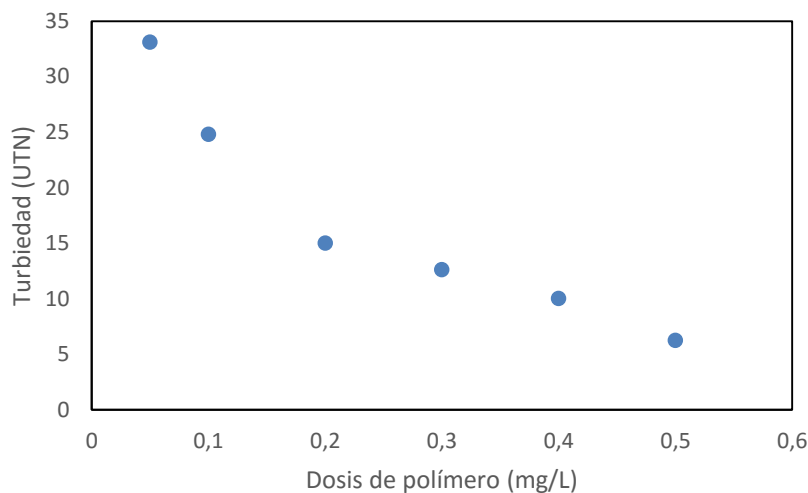


Figura 4-11 Variación de la turbiedad al aplicar diversas dosis de polímero Bufloc 5290.

- **Prueba con Bufloc 5631**

También para este caso, la disminución de la dosis de polímero no favoreció el rendimiento en cuanto a la remoción de turbiedad, por lo que se decidió establecer la dosis de 0.5 mg/L como la óptima.

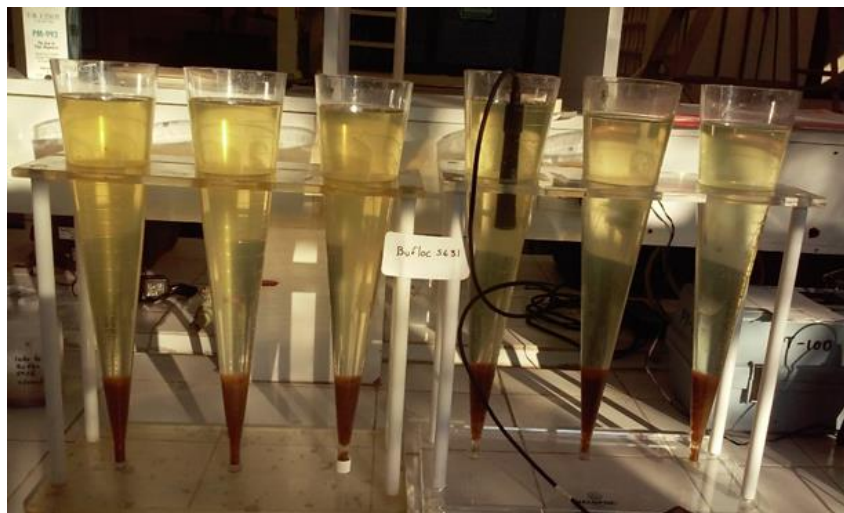


Figura 4-12 Lodo sedimentado con Bulfoc 5631.

Tabla 4-5. Valores de turbiedad logrados por el polímero Bufloc 5631.

Dosis (mg/L)	SDT (mg/L)	Ce ($\mu\text{S/cm}$)	Turbiedad (UTN)
0.05	161.5	323	32
0.1	161.3	323	23.8
0.2	161.4	323	24.4
0.3	161.4	323	17.6
0.4	161.4	323	16.3
0.5	161.6	323	11.7

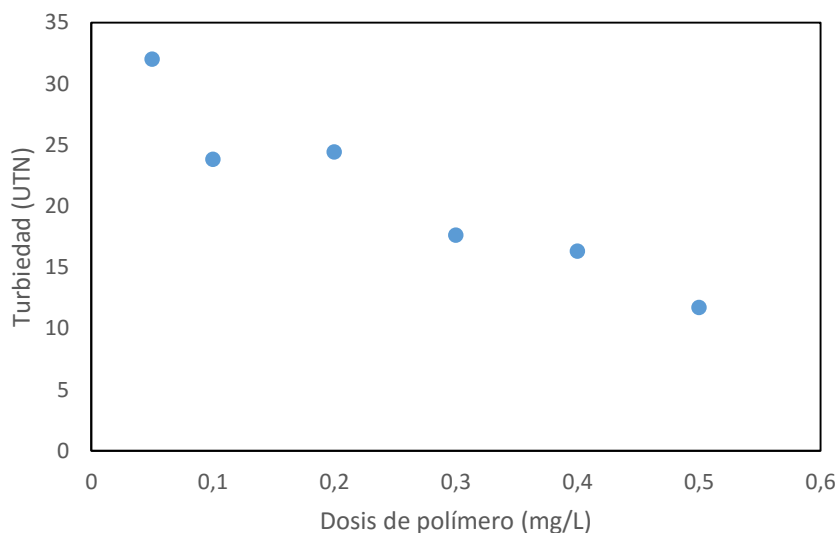


Figura 4-13 Variación de la turbiedad al aplicar diversas dosis de polímero Bufloc 5631.

La Figura 4-14 muestra un comparativo del desempeño de los tres mejores polímeros evaluados para el tratamiento de lodos proveniente del sistema de electrocoagulación. A las mismas dosis de polímero el que tuvo un mejor desempeño, es decir con el que se logró el valor más bajo de turbiedad corresponde al Bufloc 5290. Los polímeros 5426 y 5631 tuvieron resultados muy similares en dosis de 0.3 a 0.5 mg/L.

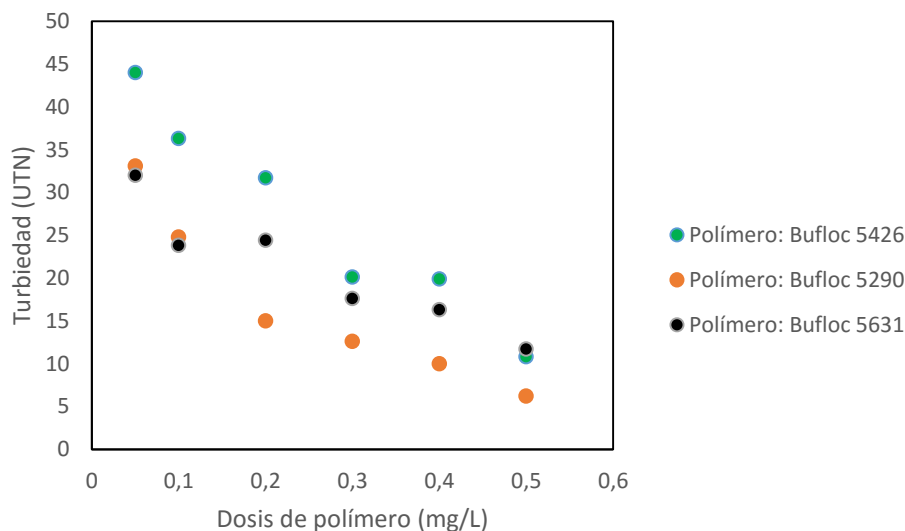


Figura 4-14. Comparativo del desempeño de los tres mejores polímeros para el tratamiento de los residuos de EC.

4.2.1.2 Tiempo a la Filtración

La siguiente tabla muestra los resultados de la prueba de resistencia a la filtración con el lodo obtenido empleando diferentes polímeros, con el polímero Bufloc 5290 se obtuvo una mejor formación de lodo que permite una eficiente filtración y formación de la capa de lodo (con aspecto pastoso) sobre la superficie del filtro, la cual se formó a los 2.56 minutos y el valor de turbiedad fue muy bajo respecto a los otros dos polímeros evaluados.

Tabla 4-6 Valores de turbiedad en la prueba de resistencia a la filtración.

Polímero	Volumen de muestra utilizado (mL)	Tiempo (min) hasta filtrar 50% de muestra	Tiempo (min) hasta filtrar 100% de muestra	Turbiedad en filtrado (UTN)
Bufloc 5631	100	1.03	2.3	100
Bufloc 5426	100	0.83	5.5	386
Bufloc 5290	100	0.68	2.56	9.72

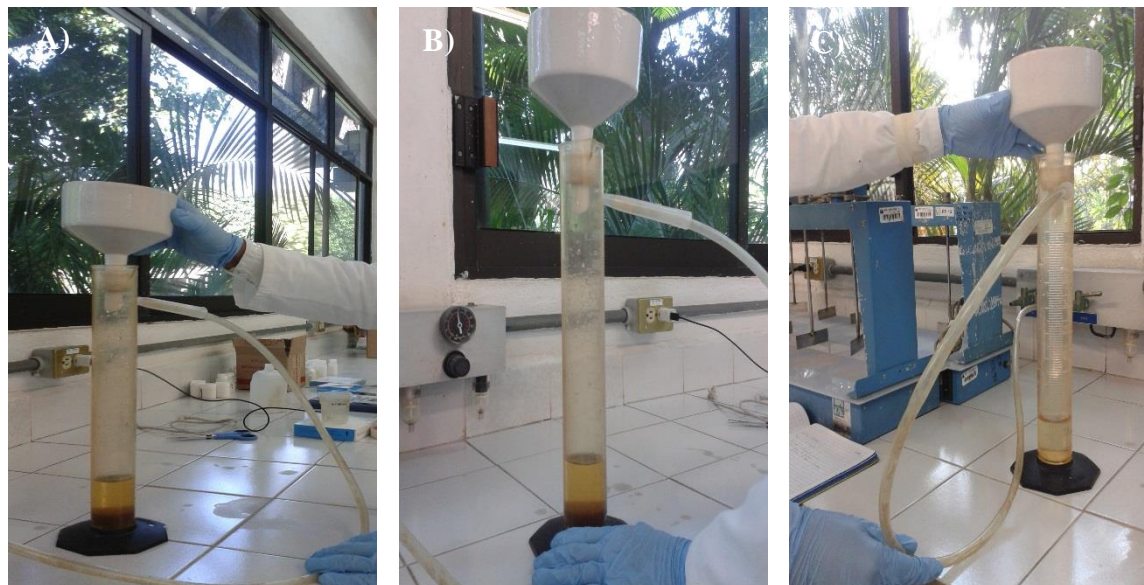


Figura 4-15 Filtrados de cada polímero: a) Bufloc 5631, b) Bufloc 5426 y c) Bufloc 5290.

4.2.1.3 Contenido de humedad en el lodo espesado con polímeros

- Prueba con Bufloc 5631

Los resultados del análisis de porcentaje de humedad para el polímero Bufloc 5631 indican que este lodo tiene un 99.5% de agua y un contenido de sólidos de 0.5%. Estos se muestran en la Tabla 4-7.

Tabla 4-7 Porcentaje de humedad y sólidos para el Bufloc 5631.

T (min)	% de humedad	% de sólidos	Masa (g)
2	1.50	98.60	9.88
4	3.50	96.40	9.65
6	6.10	94.10	9.41
8	8.70	93.20	9.14
10	9.60	90.30	9.04
20	20.10	80.01	8.00
30	29.00	70.90	7.10

40	38.90	61.20	6.12
50	47.00	52.90	5.30
60	57.10	43.00	4.31
70	67.00	32.90	3.34
80	76.50	23.60	2.37
90	84.70	15.20	1.54
100	93.50	6.60	0.67
102	94.30	5.60	0.58
104	95.80	4.20	0.43
106	97.10	2.80	0.30
108	98.00	2.10	0.21
110	98.70	1.20	0.13
112	99.40	0.70	0.07
114	99.50	0.50	0.05
116	99.50	0.50	0.05
118	99.50	0.50	0.05

- **Prueba con Bufloc 5426**

Para el caso de este polímero el contenido de humedad fue del 99.20% y solo un 0.80% de sólidos.

Tabla 4-8 Porcentaje de humedad y sólidos para el Bufloc 5426.

T (min)	% de humedad	% de sólidos	Masa (g)
2	1.20	98.90	9.89
4	3.20	96.70	9.68
6	3.70	95.40	9.50
8	7.70	92.50	9.26
10	7.20	90.30	8.80
15	14.20	85.60	8.58
20	21.90	78.30	7.83
30	33.60	66.30	6.68
40	40.60	59.60	5.96
50	57.80	42.00	4.23
60	67.00	33.20	3.33
70	72.50	27.30	2.76

80	81.40	18.80	1.89
90	90.10	9.80	0.99
92	91.10	8.80	0.89
94	92.50	7.60	0.76
96	93.70	6.10	0.59
98	94.50	5.40	0.57
100	95.40	4.80	0.47
102	96.00	4.00	0.39
104	96.70	3.30	0.34
106	97.30	2.70	0.26
110	98.20	1.70	0.18
114	98.90	1.10	0.11
116	99.10	0.90	0.09
118	99.20	0.80	0.08
119	99.20	0.80	0.08
120	99.20	0.80	0.08

- **Pruebas con Bufloc 5290**

Al igual que los anteriores pruebas de humedad, para este caso los resultados fueron muy similares, el contenido de humedad fue del 99.4% y el 0.60% de sólidos.

Tabla 4-9 Porcentaje de humedad y sólidos para el Bufloc 5290.

T (min)	% de humedad	% de sólidos	Masa (g)
2	5.20	98.60	9.89
4	7.50	96.50	9.68
6	7.80	95.70	9.45
8	8.40	91.40	9.17
10	11.00	89.20	8.94
15	16.90	83.00	8.34
20	23.50	76.80	7.70
30	33.70	66.10	6.66
40	46.00	54.20	5.43
50	57.70	42.20	4.24
60	71.50	28.80	2.89

70	79.60	20.60	2.07
80	90.10	9.80	1.00
82	91.40	8.80	0.88
84	93.20	6.80	0.70
86	94.90	5.30	0.53
88	97.30	2.60	0.27
90	98.00	2.00	0.21
92	98.80	1.50	0.14
94	99.10	1.00	0.10
96	99.40	0.60	0.06
98	99.40	0.60	0.06
100	99.40	0.60	0.06

En la siguiente figura se muestra la evolución del contenido de humedad del lodo tratado con cada polímero, prácticamente los tres productos tuvieron un desempeño muy similar. Se observa que el lodo tratado con Bufloc 5290 alcanza un equilibrio en un menor tiempo, al parecer el agua es más fácilmente liberada que en las otras dos muestras.

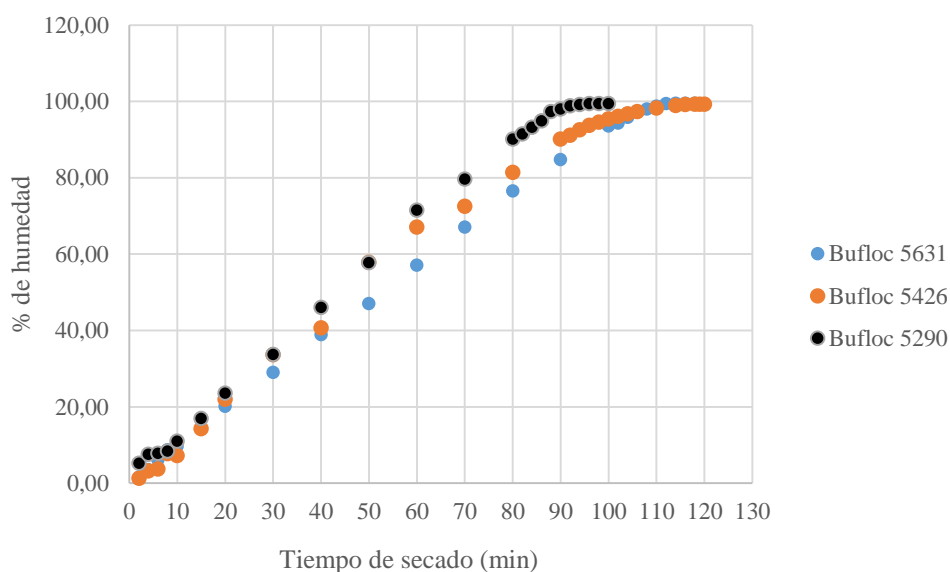


Figura 4-16 Porcentaje de humedad en el lodo de tres polímeros Bufloc.

4.2.1.4 Sólidos suspendidos totales, SST, en el lodo espesado

Los resultados del análisis de la concentración de sólidos suspendidos totales (SST) son mostrados en la Tabla 4-10 Concentración de sólidos suspendidos totales para cada polímero evaluado., el lodo acondicionado con el polímero Bufloc 5290 tuvo una mayor concentración de SST lo que puede interpretarse como que puede lograr una mayor compactación de lodo, es decir puede liberar más agua. La concentración de SST en el agua cruda fue de cercana a 233 mg/L.

Tabla 4-10 Concentración de sólidos suspendidos totales para cada polímero evaluado.

Polímero	SST promedio (mg/L)
Bufloc 5426	5410.0
Bufloc 5290	5480.0
Bufloc 5631	4020.0
Agua cruda	232.85

4.2.1.5 Turbiedad después de centrifugar el lodo espesado con polímeros

Después de realizar la centrifugación de los lodos espesados con los polímeros Bufloc 5631, 5426 y 5290, al agua clarificada se le midió la turbiedad, esta es mostrada en la Tabla 4-9. El mejor resultado se obtuvo con el polímero Bufloc 5290 que logró el valor más bajo de turbiedad (18.7 UTN).

Tabla 4-11 Turbiedad después de centrifugar el lodo.

Polímero	Turbiedad	Unidades
Bufloc 5631	21.8	UTN
Bufloc 5426	21.5	UTN
Bufloc 5290	18.7	UTN

4.2.2 Etapa B.

4.2.2.1 Tratamiento del lodo que contiene arsénico y 17 β -estradiol

El mejor polímero para el tratamiento del residuo objeto de este estudio fue el Bufloc 5290, este producto se empleó para tratar el residuo proveniente del proceso de agua para remover arsénico y la hormona 17 β -estradiol, la dosis fue de 0.4 mg/L a un gradiente de velocidad en el mezclado, G, de 300 s⁻¹ y un tiempo de sedimentación de 30 minutos, posteriormente se colectó el lodo sedimentado y se centrifugó a 3000 rpm durante 30 minutos. Todo esto se realizó en equipo de jarras (mezcla rápida), conos Imhoff (sedimentación), así como centrífuga a escala laboratorio hasta tratar los 55 litros de residuo que se habían colectado del retrolavado de filtros y lavado de la columna de floculación.

Para realizar una disposición adecuada del lodo es necesario conocer el contenido de humedad así como sus constituyentes químicos, por lo que al lodo centrifugado se le determinó la concentración de los sólidos totales (ST) y su porcentaje de humedad; un análisis de elementos; así como un análisis para cuantificación de la concentración de la hormona.

Terminado el tratamiento de lodo se cuantificó el volumen de agua clarificada y se le determinó su concentración de hierro y arsénico.

4.2.2.2 Volumen y características del lodo centrifugado

A partir de procesar 55 L de residuo mediante el acondicionamiento químico con Bufloc 5290 y sedimentación se obtuvo un volumen de 5 litros de lodo sedimentado. Este último se centrifugó y se obtuvo un volumen de 500 mL de la fase sólida, ver Figura 4-17. El volumen se disminuyó en un 99%.

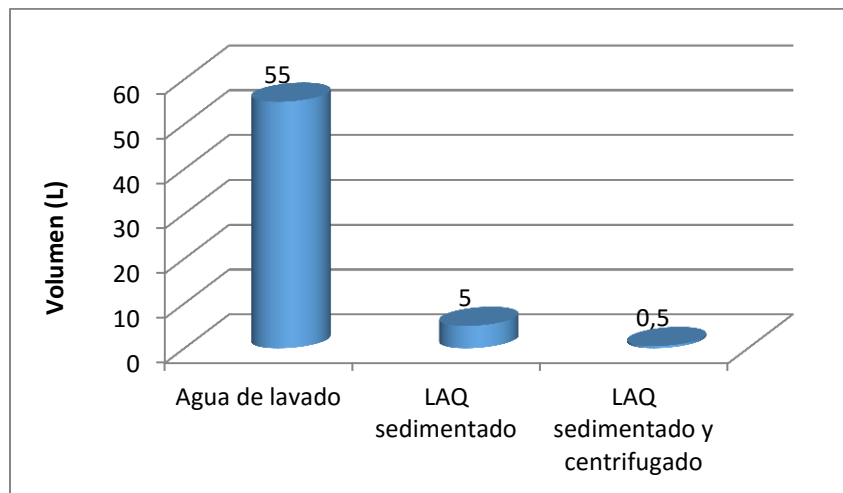


Figura 4-17 Reducción del volumen del residuo (agua de lavado) con el tratamiento.

El análisis para cuantificar la concentración de sólidos totales del lodo ya centrifugado se realizó por duplicado y los resultados se muestran en la Tabla 4-12

Tabla 4-12 Concentración de sólidos totales (ST) en el lodo centrifugado.

Peso constante en crisoles (g)	Peso con lodo (g)	Peso constante 2 crisoles más sólidos (g)		Sólidos (mg)	Concentración ST (mg/L)
74.9648	84.9648	75.4600	75.4595	494.70	66313.67
74.6574	84.6574	75.1269	75.1266	469.20	62895.44

Los resultados de la prueba de contenido de humedad a partir de 10 g de muestra se presentan en la Tabla 4-13, el porcentaje de humedad fue 95.3% con un contenido de sólidos del 4.7%, que dan valores parecidos a los obtenidos en el análisis de ST.

Tabla 4-13 Porcentaje de humedad de lodo centrifugado.

T (min)	% de humedad	% de sólidos	Masa (g)
5	23.7	76.3	7.8
10	48.8	51.2	5.38
15	67.8	32.2	3.31
20	85.1	14.9	1.55
25	92.5	7.5	0.77
30	95.1	4.9	0.5
35	95.3	4.7	0.47
40	95.3	4.7	0.47

Al realizar la comparación entre el lodo sedimentado y el lodo centrifugado con el mismo polímero Bufloc 5290, al centrifugar el lodo este tiene un tiempo de secado de 30 minutos (3 veces menor que el lodo sedimentado), el porcentaje de humedad fue del 99.4% para el lodo sedimentado y 95.3% para el lodo centrifugado lográndose pasar de 0.6% a 4.7% de sólidos, lo anterior indica el beneficio de la adición de la centrifugación al proceso de tratamiento.

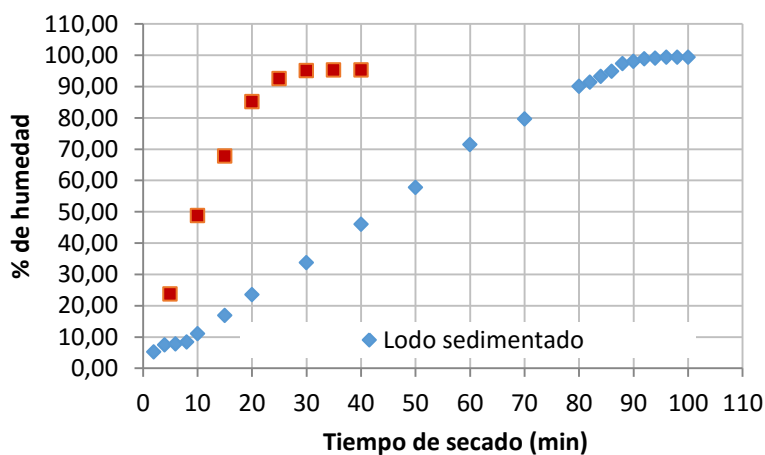


Figura 4-18 Comparación gráfica del porcentaje de humedad de lodo sedimentado y centrifugado.

El contenido de humedad logrado en el lodo acondicionado químicamente y centrifugado es aún alto, si se compara con lo que se puede lograr en lodos de plantas potabilizadoras convencionales que emplean coagulación química que pueden alcanzar de 85 a 90%, (Cornwel *et al.*, 1987) sin embargo, el producto obtenido en este estudio es manejable como un sólido húmedo para disposición.

Análisis químico del lodo centrifugado

Para identificar un residuo como peligroso por su toxicidad al ambiente la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, establece límites de algunos constituyentes tóxicos que puede contener el lixiviado obtenido de la prueba Procedimiento de Extracción de Constituyentes Tóxicos (PECT). Debido a que la cantidad de lodo obtenida no era el suficiente para realizar la extracción se determinó realizar un análisis elemental mediante Espectrofotómetro de Emisión Óptica- Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES). Los resultados se muestran en la Tabla 4-14. Los principales componentes químicos del lodo centrifugado son hierro, silicio, calcio, fósforo, arsénico y aluminio.

Tabla 4-14 Resultados del análisis Espectrofotómetro de Emisión Óptica- Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) al lodo centrifugado.

Analito	Unidades	Valores
Plata	mg/L	0.02
Aluminio	mg/L	19.36
Arsénico	mg/L	35.88
Boro	mg/L	0.33
Bario	mg/L	2.10
Berilio	mg/L	0.02
Calcio	mg/L	91.23
Cadmio	mg/L	0.47
Cobalto	mg/L	0.12
Cromo	mg/L	1.34
Cobre	mg/L	5.07

Hierro	mg/L	412.58
Potasio	mg/L	3.29
Litio	mg/L	0.18
Magnesio	mg/L	14.66
Manganeso	mg/L	4.00
Molibdeno	mg/L	0.17
Sodio	mg/L	4.07
Níquel	mg/L	1.03
Fósforo	mg/L	45.84
Plomo	mg/L	1.07
Antimonio	mg/L	0.00
Selenio	mg/L	0.00
Silicio	mg/L	102.50
Estño	mg/L	0.00
Estroncio	mg/L	2.22
Talio	mg/L	0.04
Vanadio	mg/L	4.10
Zinc	mg/L	8.32

En cuanto a la determinación del 17 β -estradiol, el Área de Cromatografía del Laboratorio de Calidad del Agua quien fue el responsable de realizar la determinación analítica de mestranol en el residuo sólido no lograron cuantificar la ausencia o presencia del esteroide debido a que su método presenta una interferencia, lo que impidió la adecuada cuantificación de esta hormona.

4.2.2.3 Volumen y características del agua separada del residuo

El agua retirada en el procesamiento del residuo (sedimentación y centrifugación) se acumuló dando un volumen de 50 litros.

La Tabla 4-15 muestra la comparación de valores de los diferentes parámetros de interés como son arsénico y hierro antes (agua de retrolavado) y después de la adición del polímero Bufloc 5290 (clarificado-sedimentación). Del clarificado de esta última

Estrategia para potabilización de agua en las cuencas de los ríos Yautepec y Cuautla, Morelos, con un enfoque holístico (segunda etapa)

etapa, una muestra fue filtrada por 0.45 micras y no se observó diferencia antes y después de filtrar, por lo que se asume que todo el hierro que le dio coloración al agua se encuentra en su forma soluble.

Tabla 4-15 Comparación de los parámetros de interés antes y después de las pruebas con polímeros.

Parámetro	Unidad	Agua de retrolavado	Clarificado (sedimentación y centrifugación)
SST	mg/L	234.3	-
SDT	mg/L	158.9	170
Fe	mg/L	-	14.5
As	µg/L	-	540
Turbiedad	UTN	45	15

4.3 CONCLUSIONES

Para la agregación de los flóculos del residuo en estudio, los polímeros que dieron mejor resultado fueron los de carga aniónica (Bufloc 5426, Bufloc 5631 y Bufloc 5290). El mejor de ellos fue el Bufloc 5290 con el que se logró un valor de 5480 mg/L de SST en el lodo sedimentado, el contenido de humedad de este lodo fue del 99.4%. Con este mismo polímero se obtuvo el mejor resultado respecto al tiempo de filtración y una adecuada formación de la torta de lodo en esta misma prueba, además de que la turbiedad del agua filtrada fue menor a 10 UTN a diferencia de lo obtenido con el lodo tratado con los otros dos polímeros donde este parámetro fue mayor a 100 UTN.

Del total del volumen de agua generada (55 L) como residuo, se puede recuperar 90.9% del agua después de la aplicación del polímero Bufloc 5290 y sedimentación,

esta cantidad de agua podría ser recirculada al tren de tratamiento si su calidad lo permitiera.

La calidad del agua retirada del lodo acondicionado químicamente tiene concentraciones de hierro y arsénico altas para ser retornadas al tratamiento, su reincorporación al proceso demandaría la adición de cloro para la oxidación y precipitación de ambos contaminantes.

Al realizar esta prueba después de centrifugar el lodo obtenido con el polímero 5290 se logró bajar la humedad a un valor de 95.35%. El contenido de humedad es aún alto si se compara con lo que se puede lograr en lodos de plantas potabilizadoras convencionales que emplean coagulación (85 a 90%) sin embargo, el producto obtenido en este estudio es manejable como un sólido húmedo para disposición.

Después de acondicionamiento químico, sedimentación y centrifugación el volumen del residuo se disminuyó en un 99%.

Es recomendable continuar el estudio con otros polímeros para mejorar la deshidratabilidad del lodo y la calidad del agua retirada del mismo, así como verificar la toxicidad ambiental del lodo, determinar la concentración de 17β -estradiol que este contiene, así como los costos de tratamiento.

5 EVALUACIÓN A ESCALA LABORATORIO DE PROCESOS DE NANOFILTRACIÓN Y ÓSMOSIS INVERSA PARA LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO Y DE LA HORMONA 17B-ESTRADIOL.

5.1 INTRODUCCIÓN

Los procesos de ósmosis inversa (OI) y de nanofiltración (NF) usan membranas semipermeables para remover principalmente contaminantes disueltos por medio de un proceso de difusión controlada. Aunque los procesos OI y NF también remueven materia particulada, las membranas semipermeables pueden incrustarse cuando son expuestas a una carga de partículas significativa. Cuando se aplica presión en exceso en un gradiente natural osmótico, el agua es forzada a pasar a través de la estructura molecular de la superficie de la membrana mientras que los sólidos disueltos son rechazados. Aunque los solutos pueden también difundirse a través de las membranas semipermeables, la tasa de masa transferida es muy inferior que la de agua. Por lo tanto, el agua que pasa a través de la membrana tiene muy pocos sólidos disueltos.

La cantidad de energía requerida para que el agua atraviese la membrana depende del material de la membrana y de su espesor, así como de la presión osmótica de alimentación. El proceso de ósmosis inversa se llama así porque el agua tiene que vencer el gradiente natural osmótico.

La presión de alimentación depende de la concentración de sólidos disueltos y de la temperatura del agua de alimentación, bajas concentraciones de SDT (Sólidos Disueltos Totales) y temperatura caliente requiere de una menor presión de alimentación para producir una misma calidad de permeado.

Las membranas de NF fueron desarrolladas en los 70's y rechazan una menor cantidad de iones pequeños, como cloro y sodio. Estos sistemas también requieren de menores presiones de alimentación, y son adecuados para aplicaciones como el ablandamiento y la remoción de sulfatos. Los dos principales materiales que se usan para

manufacturar las membranas OI y NF son acetato de celulosa y varias poliamidas. Aunque son manufacturadas en una variedad de configuraciones físicas, la configuración de espiral es la que se usa ampliamente en las plantas municipales.

La siguiente tabla muestra el potencial de remoción de varios tipos de membrana con respecto a diversos tipos de contaminantes. La siguiente tabla resume la misma información.

Tabla 5-1 Contaminantes que se remueven mediante procesos de membrana (AWWA, 2007).

Tecnología de membrana	Contaminantes que remueve
MF	<i>Giardia</i> <i>Cryptosporidium</i> Bacterias Turbiedad/materia particulada Materia orgánica coagulada Precipitados inorgánicos
UF	Todos los contaminantes que remueve MF Virus Macromoléculas orgánicas
NF	Iones divalentes/dureza Iones monovalentes Carbono orgánico disuelto Color
OI	Todos los contaminantes que remueve NF Iones monovalentes Iones disueltos
ED/EDI	Iones disueltos

Un sistema típico de membranas de OI o NF consiste de tres subsistemas separados: pretratamiento, el proceso de membrana y el postratamiento. La Figura 5-1 muestra un

proceso típico, incluyendo la línea de influente y dos líneas de efluente (el permeado y el concentrado).

Los procesos de tratamiento usualmente consisten en la adición de ácido y/o inhibidor de depósitos, para prevenir la precipitación de sales en la superficie de la membrana. Posteriormente se coloca un cartucho filtrante de 5 a 20 micrómetros para proteger las membranas de sólidos suspendidos. El postratamiento puede incluir operaciones unitarias como aireación, desgasificación, ajuste de pH, adición de químicos para controlar la corrosión, fluoración y desinfección.

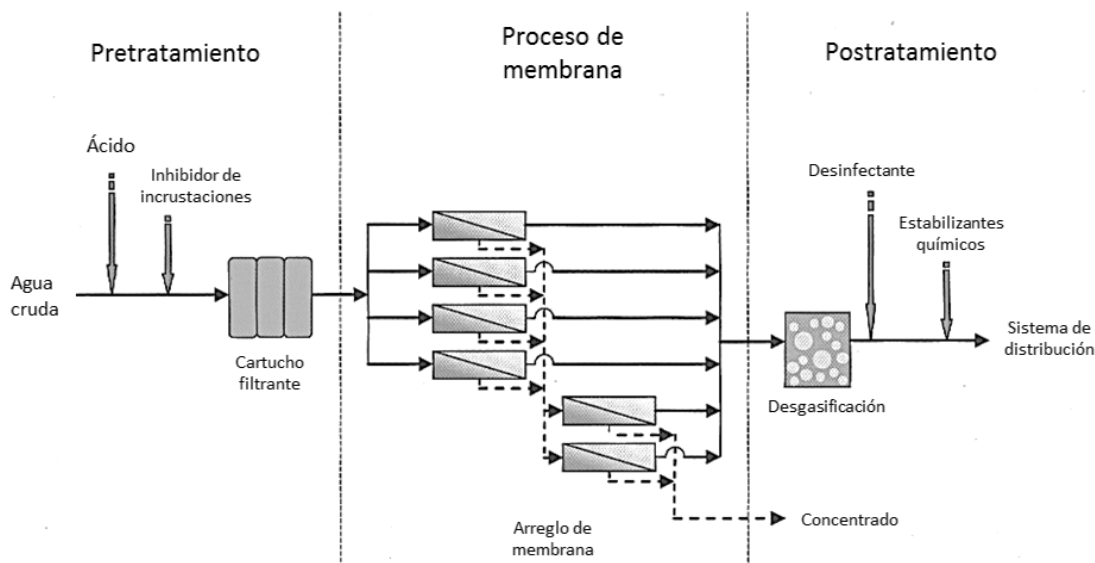


Figura 5-1 Típico sistema de membrana de nanofiltración u ósmosis inversa (AWWA, 2007).

5.2 APLICACIONES

5.2.1 Remoción de sólidos disueltos

La principal aplicación de los sistemas OI y NF es la desalación de agua superficial, subterránea, de mar, residual o industrial.

La remoción de sólidos disueltos totales mediante OI y NF no es selectiva, y se logran altos niveles de rechazo, el permeado es típicamente muy corrosivo y caracterizado por tener baja alcalinidad y mínima capacidad buffer. Si se usa ácido para el control de depósitos en el pretratamiento, el pH puede también ser bajo, haciendo más agresiva la naturaleza del permeado. Sin embargo, los sistemas OI y NF se pueden diseñar con apropiados procesos de postratamiento que produzcan agua que sea baja en sólidos disueltos totales con suficiente alcalinidad para disminuir su corrosividad.

5.2.2 Remoción de precursores DBP

Los sistemas OI y NF pueden remover precursores de subproductos de desinfección, los cuales pueden formar agentes potencialmente cancerígenos. Estos precursores incluyen trihalometanos, y ácidos haloacéticos.

5.2.3 Remoción de dureza

La nanofiltración es una alternativa adecuada al ablandamiento para reducir el calcio y magnesio en aguas duras naturales en las cuales la reducción de sólidos disueltos no es el objetivo principal. Aunque las membranas OI también son capaces de reducir la dureza, las membranas NF tienen menores capacidades de rechazo para iones monovalentes, lo que les permite operar a bajas presiones, lo que resulta en un proceso más económico. Típicamente, los procesos NF pueden remover más del 95% de la dureza total.

5.2.4 Remoción de color

La NF es también más efectiva que el suavizado con cal para remover el color natural. Es capaz de remover más del 95% de color.

5.2.5 Remoción de contaminantes inorgánicos

Las membranas OI son efectivas para la remoción de arsénico, nitratos, fluoruros, cadmio, mercurio, entre otros. Los fabricantes han modelado software que puede predecir la calidad del agua de permeado con una buena exactitud.

5.2.6 Remoción de patógenos

Debido a que las membranas semipermeables de OI y NF no son porosas, ellas tienen la habilidad de retener a los microorganismos. Se ha demostrado que las membranas OI proveen una remoción de entre 4 y 5 unidades logarítmicas de virus asociados a enfermedades transmitidas en el agua. Se ha determinado también que es efectivo para la remoción de Giardia. Sin embargo, es importante notar que los sistemas OI, NF no son barreras absolutas y no fueron diseñados para remover bacterias y virus.

5.2.7 Remoción de contaminantes emergentes

Los procesos OI, NF son a menudo las primeras tecnologías consideradas para tratar una variedad de contaminantes emergentes, por ejemplo, el perclorato, un ion inorgánico considerado como uno de los contaminantes emergentes que solo se puede remover con tecnologías como OI e intercambio iónico. OI y NF también son adecuados para eliminar contaminantes como disruptores endocrinos y compuestos activos farmacéuticos.

5.3 JUSTIFICACIÓN

En base a que el marco teórico de los procesos de membrana (NF y OI) indica que ambas tecnologías son aptas para la remoción de contaminantes emergentes y sólidos

disueltos totales, estas tecnologías fueron seleccionadas para su evaluación en la remoción de contaminantes presentes en las cuencas de los ríos Cuautla y Yautepec del Edo. de Morelos (arsénico y hormona estrogénica).

5.4 OBJETIVO

Evaluar el desempeño individual de membranas de ósmosis inversa y nanofiltración para la remoción de arsénico y la hormona estrogénica 17 β -estradiol.

5.5 METODOLOGÍA

El estudio se dividió en dos etapas. En la primera se evaluó la eficiencia individual de tres membranas para remover arsénico y la hormona estrogénica 17 β -estradiol. Una de las membranas evaluadas fue de ósmosis inversa (alto rechazo de iones monovalentes) y dos membranas fueron de nanofiltración (una de alto rechazo de iones divalentes, y una con un rechazo moderado de iones divalentes). La segunda etapa correspondió a la evaluación de dos técnicas de remineralización del agua procesada mediante ósmosis inversa/nanofiltración. Esto se realizó debido a que la ósmosis inversa/nanofiltración produce un agua muy baja en sales, que si bien puede cumplir con la Norma de agua potable Mexicana, esta puede ser corrosiva, y por lo tanto puede provocar daños en el sistema de suministro de agua potable.

5.5.1 Evaluación de membranas de ósmosis inversa y nanofiltración a escala laboratorio.

La siguiente tabla muestra las características principales de las membranas utilizadas, mientras que las figuras de la 3-5 muestran las fichas técnicas de las mismas. Estas membranas se eligieron para abarcar un rango amplio de porcentaje nominal de rechazo de sales.

Tabla 5-2. Características de las membranas utilizadas.

Membrana	Modelo de membrana	Porcentaje nominal de rechazo de sales
Nanofiltración CSM	NE 4040-70	40 – 70 %
Nanofiltración CSM	NE 4040-90	85 – 95 %
Ósmosis Inversa Hydranautics	CPA5-LD-4040	99.5 – 99.7 %

La evaluación de las membranas se realizó en un banco de pruebas del IMTA, el cual tiene una bomba de alta presión equipado con un variador de frecuencia que permite evaluar membranas de nanofiltración o de ósmosis inversa. El equipo permite probar una sola membrana a la vez, y es alimentado por una cisterna de 10 m³ de capacidad.



Figura 5-2 Banco de pruebas de membranas.

Nitto

HYDRANAUTICS
Nitro Group Company

Membrane Element

**CPA5-LD-4040
(Low Fouling Technology)**

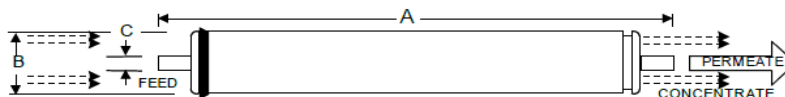
Performance:	Permeate Flow:	2,100 gpd (7.95 m ³ /d)
	Salt Rejection:	99.7 % (99.5% minimum)
Type	Configuration:	Low Fouling Spiral Wound
	Membrane Polymer:	Composite Polyamide
	Membrane Active Area:	80 ft ² (7.43 m ²)
	Feed Spacer:	34 mil (0.864 mm) with biostatic agent
Application Data*	Maximum Applied Pressure:	600 psig (4.16 MPa)
	Maximum Chlorine Concentration:	< 0.1 PPM
	Maximum Operating Temperature:	113 °F (45 °C)
	pH Range, Continuous (Cleaning):	2-11 (1-13)*
	Maximum Feedwater Turbidity:	1.0 NTU
	Maximum Feedwater SDI (15 mins):	5.0
	Maximum Feed Flow:	16 GPM (3.6 m ³ /h)
	Minimum Ratio of Concentrate to Permeate Flow for any Element:	5:1
Maximum Pressure Drop for Each Element:	10 psi	

* The limitations shown here are for general use. For specific projects, operating at more conservative values may ensure the best performance and longest life of the membrane. See Hydranautics Technical Bulletins for more detail on operation limits, cleaning pH, and cleaning temperatures.

Test Conditions

The stated performance is initial (data taken after 30 minutes of operation), based on the following conditions:

- 1500 PPM NaCl solution
- 225 psi (1.55 MPa) Applied Pressure
- 77 °F (25 °C) Operating Temperature
- 15% Permeate Recovery
- 6.5 - 7.0 pH Range



A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)	Weight, lbs. (kg)
40.00 (1016)	3.95 (100.3)	0.75 (19.1)	8 (3.6)

Figura 5-3 Membrana de ósmosis inversa marca: CSM Modelo: CPA5-LD-4040.

NE4040-70

CSM®

ESPECIFICACIONES

Características Generales	Rango de flujo de permeado	1,500 GPD (5.7 m ³ /día)
	Porcentaje nominal de rechazo de sales	40.0 - 70.0 %
	Rechazo de iones divalentes	45.0 - 70.0 %
	Area efectiva de membrana	85 Ft ² (7.9 m ²)

1.- Las condiciones del permeados están basadas en datos tomados después de 30 min. de operación en las siguientes condiciones monovalentes de prueba

- Una solución de 2,000 mg/l de NaCl a 75 psig (0.5 MPa) de presión aplicada
- 15% de recuperación
- 77 °F (25 °C)
- pH 6.5 - 7.0

2.- Las condiciones del permeados están basadas en datos tomados después de 30 min. de operación en las siguientes condiciones divalentes de prueba

- Una solución de 500 mg/l de CaCl a 75 psig (0.5 MPa) de presión aplicada
- 15% de recuperación
- 77 °F (25 °C)
- pH 6.5 - 7.0

3.- 97.0% Minimo de rechazo de sales de MgSO₄ (Las condiciones de prueba son equivalentes con NaCl)

4.- El rango del flujo de permeado puede variar pero no sera mas del 15% de los valores que se presentan

5.- Todos los elementos están sellados al vacío en bolsas de polietileno, con una solución al 1.0% SBS (bisulfito de sodio) y empacadas individualmente en cajas de carton

Tipo de Membrana	Compuesto de película delgada
Material de la Membrana	Poliamida (PA)
Configuración de la Membrana	Espiral con cubierta de FRP

Modelo	A	B	C	D	E
NE4040-70	40.0 pulg. (1,016 mm)	4.0 pulg. (102 mm)	0.75 pulg. (19.1 mm)	1.61 pulg. (41 mm)	1.61 pulg. (41 mm)



- 1.- Cada membrana viene con un sello U (rechazo) , un interconector (coople) y dos D-ring
- 2.- Todos los modelos NE4040 encajan en los recipientes de presión de 4" pulg. (102 mm) I.D.

Figura 5-4 Membrana de nanofiltración marca: CSM Modelo: NE4040-70.

NE4040-90

CSM®

ESPECIFICACIONES

Características Generales	Rango de flujo de permeado	1,600 GPD (6.0 m3/día)
	Porcentaje nominal de rechazo de sales	85.0 - 95.0 %
	Rechazo de iones divalentes	90.0 - 95.0 %
	Area efectiva de membrana	85 Ft2 (7.9 m2)

1.- Las condiciones del permeados están basadas en datos tomados después de 30 min. de operación en las siguientes condiciones monovalentes de prueba

- Una solución de 2,000 mg/l de NaCl a 75 psig (0.5 MPa) de presión aplicada
- 15% de recuperación
- 77 °F (25 °C)
- pH 6.5 - 7.0

2.- Las condiciones del permeados están basadas en datos tomados después de 30 min. de operación en las siguientes condiciones divalentes de prueba

- Una solución de 500 mg/l de CaCl a 75 psig (0.5 MPa) de presión aplicada
- 15% de recuperación
- 77 °F (25 °C)
- pH 6.5 - 7.0

3.- 97.0% Mínimo de rechazo de sales de MgSO4 (Las condiciones de prueba son equivalentes con NaCl)

4.- El rango del flujo de permeado puede variar pero no será más del 15% de los valores que se presentan

5.- Todos los elementos están sellados al vacío en bolsas de polietileno, con una solución al 1.0% SBS (bisulfito de sodio) y empacadas individualmente en cajas de cartón

Tipo de Membrana	Compuesto de película delgada
Material de la Membrana	Poliamida (PA)
Configuración de la Membrana	Espiral con cubierta de FRP

Modelo	A	B	C	D	E
NE4040-90	40.0 pulg. (1,016 mm)	4.0 pulg. (102 mm)	0.75 pulg. (19.1 mm)	1.61 pulg. (41 mm)	1.61 pulg. (41 mm)



- 1.- Cada membrana viene con un sello U (rechazo) , un interconector (cople) y dos O-ring
- 2.- Todos los modelos NE4040 encajan en los recipientes de presión de 4" pulg. (102 mm) I.D.

Figura 5-5 Membrana de nanofiltración marca: CSM Modelo: NE4040-90.

5.5.2 Preparación de agua cruda

Se preparó agua en una cisterna con capacidad de un volumen de 10 m³, llenándose con agua de pozo del IMTA, la cual se aireó con ayuda de un compresor para eliminar el cloro libre presente. El cloro es un elemento indeseable para estos sistemas, ya que corroe las membranas a base de poliamidas. Una vez eliminado el cloro, se adicionó el arsénico necesario y la hormona para alcanzar las concentraciones requeridas en el estudio (200 microgramos/L de arsénico y 70 nanogramos/L de 17β-estradiol), una vez agregados los contaminantes, se mezcló durante 13-15 minutos mediante aireación.

5.5.3 Calidad del agua cruda

Se preparó agua sintética disolviendo la masa requerida de arsénico y hormona estrogénica 17β-estradiol en agua de pozo del IMTA. La calidad del agua sintética se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5-3. Calidad del agua cruda (agua sintética).

Parámetro	Valor
pH	7.78
Conductividad (microS/cm)	346
Sólidos disueltos totales	150
Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	70
Dureza total(mg/L CaCO ₃)	94
Dureza de calcio	75
Arsénico (mg/L)	200
Sulfatos (mg/L)	27
Cloruros (mg/L)	42.5
Fluoruros (mg/L)	0.221
Nitratos (mg/L)	3.2
Sílice (mg/L)	52.8
Fosfatos (mg/L)	0.99
Magnesio (mg/L)	0.01

5.5.4 Evaluación de dos técnicas de remineralización

Los sistemas de post-tratamiento de agua dirigidos a remineralizar y estabilizar el agua desalinizada han sido una parte integral de las plantas desalinizadoras. El más importante propósito de la remineralización es producir un agua químicamente estable con el objetivo de minimizar la corrosión de partes metálicas y la desintegración de componentes de concreto en los sistemas de distribución de agua (AWWA, 2007).

Existe una diversidad de técnicas de remineralización, las cuales se pueden dividir en tres grupos de tecnologías: (1) procesos que se basan en la adición directa de químicos que contienen calcio (p.ej. hidróxido de calcio, cloruro de calcio) y magnesio (p.ej. cloruro de magnesio y sulfato de magnesio), (2) procesos en los que la remineralización se realiza mediante la mezcla de agua desalinizada con una porción del agua que se utiliza para llevar a cabo la desalinización, o con otras fuentes de agua con elevado contenido de calcio y magnesio, y (3) procesos en los que el calcio y el magnesio son agregados mediante la disolución de minerales como calcita (carbonato de calcio) y dolomita (carbonato de calcio y magnesio) (Voutchkov, 2011).

La disolución de calcita/dolomita tiene las siguientes ventajas sobre los otros procesos de remineralización:

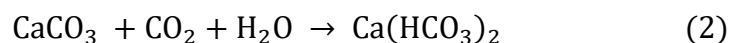
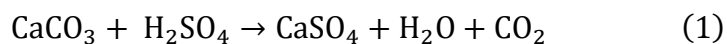
1. No adiciona turbidez al agua producto
2. Produce agua con elevada capacidad buffer
3. Facilidad de operación
4. No existe riesgo si ocurre una sobredosificación

Este método es rutinariamente usado en regiones donde la calcita está disponible a un precio accesible. El proceso de disolución se realiza en un pH ácido, en tanques empacados con calcita, en el que se controla el pH del influente; estos equipos son comúnmente llamados “contactores de calcita o filtros de calcita”. La disolución de

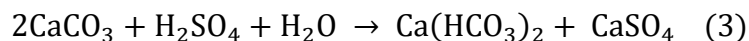
calcita resulta en el enriquecimiento del agua con iones de calcio y alcalinidad por bicarbonatos.

En la práctica, la reducción de pH se lleva a cabo mediante la adición de un ácido fuerte (H_2SO_4) o uno débil (CO_2).

Cuando se utiliza ácido sulfúrico, en conjunto con calcita, primeramente ocurre una reacción en la que se provoca la formación de dióxido de carbono, y sulfato de calcio, mientras que en una reacción secundaria entre el dióxido de carbono y la calcita (CaCO_3) se forma bicarbonato de calcio. Las reacciones son las siguientes (Hernandez-Suarez, 2010):



En resumen:



Los filtros de calcita (o también llamados contactores de calcita) han sido utilizados por décadas, sin embargo, existe poca información en la literatura científica sobre los parámetros de diseño imperativos de esta tecnología (Lehmann *et al*, 2013), los cuales inciden en el costo de inversión y de operación. Los criterios de diseño sugieren que la velocidad del agua en los contactores de calcita debe ser de entre 4 a 8 m/h, el tiempo de residencia hidráulico debe oscilar entre 10 y 30 minutos y el pH debe ser menor a 4.5. Además, de que no se indica el nivel de efecto que tienen estos parámetros en la eficiencia de remineralización, estos rangos son amplios, por lo que esta información no ayuda a diseñar filtros eficientes con el menor costo de inversión y operación asociado.

Se eligieron las siguientes técnicas para ser evaluadas para remineralizar el agua:

- 1.- Filtración en calcita.
- 2.- Dosificación de cloruro de calcio y bicarbonato de sodio.

Estas técnicas se eligieron en base a que son las más comunes, fáciles de operar y que no incrementan significativamente la turbiedad del efluente.

Uno de los aspectos más importantes para evaluar las técnicas fue el cálculo del índice de saturación de Langelier en el agua producto de cada una de ellas.

El índice de saturación de Langelier se calcula en base al pH, alcalinidad, sólidos disueltos totales, dureza total y temperatura de una muestra de agua; y es un indicador de la tendencia corrosiva o incrustativa del agua, siendo un valor de 0 ± 0.5 un rango aceptable para que un agua no provoque problemas de corrosión o de incrustación (Waterexpert, 2015).

La siguiente tabla muestra el significado de los índices de saturación de langelier, y la recomendación para evitar los problemas de corrosión e incrustación en sistemas de distribución de agua.

Tabla 5-4. Descripción de los índices de saturación de Langelier.

ÍNDICE DE SATURACIÓN DE LANGELIER (ISL)		
Índice de saturación	Descripción	Recomendación
-4	Corrosión severa	Se recomienda tratamiento
-3	Corrosión severa	Se recomienda tratamiento
-2	Corrosión moderada	Se recomienda tratamiento
-1	Corrosión ligera	Puede ser necesario tratamiento
-0.5	Ligera o sin corrosión	No se requiere tratamiento
0	Casi equilibrio	No se requiere tratamiento
0.5	Débil formación de película	No se requiere tratamiento
1	Ligera precipitación de película	Puede ser necesario tratamiento
2	Ligera o moderada formación de película	Puede ser necesario tratamiento
3	Precipitación moderada	Se recomienda tratamiento
4	Precipitación severa	Se recomienda tratamiento

5.5.5 Pruebas en contactores de calcita

Debido a la falta de información técnica en la bibliografía sobre criterios de diseño de filtros de calcita, se realizó un estudio enfocado en la evaluación del efecto que tienen la velocidad de flujo, el tiempo de contacto y el pH, en un proceso de remineralización de agua osmotizada, los cuales son considerados los parámetros de diseño más importantes para los contactores de calcita. Para evaluar dichos parámetros de diseño (factores) se empleó un diseño de experimentos factorial 2^k , específicamente un 2^3 , el cual consistió de once pruebas experimentales. Cada parámetro se evaluó en tres niveles, uno bajo, uno alto y uno medio. La siguiente tabla muestra los niveles elegidos para cada uno de los factores sujetos a estudio. Los niveles corresponden a los valores altos y bajos recomendados por la literatura, a fin de evaluar en un amplio intervalo, el efecto de cada uno de los factores.

Tabla 5-5 Niveles de los factores sujetos a estudio.

	Velocidad de flujo (m/h)	Tiempo de contacto (min)	pH
Nivel bajo	4	10	3
Nivel alto	8	20	6
Nivel central	6	15	4.5

La tabla 6 indica la matriz de experimentos, en la que se muestra el orden en el que se llevaron a cabo las once pruebas y la combinación de factores en cada una de ellas.

Tabla 5-6. Matriz experimental del diseño 2³ empleado.

No. de prueba	pH	Tiempo de contacto (min)	Velocidad de flujo (m/h)
1	4.5	15	6
2	4.5	15	6
3	3	20	4
4	6	10	8
5	6	10	4
6	3	10	4
7	6	20	8
8	6	20	4
9	3	20	8
10	3	10	8
11	4.5	15	6

Antes de realizar cada una de las pruebas, primeramente se desalinizó agua proveniente de un pozo del Instituto, la cual se recolectó en un tanque y se le ajustó el pH con ácido sulfúrico al 98% (grado comercial), al pH requerido. El equipo utilizado para desalinizar agua fue un banco de pruebas para membranas de ósmosis inversa (Figura 5-6 a). El modelo de la membrana utilizada fue el CPA5-LD-4040 de Hydranautics. El contactor piloto de calcita (Figura 5-6 b) se construyó en acrílico, y se empacó a diferentes niveles de altura con calcita, según fuera el tiempo de contacto requerido en cada prueba; el caudal de entrada también se varió en cada prueba, ajustándose para alcanzar la velocidad de flujo y el tiempo de contacto requerido. La calcita utilizada tuvo una pureza mayor al 98% y un diámetro efectivo de 1 mm. El contactor operó a flujo continuo, y el tiempo de operación fue de 5 horas para cada una de las pruebas realizadas.

La Figura 3-6 a muestra el banco de pruebas utilizado para desalinizar agua, mientras que la Figura 3-6 b muestra el contactor de calcita utilizado para realizar los

experimentos. El agua desalinizada tuvo índice de Langelier de -5 antes de someterse al proceso de remineralización.

Los resultados obtenidos en las pruebas experimentales se analizaron mediante el paquete de cómputo estadístico STATGRAPHICS Centurión XV Versión 15.2.06, del que se obtuvieron análisis de varianza, gráficas de efectos principales, diagramas de Pareto y gráficas de superficie de respuesta, para la variable de respuesta analizada.

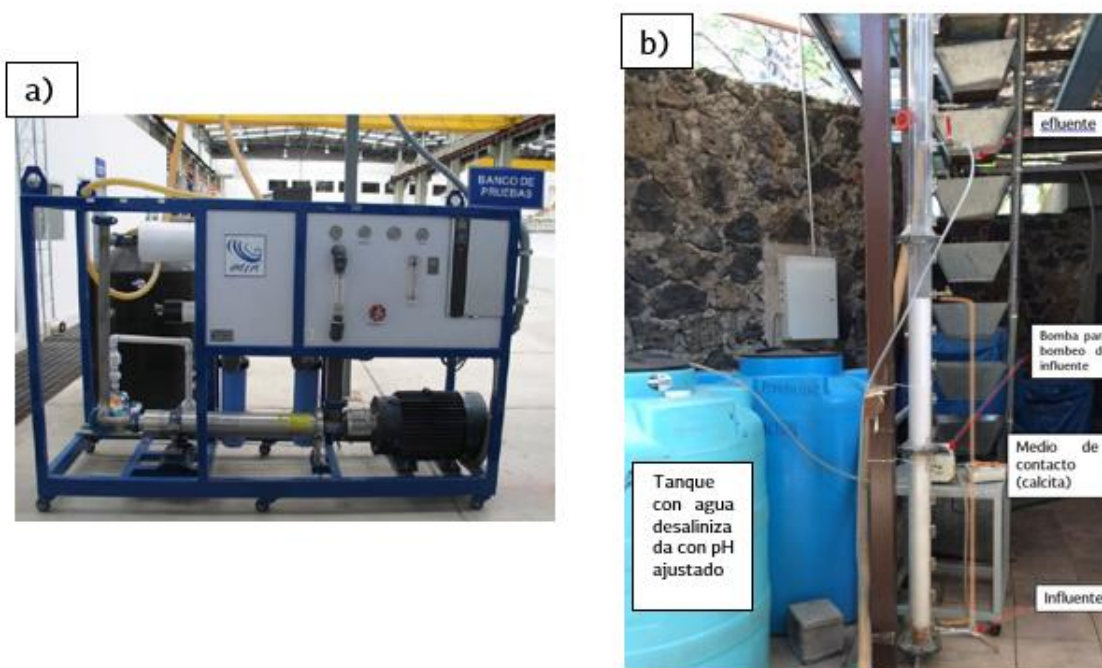


Figura 5-6 a) Banco de pruebas para membranas de ósmosis inversa, **b)** Contactor de calcita utilizado para realizar las pruebas

Pruebas con dosificación de cloruro de calcio y bicarbonato de sodio

Para evaluar el efecto de la dosificación de cloruro de calcio y bicarbonato de sodio, primeramente se hicieron pruebas para obtener dos correlaciones que permitieran evaluar el efecto individual que tiene la dosificación de estos reactivos en agua desalinizada. Una vez obtenidas las correlaciones se eligió la dosis óptima y se preparó una disolución para ser evaluada mediante caracterización y obtención del ISL.

5.6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.6.1 Evaluación de membranas de ósmosis inversa y nanofiltración a escala laboratorio.

La siguiente tabla muestra las condiciones promedio en que operaron las membranas. Puede observarse que la membrana HYDRANAUTICS CPA5-LD-4040 requirió mayor presión para alcanzar el caudal de permeado requerido, ya que esta membrana es de ósmosis inversa, mientras que la membrana que requirió una menor presión fue la NE 4040-70 (65 psi), es decir, la que tiene un menor porcentaje nominal de rechazo de sales. Se descartó una condición de incrustación o de atascamiento porque la ΔP se mantuvo por debajo de 10 psig, tal como señala el fabricante.

Tabla 5-7 Condiciones promedio de operación de las membranas evaluadas.

Membrana	Presiones de operación		
	Presión de alimentación	Presión de rechazo	ΔP
Unidades	Psig	Psig	Psig
CSM NE 4040-70 Nanofiltración	65	60	5
CSM NE 4040-90 Nanofiltración	93	86	7
HYDRANAUTICS CPA5-LD-4040 Ósmosis inversa	165	157	8

Se obtuvo una mayor remoción de iones monovalentes y polivalentes al utilizar la ósmosis inversa, mientras que la membrana que tuvo la menor remoción fue la que tiene un porcentaje nominal de rechazo de sales del 70% (NE 4040-70). Es decir, la eficiencia de remoción de sales fue directamente proporcional al porcentaje nominal de

rechazo de sales de las membranas, siendo la membrana de ósmosis inversa la que requirió de una mayor presión, y por lo tanto, tendría un mayor costo energético. En cuanto a la remoción de arsénico se refiere, las tres membranas evaluadas lograron rechazar el arsénico en un elevado porcentaje (100% para la membrana de ósmosis inversa y 99.99% para ambas membranas de nanofiltración), por lo que fue posible obtener en todos los casos un agua producto con una concentración de arsénico inferior al límite que establece la NOM-127-SSA1-1994 (2000), el cual es de 0.025 mg/L. Estos resultados nos muestran que incluso la membrana con el menor rechazo de sales evaluada (NE 4040-70) es capaz de rechazar el arsénico presente. En el anexo 9.2 se muestra los informes de prueba de concentración de arsénico en el agua cruda y el efluente de cada uno de los efluentes realizado en un laboratorio acreditado. La siguiente tabla muestra la calidad del agua de los efluentes.

Tabla 5-8 Calidad del efluente producido por las membranas.

Parámetro	Efluente de membrana de ósmosis inversa CPA5-LD-4040	Efluente de membrana de nanofiltración NE 4040-90	Efluente de membrana de nanofiltración NE 4040-70
Dureza total(mg/L CaCO₃)	3	0	0
Dureza de calcio	1	13	15
Arsénico (mg/L)	<0.001	0.0035	0.0013
Sulfatos (mg/L)	0	0	0
Cloruros (mg/L)	0.2	3.2	18.3
Fluoruros (mg/L)	0.047	0.0763	0.1
Nitratos (mg/L)	1	1.1	3
Sílice (mg/L)	0	14.5	34.6
Fosfatos (mg/L)	0.24	0.43	0.65
Magnesio (mg/L)	0.001	0.002	0.003
SDT (mg/L)	3	17.4	58.9

El porcentaje de remoción de sólidos disueltos totales fue: 98% para la membrana CPA5-LD-4040, 88% para la membrana NE 4040-90 y 60% para la membrana NE 4040-70.

Dado que la membrana NE 4040-70 ofrece a su vez, el menor consumo energético, se procedió a simular en software especializado el proceso en un banco de nanofiltración con vasijas de presión de seis membranas (es importante mencionar que el presente estudio se realizó en un banco de pruebas de una sola membrana que permite evaluar diversas membranas para observar el rechazo de contaminantes de las mismas, sin embargo, la calidad de agua producto no es representativa de un proceso a escala industrial, ya que en los procesos industriales se colocan series de 6 membranas, obteniéndose un agua producto con una calidad inferior a la que se produce al operar una sola membrana). Esta simulación permitió calcular el costo de energía asociado al proceso.

5.6.2 Evaluación de dos técnicas de remineralización

5.6.2.1 Pruebas en contactores de calcita

El análisis de varianza del diseño experimental indicó que el pH fue el único factor que tuvo un efecto significativo sobre el índice de langelier del agua remineralizada, ya que su valor-P fue menor al valor de la significancia prefijada ($\alpha = 0.05$).

Tabla 5-9 Análisis de varianza para el índice de Langelier

<u>Source</u>	<u>Sum of Squares</u>	<u>Df</u>	<u>Mean Square</u>	<u>F-Ratio</u>	<u>P-Value</u>
A:pH	0.959113	1	0.959113	11.34	0.0435
B:Tiempo de residencia	0.0066125	1	0.0066125	0.08	0.7979
C:Velocidad	0.0036125	1	0.0036125	0.04	0.8495
AB	0.0276125	1	0.0276125	0.33	0.6077
AC	0.0105125	1	0.0105125	0.12	0.7477
BC	0.0406125	1	0.0406125	0.48	0.5382
Total error	0.253725	3	0.084575		
Total (corr.)	1.3018	9			

Con objeto de visualizar el impacto de cada uno de los factores, así como de las interacciones entre éstos en la variable de respuesta (índice de Langelier), se elaboró el diagrama de Pareto. En esta gráfica, cada efecto es dividido entre su error estándar. En adición, una línea es dibujada sobre la gráfica para determinar si un efecto es estadísticamente significativo en el nivel de significancia especificado. Los factores y sus interacciones se encuentran graficados en orden descendente con relación al impacto con que estos afectan al índice de Langelier. El diagrama de Pareto muestra, al igual que el análisis de varianza, que únicamente el pH tiene efecto significativo sobre el índice de estabilización de Langelier ya que es el único factor que cruza la línea de significancia).

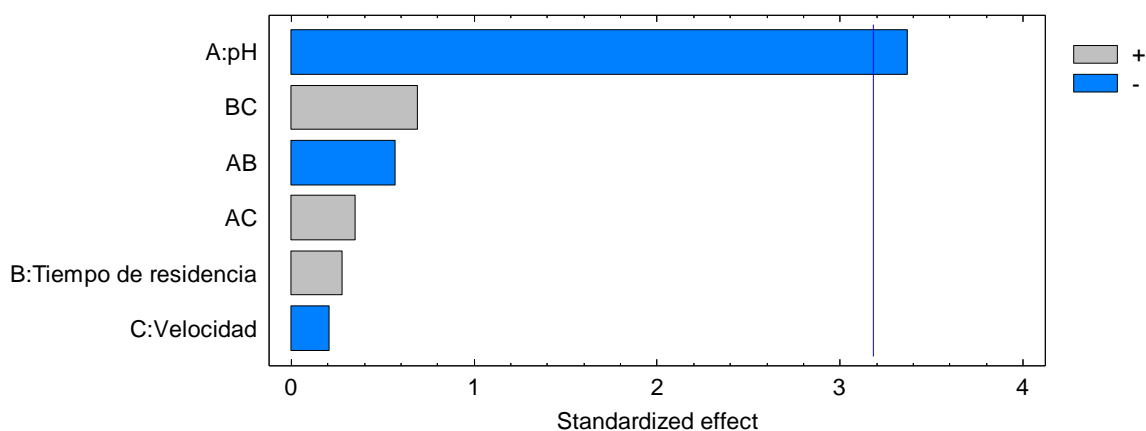


Figura 5-7 Diagrama de Pareto del diseño experimental realizado

El gráfico de superficie de respuesta (Figura 5-8) muestra que al ajustar el influente a remineralizar, a un pH de 3 se obtienen índices de Langelier mayores a -0.5, por lo que se obtiene un efluente con una estabilidad química aceptable, que no provocará problemas de corrosión o incrustación en la red de suministro. Este índice no se modificará si se varía el tiempo de residencia o la velocidad de flujo bajo las condiciones empleadas en este estudio.

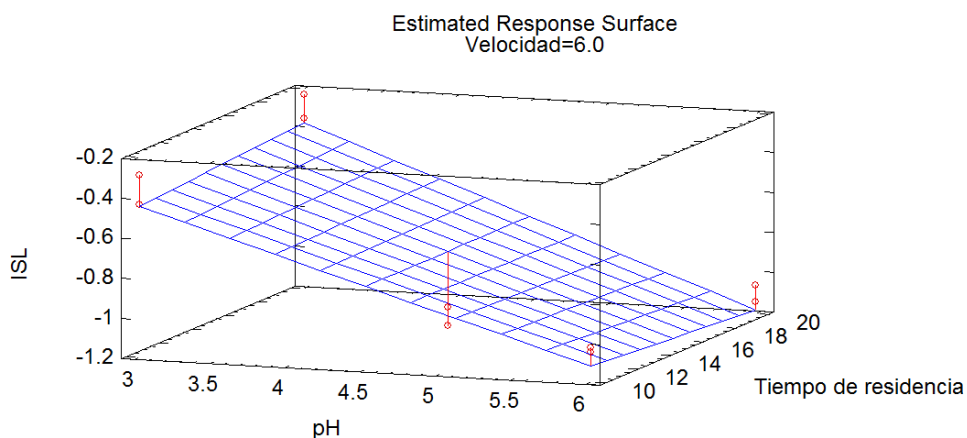


Figura 5-8 Gráfico de superficie de respuesta.

De los tres factores evaluados en este estudio (pH del influente, tiempo de residencia y velocidad de flujo), únicamente el pH del influente tuvo un efecto estadísticamente significativo en el índice de saturación de Langelier, para el proceso de remineralización en un contactor de calcita a flujo continuo. Por lo que es posible diseñar contactores de calcita con una velocidad de 8 m/h, y un tiempo de contacto de 10 min (que implican la construcción de contactores más compactos) y por ende, un menor costo de inversión en comparación con contactores que operen a una velocidad de 4 m/h y tiempos de residencia de 30 min. Esto sin afectar la eficiencia de remineralización. Durante el presente estudio fue posible obtener efluentes con un índice de langelier >-0.5, independientemente de los niveles de tiempo de residencia y velocidad de flujo utilizados.

El costo de este proceso de remineralización se calculó en 0.65 pesos/m³, del cual 0.46 pesos/m³ corresponde al costo del ácido y 0.19 pesos/m³ corresponde al costo de la calcita consumida.

5.6.2.2 Pruebas con dosificación de cloruro de calcio y bicarbonato de sodio

La siguiente tabla relaciona la dosis de cloruro de calcio con el aporte de dureza total, pH, sólidos disueltos totales, alcalinidad e índice de Langelier.

Como puede observarse, la dosificación de este reactivo aumenta la dureza, pero no proporciona alcalinidad, ni aumento de pH. El incremento del índice de Langelier (ISL) no es significativo.

Tabla 5-10 Correlación entre la dosis de cloruro de calcio y su aporte en dureza, pH, alcalinidad e índice de saturación de Langelier.

Dosis de cloruro de calcio (mg/L)	Dureza total (mg/L)	pH	Sólidos disueltos totales (mg/L)	Alcalinidad (mg/L)	ISL
0	2.9	6.28	1	0	-4.62
130	109	6.05	144.2	2.4	-3.48
290	241	6.03	302	2.2	-3.25
575	454	5.90	588	2.7	-3.03
1150	907	5.90	1131	3.3	-2.68
2885	2385	5.94	2660	4.4	-2.12

La siguiente tabla relaciona la dosis de bicarbonato de sodio con su aporte de dureza total, pH, sólidos disueltos totales, alcalinidad e índice de Langelier. Como puede observarse, la dosificación de este reactivo aumenta la alcalinidad, y el pH, pero no proporciona dureza, por lo que no incrementa el índice de Langelier (ISL) lo suficiente para alcanzar un valor aceptable.

Tabla 5-11. Correlación entre la dosis de bicarbonato de sodio y su aporte en dureza, pH, alcalinidad e índice de saturación de Langelier.

Dosis de Bicarbonato de sodio (mg/L)	Dureza total (mg/L)	pH	Sólidos disueltos totales (mg/L)	Alcalinidad (mg/L)	ISL
0	0	6	1	0	-4.62
100.2	1.9	8.00	56.9	59	-2.00
200.4	2.7	8.27	111	119	-1.27
400.2	2	8.30	219	232	-1.20
1001.8	2	8.41	524	590	-0.80

Posteriormente se procedió a adicionar los dos reactivos en las siguientes proporciones: 130 mg/L de cloruro de calcio y 100 mg/L de bicarbonato de sodio.

El costo de este proceso se calculó en 3.35 pesos/m³, del cual 0.79 pesos/m³ corresponden al costo de la dosificación de bicarbonato de sodio y 2.56 pesos/m³ a la dosificación de cloruro de calcio.

Bajo estas condiciones se obtuvo un agua con la siguiente calidad:

Tabla 5-12. Datos de calidad de agua obtenida con la mezcla de cloruro de calcio y bicarbonato de sodio.

Alcalinidad (mg/L CaCO₃)	59
pH	7.95
SDT (mg/L)	196.5
Dureza (mg/L)	108
Temperatura (°C)	23.4
ISL	-0.19

El índice de Langelier obtenido de esta mezcla fue de -0.19, que se considera un valor aceptable, que no provocará problemas de incrustación o corrosión.

5.6.3 Cálculo del costo del proceso de nanofiltración

Para calcular el costo del proceso de nanofiltración se realizó una simulación en un software especializado en procesos de nanofiltración y ósmosis inversa, utilizando datos de la fuente de agua más contaminada que se detectó durante un muestreo que realizó el IMTA en el 2014 en la cuenca del río Cuautla-Yautepec (concentración de arsénico de 0.187 mg/L). Se simuló una planta de nanofiltración con capacidad de producir 1L/s de agua potable, con tres vasijas de presión con capacidad para alojar 6 membranas de nanofiltración con un rechazo moderado de iones divalentes. El costo se calculó en \$2 pesos por m³ de agua tratada, y se integró de la siguiente manera:

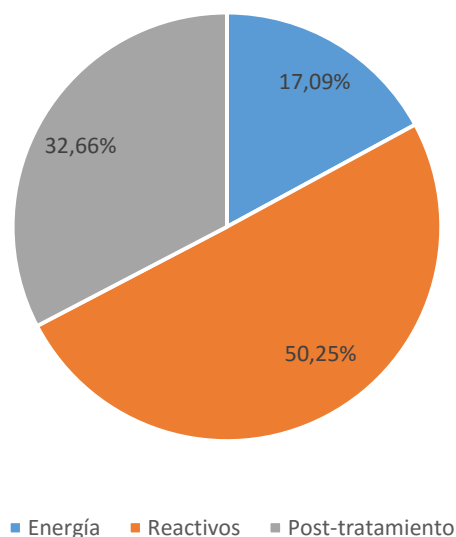


Figura 5-9 Costo del tratamiento mediante nanofiltración

5.7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las tres membranas evaluadas en el presente estudio presentaron un elevado rechazo de arsénico (100% para la membrana de ósmosis inversa y 99.99% para ambas membranas de nanofiltración), partiendo de un agua que contenía 199 microgramos por Litro de arsénico. Sin embargo, cada una de ellas rechazó en diferente proporción las sales, y requirió diferente presión para obtener un mismo caudal de agua producto. De estos datos se obtiene que la mejor membrana para llevar a cabo el proceso es la de nanofiltración que tiene un porcentaje nominal de rechazo de sales medio (40-70%), ya que esta membrana requiere de una menor presión en comparación con las otras dos evaluadas, y por ende, tiene el menor costo energético. El costo del tratamiento mediante nanofiltración con membranas con moderado rechazo de iones divalentes se calculó en \$2 pesos por m³ de agua tratada.

Se recomienda hacer pruebas de nanofiltración utilizando un equipo piloto con vasijas de presión que contengan 6 membranas en serie, esto para obtener datos de calidad de agua más representativos de una planta real, y verificar que el proceso de nanofiltración permita remover eficientemente elevadas concentraciones de arsénico.

De las dos técnicas de remineralización evaluadas (contactor de calcita y adición de cloruro de calcio y bicarbonato de sodio) se determinó que la más adecuada es el uso de contactores de calcita, ya que es una técnica más económica, más práctica de utilizar y que conlleva menos riesgos en caso de una sobredosificación. El costo de este proceso de remineralización se calculó en 0.65 pesos/m³. De los factores estudiados que afectan al proceso, se determinó que únicamente el pH del influente es el que tiene un efecto estadísticamente significativo en el índice de langelier del agua producto, así mismo se determinó que la velocidad del agua en el contactor puede ser de 8 m/h y el tiempo de residencia de 10 min. Estos criterios de diseño permiten construir contactores más pequeños, y por ende, disminuir el costo de inversión.

6 DETERMINACIÓN DE LA ESTROGENICIDAD DEL AGUA TRATADA MEDIANTE PROCESOS DE ELECTROCOAGULACIÓN, OSMOSIS INVERSA Y NANOFILTRACIÓN EN LOS PATRONES DE EXPRESIÓN GENÉTICA DEL PEZ *Danio rerio*.

6.1 INTRODUCCIÓN

Muchas sustancias químicas hechas por el hombre usadas en aplicaciones industriales y agrícolas están ampliamente dispersas como contaminantes en el ambiente, teniendo el potencial significativo de interferir en funciones biológicas normales y causando efectos adversos a la salud. Estas sustancias químicas interfieren con los complejos y cuidadosamente regulados sistemas mensajeros hormonales corporales imitando o antagonizando las acciones de las hormonas endógenas. Estas sustancias químicas como grupo son conocidas como *sustancias químicas disruptivas endócrinas* (CDEs).

Los CDEs comprenden una clase amplia de sustancias exógenas, muchas sustancias químicas están dispersas ampliamente en el ambiente y compuestos que pueden unirse a receptores de hormona esteroide. Algunas sustancias químicas con efectos disruptivos endócrinos son contaminantes heredados, como plaguicidas y metales pesados, y muchas son contaminantes emergentes. Muchos de estos nuevos compuestos son contaminantes industriales, como ftalatos (usados en la fabricación de plásticos para hacerlo flexibles), bisfenol A (BPA; usado en plásticos para hacerlos más duros, más claros, y más resistentes a estrés térmico), alquil fenoles (presentes en detergentes y tensoactivos), bifeniles policlorados (PCBs; usados antes en equipo eléctrico), dioxinas (liberadas de incineradores), plaguicidas organoclorados y organohalógenos (usados como retardadores de fuego), y herbicidas triazina (atrazina y simazina). También hay sustancias farmacéuticas diseñadas expresamente para tener actividad hormonal, como dietilestilbestrol (DES), agentes anticonceptivos, y otros que son usados en el tratamiento de enfermedades como osteoporosis. Estos compuestos xenobióticos tienen una amplia capacidad para alterar acciones hormonales normales.

La mayor parte de estos compuestos sintéticos están presentes en la biosfera causando graves daños a la salud humana. En la historia evolutiva humana y de los vertebrados, la evolución biológica no ha tenido suficiente tiempo para desarrollar mecanismos contra los efectos adversos de los CDEs.

6.2 ANTECEDENTES

6.2.1 El Sistema Endócrino

El sistema endocrino y el sistema nervioso constituyen los dos sistemas reguladores principales en fisiología mamífera. El sistema endócrino regula procesos biológicos en el cuerpo desde la concepción hasta la edad adulta, incluyendo crecimiento general y el desarrollo del cerebro y sistema nervioso, el crecimiento y función del sistema reproductivo, y metabolismo y niveles de azúcar en sangre. El sistema endócrino humano es una extensa red de glándulas productoras de hormona que consta de hipotálamo, pituitaria, tiroide y órganos como ovarios femeninos, testículos masculinos, y páncreas, como constituyentes principales. Estas glándulas endocrinas y órganos producen y segregan cantidades cuidadosamente medidas de diferentes tipos de hormonas que efectúan diversas funciones. Las hormonas son transportadas por todo el cuerpo vía la corriente sanguínea, ejerciendo efectos fisiológicos en sus células blanco. Las células blanco para cada hormona se caracterizan por la presencia de ciertas moléculas de acoplamiento, una clase de proteínas conocidas como receptores. La interacción entre la hormona y su receptor desencadena una cascada de reacciones bioquímicas en la célula blanco que finalmente modifican la función o actividad de la célula.



Figura 6-1 Grupo de químicos de algunos disruptores potenciales.

La salud humana depende del buen funcionamiento del sistema endócrino para regular la liberación de ciertas hormonas que son esenciales para funciones como metabolismo, crecimiento y desarrollo, sueño y estado de ánimo. Algunas sustancias conocidas como *disruptivas endócrinas* (DEs) pueden cambiar la(s) función(es) de este sistema hormonal, incrementado el riesgo de efectos adversos para la salud.

6.2.2 Sustancias Químicas Disruptivas Endócrinas (CDEs).

Las CDEs actúan como imitadoras de hormonas naturales, pero algunas de las CDEs pueden antagonizar la acción o modificar la síntesis, metabolismo y transporte de las hormonas endógenas, produciendo una serie de enfermedades del desarrollo, reproductivas, neurológicas, inmunes, o enfermedades metabólicas en humanos y fauna. De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental U.S. (EPA), las CDEs han sido descritas como *agentes exógenos que interfieren con la producción, liberación, transporte, metabolismo, unión, o eliminación de las hormonas naturales en el cuerpo,*

responsables del mantenimiento de la homeostasis y la regulación de procesos de desarrollo.

El concepto de disrupción endócrina, la modulación inapropiada del sistema endócrino por sustancias químicas alimenticias y ambientales, así como el modo de acción de estas sustancias químicas xenobióticas en animales irrumpió por primera vez a la atención pública con la publicación de *Nuestro Futuro Robado* por Theo Colborn, Dianne Dumanoski, y John Peterson Myers, el cual tiene el crédito de haber atraído la atención pública debido a la inquietud sobre los riesgos planteados por CDEs (Colborn *et al.*, 1996). El libro planteó el tema de sustancias químicas producidas por el hombre amenazando la capacidad reproductiva e inteligencia de generaciones futuras de humanos y fauna. Ella y otros autores plantearon que muchos CDEs producían efectos en dosis mucho más bajas que toxicidades causadas por medio de otros modos de acción y por tanto deberían tener una regulación especial (Colborn *et al.* 1993, Colborn *et al.* 1996). Desde entonces, el tema ha generado una controversia considerable. Mucha de esta controversia se centra en determinar cuáles sustancias químicas causan efectos adversos detectables en niveles de exposición experimentados típicamente por humanos o animales.

6.2.3 Fuentes de EDCs en el Ambiente

Los EDCs se originan de numerosas fuentes e ingresan al ambiente por: aire, suelo, y agua, los EDCs entran en la cadena alimenticia, algunos de estos compuestos son lipofílicos y persistentes, teniendo el potencial para bioacumularse y llegar a ser una parte de la carga corporal de una planta o animal además de biomagnificarse en niveles tróficos más altos.

Las descargas de plantas de tratamiento de agua residual municipales (PTARs) han sido identificadas como contribuyentes significativos de CDEs a aguas superficiales (Kolpin *et al.* 2002, Snyder *et al.* 2003). Las fuentes reales son descargas aguas arriba de las instalaciones de tratamiento de agua, las cuales incluyen hormonas naturales y

estrógenos farmacéuticos excretados por humanos eliminados por los inodoros, productos farmacéuticos y de cuidado personal (PPCPs) excretados o lavados del cuerpo, material vegetal, artículos tratados con retardadores de fuego, otros productos de limpieza domésticos, y plaguicidas (Staples *et. al.* 1998, Yin *et al.* 2002, Snyder *et al.* 2003). Las PTARs podrían recibir también efluentes de procesos industriales que usan limpiadores conteniendo nonilfenoles y plásticos conteniendo BPA o corrientes de escorrentías de agua de lluvia y hospital que contienen EDCs (Boyd *et al.*, 2004) Figura 6-2.

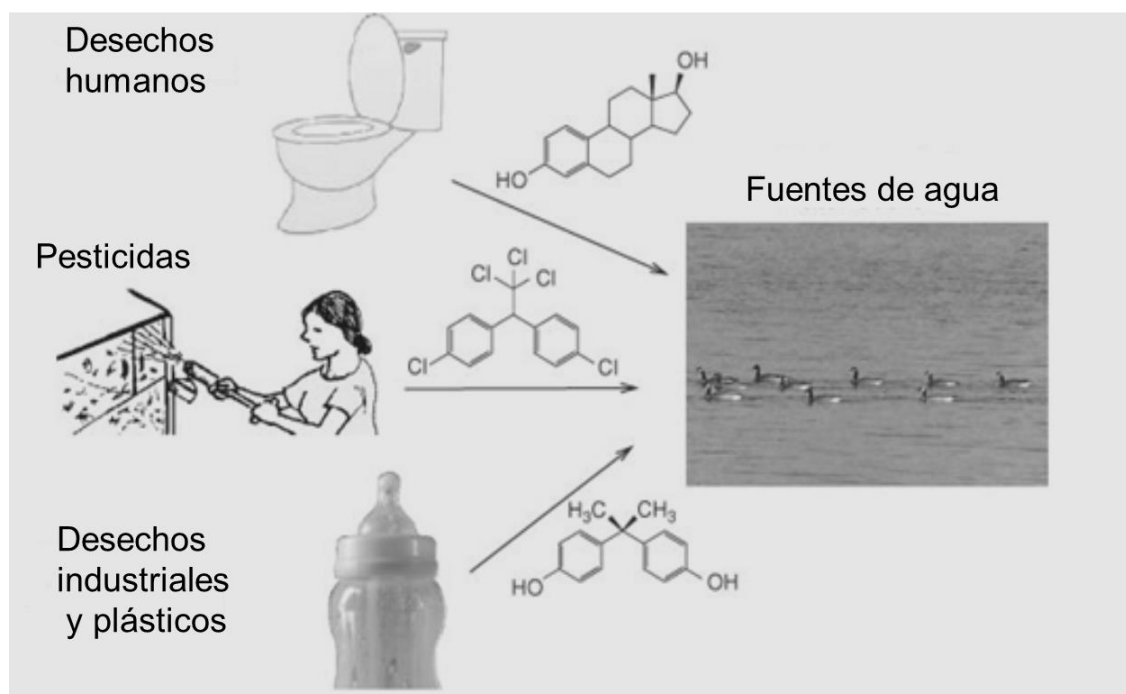


Figura 6-2 Fuentes de CDEs en fuentes de agua.

6.2.4 Aspectos sobre disrupción endócrina

Han surgido varios puntos sobresalientes definiendo los rasgos específicos de disrupción endócrina. Los CDEs tienen efectos en dosis altas y dosis bajas causando ambos inquietud, en realidad los CDEs activos en dosis bajas son los que conducen a los umbrales típicos de toxicidad y, por tanto, son los de mayor preocupación. Los CDEs existen en el ambiente como mezclas químicas complejas, no como compuestos solos; sus impactos varían sustancialmente durante el ciclo de vida de un organismo y a menudo son particularmente severos durante gestación y desarrollo inicial, sus impactos resultan tiempo después de la exposición y muchos CDEs exhiben impactos trans-generacionales (epigenéticos).

6.2.5 Sustancias de prueba como posibles CDEs

6.2.5.1 Arsénico

La preocupación por la presencia del arsénico se debe a que se encuentra de manera ubicua en el medio ambiente, y contaminando el agua subterránea de forma natural como resultado de formaciones geológicas y condiciones geoquímicas que son comunes en muchas áreas. El arsénico está presente en concentraciones altas en muchos sitios de residuos tóxicos por medio de desechos de compuestos conteniendo arsénico de prácticas mineras e industriales. Puede acumularse en agua subterránea y en los pozos de agua de fuentes naturales. La existencia de formaciones geológicas conteniendo niveles altos de arsénico puede lixiviarse fácilmente en agua subterránea y encontrar su camino hacia pozos y otros suministros de agua.

Esta contaminación de agua potable por arsénico (As) es considerada una seria amenaza a la salud ambiental en todo el mundo está asociada con crecientes riesgos de enfermedad incluyendo cáncer de piel, pulmón, vejiga, y otros tipos de cáncer; diabetes tipo 2; enfermedades vasculares y cardiovasculares; efectos reproductivos y

del desarrollo; y efectos cognitivos y neurológicos. Riesgos crecientes a la salud pueden ocurrir en niveles tan bajos como 10–50 ppb, mientras que efectos biológicos han sido observados en experimentos animales y sistemas de cultivo de célula en niveles mucho más bajos. El As es un potente disruptivo endócrino, alterando la expresión génica mediante los receptores glucocorticoide, mineralocorticoide, progesterona, y de andrógeno esteroide (SRs) estrechamente relacionados en concentraciones tan bajas como 0.01 μM (~0,7 ppb). Dosis muy bajas aumentaron la transcripción génica mediada por hormona, mientras que dosis ligeramente más altas, pero aún no citotóxicas fueron supresoras. El As también trastorna el receptor de estrógeno (ER) relacionado *in vivo* y en cultivo celular (Davey, 2007).

Al metabolismo del As se le adjudica que contribuye a los efectos adversos para la salud vistos en poblaciones expuestas a arsénico inorgánico. El arsénico inorgánico (As) existe en dos estados de valencia: As (III) y As (V). En humanos, As (III) es metilado oxidativamente a monometil As (V), reducido a monometil As (III), metilado de nuevo a dimetil As (V), y luego reducido a dimetil As (III). En general, especies de As trivalentes son más tóxicas que especies pentavalentes, y formas orgánicas son más tóxicas que formas inorgánicas. La enzima responsable de ambas etapas de metilación es arsénico (III) metiltransferasa (AS3MT) (Watson, 2007).

La mayor parte de las normas de arsénico mundiales están basadas en modelos de evaluación de riesgo, datos de altas exposiciones de poblaciones, el nivel contaminante máximo de As, establecido por la USEHA y la WHO, es 10 $\mu\text{g/L}$ (Watson, 2007).

6.2.5.2 17 β -estradiol

Los estrógenos son las hormonas sexuales femeninas más importantes producidas en el ovario en mujeres premenopáusicas, mediante la aromatización de andrógenos. Los estrógenos esteroideos son compuestos solubles en lípidos capaces de pasar a través de la membrana plasmática de las células mediante difusión. Los estrógenos más abundantes son 17 β -estradiol (E2) y estrona (E1), extraídos de tejido ovárico. E2 es el

estrógeno principal producido por el ovario, y dos estrógenos, E1 (elevado postmenopáusicamente) y E3 (estriol —elevado durante el embarazo) son en gran medida subproductos del metabolismo de E2 (Figura 6-3). E2 desempeña un papel crítico en muchos procesos fisiológicos en machos y hembras. Éstos incluyen crecimiento normal, desarrollo, y regulación génica de tipo de célula específico en tejidos del tracto reproductivo, sistema nervioso central, y esqueleto (Kazeto *et al.*, 2004). E2 es excretado en la orina de la mujer hasta 60 µg por día, aumentando a 200–400 µg durante el embarazo. E2 es también el ligando natural y el más potente entre los estrógenos endógenos que actúan solamente como agonistas de receptor, y se ha encontrado que es un CDE importante en el ambiente acuático (Routledge *et al.*, 1998).



Figura 6-3 Estrógenos esteroides fisiológicos conteniendo anillo A aromatizado.

Los estrógenos están entre las sustancias químicas más potentes en la naturaleza. Si bien las concentraciones ambientales de estos compuestos son generalmente bajas, la respuesta de los animales a dosis bajas de estrógenos hace de su introducción en el ambiente un problema.

Bajo este contexto, el objetivo de este capítulo es aplicar los métodos moleculares para evaluar los patrones de expresión genética del pez *Danio rerio* causados por estrogenicidad en el agua tratada mediante los métodos de electrocoagulación, osmosis inversa y nanofiltración.

Los resultados que se generan permitirán evaluar: (1) los posibles efectos causados por el agua tratada para la remoción de arsénico y hormonas en el pez *Danio rerio*, aplicando la metodología de qPCR en tiempo real y (2) Dar una propuesta de los posibles mecanismos de estrogenicidad para los compuestos probados.

6.2.6 Exposición del pez cebra

Una vez realizados los diferentes procesos para la remoción de arsénico-estradiol, se procedió a llevar a cabo exposiciones del pez cebra con cada una de las muestras de agua producto de los procesos.

El organismo utilizado para las pruebas se obtuvo a partir de cultivos controlados del pez cebra en el laboratorio. El cultivo del pez cebra se mantuvo en acuarios de 40 L, con una temperatura de 25 ± 2 °C y un fotoperíodo de 16h luz / 8h oscuridad, con una intensidad luminosa de 1000 luxes y aireación continua. Se utilizaron 15 ejemplares adultos macho de 8 a 12 meses de edad para cada pecera.

El tiempo de exposición de los organismos fue de 30 días, durante los cuales se supervisó diariamente las condiciones controladas (temperatura, fotoperíodo y aireación) y la sobrevivencia de los peces.

Las muestras de agua que se utilizaron para las exposiciones del pez cebra fueron las siguientes:

- Como blanco se utilizó agua desionizada.
- Muestra de agua con NaCl+ 200 µg Arsénico.
- Muestra de agua con NaCl+ 70 ng β-Estradiol.
- Muestra de agua sintética (arsénico 200 µg/L y estradiol 70 ng/L).
- Muestra de agua producto del proceso de remoción por filtración mediante carbón activado.

- Muestra de agua producto del proceso de remoción por filtración mediante filtro arena-antracita.
- Muestra de agua producto del proceso de ósmosis reversa.
- Muestra de agua producto del proceso con la membrana CSM 90.
- Muestra de agua producto del proceso con la membrana CSM 70.

6.2.7 Disección de peces y extracción de ARN

Una vez transcurrido el periodo de exposición se procedió a la disección de los peces expuestos, la cual consistió en separar y almacenar cuidadosamente los siguientes órganos: ojos, branquias, hígado, intestino, músculo y cerebro.

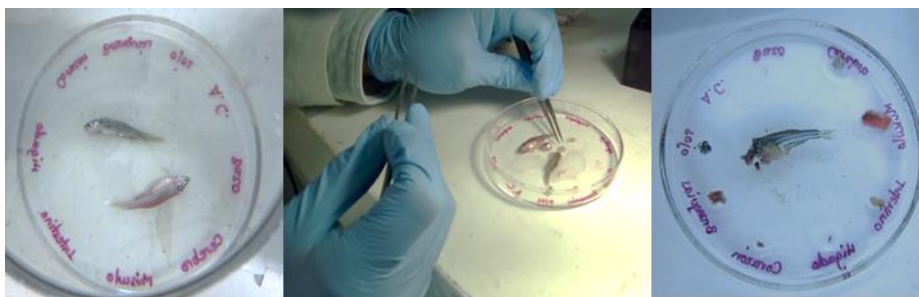


Figura 6-4 Disección de peces expuestos.

El ARN total fue aislado por medio del método de extracción fenólica con TRIZOL (Reagent® Invitrogen TM Life Technologies). Este método se basa en el uso de una solución monofásica de fenol e isotiocianato de guanidina para la lisis de las células y la separación de la muestra en dos fases (acuosa y orgánica), seguido de la extracción y precipitación del ARN total con cloroformo e isopropanol, respectivamente, a partir de la fase acuosa.

6.2.8 Determinación de la concentración, pureza e integridad del ARN total

Para cuantificar la concentración del ARN total, la muestra se midió en un espectrofotómetro (Epoch® BioTek) con lámpara UV. Una vez que se obtuvieron los valores de absorbancia del ARN, se tomó en cuenta la relación de absorbancias a 260/280, donde se indica la pureza del ARN.

Se considera que las relaciones cercanas a 2.0 unidades de densidad óptica (260 nm) son las óptimas. Para determinar la integridad del ARN total extraído, se sometió cada una de las mismas muestras a electroforesis horizontal en gel de agarosa desnaturalizante al 1.5% teñido con bromuro de etidio (0.5 µg/mL). La electroforesis se llevó a cabo a 100 voltios durante 60 minutos y el ARN se observó en un transiluminador con luz ultravioleta a 260 nm.

6.2.9 Retrotranscripción del ARN a ADNc

La síntesis de ADNc a partir del ARN se realizó usando el kit comercial “Maxima First Strand cDNA Synthesis for RT-qPCR” de Thermo Scientific.

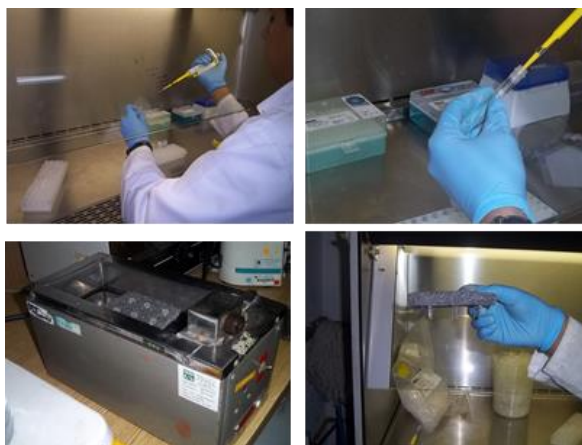


Figura 6-5 Procedimiento para la síntesis de ADNc a partir de ARN.

Se prepararon tres baños, uno a 25°C, uno a 50°C y el último a 85°C.

Después de la descongelación de los componentes del equipo, éstos se mezclan y centrifugan brevemente y se almacenan en hielo. Las soluciones estériles se mezclan en un tubo libre de RNasa, en el siguiente orden:

Tabla 6-1 Reactivos utilizados para la retrotranscripción.

5X Reaction Mix	4 µL
Maxima Enzyme Mix	2 µL
Template RNA	1 pg - 5 µg
Water, nuclease-free	to 20 µL
Volumen total	20 µL

Enseguida se mezcló suavemente y se centrifugó, posteriormente la mezcla se incubó durante 10 min a 25 °C, después 15 min a 50 °C y a 85 °C durante 5 min para terminar la reacción. El producto de la síntesis de ADNc se utilizó directamente en qPCR.

6.2.10 Análisis de los niveles de expresión genética por PCR tiempo real de las muestras de ADNc

Para el análisis de la expresión genética por PCR tiempo real se usó como molde el ADNc obtenido según el procedimiento anterior. Para la amplificación de cada gen se cuentan con dos oligonucleótidos específicos, una sonda marcada con un fluorocromo y un apagador (Quencher).

Las reacciones de PCR tiempo real se realizaron en una placa de 96 pozos usando el termociclador Applied Biosystems 7500. En cada pozo se trabajó en formato múltiplex (tres genes por tubo de reacción). Para ello, las tres sondas incluidas en cada tubo de reacción cuentan con un marcador fluorescente diferente (FAM, TAMRA y Cy5). La metodología fue la siguiente:

Se descongelaron y mezclaron perfectamente todas las soluciones Master mix 2x, Oligo Forward #1, Oligo Reverse #1, Oligo Forward #2, Oligo Reverse #2, Oligo Forward #3, Oligo Reverse #3, ADNc, Agua libre de nucleasas antes de utilizarlas.

La reacción se preparó adicionando a cada tubo los siguientes componentes:

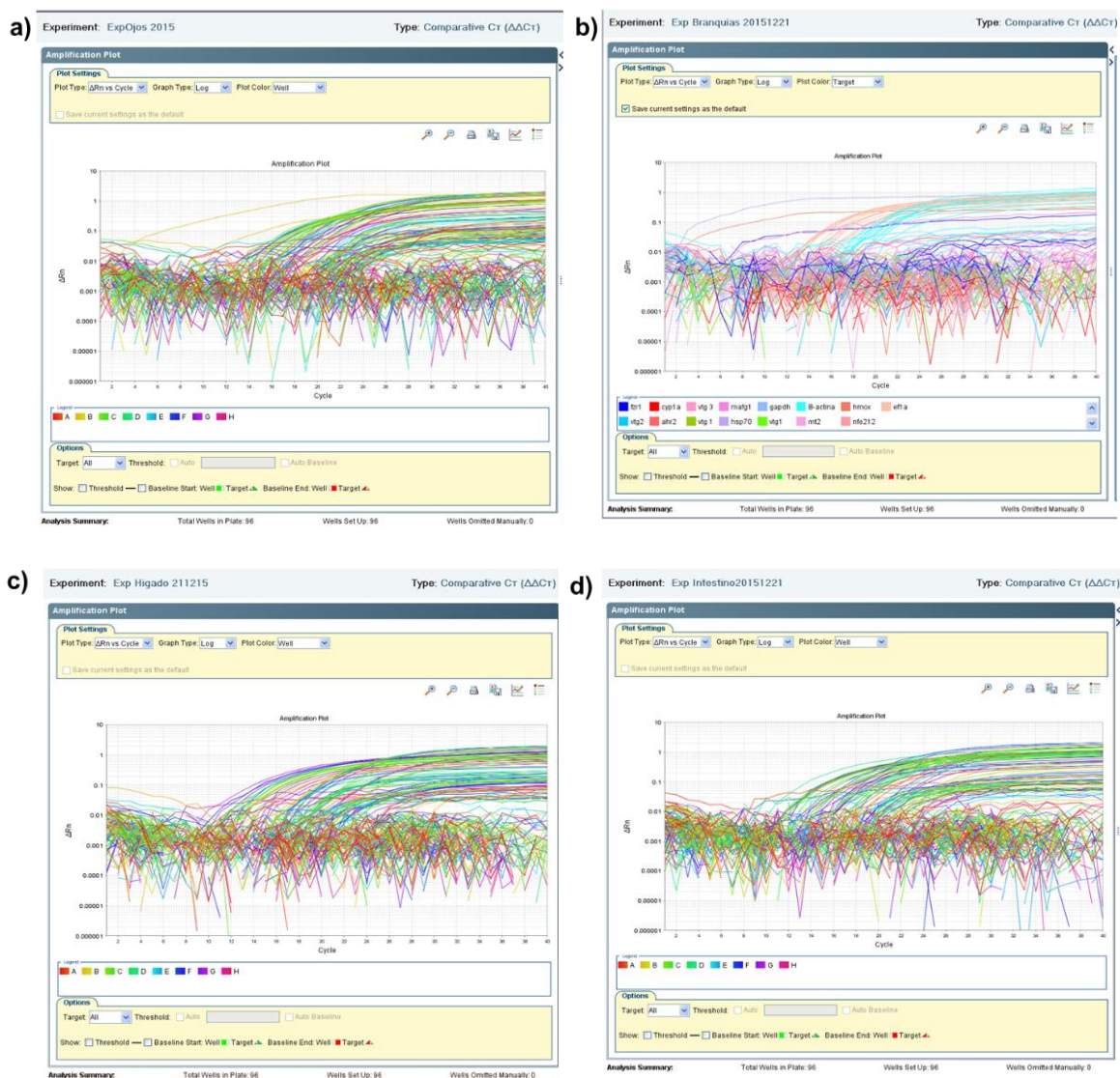
Tabla 6-2 Componentes de reacción para PCR.

Master mix 2x	12.5 μ L
Oligo Forward #1	0.3 μ M
Oligo Reverse #1	0.3 μ M
Oligo Forward #2	0.3 μ M
Oligo Reverse #2	0.3 μ M
Oligo Forward #3	0.3 μ M
Oligo Reverse #3	0.3 μ M
ADNc	\leq 1000 ng
Agua libre de nucleasas	25 μ L

- Se mezcló el contenido de cada tubo sin crear burbujas, ya que podrían interferir con la detección de la fluorescencia.
- Posteriormente se centrifugó brevemente.
- La microplaca conteniendo las mezclas anteriormente mencionadas es colocada en el equipo Applied Biosystems 7500, un equipo de tercera generación que permite cuantificar la expresión de genes de interés en tiempo real.
- El programa para la amplificación de los genes de interés consistió en 40 ciclos, un primer segmento de 10 min a 95 °C para la desnaturalización, un segundo segmento para una desnaturalización a 95 °C por 15 segundos y un tercer segmento de

amplificación a 60° C por 1 minuto.

Las siguientes gráficas muestran la amplificación de todas las muestras analizadas. Es la ΔRn vs Ciclo - ΔRn siendo la magnitud de la fluorescencia normalizada generada por el reportero en cada ciclo durante la amplificación por PCR. En la Figura 6-6 se muestra el ΔRn obtenido en función del número de ciclo.



Estrategia para potabilización de agua en las cuencas de los ríos Yautepec y Cuautla, Morelos, con un enfoque holístico (segunda etapa)

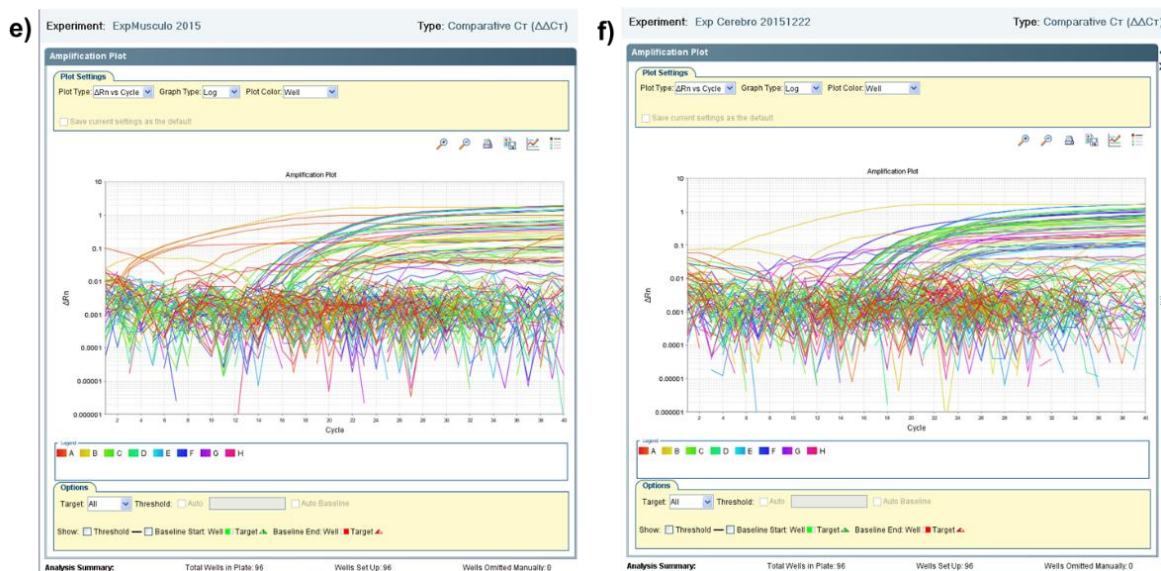


Figura 6-6 Curva de amplificación de los genes β -actina, *cyp1a*, *fzr1*, *ahr2*, *hmox1*, *hsp70*, *mafg1*, *nfe2l2*, *gapdh*, *vtg1*, *mt2* y *ef1a* en los diferentes órganos de los peces expuestos de las diferentes muestras a) ojo, b) branquias, c) hígado, d) intestino, e) músculo y f) cerebro.

6.3 RESULTADOS

Con base en valores promedio del ciclo umbral [Ct] obtenidos del PCR tiempo real en los peces control, fueron calculados los niveles de expresión general del gen de referencia β -actina. La evaluación de los datos de PCR en tiempo real fue realizada usando el método qGen desarrollado por Muller (2002). Este método calcula la abundancia de ARNm basado en la eficiencia de la reacción de amplificación de PCR específicamente para cada gen, relacionándolo con el gen de referencia.

6.3.1 Niveles de expresión de genes blanco en diversos órganos de peces expuestos a arsénico a una concentración de $200 \mu\text{g L}^{-1}$.

En la Figura 6-7 se muestra el promedio del comportamiento de cada gen respecto a la exposición a arsénico. El gen *cyp1a* se expresó sólo en branquias, correspondiendo esta expresión a un 16.6% respecto a los seis órganos analizados; en los órganos ojos, hígado, intestino, músculo y cerebro no hubo expresión. El gen *fzr1* se expresó en ojo,

branquias e intestino, correspondiendo esta expresión a un 50% respecto a los seis órganos analizados; se reprimió en los órganos músculo y cerebro, es decir, 33.3 % respecto al total de órganos, el hígado no mostro expresión. El gen *hmx* se expresó en músculo, correspondiendo esta expresión a un 16.6% respecto a los seis órganos analizados; se reprimió en los órganos branquias y cerebro, correspondiendo a 33.33% de los órganos analizados; los órganos ojos, hígado, intestino no mostraron expresión. El gen *hsp70* se expresó en branquias, correspondiendo esta expresión a un 16.66% respecto a los seis órganos analizados; se reprimió en los órganos ojos, hígado, intestino, músculo y cerebro, es decir, 83.33% respecto al total de órganos. El gen *mafg1* se expresó en cerebro, correspondiendo esta expresión a un 16.6% respecto a los seis órganos analizados; no hubo expresión en los órganos ojo, branquias, hígado, intestino, músculo y cerebro, es decir, 83.33% respecto del total de órganos. El gen *gapdh* se reprimió en cerebro, correspondiendo a un 16.6% respecto a los seis órganos analizados; no se expresó en los órganos ojo, hígado, intestino, músculo y cerebro, es decir, 83.33% respecto del total de órganos. El gen *ef1a* se expresó en branquias, correspondiendo a un 16.6% respecto a los seis órganos analizados; se reprimió en los órganos ojo, hígado, intestino, músculo y cerebro, es decir, 83.33% respecto del total de órganos.

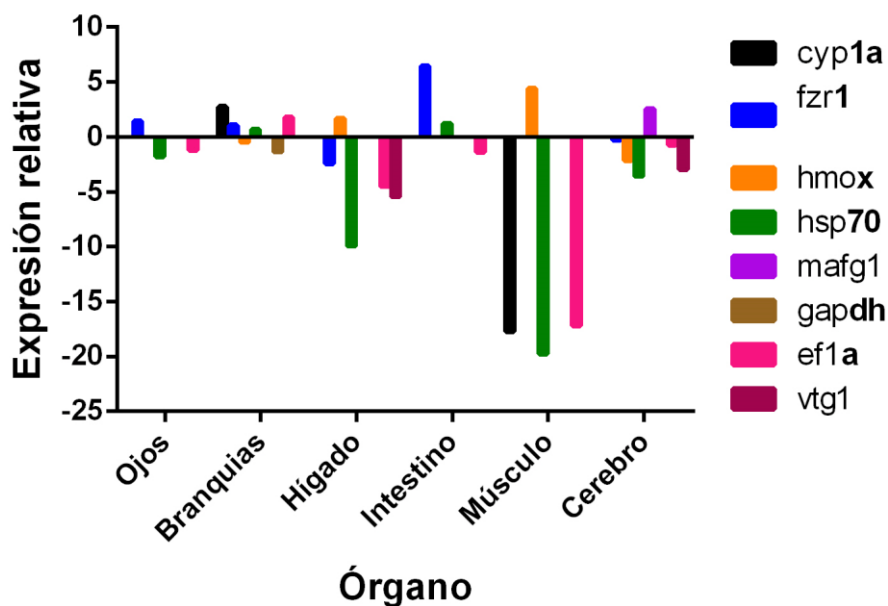


Figura 6-7 Expresión promedio de los genes blanco en diversos órganos de peces *Danio rerio* expuestos a arsénico a una concentración de 200 µg/L.

El comportamiento de los genes analizados en el pez cebrá después de ser expuesto a la muestra de arsénico con 200 µg/L mostro que el valor máximo de expresión fue con el gen *fzf1* con 5.77 veces en el órgano branquias, y el valor mínimo se dio en el gen *hsp70* el cual se reprimió -19.76 veces en el cerebro. El gen que se expresó en más órganos fue *fzf1*, y el órgano donde más genes se expresaron fue branquias. El gen que se reprimió en más órganos fue *ef1a*, y el órgano donde se reprimieron más genes fue en el cerebro. Asimismo, los genes expresados en menos órganos fueron *cyp1a* y *maf1*; y el órgano donde se expresaron menos genes fue en el hígado. El gen *vtg1* miembro de la familia de vitelogeninas se reprimió en los órganos hígado y cerebro.

6.3.2 Niveles de expresión de genes blanco en diversos órganos de peces expuestos a estradiol a una concentración de 70 ng L⁻¹.

En la Figura 6-8 se muestra el promedio del comportamiento de cada gen respecto a la exposición a estradiol. El gen *cyp1a* se reprimió en hígado, correspondiendo esta expresión a un 16.6% respecto a los seis órganos analizados; en ojos, branquias, intestino, músculo y cerebro no hubo expresión. El gen *fzr1* se expresó en ojo, branquias e intestino, correspondiendo esta expresión a un 50% respecto a los seis órganos analizados; se reprimió en los órganos hígado, músculo y cerebro, es decir, 50% respecto al total de órganos. El gen *hmx* se expresó en intestino y músculo, correspondiendo esta expresión a un 33.33% respecto a los seis órganos analizados; se reprimió en los órganos branquias, hígado y cerebro, correspondiendo a 50% de los órganos analizados; en los órganos ojos, hígado, intestino no hubo expresión. El gen *hsp70* se reprimió en branquias, hígado, intestino, músculo y cerebro correspondiendo esta expresión a un 83.33% respecto a los seis órganos analizados; no hubo expresión en ojo. El gen *nfe212* se expresó en branquias, en los demás órganos no hubo expresión. El gen *mafg1* se expresó en cerebro, correspondiendo esta expresión a un 16.6% respecto a los seis órganos analizados; no hubo expresión en los órganos ojo, branquias, hígado, intestino, músculo y cerebro, es decir, 83.33% respecto del total de órganos.

El gen *gapdh* se expresó en los órganos branquias e hígado correspondiendo a un 33.33% respecto a los seis órganos analizados; se reprimió en intestino, músculo y cerebro correspondiendo a un 50% respecto a los seis órganos analizados; no se expresó en el ojo.

El gen *ef1a* se expresó en branquias, correspondiendo a un 16.6% respecto a los seis órganos analizados; se reprimió en los órganos ojo, hígado, intestino, músculo y cerebro, es decir, 83.33% respecto del total de órganos.

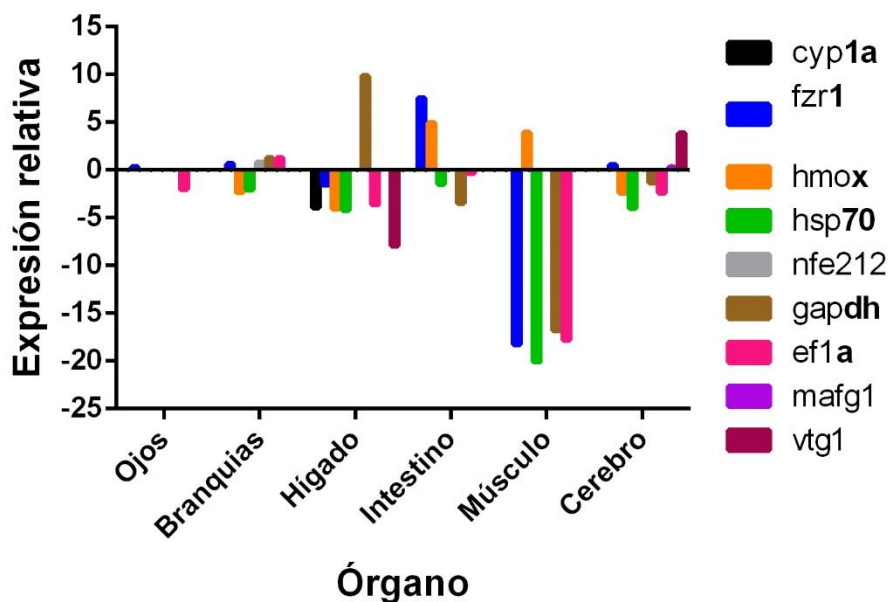


Figura 6-8 Expresión promedio de los genes blanco en diversos órganos de peces *Danio rerio* expuestos a estradiol a una concentración de 70 ng/L.

El comportamiento de los genes analizados en el pez cebra después de ser expuestos a la muestra de estradiol con 70 ng/L mostro que el valor máximo de expresión fue con el gen *fzf1* con 7.54 veces en el órgano intestino, y el valor mínimo se dio en el gen *hsp70* el cual se reprimió -20.06 veces en el músculo. El gen que se expresó y se reprimió en más órganos fue *fzf1*, mientras que el órgano donde se expresaron más genes fue en branquias; el cerebro fue el órgano donde se reprimieron más genes. Los genes que se expresaron en menos órganos fueron *nfe212* y *maf1*, mientras que fue en el ojo donde se expresaron menos genes. El gen *vtg1* miembro de la familia de vitelogeninas se expresó en el órgano cerebro y se reprimió en el órgano hígado.

6.3.3 Niveles de expresión de genes blanco en diversos órganos de peces expuestos a agua sintética contenido 200 μgL^{-1} de arsénico y 70 ngL^{-1} de 17 β -estradiol.

En la Figura 6-9 se muestra el promedio del comportamiento de cada gen respecto a esta muestra.

El gen *cyp1a* se expresó en branquias y cerebro, correspondiendo esta expresión a un 33.33% respecto a los seis órganos analizados; en los órganos ojos, hígado, intestino y músculo no hubo expresión. El gen *fzr1* se expresó en branquias e intestino, correspondiendo esta expresión a un 33.33% respecto a los seis órganos analizados; se reprimió en los órganos ojo, hígado, músculo y cerebro, es decir, 66.66 % respecto al total de órganos. El gen *hmox* se expresó en ojo e intestino, correspondiendo esta expresión a un 33.33% respecto a los seis órganos analizados; se reprimió en los órganos hígado y cerebro y músculo; mientras que los órganos branquias y músculo no mostraron expresión. El gen *hsp70* se expresó en los órganos ojo y branquias, correspondiendo esta expresión a un 33.33% respecto a los ocho órganos analizados; se reprimió en los órganos hígado, intestino y cerebro; mientras que en músculo no mostro expresión. El gen *maf1* se expresó en los órganos ojo y cerebro, correspondiendo esta expresión a un 33.33% respecto a los seis órganos analizados; en los órganos branquias, hígado, intestino y músculo no hubo expresión. El gen *gapdh* se expresó en los órganos ojos, branquias, intestino, músculo y cerebro, correspondiendo esta expresión a un 83.33% respecto a los seis órganos analizados; mientras que reprimió en el órgano hígado. El gen *ef1a* se expresó en branquias e intestino, correspondiendo esta expresión a un 33.33% respecto a los seis órganos analizados; mientras que reprimió en los órganos ojo, hígado, músculo y cerebro.

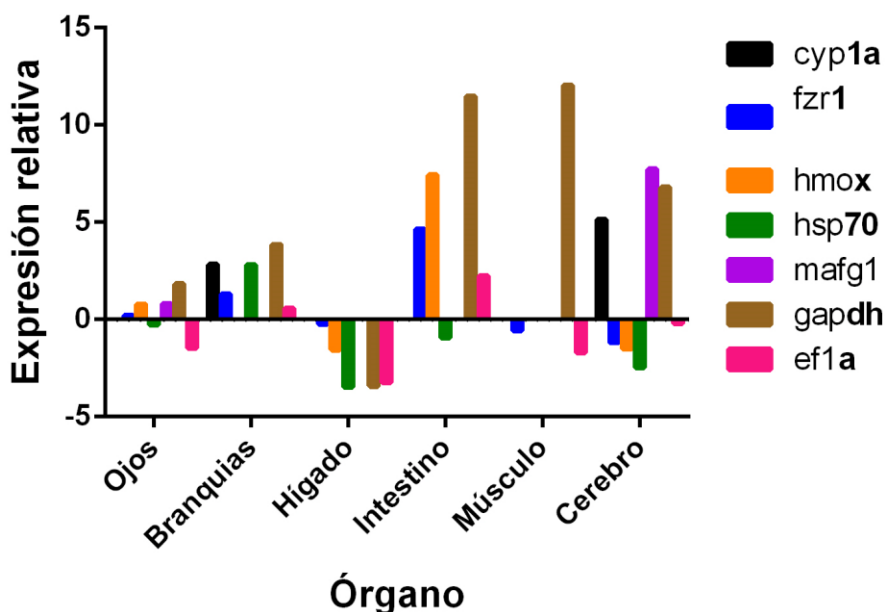


Figura 6-9 Expresión promedio de los genes blanco en diversos órganos de peces *Danio rerio* expuestos a agua sintética contenido $200 \mu\text{gL}^{-1}$ de arsénico y 70ngL^{-1} de 17β -estradiol.

El comportamiento de los genes analizados en el pez cebra después de ser expuestos a la muestra de agua sintética conteniendo arsénico $200 \mu\text{g/L}$ y estradiol con 70ng/L mostro que el valor máximo de expresión fue con el gen *gapdh* con 12.04 veces en el órgano intestino, y el valor mínimo se dio en el gen *hsp70* el cual se reprimió -3.46 veces en el órgano hígado. El gen que se expresó en más órganos fue *gapdh*, mientras que fue en el órgano branquias donde se expresaron más genes. Los genes que se reprimieron en más órganos fueron *fzf1* y *ef1a*; mientras que el gen *cyp1a* fue el gen que se expresó en menos órganos. El hígado fue órgano donde se reprimieron más genes y fue en el músculo donde la expresión de los genes fue mínima.

6.3.4 Niveles de expresión de genes blanco en diversos órganos de peces expuestos al agua producto del proceso Carbón Activado Granular (CAG).

En la Figura 6-10 se muestra el promedio del comportamiento de cada gen respecto a esta muestra. El gen *cyp1a* se expresó en hígado, correspondiendo esta expresión a un 20% respecto a los cinco órganos analizados; en los órganos ojos, intestino, músculo y cerebro no hubo expresión. El gen *fzr1* se expresó en hígado, músculo y cerebro, correspondiendo esta expresión a un 60% respecto a los ocho órganos analizados; se reprimió en el órgano intestino, es decir, 20 % respecto del total de órganos; en el ojo, no hubo expresión. El gen *hmox* se expresó en hígado, correspondiendo esta expresión a un 20% respecto a los cinco órganos analizados; los órganos ojos, intestino, músculo y cerebro no mostraron expresión. El gen *hsp70* se reprimió en los órganos ojo e intestino, correspondiendo esta expresión a un 40% respecto a los cinco órganos analizados; en los órganos hígado, músculo y cerebro no hubo expresión. El gen *gapdh* se expresó en intestino, correspondiendo esta expresión a un 20% respecto a los cinco órganos analizados; en los órganos ojos, hígado, músculo y cerebro no hubo expresión. El gen *ef1a* se reprimió en ojo e intestino, correspondiendo esta expresión a un 40% respecto a los cinco órganos analizados; en los órganos hígado, músculo y cerebro no hubo expresión.

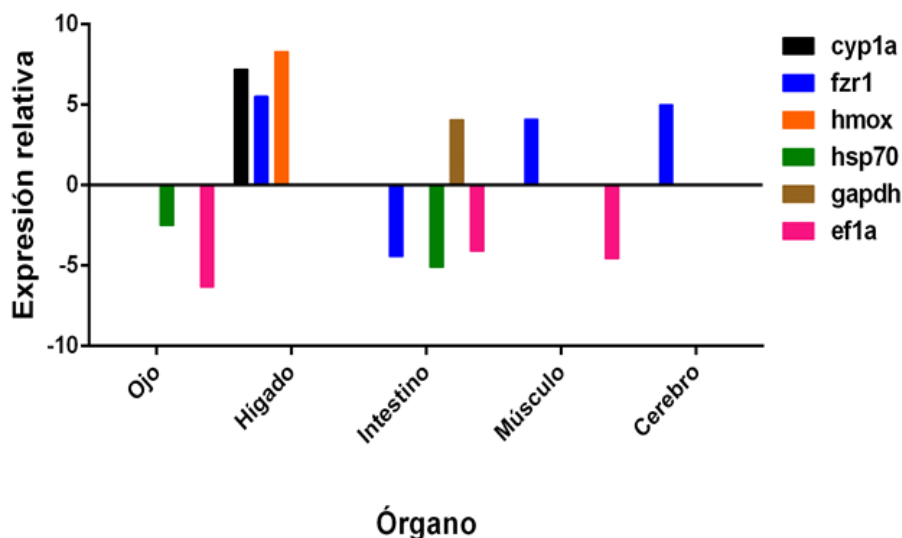


Figura 6-10 Expresión promedio de genes blanco en peces *Danio rerio* expuestos a la muestra al agua producto del proceso Carbón Activado Granular (CAG).

El comportamiento de los genes analizados en el pez cebra después de ser expuesto a la muestra de agua producto del proceso Carbón Activado Granular (CAG) mostro que el valor máximo de expresión fue con el gen *hmox* con 8.30 veces en el órgano hígado, y el valor mínimo se dio en el gen *hef1a* el cual se reprimió -6.32 veces en el ojo. El gen que se expresó en más órganos fue *fzf1*, y el órgano donde más genes se expresaron fue hígado. Los genes que se reprimieron en más órganos fueron *hsp70* y *ef1a*, y el órgano donde se reprimieron más genes fue en el intestino. Asimismo, los genes expresados en menos órganos fueron *cyp1a* y *gapdh*; y los órganos donde se expresaron menos genes fueron en músculo y cerebro.

6.3.5 Nivel de expresión de los genes blanco en diversos órganos de peces expuestos al agua producto del proceso arena-antracita.

En la Figura 6-10 se muestra el comportamiento de cada gen respecto a esta muestra. El gen *fzr1* se expresó en hígado y músculo, expresándose 40% respecto a los cuatro órganos analizados; en el órgano ojo no mostro expresión. El gen *hmox* se expresó en intestino, correspondiendo al 20% respecto a los cinco órganos analizados; mientras que en ojo se reprimió; en los órganos hígado y músculo no hubo expresión. El gen *hsp70* se reprimió en ojo, correspondiendo esta expresión a un 20% de los cuatro órganos analizados; en los órganos hígado, intestino y músculo no hubo expresión. El gen *ef1a* se reprimió en ojos y músculo, correspondiendo esta expresión a un 50% respecto a los cuatro órganos analizados; en los órganos hígado e intestino no hubo expresión.

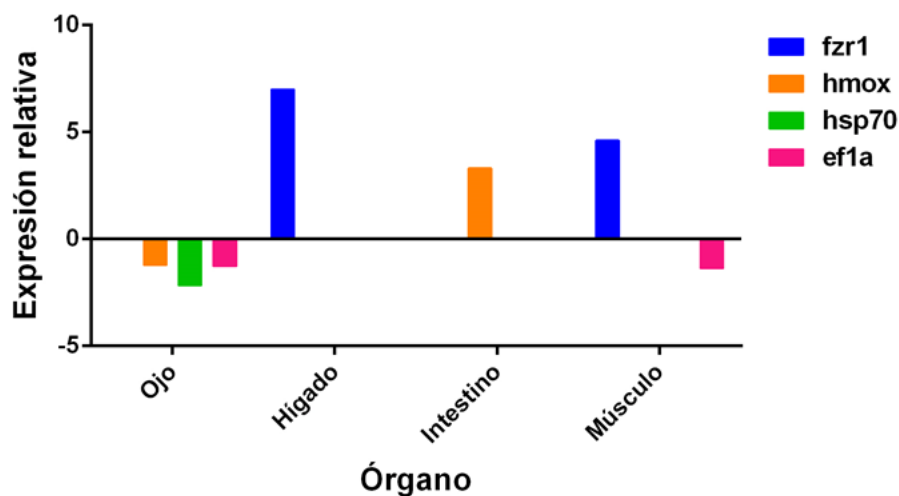


Figura 6-11 Expresión promedio de los genes blanco en diversos órganos de peces *Danio rerio* expuestos al agua producto del proceso arena-antracita.

El comportamiento de los genes analizados en el pez cebra después de ser expuesto a la muestra de agua producto del proceso arena-antracita mostro que el valor máximo de expresión fue con el gen *fzr1* con 6.99 veces en el órgano hígado, y el valor mínimo se dio en el gen *ef1a* el cual se reprimió -1.37 veces en el músculo. El gen que se expresó en más órganos fue *fzr1*. El gen que se reprimió en más órganos fue *ef1a*, y el órgano donde se reprimieron más genes fue en el ojo. Asimismo, el gen expresado en menos órganos fue *hsp70*; y los órganos donde se expresaron menos genes fueron en hígado e intestino.

6.3.6 Nivel de expresión de los genes blanco en diversos órganos de peces expuestos al agua producto del proceso de osmosis reversa.

En la Figura 6-12 se muestra el promedio del comportamiento de cada gen respecto a esta muestra. El gen *hsp70* se reprimió en el órgano ojos, correspondiendo esta expresión a un 50% respecto a los dos órganos analizados; en el órgano músculo no hubo expresión. El gen *ef1a* se reprimió en ojo y músculo, correspondiendo esta expresión a un 100% respecto a los dos analizados.

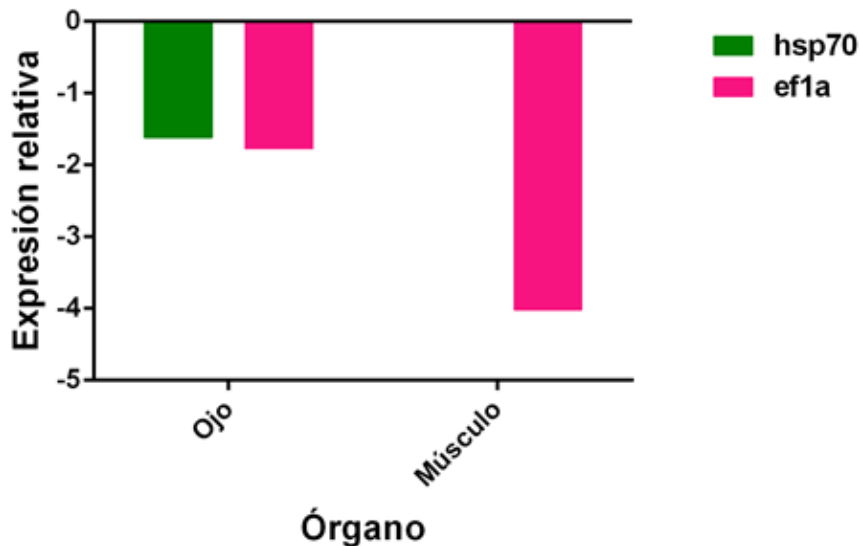


Figura 6-12 Expresión promedio de genes blanco en peces *Danio rerio* expuestos al agua producto del proceso de osmosis reversa.

El comportamiento de los genes analizados en el pez cebrá después de ser expuesto a la muestra de agua producto del proceso osmosis inversa mostró que el valor mínimo se dio en el gen *ef1a* el cual se reprimió -4.01 veces en el músculo. El gen que se reprimió en más órganos fue *ef1a* y el órgano donde se reprimieron más genes fue en el ojo. Asimismo, el gen expresado en menos órganos fue *hsp70*; y el órgano donde se expresaron menos genes fue el intestino.

6.3.7 Niveles de expresión de genes blanco en diversos órganos de peces expuestos al agua producto del proceso de nanofiltración con la membrana nominal CM90.

En la Figura 6-13 se muestra el promedio del comportamiento de cada gen respecto a esta muestra. El gen *cyp1a* se expresó en hígado, correspondiendo esta expresión a un 20% respecto a los cuatro órganos analizados; en los órganos ojos, intestino y cerebro no hubo expresión. El gen *fzr1* se expresó en hígado y cerebro, correspondiendo esta

expresión al 50% respecto a los cuatro órganos analizados; en los órganos ojo y cerebro no hubo expresión. El gen *hsp70* se reprimió en los órganos ojo e intestino, correspondiendo esta expresión a 50% respecto a los cuatro órganos analizados; en los órganos hígado y cerebro no hubo expresión. El gen *gapdh* se expresó en hígado, correspondiendo esta expresión a un 25% respecto a los cuatro órganos analizados; en los órganos ojos, intestino y cerebro no hubo expresión. El gen *ef1a* se reprimió en intestino, correspondiendo esta expresión a 25% respecto a los cuatro órganos analizados; en los órganos ojo, y cerebro no hubo expresión.

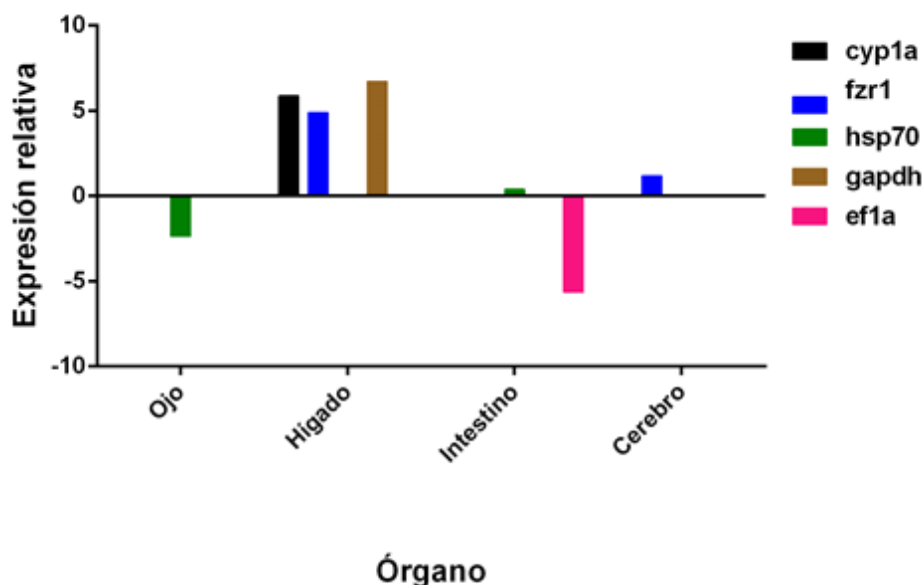


Figura 6-13 Expresión promedio de genes blanco en peces *Danio rerio* expuestos al agua producto del proceso de nanofiltración con la membrana CM90.

El comportamiento de los genes analizados en el pez cebrá después de ser expuesto a la muestra de agua producto de nanofiltración con la membrana CM90 mostró que el valor máximo de expresión fue con el gen *gapdh* con 6.72 veces en el órgano hígado, y el valor mínimo se dio en el gen *ef1a* el cual se reprimió -5.65 veces en el intestino. El gen que se expresó en más órganos fue *fzf1*, el órgano donde se expresaron más

genes fue en hígado. El gen que se reprimió en más órganos fue *hsp70*, y los órganos donde se reprimieron más genes fueron en el ojo e intestino. Asimismo, el gen expresado en menos órganos fue *gapdh*; y los órganos donde se expresaron menos genes fueron en ojo y en el cerebro.

6.3.8 Niveles de expresión de genes blanco en diversos órganos de peces expuestos al agua producto del proceso de nanofiltración con la membrana nominal CM70.

En la Figura 6-14 se muestra el promedio del comportamiento de cada gen respecto a esta muestra. El gen *fzr1* se expresó en hígado, correspondiendo esta expresión a un 20% respecto a los cinco órganos analizados; en los órganos ojo, intestino, músculo y cerebro no hubo expresión. El gen *hmox* se expresó en hígado, correspondiendo esta expresión a 20% respecto a los cinco órganos analizados; se reprimió en ojos; mientras que en los órganos, intestino, músculo y cerebro no mostraron expresión. El gen *hsp70* se reprimió en los órganos hígado e intestino, correspondiendo esta expresión a un 40% respecto a los cinco órganos analizados; en los órganos ojo, músculo y cerebro no hubo expresión. El gen *gapdh* se reprimió en ojo, correspondiendo esta expresión a un 20% respecto a los cinco órganos analizados; en los órganos hígado, intestino, músculo y cerebro no hubo expresión.

El gen *ef1a* se reprimió en ojo, hígado, intestino, músculo y cerebro, correspondiendo esta expresión a un 100% respecto a los cinco órganos analizados.

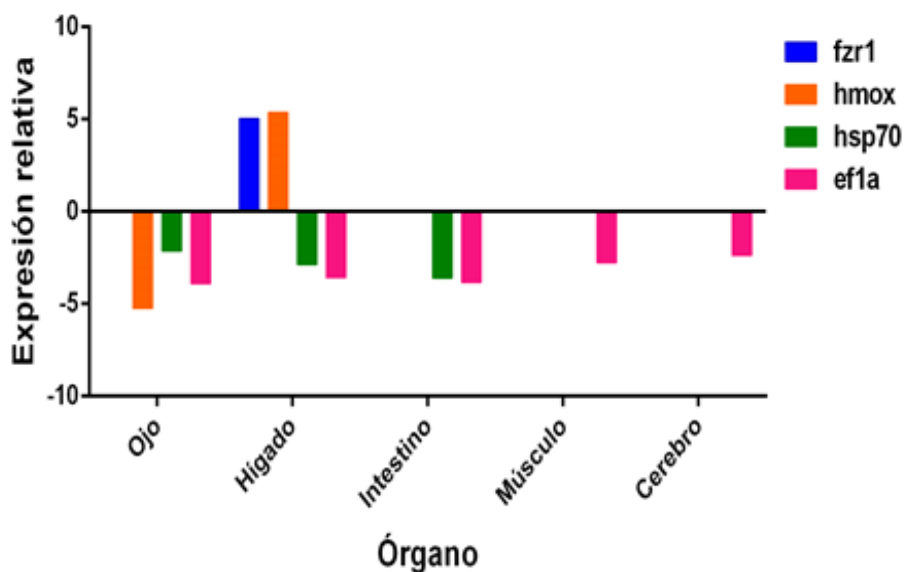


Figura 6-14 Expresión promedio de genes blanco en peces *Danio rerio* expuestos al agua producto del proceso de nanofiltración con la membrana CM70.

El comportamiento de los genes analizados en el pez cebrá después de ser expuesto a la muestra de agua producto de nanofiltración con la membrana CM70 mostro que el valor máximo y mínimo de expresión fue con el gen *hmox* con 5.33 veces en el órgano hígado, y el valor mínimo de este gen donde se reprimió -5.24 veces en el intestino. El gen que se expresó en más órganos fue *fzf1*, el órgano donde se expresaron más genes fue en hígado. El gen que se expresó en más órganos fue *fzf1*, y el órgano donde se expresaron más genes fue en el hígado. Asimismo, el gen que se reprimió en más órganos fue *ef1a*; y fue en ojo donde se reprimieron más genes. El gen expresado en menos órganos fue *fzf1*, y los órganos donde se expresaron menos genes fueron en músculo y cerebro.

6.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El arsénico causó 39% de expresión inducida y una supresión de 61% de los genes analizados del lote de peces expuesto al agua sintética de este metal. Mientras que el estradiol causó una expresión inducida de 36.6% y una supresión de 63.3% de los genes analizados del lote de peces expuesto al agua sintética de esta hormona. Asimismo, la mezcla de ambos (arsénico-estradiol) causó una expresión inducida de 54.84% y una supresión de 45.16% de los genes analizados del lote de peces expuesto al agua sintética de esta hormona.

El arsénico, la hormona y la mezcla de ambos alteran la regulación génica nuclear dependiente de receptores de hormona esteroide para glucocorticoides (GR) en células intactas en concentraciones trazas pero ambientalmente relevantes. Las branquias representaron un blanco biológico relevante de exposición para el metal, para la hormona, así como para la mezcla. Mientras que el hígado, quién es el órgano donde inicia el metabolismo y que está asociado directamente con varios estados de enfermedad en el humano relacionados con arsénico, tal como diabetes, en este estudio mostro una cantidad alta de genes suprimidos en el lote de peces expuesto tanto a la hormona como a la mezcla (arsénico-estradiol). Mientras que el cerebro fue el órgano donde se reprimieron más genes para el caso de la solución de arsénico.

Kailtrer *et al.* (2001), reportaron que el arsénico y el estradiol, desempeñan un papel importante en el mecanismo de carcinogénesis mediante la alteración de la función de los receptores de hormona esteroide para glucocorticoides. Para el humano, el pulmón y la piel son dos de los blancos primarios para aumentos inducidos por arsénico y con riesgo de cáncer después de una exposición ambiental sistémica. En modelos de animales experimentales, se ha sugerido que la hormona esteroide para glucocorticoides tiene un papel fundamental en carcinogénesis en pulmón y piel. En consecuencia, sí dosis ambientalmente relevantes de arsénico y estradiol son capaces de suprimir la función normal de la hormona esteroide para glucocorticoides GR como

un mediador de regulación génica, posiblemente contribuya a su capacidad para promover tumorigenesis y otros estados patológicos en otros tejidos. Por consiguiente en este estudio, tanto la solución sintética del arsénico, como la solución sintética de la hormona, cada uno por separado; así como la mezcla de ambos representan una clase de disruptores endócrinos que actúan perturbando interacciones complejas con otras proteínas, como los factores de transcripción y/o miembros del complejo de iniciación, que son críticos para transcripción génica inducida regulada por receptores de hormona esteroide para glucocorticoides.

Para el caso de la hormona, en un pez macho en aguas prístinas se puede detectar débilmente alguna vitelogenina, debido a que las concentraciones de estrógeno circulante en el pez macho son demasiado bajas para activar la expresión del gen vitelogenina. Aunque el gen de vitelogenina es normalmente silenciado, puede ser inducido si pez macho es tratado con estrógenos. La exposición de pez macho a varias concentraciones a estrógenos, naturales y sintéticos, ha mostrado efectos dosis-respuesta muy pronunciados y también ha mostrado que el pez macho es muy sensible a estrógenos presentes en el agua (Sumpter, 1995). Los estrógenos actúan vía receptores específicos; se difunden a través de la célula y membranas nucleares para unirse a receptores de estrógeno nucleares. Los receptores de estrógeno son muy similares en pez y en mamíferos, lo que explica por qué las sustancias químicas que actúan como estrógenos lo hacen en todos los vertebrados.

El agua producto del proceso Carbón Activado Granular (CAG) causó una supresión de 45% de los genes analizados del pez expuesto a esta agua; mientras que la expresión inducida fue de 54.54%. Para el agua producto del proceso arena-antracita causó una supresión de 57% de los genes analizados del pez expuesto a esta agua; mientras que la expresión inducida fue de 42.85%. La comparación de ambos procesos indica que la mezcla arena-antracita fue la que removió más la presencia de la mezcla arsénico-estradiol.

El agua producto del proceso osmosis inversa causó una supresión de 100% de los genes analizados del pez expuesto a esta agua, no hubo expresión inducida en este proceso. Para el agua producto del proceso de nanofiltración con la membrana nominal CSM90 causó una supresión de 28.57% de los genes analizados del pez expuesto a esta agua; mientras que la expresión inducida fue de 71.42%. Para el agua producto del proceso de nanofiltración con la membrana nominal CSM70 causó una supresión de 81.81% de los genes analizados del pez expuesto a esta agua; mientras que la expresión inducida fue de 18.18%. La comparación de los tres procesos muestra que la osmosis inversa es el tratamiento que removió la mezcla arsénico-estradiol en un 100%; debido a que fue el proceso que no mostro una expresión inducida y si una supresión en sólo tres genes. El agua producto del proceso de nanofiltración con las membranas nominales CSM90 y CSM70, siendo la CSM90 la que mostro una mejor remoción de ambas, sin embargo, la membrana CSM70 también mostro una buena remoción.

6.5 CONCLUSIONES

Vale la pena mencionar, que de los genes que se expresaron o reprimieron, la expresión del gen *vgt1* se mostro únicamente en los lotes de peces expuestos durante 30 días a las tres aguas sintéticas de arsénico, de estradiol y de la mezcla de ambos, mostrando una posible actividad estrógena. Mientras que, en las aguas producto de todos los procesos analizados no se mostro la expresión de este gen.

Para el caso del As, nuestros resultados coinciden con los reportados en otras investigaciones, indicando que la supresión es el resultado de la expresión génica disminuida. Los resultados muestran que el arsénico suprimió fuertemente la expresión génica afectando la expresión en curso. El arsénico es una sustancia química disruptiva endócrina (EDC) que también actúa mediante un mecanismo único totalmente distinto de los EDCs orgánicos previamente caracterizados.

Se tiene conocimiento que los Receptores de estrógeno desempeña un papel importante en desarrollo y función normal de hígado y también ha sido reportado previamente, que tiene un rol en carcinogénesis de hígado en sistemas experimentales. La exposición a As en agua potable ha sido asociada con riesgo incrementado de cáncer de hígado, esto plantea la posibilidad de que los efectos de As sobre ER podrían desempeñar un papel en la incidencia de enfermedad.

A partir de los resultados obtenidos de la evaluación de la expresión génica de peces cebrá expuestos a muestras de agua sintética de arsénico, de 17β -estradiol, a la mezcla de ambas y al agua producto de los diferentes procesos, se obtuvo que los genes que se expresaron en la mayoría de los órganos estudiados fueron *ef1a*, *cyp1a*, *fzr1*, *hmox* y *hsp70*, de los cuales ya se cuenta con información sobre su función celular. El gen *cyp1a* tiene actividad de oxido-reductasa, aromatasa, entre otras; y está involucrado en el metabolismo de compuestos aromáticos. El gen *hmox* responde a estímulos por xenobióticos y sustancias tóxicas, además está involucrado en diversas reacciones del metabolismo por su actividad hemo-oxigenasa. Los genes *ef1a* y *hsp70*, están involucrados en la biosíntesis y correcto plegamiento de las proteínas, respectivamente. Cabe mencionar que el gen *hsp70* se sobreexpresa en respuesta a estrés térmico o en presencia de sustancias tóxicas, la actividad de las proteínas *hsp70* son de suma importancia en la fisiología celular. El gen *fzr1* está involucrado en la regulación de la división celular.

6.6 MECANISMOS DE REACCIÓN DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES ARSÉNICO Y 17β -ESTRADIOL.

El sistema endócrino humano consta de glándulas que producen y segregan hormonas que viajan por medio de la sangre a un órgano efector (un órgano o célula que actúa en respuesta a un estímulo) distante y regulan muchas funciones del cuerpo. Las hormonas actúan en receptores en las células blanco de esa hormona, produciendo una respuesta en el tejido blanco. En general, las hormonas operan como señales

químicas, habilitando al sistema endócrino para regular una variedad de funciones biológicas, como la homeostasis (la capacidad del cuerpo para mantener un estado de equilibrio), crecimiento, desarrollo, diferenciación sexual, y reproducción (Norris y Carr, 2006).

6.6.1 Mecanismos de reacción de los disruptores endócrinos

Muchos disruptores endocrinos químicos (EDC) afectan negativamente la señalización de estrógenos mediante la interacción con dos receptores de estrógeno (RE): ER α y ER β . Aunque los receptores tienen la unión similar al ligando y dominios de unión a ADN, ER α y ER β presentan propiedades únicas en términos de selectividad al ligando y la regulación de genes blanco. Los EDCs que se dirigen a la señalización de ER pueden modificar la actividad genómica y no genómica, a través de interacciones directas con ER, indirectamente a través de factores de transcripción, como el receptor de aril hidrocarburos (AHR), o mediante la modulación de las enzimas metabólicas que son críticas para la síntesis y el metabolismo de estrógenos.

Muchos EDC actúan a través de múltiples mecanismos de los que son ejemplos los productos químicos que se unen tanto a AhR (receptor de arilhidrocarburos) y ER, como el 3- metilcolantreno. Otros EDC como los fitoestrógenos, bifenilos, y plaguicidas organoclorados que se dirigen a la señalización de ER, alteran la señalización ER normal. Los EDCs también pueden tener selectividad de tejido con actividad agonista y antagonista similares a moduladores de receptores de estrógeno selectivos (SERMs) diseñados para uso farmacéutico.

Las exigencias actuales de la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. requieren ensayos *in vitro* y basados en células para identificar los EDC que se dirigen a la señalización directa de ER, a través de mecanismos metabólicos. Ensayos adicionales pueden ser útiles para identificar los EDC que actúan a través de mecanismos alternativos antes de continuar con el estudio *in vivo*.

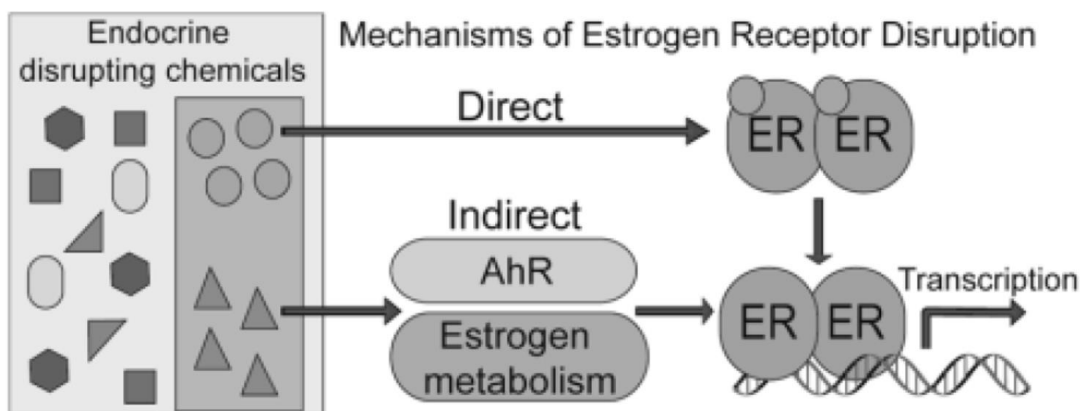


Figura 6-15 Mecanismo de acción de disruptores endocrinos (Shanle & Xu, 2011).

6.6.2 Modo de acción del arsénico en el sistema endocrino

El arsénico actúa como un potente disruptor endócrino, alterando la regulación génica mediante los receptores de hormona esteroide para glucocorticoides (GRs), mineralocorticoides (MRs), progesterona (PR), y andrógeno (AR) (Davey, 2007). En general, los mecanismos debidos a arsénico se centran en uno o más de los metabolitos organoarsénicos teniendo un impacto en la red reguladora de la célula. Éstos incluyen: inducción de una respuesta protectora de especie de oxígeno reactivo (ROS), intensificación/supresión de actividad de reparación de ADN, retrasos en control de ciclo celular, activación de respuestas mitogénicas (APK, PI3K, etc.), o apoptosis con hiperplasia regenerativa.

Todos estos receptores muestran una respuesta dosis-dependiente similar y sorprendentemente compleja a As, con un aumento de transcripción génica dependiente de hormona en dosis muy bajas (0.1–1 μM As) y supresión en dosis más altas pero aún no citotóxicas (1–5 μM As). Se ha establecido que respuestas celulares a estrógenos están mediadas a través de múltiples rutas de señalización. ER α y ER β no funcionan solamente en el núcleo, sino también son importados a la mitocondria y son asociados con el plasma de membrana. La respuesta nuclear a E2 es mediada a través la de interacción directa de ERs con ERE además de indirectamente a través de

interacción de ER con otros factores de transcripción (p.e., Sp1, AP-1, NF- κ B). En ambos casos estas interacciones son seguidas por asociaciones con un array de proteínas de maquinaria transcripcional y coreguladoras (Ascenzi *et al.*, 2006). La importación a mitocondria es seguida por niveles incrementados de ARNm codificados por ADN, posiblemente mediados a través de la unión de ER a elementos similares-a-ERE en ADN mitocondrial (Chen *et al.*, 2004b). La asociación de los ERs con el plasma de membrana da lugar en minutos de tratamiento de E2, a incrementos en varias rutas de proteínas cinasas y niveles de segundos mensajeros (Chen *et al.* 2004a). Las proteínas cinasas activadas por mitógenos pueden dar lugar a la fosforilación de numerosos sustratos (Shah y Catt, 2006), demostrando la vasta red de rutas de señalización afectadas potencialmente por estrógenos. La complejidad de roles específicos para estas rutas de señalización de ER no nucleares están siendo aclarados (Yager y Chen, 2007).

Los mecanismo(s) mediante los cuales As afecta la expresión genética mediada por ER aún no claramente determinada, pero los datos sobre la constelación de efectos que As ejerce proporcionan varias señales (Figura 6-15). Un descubrimiento en el estudio de Davey *et al.* (2007) es que el As parece estar inhibiendo la transcripción en curso, es decir, la expresión génica medida 24 horas después del tratamiento de E2, esto fue similar si el As fue añadido 4 h antes o 4 h después de tratamiento con E2. Evidencia reseñada en Ascenzi y colaboradores (2006) sugiere que ER α puede ser un ciclo de abierto y cerrado del promotor, un proceso que “permite un muestreo continuo de niveles de E2”. Un proceso así da la oportunidad para modificaciones inducidas por As del ER y/o proteínas co-reguladoras mediante ROS, cambios en fosforilación, o incluso unión directa mediante As.

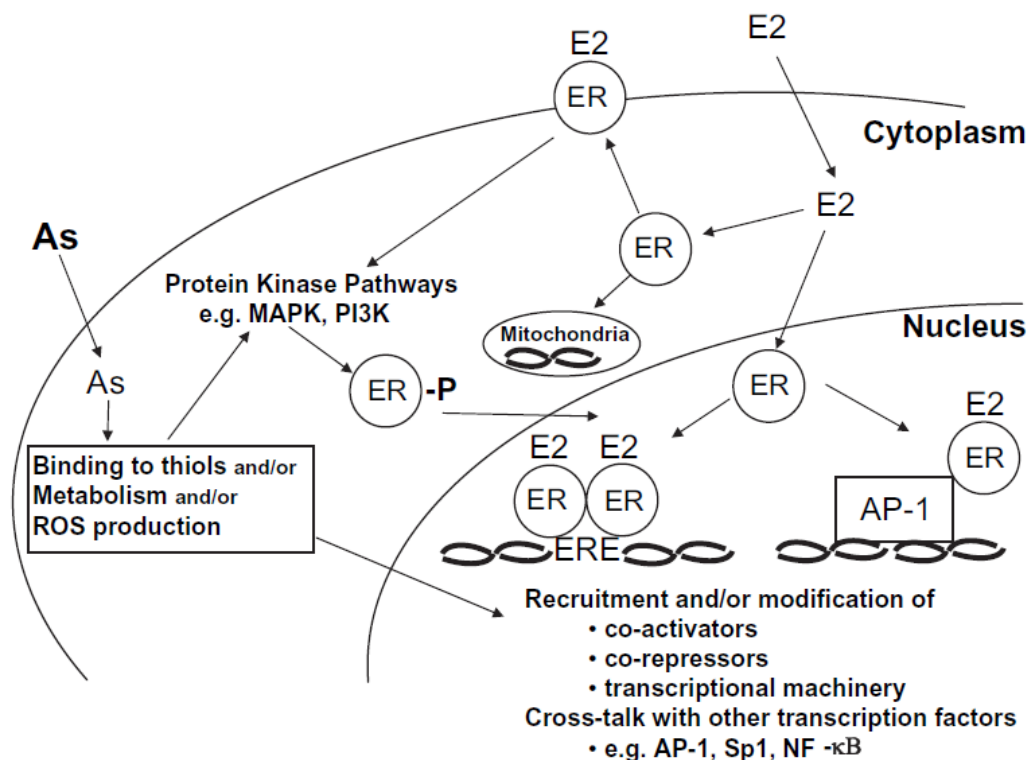


Figura 6-16 Sitios potenciales para interferencia de arsénico con expresión génica mediada por ER. Esta figura resume los puntos donde el arsénico puede ejercer efectos en rutas de señalización dando lugar a la inhibición de expresión génica resultante de exposición a E2. PI3K, fosfoinositol-3 cinasa; MAPK, proteínas cinasas activadas por mitógenos (Watson, 2007).

6.6.3 Modo de acción del estradiol en el sistema endocrino

Existen múltiples ondas de activación transcripcional después de una sola exposición a hormonas: respuestas primarias, secundarias, y retrasadas (Dean & Sanders, 1996). Los genes que son activados directamente por hormonas son definidos como respuestas primarias. Se cree que éstas ocurren dentro de 2-6 h de exposición. Genes que no son blancos directos de las hormonas, pero en cambio son sobre-regulados por productos de los blancos directos, caracterizan las respuestas secundarias. Debido a que estos genes requieren transcripción y traducción de los productos directos, estas respuestas ocurren más tarde que las respuestas primarias. La tercera categoría,

“respuestas primarias retrasadas”, se refiere a un grupo de genes que son tomados como blanco por la hormona pero también dependen de productos de proteína para ser hechos de la respuesta primaria para activación completa. Esta secuencia ordenada de estos sucesos transcripcionales se supone que sea importante para la homeostasis y ciertamente para reproducción y desarrollo, sucesos que son regulados por acción hormonal (Bowman *et al.*, 2002)

El modelo clásico para la acción de las hormonas establece que los esteroides pueden cruzar libremente la membrana plasma, entrar en el citoplasma, se unen y activan proteínas receptoras esteroides intracelulares específicas. Según este modelo, la hormona esteroide se une a la cavidad de unión a hormona o, en algunos casos, a alguna otra parte del receptor, induciendo un cambio de conformación del receptor para activar o inhibir su capacidad para funcionar como un factor de transcripción, a menudo vía unión de proteínas co-activadoras o co-represoras (Figura 6-16).

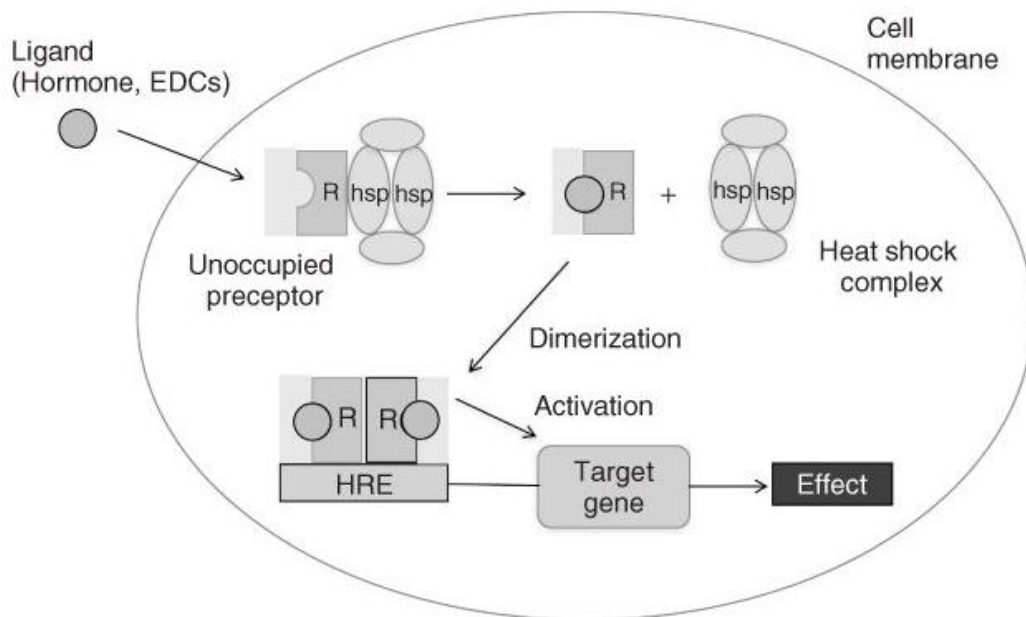


Figura 6-17 Mecanismo de acción de receptores de hormona esteroide simplificado. El ligando unido a la proteína receptora (R) estimula la disociación de las proteínas de choque térmico (hsp), causando cambios de conformación en el receptor y promoviendo la dimerización del

receptor. Esto le permite unirse como un dímero a sitios de ADN nuclear específicos, llamados elementos sensibles a hormona (HRE). Posteriormente, ocurre la unión de ADN a HRE para producir un complejo que puede desencadenar o suprimir la transcripción de un conjunto selecto de genes (Weigel, 1996).

La consecuencia principal de la activación es que el receptor se vuelve competente para interactuar directamente con elementos sensibles a ADN (elementos de respuesta a ADN) de genes blanco, así como 'cross-talking' con otras rutas de señalización. Esto inicia una secuencia de reacciones que regulan la expresión de genes. Las hormonas de este tipo incluyen las hormonas esteroides (p.e., cortisol, progesterona, estradiol, y testosterona), tirosina, y ácido retinoico.

7 CARACTERIZACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A CONTAMINANTES INORGÁNICOS, ORGÁNICOS Y EMERGENTES

7.1 OBJETIVO

Caracterizar la exposición a contaminantes inorgánicos, orgánicos y emergentes.

7.2 METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA EXPOSICIÓN Y EVALUACIÓN DE RIESGOS SANITARIOS.

La caracterización de la exposición, es una etapa fundamental en el proceso de evaluación y caracterización de riesgos sanitarios.

En general, la metodología propuesta cuenta con tres fases: la obtención de un listado preliminar de sitios potencialmente contaminados, la inspección de estos sitios para jerarquizarlos a fin de llevar a cabo la evaluación de la exposición.

La evaluación de la exposición se basó en la metodología para la evaluación de riesgos en sitios potencialmente peligrosos (ATSDR y la USEPA), así como en la información generada en el punto anterior.

El tipo y nivel de contaminantes presentes, así como la estrogenicidad detectados, permitirán obtener un primer modelo de exposición-efecto para las zonas de interés, lo que no constituye un estudio de causalidad, sino sólo de posibles efectos a la salud.

7.2.1 Búsqueda y análisis de información

Se llevó a cabo una búsqueda de información en bases de datos especializadas en materia de calidad del agua, riesgos sanitarios y contaminantes emergentes. Se analizó información de textos, revistas indizadas y de divulgación científica, congresos, simposia e informes institucionales, entre otros, obtenidos en bases de datos nacionales, de Canadá, Estados Unidos, Australia y de otros países, así como de

organismos internacionales entre los que se encuentran la Organización Mundial de la Salud y la Unión Europea.

Asimismo, se realizó una búsqueda y análisis de información nacional e internacional sobre el marco normativo y regulaciones en materia de calidad del agua de consumo, así como de esquemas y/o proyectos de reúso y reciclamiento de aguas residuales con fines potables.

7.2.2 Análisis de las estadísticas de morbilidad y mortalidad

Una de las utilidades de las tasas y de las proporciones es poder comparar la frecuencia de un evento, no solamente a través del tiempo, sino también entre varias regiones y subgrupos específicos de estas regiones. En este caso, se presentan las tasas de morbilidad debido a las diez principales causas de enfermedad para el período de 2008 a 2012, así como las tasas de mortalidad debidas a enfermedades infecciosas respiratorias agudas, enfermedades infecciosas intestinales por otros organismos y las mal definidas, y enfermedades crónicas seleccionadas en el contexto nacional, estatal, jurisdiccional y municipal, para identificar posibles diferencias.

7.2.3 Tasas de morbilidad

Los datos sobre el número de casos de enfermedad y tasas de morbilidad por 10,000 habitantes, por grupos quinquenales de edad, fueron consultadas en el Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica a nivel estatal. Las tasas de morbilidad se estiman con información de la Secretaría de Salud/Dirección General de Epidemiología y las proyecciones de la población de México 2005-2030 del CONAPO [2006].

Así, la medida de enfermedad que se tiene es el número de casos nuevos de una enfermedad ocurridos durante un período de tiempo específico en una población en riesgo de desarrollar la enfermedad:

$$\text{Tasa de morbilidad} \times 10,000 \text{ hab}$$
$$= \frac{\text{No. de casos nuevos en la población en un período de tiempo}}{\text{No. de personas en riesgo de enfermedad durante el mismo período}} \times 10,000$$

7.2.4 Tasa de mortalidad

La tasa cruda de mortalidad es el número de decesos o defunciones ocurridos durante un período de tiempo específico en una población en riesgo de morir. Generalmente las tasas de mortalidad específica por edad se expresan por cada 1,000 habitantes, pero para nuestro propósito se trabajarán tasas por 100,000 habitantes.

Un aspecto importante a considerar es que, si las poblaciones se distribuyeran de manera parecida respecto a factores tales como edad, sexo, raza, etnia, clase social, entre otros, que estén relacionados con el evento estudiado, no habría problema en comparar las tasas crudas o brutas; sin embargo, dado que dichas distribuciones no son similares, la comparación directa de las tasas brutas de mortalidad puede llevar a conclusiones erróneas.

Así, al comparar las tasas de mortalidad, éstas podrían estar afectadas o alteradas por la proporción de sujetos en cada grupo de edad de cada población. Por tanto, el hecho de que, por ejemplo, uno de los municipios presente una tasa de mortalidad superior a la del otro no significa que necesariamente haya un problema de salud mayor, ya que la diferencia observada entre las tasas podría ser efecto de diferencias en las estructuras etarias de la población; esto es, la edad podría estar causando un efecto de confusión.

Para solucionar este factor de confusión, se recurrió a la estandarización de tasas por edad, lo cual permite comparar tasas crudas de mortalidad de dos poblaciones distintas en un mismo año o de la misma población en distintos años eliminando el efecto de la estructura etaria de la población. La estandarización consiste en obtener una media ponderada de las tasas específicas de mortalidad por grupos de edad. El principio es

calcular tasas “hipotéticas” para cada grupo de comparación, usando una distribución artificial idéntica al factor de confusión por el cual estandarizar.

Debido a que se cuenta con información para estimar tasas específicas de mortalidad y con una población estándar (Organización Mundial de la Salud), se utilizó el método directo o de la población estándar. Es importante señalar que si bien es posible comprar tasas de manera directa y no excluye la comparación de las tasas específicas, tiene como limitante la arbitrariedad de la población de referencia y problemas con poblaciones pequeñas.

Las fuentes de información fueron las siguientes:

Datos	Fuente de información
Defunciones por año de registro y ocurrencia para población total, menores de un año y grupos quinquenales de edad	INEGI. Consulta interactiva de datos. Estadísticas de mortalidad. http://www.inegi.org.mx/
Población total a mitad del año por grupos quinquenales de edad	Secretaría de Salud/Dirección General de Información en Salud, Estimaciones con base en las Proyecciones de la Población de México 2005 - 2030
Población estándar mundial de la Organización Mundial de la Salud	Ahmed, <i>et al.</i> , 2001

7.2.5 Evaluación del riesgo de exposición y efectos a la salud

El estudio de evaluación del riesgo de exposición y de daño a la salud se basó en la metodología propuesta por la USEPA [1989] en la Figura 7-1.

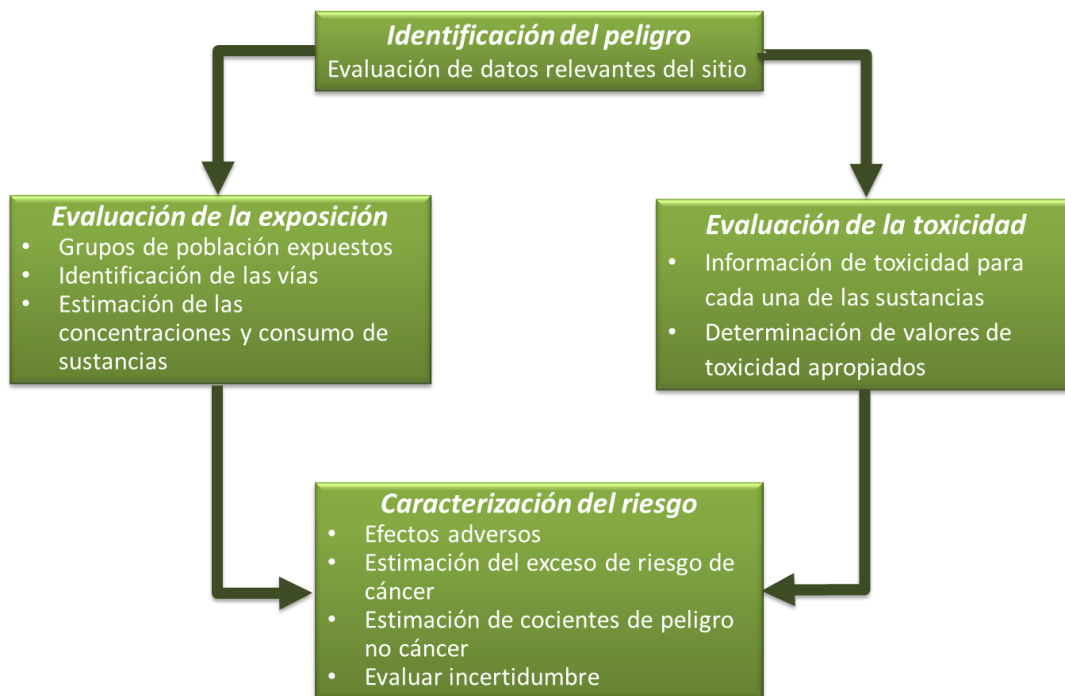


Figura 7-1. Metodología de evaluación de riesgos a la salud

Conceptualmente, para llevar a cabo la evaluación de riesgos a la salud, es necesario identificar las fuentes (contaminantes, concentraciones, temporalidad y localidades potencialmente afectadas) las vías de exposición (medio, tasas de migración de contaminantes, temporalidad, pérdida y ganancia de funciones) y los receptores o población potencialmente expuesta.

El proceso de evaluación inició en la primera etapa del estudio, con la colección y análisis de datos del sitio y con la identificación de sustancias de interés potencial (Capítulo I), a fin de determinar la relevancia de éstos para la evaluación de la toxicidad y riesgo de exposición. Con ello es posible caracterizar dicho riesgo, así como evaluar los elementos que conforman el modelo conceptual de evaluación de riesgos sanitarios (Figura 7-2).

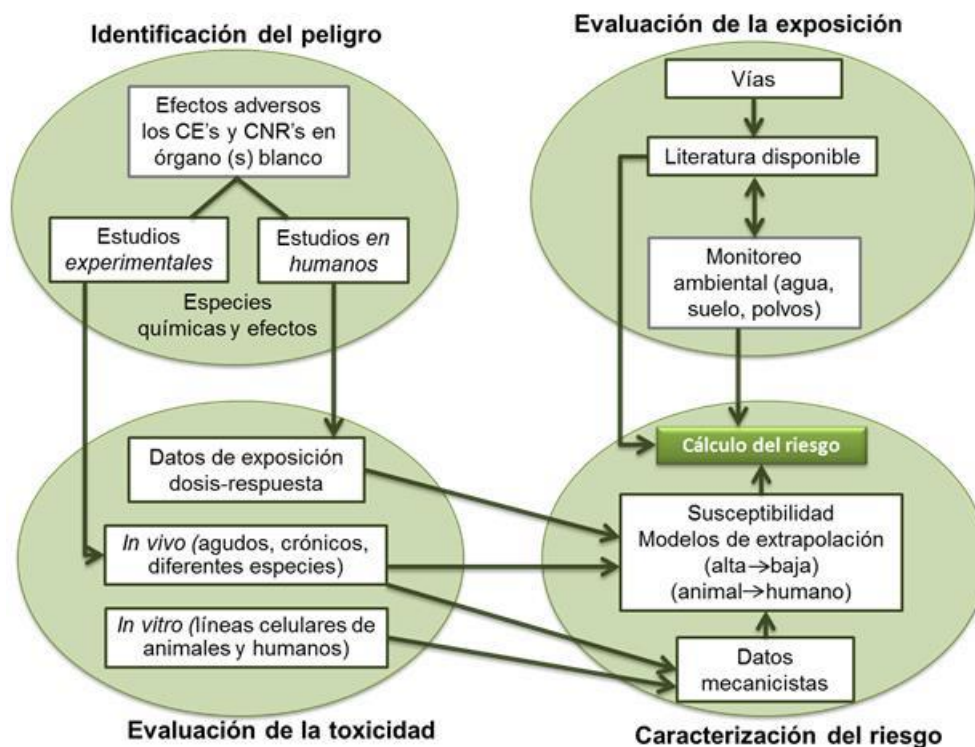


Figura 7-2. Modelo conceptual del procedimiento para la evaluación de riesgos sanitarios.

CE's: Contaminantes emergentes; CNR's: contaminantes no regulados

El primer punto que es la evaluación de datos, es crítico considerar los siguientes aspectos:

- La combinación de datos obtenidos durante el estudio y la que se encuentra en investigaciones anteriores
- La evaluación de métodos analíticos y la calidad de los datos con respecto a los límites de cuantificación de las muestras
- Evaluación de la calidad de los datos con respecto a los criterios de calidad y a los blancos de campo, cristalería y método
- Evaluación preliminar de los compuestos identificados
- Comparación de la contaminación potencial del sitio con los antecedentes

Para fines del presente estudio, y con base en las características de la información que es posible obtener, es fundamental la caracterización de la exposición (Figura 7-3), definida ésta como el contacto del organismo humano con un agente químico presente en agua para uso y consumo humano.

La magnitud de la exposición está determinada por la medición o estimación de la cantidad de agente disponible para las fronteras o barreras de intercambio (en este caso la piel y la boca) durante un período de tiempo específico. Así, la evaluación de la exposición es la determinación cualitativa o cuantitativa, de la magnitud, frecuencia, duración y ruta de exposición.

7.2.6 Encuesta

La encuesta fue la herramienta para la obtención de la información que permitió la estimación del consumo de agua y evaluación de los riesgos sanitarios. Se aplicaron 100 cuestionarios en los municipios de Jiutepec, Totolapan, Huitzilac, Tlaltizapán, Tepalcingo, Tetela del Volcán, Emiliano Zapata, Tepoztlán, Yautepec y Cuautla.

El cuestionario incluyó aspectos socioeconómicos, de salud, uso de medicamentos prescritos y no prescritos, uso de productos para el cuidado personal, así como consumo promedio de agua y tipo de agua utilizada para la preparación de bebidas y alimentos (Anexo I, cuestionario aplicado).



Figura 7-3. Evaluación de la exposición a contaminantes emergentes y no regulados a través del agua para uso y consumo humano.

7.3 PROBLEMÁTICA EN LA ZONA

Dentro de la cuenca del río Yautepec, se presentan graves problemas de disponibilidad de agua para consumo humano, especialmente en localidades rurales de municipios que se encuentran en la parte alta del estado: Tepoztlán, Tlalnepantla, Totolapan, Tlayacapan y Atlatlahucan; este último con poco más del 90% de su población ubicada dentro de la cuenca, y la localidad de Coajomulco en el municipio de Huitzilac.

Por sus condiciones geográficas y geológicas, es notoria la ausencia de fuentes de abastecimiento, o bien, dependen de norias o escurrimientos superficiales que en época de estiaje reducen significativamente su disponibilidad. Destaca el municipio de Tlalnepantla, que presenta el rezago más importante de cobertura de agua entubada

(alrededor del 78%); seguido de Totolapan, con un rezago del 45%, así como Tepoztlán, con un 42%, y, finalmente, Tlayacapan y Atlatlahucan con un 24 y un 18%, respectivamente.

En lo que respecta a la cobertura de drenaje, Tlalnepantla continua presentando un rezago importante del orden del 63%, seguido de Totolapan con el 37%, Tlayacapan con el 22%, y finalmente Tepoztlán y Atlatlahucan con el 18 y el 14%, respectivamente. Es importante resaltar que en el caso de Tepoztlán, de esta cobertura de drenaje el 70% es alcanzado a través de conexiones a fosas sépticas.

Para la Comisión Estatal de Agua (CEA), esta situación es crítica y no ha podido ser resuelta, particularmente en las localidades de Coajomulco, en Huitzilac, y Felipe Neri, El Vigía y El Pedregal, en Tlalnepantla, todas ellas de alta marginalidad, que carecen de una fuente de abastecimiento adecuada de agua potable.

El abasto en localidades rurales de los municipios de Atlatlahucan y Tlayacapan depende más de la ampliación o rehabilitación de la infraestructura, particularmente de la red de distribución, y de una mejor operación de los sistemas.

A pesar de que los municipios de Totolapan y Tepoztlán cuentan con pozos profundos y manantiales para abastecimiento, éstos no captan el recurso en cantidad suficiente para satisfacer las necesidades que demanda la población. En Tepoztlán se localizan el mayor número de localidades rurales con alta marginalidad, 16, seguida de Totolapan con nueve. En la mayoría de las localidades no se cuenta con infraestructura de alcantarillado sanitario debido, principalmente, al tamaño de la población y a la configuración topográfica de la localidad.

Uno de los servicios que requiere mayor presencia en las localidades rurales y genera un mayor impacto en el medio ambiente es el saneamiento, la población ha probado diferentes sistemas y técnicas de saneamiento existentes en el mercado, como son las

letrinas y fosas sépticas o, simplemente, no cuenta con sistema alguno de saneamiento.

El acuífero de Cuautla-Yautepec, principal fuente de suministro de agua para la cuenca, está considerado como sobrexplotado y tiene una disponibilidad apenas del orden de los 14.76 hm³, situación que pone en riesgo el abasto de agua en la cuenca por su dinámica de crecimiento poblacional. Aunado a esto, el uso de las aguas superficiales en la cuenca se está viendo limitado por su contaminación, particularmente para el riego agrícola.

En la zona, las unidades presentan rezagos importantes en la modernización y tecnificación del riego, además de que tienen que afrontar problemas en el mantenimiento y operación de la infraestructura, tales como el mantenimiento de canales, la reparación de obras y el control de malezas acuáticas.

En la cuenca del río Cuautla, se tienen cuatro plantas de tratamiento de aguas residuales, con una capacidad instalada de 469 L/s. Considerando que se generan 744 L/s de aguas residuales, de las cuales se colectan 479 L/s y se tratan tan sólo 433 L/s, resulta claro que los cuerpos receptores, están potencialmente expuestos tanto a los contaminantes presentes en las descargas no tratadas como a aquéllos que persisten a los procesos de tratamiento.

Por otro lado, las estadísticas del Consejo Nacional de Población (2010), muestran que el grado de marginación de los municipios va de medio a muy bajo (Tabla 7-1); sin embargo, en los municipios de Atlatlahuacan, Huitzilac, Jonacatepec, Tepalcingo, Tepoztlán, Tlalnepantla, Tlalquiltenango, Tlayacapan, Totolapan, Yautepec y Yecapixtla, más del 10% de la población ocupa viviendas sin agua entubada. Además, municipios como Ayala, Tlaquiltenango, Yecapixtla y, en menor medida el de Atlatlahuacan, presentan índices de dispersión elevados, lo que dificulta la provisión de servicios básicos para las localidades rurales tales como electrificación, agua potable y

drenaje. Adicionalmente en la zona se ubica la comunidad indígena de Tetelcingo, en el municipio de Cuautla.

La Comisión Estatal de Agua del estado de Morelos, reconoce como obstáculos para el desarrollo hídrico de ambas cuencas, tanto el elevado consumo y desperdicio de agua, como la contaminación de aguas superficiales y subterráneas.

7.4 ESTADÍSTICAS DE MORBILIDAD Y MORTALIDAD EN EL ESTADO DE MORELOS

Como en el ámbito nacional, el estado de Morelos y sus municipios, enfrentan cambios epidemiológicos, que también se traducen en la coexistencia de enfermedades infecciosas con enfermedades no transmisibles o crónico-degenerativas. Éstas últimas van en aumento, debido tanto a la transición demográfica asociada al envejecimiento poblacional y a la persistencia de desigualdades de desarrollo, como al desarrollo urbano, tecnológico y de riesgo, relacionados con estilos de vida.

7.4.1 Principales causas de enfermedad en el estado de Morelos

En el contexto municipal, como a nivel estatal y nacional, las enfermedades infecciosas de vías respiratorias agudas y las enfermedades infecciosas intestinales son las dos principales causas de morbilidad en la población, y emergen como problema enfermedades crónicas como la hipertensión arterial y la diabetes mellitus tipo II no insulino dependiente (Tabla 7-2).

La edad es un factor de riesgo importante para las diferentes enfermedades. La información estadística del estado, indican que las enfermedades respiratorias agudas (IRA's) y las infecciones intestinales (EII) son la primera y segunda causa de enfermedad respectivamente, en la población general y en menores de cinco años, en tanto que la hipertensión arterial y la diabetes mellitus tipo II aparecen como causa importante en adultos de 20 y más años.

De acuerdo con las tasas de morbilidad por 10,000 habitantes, el grupo de edad de mayor riesgo para las IRA's es de la población menor de un año, seguido por los la de uno a cinco años y de seis a nueve años, otros grupos etarios parecen ser menos susceptibles a este tipo de infecciones.

Tabla 7-1. Servicios en la vivienda y grado de marginación de los municipios de las cuencas de los ríos Cuautla y Yauatepec.

Municipio	Población total	% Ocupantes en viviendas sin drenaje ni excusado	% Ocupantes en viviendas sin agua entubada	% Viviendas con algún nivel de hacinamiento	Grado de marginación	Índice de marginación escala 0 a 100	Lugar que ocupa en el contexto estatal	Lugar que ocupa en el contexto nacional
Morelos	1,777,227	1.98	8.25	34.17				
Atlatlahucan	18,895	3.00	14.67	37.72	Bajo	19.608	21	1,806
Ayala	78,866	3.73	8.85	40.26	Medio	20.168	18	1,756
Cuautla	175,207	0.77	5.90	34.03	Muy bajo	13.030	29	2,226
Cuernavaca	365,168	0.32	2.56	24.33	Muy bajo	7.257	33	2,418
Emiliano Zapata	83,485	1.06	0.80	35.02	Muy bajo	12.627	30	2,245
Huitzilac	17,340	1.42	31.14	42.56	Bajo	17.473	24	1,953
Jiutepec	196,953	0.39	3.63	28.63	Muy bajo	8.597	32	2,383
Jojutla	55,115	1.85	4.13	31.62	Bajo	14.010	27	2,175
Jonacatepec	14,604	4.90	34.77	42.28	Medio	22.376	11	1,595
Ocuituco	16,858	3.31	6.92	47.67	Medio	25.894	3	1,332
Tepalcingo	25,346	6.44	20.62	40.66	Medio	25.023	7	1,400
Tepoztlán	41,629	3.36	40.60	34.68	Bajo	18.849	22	1,859
Tetela del Volcán	19,138	4.13	2.33	47.17	Medio	22.997	8	1,551
Tlalnepantla	6,636	6.27	55.94	51.30	Medio	28.771	1	1,114
Tlaltizapán	48,881	2.55	6.92	35.46	Bajo	18.365	23	1,893
Tlaquiltenango	31,534	4.06	11.83	34.52	Medio	19.976	19	1,771
Tlayacapan	16,543	4.85	20.96	44.82	Medio	19.948	20	1,776
Totolapan	10,789	5.25	41.17	51.07	Medio	25.104	5	1,390
Xochitepec	63,382	2.48	7.17	40.23	Bajo	16.704	25	2,017
Yauatepec	97,827	2.13	10.26	37.42	Bajo	15.028	26	2,113
Yecapixtla	46,809	3.04	16.93	48.70	Medio	20.892	16	1,706
Zacatepec de Hidalgo	35,063	1.01	0.94	29.41	Muy bajo	11.557	31	2,294

Fuente: CONAPO, 2010

Tabla 7-2. Principales causas de enfermedad en la República Mexicana y el estado de Morelos (2007-2014).

Orden	1995		2000		2005		2006		2008	
	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos
1	Infecciones respiratorias agudas		Infecciones respiratorias agudas		Infecciones respiratorias agudas		Infecciones respiratorias agudas		Infecciones respiratorias agudas	
2	Otras infecciones intestinales y las mal definidas		Otras infecciones intestinales y las mal definidas		Infecciones intestinales por otros organismos y las mal definidas		Infecciones intestinales por otros organismos y las mal definidas		Infecciones intestinales por otros organismos y las mal definidas	
3	Amibiasis intestinal		Infección de vías urinarias		Infección de vías urinarias		Infección de vías urinarias		Infección de vías urinarias	
4	Otras helmintiasis		Amibiasis intestinal		Úlceras, gastritis y duodenitis	Intoxicación por picadura de alacrán	Úlceras, gastritis y duodenitis	Intoxicación por picadura de alacrán	Úlceras, gastritis y duodenitis	Intoxicación por picadura de alacrán
5	Otitis media aguda	Intoxicación por picadura de alacrán	Úlceras, gastritis y duodenitis	Intoxicación por picadura de alacrán	Amebiasis intestinal	Úlceras, gastritis y duodenitis	Otitis media aguda	Úlceras, gastritis y duodenitis	Otitis media aguda	Úlceras, gastritis y duodenitis
6	Ascariasis	Otitis media aguda	Otras helmintiasis		Otitis media aguda	Amebiasis intestinal	Amebiasis intestinal		Amebiasis intestinal	Hipertensión arterial
7	Hipertensión arterial	Ascariasis	Otitis media aguda	Úlceras, gastritis y duodenitis	Hipertensión arterial	Faringitis y amigdalitis estreptocócicas	Hipertensión arterial		Hipertensión arterial	Amebiasis intestinal
8	Varicela	Candidiasis urogenital	Hipertensión arterial	Otitis media aguda	Gingivitis y enfermedad periodontal	Hipertensión arterial	Gingivitis y enfermedad periodontal	Diabetes mellitus no insulino-dependiente (Tipo II)	Gingivitis y enfermedad periodontal	Diabetes mellitus no insulino-dependiente (Tipo II)
9	Diabetes mellitus		Varicela	Hipertensión arterial	Otras helmintiasis	Diabetes mellitus no insulino-dependiente (Tipo II)		Otitis media aguda	Diabetes mellitus no insulino-dependiente (Tipo II)	Otitis media aguda
10	Angina estreptocócica	Varicela	Ascariasis	Candidiasis urogenital	Diabetes mellitus no insulino-dependiente	Otitis media aguda	Otras helmintiasis	Candidiasis urogenital	Conjuntivitis	Otras helmintiasis
11	Candidiasis urogenital	Hipertensión arterial	Candidiasis urogenital	Diabetes mellitus	Candidiasis urogenital	Otras helmintiasis	Candidiasis urogenital	Otras helmintiasis		Fiebre por dengue
12	Accidente de tráfico	Tricomoniasis urogenital	Diabetes mellitus	Varicela	Varicela	Candidiasis urogenital	Conjuntivitis	Asma y estado asmático	Varicela	Candidiasis urogenital
13	Paratifoidea y otras salmonelosis	Intoxicación por ponzoña de animales	Asma	Ascariasis	Asma y estado asmático		Varicela	Gingivitis y enfermedad periodontal	Asma y estado asmático	Gingivitis y enfermedad periodontal
14	Neumonías y bronco-neumonías	Accidentes de tráfico	Insuficiencia venosa periférica	Asma	Conjuntivitis	Varicela	Intoxicación por picadura de alacrán	Conjuntivitis	Candidiasis urogenital	Asma y estado asmático



Orden	1995		2000		2005		2006		2008	
	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos
15	Tricomoniasis urogenital	Paratifoidea y otras salmonelosis	Desnutrición leve	Tricomoniasis urogenital	Intoxicación por picadura de alacrán	Gingivitis y enfermedad periodontal	Asma y estado asmático	Tricomoniasis urogenital	Intoxicación por picadura de alacrán	Faringitis y amigdalitis estreptocócica
16	Oxiuriasis	Escabiasis	Angina estreptocócica		Tricomoniasis urogenital		Tricomoniasis urogenital	Varicela	Neumonías y bronco-neumonías	Varicela
17	Escabiasis	Intoxicación alimentaria bacteriana	Intoxicación por picadura de alacrán	Insuficiencia venosa periférica	Ascariasis	Neumonías y bronconeumonías		Ascariasis	Tricomoniasis urogenital	Conjuntivitis
18	Dermatofitosis y dermatomycosis	Giardiasis	Neumonías y bronco-neumonías		Neumonías y bronco-neumonías	Conjuntivitis	Ascariasis	Dengue clásico	Desnutrición leve	Neumonías y bronco-neumonías
19	Intoxicación por ponzoña de animales	Neumonías y bronco-neumonías	Tricomoniasis urogenital	Desnutrición leve		Desnutrición leve	Otras infecciones intestinales debidas a protozoarios	Neumonías y bronco-neumonías	Paratifoidea y otras salmonelosis	Tricomoniasis urogenital
20	Parotiditis epidémica infecciosa		Conjuntivitis mucopurulenta	Quemaduras	Otras infecciones intestinales debidas a protozoarios	Mordeduras por perro	Desnutrición leve	Faringitis y amigdalitis estreptocócica	Quemaduras	Otras infecciones intestinales debidas a protozoarios

Tabla 5.2. Continuación

Orden	2010		2011		2012		2013		2014	
	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos
1	Infecciones respiratorias agudas		Infecciones respiratorias agudas		Infecciones respiratorias agudas		Infecciones respiratorias agudas		Infecciones respiratorias agudas	
2	Infecciones intestinales por otros organismos y las mal definidas		Infecciones intestinales por otros organismos y las mal definidas		Infecciones intestinales por otros organismos y las mal definidas		Infecciones intestinales por otros organismos y las mal definidas		Infecciones intestinales por otros organismos y las mal definidas	
3	Infección en vías urinarias		Infección en vías urinarias		Infección en vías urinarias		Infección en vías urinarias		Infección en vías urinarias	
4	Úlceras, gastritis y duodenitis	Intoxicación por picadura de alacrán	Úlceras, gastritis y duodenitis	Intoxicación por picadura de alacrán	Úlceras, gastritis y duodenitis	Intoxicación por picadura de alacrán	Úlceras, gastritis y duodenitis	Intoxicación por picadura de alacrán	Úlceras, gastritis y duodenitis	Intoxicación por picadura de alacrán
5	Otitis media aguda	Úlceras, gastritis y duodenitis	Gingivitis y enfermedades periodontales	Úlceras, gastritis y duodenitis	Gingivitis y enfermedades periodontales	Úlceras, gastritis y duodenitis	Gingivitis y enfermedades periodontales	Úlceras, gastritis y duodenitis	Gingivitis y enfermedades periodontales	Úlceras, gastritis y duodenitis
6	Gingivitis y enfermedades periodontales	Hipertensión arterial	Otitis media aguda	Gingivitis y enfermedades periodontales	Otitis media aguda	Hipertensión arterial	Otitis media aguda	Hipertensión arterial	Otitis media aguda	Gingivitis y enfermedades periodontales
7	Hipertensión arterial	Amebiasis intestinal	Hipertensión arterial		Hipertensión arterial	Gingivitis y enfermedades periodontales	Hipertensión arterial	Diabetes mellitus no insulino-dependiente (tipo II)	Hipertensión arterial	
8	Conjuntivitis	Otitis media aguda	Conjuntivitis	Otitis media aguda	Conjuntivitis	Diabetes mellitus no insulino-dependiente (tipo II)	Conjuntivitis	Gingivitis y enfermedades periodontales	Conjuntivitis	Otitis media aguda
9	Amebiasis intestinal	Diabetes mellitus no insulino-dependiente (tipo II)	Diabetes mellitus no insulino-dependiente (tipo II)		Diabetes mellitus no insulino-dependiente (tipo II)	Otitis media aguda	Diabetes mellitus no insulino-dependiente (tipo II)	Otitis media aguda	Diabetes mellitus no insulino-dependiente (tipo II)	
10	Diabetes mellitus no insulino-dependiente (tipo II)	Amebiasis intestinal	Obesidad	Amebiasis intestinal	Candidiasis urogenital	Amebiasis intestinal	Candidiasis urogenital	Obesidad		
11	Asma y estado asmático	Otras helmintiasis	Varicela	Vulvovaginitis aguda	Asma y estado asmático	Amebiasis intestinal	Intoxicación por picadura de alacrán	Fiebre por dengue	Vulvovaginitis aguda	
12	Otras helmintiasis	Candidiasis urogenital	Asma y estado asmático	Conjuntivitis	Intoxicación por picadura de alacrán	Fiebre por dengue	Asma y estado asmático	Amebiasis intestinal	Asma y estado asmático	Conjuntivitis
13	Candidiasis urogenital	Asma y estado asmático	Otras helmintiasis	Candidiasis urogenital	Candidiasis urogenital	Asma y estado asmático	Candidiasis urogenital	Asma y estado asmático	Intoxicación por picadura	Candidiasis urogenital



Orden	2010		2011		2012		2013		2014	
	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos
									de alacrán	
14	Intoxicación por picadura de alacrán	Conjuntivitis	Intoxicación por picadura de alacrán	Amebiasis intestinal	Otras helmintiasis		Otras helmintiasis		Amebiasis intestinal	
15	Varicela		Candidiasis urogenital	Asma y estado asmático	Conjuntivitis		Varicela	Conjuntivitis	Candidiasis urogenital	Asma y estado asmático
16	Neumonías y bronco-neumonías	Faringitis y amigdalitis estreptocócica	Neumonías y bronco-neumonías	Otras helmintiasis	Neumonías y bronco-neumonías	Faringitis y amigdalitis estreptocócica	Neumonías y bronco-neumonías	Desnutrición leve	Síndrome febril	Otras helmintiasis
17	Tricomoniasis urogenital	Neumonías y bronco-neumonías	Quemaduras	Insuficiencia venosa periférica	Faringitis y amigdalitis estreptocócica		Varicela	Faringitis y amigdalitis estreptocócica		Insuficiencia venosa periférica
18	Quemaduras	Tricomoniasis urogenital	Paratifoidea y otras salmonelosis	Depresión	Quemaduras	Desnutrición leve	Quemaduras	Tricomoniasis urogenital	Otras helmintiasis	Depresión
19	Paratifoidea y otras salmonelosis	Desnutrición leve	Desnutrición leve	Faringitis y amigdalitis estreptocócica	Paratifoidea y otras salmonelosis	Tricomoniasis urogenital	Desnutrición leve	Neumonías y bronco-neumonías	Neumonías y bronco-neumonías	Faringitis y amigdalitis estreptocócica
20	Desnutrición leve	Otras infecciones intestinales debidas a protozoarios	Tricomoniasis urogenital	Varicela	Desnutrición leve	Fiebre hemorrágica por dengue	Fiebre por dengue	Varicela	Faringitis y amigdalitis estreptocócica	Varicela

Fuente: Secretaría de Salud/Dirección General de Información en Salud, Sistema Único Automatizado para la Vigilancia Epidemiológica (SUAVE).

Con respecto a las enfermedades infecciosas intestinales por otros organismos y las mal definidas, las tasas de morbilidad por 10,000 habitantes, los grupos más afectados son los menores de cinco años; el grupo menos vulnerable a este tipo de infecciones es el de 15 a 19 años; los adultos de 60 a 64 años así como los de 65 y más años, son también susceptibles a las infecciones intestinales, pues las tasas de morbilidad se incrementan con respecto a las observadas para la población de los grupos quinquenales de edad de 15 a 44 años.

La hipertensión arterial y la diabetes mellitus no insulino dependiente (tipo II), emergen como problemas de salud pública en todo el país, y en el estado de Morelos las tasas de incidencia han sido más altas que la nacional para el período de 2005 a 2014 (Figura 7-4).

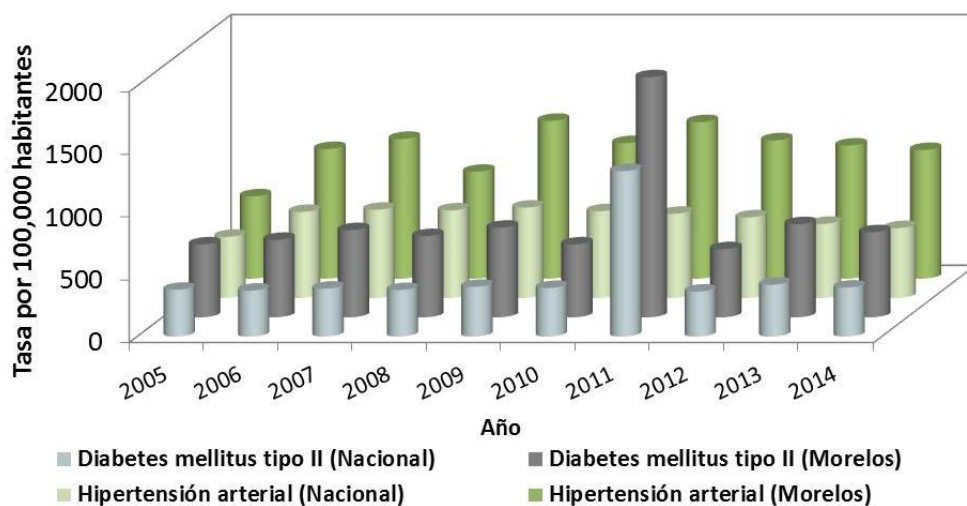


Figura 7-4. Incidencia de Diabetes mellitus no insulino dependiente (tipo II) e hipertensión arterial para el período 2005-2014

Fuente: Dirección General de Epidemiología. Accesado 20 de diciembre de 2015.

<http://www.epidemiologia.salud.gob.mx/anuario/html/anuarios.html>

La diabetes mellitus tipo II, es ahora también considerado un problema de salud pública emergente entre la población infantil. En el estado de Morelos este padecimiento no se encuentra dentro de las diez principales causas de enfermedad en menores de 15 años; sin embargo, en 2010 calificó en esta categoría para el grupo de niños y niñas de 10 a 14 años y, de 2010 a 2012 para los jóvenes de 15 a 19 años. Las tasas de morbilidad se incrementan con la edad, siendo la población general de 60 a 64 años la que presenta la mayor incidencia, como se ilustra en la Figura 7-5, para el año 2014.

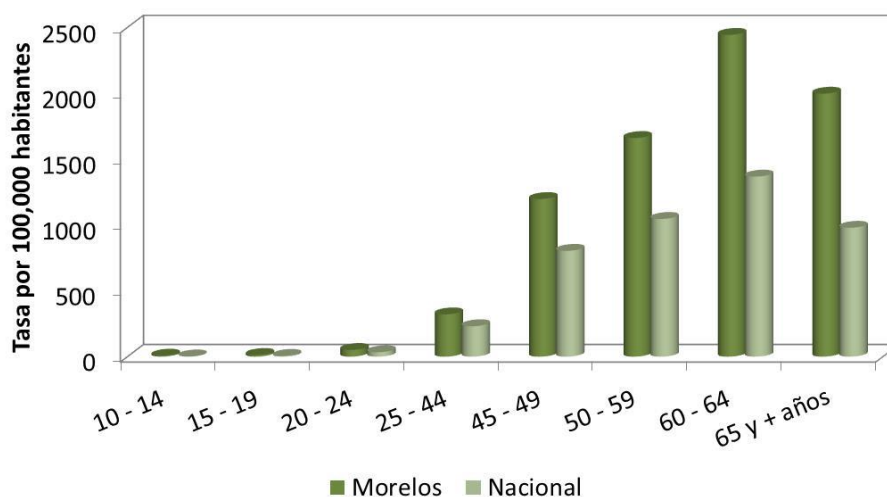


Figura 7-5. Incidencia de diabetes mellitus no insulínica (tipo II) por grupos quinquenales de edad en el año 2014.

Fuente: Dirección General de Epidemiología. Accesado 20 de diciembre de 2015.

<http://www.epidemiologia.salud.gob.mx/anuario/html/anuarios.html>

Con respecto a la hipertensión arterial, es un padecimiento que por su naturaleza no aplica a menores de 15 años y como en el caso de la diabetes mellitus tipo II, la incidencia se incrementa con la edad, con tasas sensiblemente superiores a la nacional para el año 2014 (Figura 7-6).

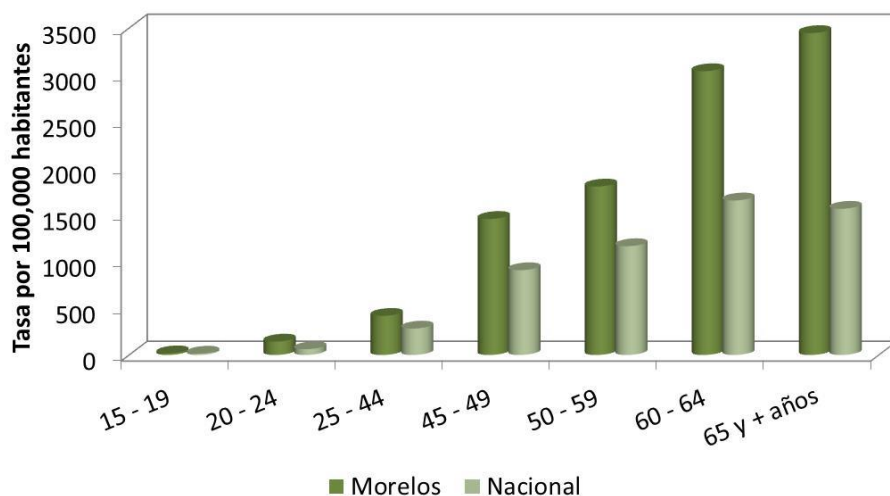


Figura 7-6. Incidencia de hipertensión arterial por grupos quinquenales de edad en el año 2014.

Fuente: Dirección General de Epidemiología. Accesado 20 de diciembre de 2015.

<http://www.epidemiologia.salud.gob.mx/anuario/html/anuarios.html>

7.4.2 Principales causas de mortalidad general en la República Mexicana y el estado de Morelos

Tanto a nivel nacional como estatal, las tres primeras causas de mortalidad en el período 2000 a 2013, son las enfermedades del corazón, diabetes mellitus y tumores malignos (Tabla 7-3), siendo los accidentes y enfermedades del hígado la cuarta o quinta causa. Entre las enfermedades infecciosas, solamente la influenza y neumonía se encuentra entre las diez primeras causas de mortalidad y las infecciones intestinales son ahora la diecinueveava o veinteava causa entre la población general.

Tabla 7-3. Principales causas de mortalidad en la República Mexicana y el estado de Morelos en el período 2000 a 2013.

Orden	2000		2005		2006		2007		2008	
	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos
1	Enfermedades del corazón		Enfermedades del corazón		Enfermedades del corazón		Enfermedades del corazón		Enfermedades del corazón	
2	Tumores malignos		Diabetes mellitus	Tumores malignos	Diabetes mellitus		Diabetes mellitus		Diabetes mellitus	
3	Diabetes mellitus		Tumores malignos	Diabetes mellitus	Tumores malignos		Tumores malignos		Tumores malignos	
4	Accidentes		Accidentes	Enfermedades del hígado	Accidentes		Accidentes		Accidentes	Enfermedades del hígado
5	Enfermedades del hígado		Enfermedades del hígado	Accidentes	Enfermedades del hígado		Enfermedades del hígado		Enfermedades del hígado	Accidentes
6	Enfermedades cerebrovasculares		Enfermedades cerebrovasculares		Enfermedades cerebrovasculares		Enfermedades cerebrovasculares		Enfermedades cerebrovasculares	
7	Ciertas afecciones originadas en el período perinatal		Ciertas afecciones originadas en el período perinatal	Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas	Ciertas afecciones originadas en el período perinatal	Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas	Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas		Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas	
8	Influenza y neumonía	Agresiones	Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas	Ciertas afecciones originadas en el período perinatal	Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas	Ciertas afecciones originadas en el período perinatal	Ciertas afecciones originadas en el período perinatal		Ciertas afecciones originadas en el período perinatal	Insuficiencia renal
9	Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas		Influenza y neumonía	Desnutrición y otras deficiencias nutricionales	Influenza y neumonía	Insuficiencia renal	Influenza y neumonía	Insuficiencia renal	Agresiones	
10	Agresiones	Desnutrición y otras deficiencias nutricionales	Insuficiencia renal		Insuficiencia renal	Desnutrición y otras deficiencias nutricionales	Insuficiencia renal	Desnutrición y otras deficiencias nutricionales	Influenza y neumonía	Desnutrición y otras deficiencias nutricionales
11	Malformaciones congénitas, deformidades y anomalías cromosómicas		Agresiones	Influenza y neumonía	Agresiones	Influenza y neumonía	Agresiones	Influenza y neumonía	Insuficiencia renal	Ciertas afecciones originadas en el período perinatal
12	Desnutrición y otras deficiencias nutricionales	Influenza y neumonía	Malformaciones congénitas, deformidades y anomalías cromosómicas	Agresiones	Malformaciones congénitas, deformidades y anomalías cromosómicas		Malformaciones congénitas, deformidades y anomalías cromosómicas	Agresiones	Malformaciones congénitas, deformidades y anomalías cromosómicas	Influenza y neumonía



Orden	2000		2005		2006		2007		2008	
	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos
13	Insuficiencia renal		Desnutrición y otras deficiencias nutricionales	Malformaciones congénitas, deformidades y anomalías cromosómicas	Desnutrición y otras deficiencias nutricionales	Agresiones	Desnutrición y otras deficiencias nutricionales	Malformaciones congénitas, deformidades y anomalías cromosómicas	Desnutrición y otras deficiencias nutricionales	Malformaciones congénitas, deformidades y anomalías cromosómicas
14	Bronquitis crónica y la no especificada, enfisema y asma		Bronquitis crónica y la no especificada, enfisema y asma		Bronquitis crónica y la no especificada, enfisema y asma		Bronquitis crónica y la no especificada, enfisema y asma		Asma	
15	Enfermedades infecciosas intestinales	Enfermedad por virus de la inmunodeficiencia humana	Enfermedad por virus de la inmunodeficiencia humana		Enfermedad por virus de la inmunodeficiencia humana		Enfermedad por virus de la inmunodeficiencia humana	Anemias	Enfermedad por virus de la inmunodeficiencia humana	
16	Enfermedad por virus de la inmunodeficiencia humana	Enfermedades infecciosas intestinales	Lesiones autoinflingidas intencionalmente	Enfermedades infecciosas intestinales	Lesiones autoinflingidas intencionalmente	Anemias	Lesiones autoinflingidas intencionalmente	Enfermedad por virus de la inmunodeficiencia humana	Lesiones autoinflingidas intencionalmente	Septicemia
17	Lesiones autoinflingidas intencionalmente	Anemias	Enfermedades infecciosas intestinales	Síndrome de dependencia del alcohol	Enfermedades infecciosas intestinales		Septicemia		Septicemia	Lesiones autoinflingidas intencionalmente
18	Septicemia		Septicemia		Septicemia	Síndrome de dependencia del alcohol	Enfermedades infecciosas intestinales	Lesiones autoinflingidas intencionalmente	Anemias	
19	Anemias	Úlceras gástrica y duodenal	Anemias		Anemias	Septicemia	Anemias	Síndrome de dependencia del alcohol	Enfermedades infecciosas intestinales	
20	Síndrome de dependencia del alcohol	Lesiones autoinflingidas intencionalmente	Úlceras gástrica y duodenal		Úlceras gástrica y duodenal		Síndrome de dependencia del alcohol	Úlceras gástrica y duodenal	Úlceras gástrica y duodenal	

Tabla 5.3. Continuación

Orden	2009		2010		2011		2012		2013	
	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos
1	Enfermedades del corazón		Enfermedades del corazón	Diabetes mellitus	Enfermedades del corazón		Enfermedades del corazón		Enfermedades del corazón	Diabetes mellitus
2	Diabetes mellitus		Diabetes mellitus	Enfermedades del corazón	Diabetes mellitus		Diabetes mellitus		Diabetes mellitus	Enfermedades del corazón
3	Tumores malignos		Tumores malignos		Tumores malignos		Tumores malignos		Tumores malignos	
4	Accidentes	Enfermedades del hígado	Accidentes	Enfermedades del hígado	Accidentes	Enfermedades del hígado	Accidentes	Enfermedades del hígado	Accidentes	Agresiones
5	Enfermedades del hígado	Accidentes	Enfermedades del hígado	Enfermedades cerebro-vasculares	Enfermedades del hígado	Accidentes	Enfermedades del hígado	Agresiones	Enfermedades del hígado	
6	Enfermedades cerebrovasculares		Enfermedades cerebro-vasculares	Agresiones	Enfermedades cerebrovasculares		Enfermedades cerebro-vasculares	Accidentes	Enfermedades cerebro-vasculares	Accidentes
7	Agresiones	Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas	Agresiones	Accidentes	Agresiones		Agresiones	Enfermedades cerebro-vasculares	Agresiones	Enfermedades cerebro-vasculares
8	Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas	Agresiones	Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas		Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas		Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas		Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas	
9	Influenza y neumonía		Influenza y neumonía	Insuficiencia renal	Influenza y neumonía	Ciertas afecciones originadas en el período perinatal	Influenza y neumonía	Insuficiencia renal	Influenza y neumonía	Insuficiencia renal
10	Ciertas afecciones originadas en el período perinatal	Insuficiencia renal	Ciertas afecciones originadas en el período perinatal	Desnutrición y otras deficiencias nutricionales	Ciertas afecciones originadas en el período perinatal	Insuficiencia renal	Ciertas afecciones originadas en el período perinatal	Influenza y neumonía	Ciertas afecciones originadas en el período perinatal	Desnutrición y otras deficiencias nutricionales
11	Insuficiencia renal	Desnutrición y otras deficiencias nutricionales	Insuficiencia renal	Ciertas afecciones originadas en el período perinatal	Insuficiencia renal	Desnutrición y otras deficiencias nutricionales	Insuficiencia renal	Ciertas afecciones originadas en el período perinatal	Insuficiencia renal	Ciertas afecciones originadas en el período perinatal
12	Mal-formaciones congénitas, deformidades y anomalías	Ciertas afecciones originadas en el período perinatal	Mal-formaciones congénitas, deformidades y anomalías	Influenza y neumonía	Mal-formaciones congénitas, deformidades y anomalías	Influenza y neumonía	Mal-formaciones congénitas, deformidades y anomalías	Desnutrición y otras deficiencias nutricionales	Malformaciones congénitas, deformidades y anomalías cromosómicas	



Orden	2009		2010		2011		2012		2013	
	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos	República Mexicana	Estado de Morelos
	cromosómicas		cromosómicas		cromosómicas		cromosómicas			
13	Desnutrición y otras deficiencias nutricionales	Mal-formaciones congénitas, deformidades y anomalías cromosómicas	Desnutrición y otras deficiencias nutricionales	Mal-formaciones congénitas, deformidades y anomalías cromosómicas	Desnutrición y otras deficiencias nutricionales	Mal-formaciones congénitas, deformidades y anomalías cromosómicas	Desnutrición y otras deficiencias nutricionales	Mal-formaciones congénitas, deformidades y anomalías cromosómicas	Desnutrición y otras deficiencias nutricionales	Influenza y neumonía
14	Bronquitis crónica y la no especificada, enfisema y asma	Enfermedad por virus de la inmunodeficiencia humana	Bronquitis crónica y la no especificada, enfisema y asma		Lesiones autoinfligidas intencionalmente	Bronquitis crónica y la no especificada, enfisema y asma	Lesiones autoinfligidas intencionalmente	Bronquitis crónica y la no especificada, enfisema y asma	Lesiones autoinfligidas intencionalmente	Bronquitis crónica y la no especificada, enfisema y asma
15	Lesiones autoinfligidas intencionalmente	Bronquitis crónica y la no especificada, enfisema y asma	Lesiones autoinfligidas intencionalmente	Anemias	Bronquitis crónica y la no especificada, enfisema y asma	Enfermedad por virus de la inmunodeficiencia humana	Bronquitis crónica y la no especificada, enfisema y asma	Anemias	Bronquitis crónica y la no especificada, enfisema y asma	Enfermedad por virus de la inmunodeficiencia humana
16	Enfermedad por virus de la inmunodeficiencia humana	Anemias	Enfermedad por virus de la inmunodeficiencia humana	Septicemia	Enfermedad por virus de la inmunodeficiencia humana	Septicemia	Enfermedad por virus de la inmunodeficiencia humana	Septicemia	Enfermedad por virus de la inmunodeficiencia humana	Lesiones autoinfligidas intencionalmente
17	Septicemia	Lesiones autoinfligidas intencionalmente	Septicemia	Enfermedad por virus de la inmunodeficiencia humana	Septicemia	Anemias	Septicemia	Enfermedad por virus de la inmunodeficiencia humana	Enfermedad por virus de la inmunodeficiencia humana	Anemias
18	Anemias	Septicemia	Anemias	Síndrome de dependencia del alcohol	Anemias	Lesiones autoinfligidas intencionalmente	Anemias	Lesiones autoinfligidas intencionalmente	Anemias	Síndrome de dependencia del alcohol
19	Enfermedades infecciosas intestinales	Úlceras gástrica y duodenal	Enfermedades infecciosas intestinales	Lesiones autoinfligidas intencionalmente	Enfermedades infecciosas intestinales	Enfermedades infecciosas intestinales	Enfermedades infecciosas intestinales	Enfermedades infecciosas intestinales		Septicemia
20	Úlceras gástrica y duodenal	Enfermedades infecciosas intestinales	Síndrome de dependencia del alcohol	Enfermedades infecciosas intestinales	Úlceras gástrica y duodenal	Síndrome de dependencia del alcohol	Úlceras gástrica y duodenal	Íleo paralítico y obstrucción intestinal sin hernia	Úlceras gástrica y duodenal	Enfermedades infecciosas intestinales

Fuente: INEGI (2015). Principales causas de mortalidad por residencia habitual, grupos de edad y sexo del fallecido
Consulta de resultados: Tabulados básicos. Accesado el 15 de noviembre de 2015.

7.4.3 Estadísticas de mortalidad en los municipios de las cuencas de los ríos Cuautla y Yautepec

En esta sección se presentan las estadísticas de mortalidad debida a enfermedades seleccionadas, básicamente enfermedades no transmisibles. Se calcularon las tasas de mortalidad ajustadas por edad para población general, en los contextos nacional, estatal, y municipal a fin de identificar posibles diferencias.

7.4.3.1 Mortalidad general para el período 1990-2012

Tanto en el contexto nacional como estatal y municipal, la tasa de mortalidad general tiende a descender o se mantiene relativamente constante (Tabla 7-4), como resultado de la evolución de los sistemas de diagnóstico de enfermedades, disponibilidad de vacunas, profilaxis, fármacos y acceso a los servicios de salud para la población.

Para el año 2012, se observa que las tasas de mortalidad en los municipios de Atlatlahuacan, Ayala, Huitzilac, Jojutla y Tetela del Volcán, son sensiblemente superiores a la nacional y estatal, en tanto que Emiliano Zapata y Tepoztlán presentan las menores tasas.

Tabla 7-4. Tasa de mortalidad general por 100,000 habitantes en población general.

	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012
Nacional	692.68	687.81	635.20	640.10	665.51	643.04	638.05
Estado de Morelos	642.15	640.90	583.09	592.32	631.56	603.76	629.99
Atlatlahuacan	573.03	452.13	484.39	760.12	685.18	725.71	769.34
Ayala	755.64	407.56	425.50	567.57	649.50	621.78	701.02
Cuautla	843.09	665.99	634.35	593.03	648.18	630.48	624.32
Cuernavaca	578.02	726.40	674.50	612.80	636.90	596.73	629.01
Emiliano Zapata	724.41	577.95	562.89	488.95	529.46	529.05	490.99
Huitzilac	612.28	692.30	662.37	690.45	739.46	665.72	768.53
Jiutepec	738.21	595.83	563.51	530.29	552.43	497.96	554.58
Jojutla	679.22	568.89	624.42	641.41	702.96	667.47	731.29
Jonacatepec	656.41	824.98	559.21	505.27	738.53	584.42	546.91
Ocuituco	665.94	539.59	642.59	631.38	680.03	549.08	693.48
Tepalcingo	581.12	479.75	438.58	496.67	590.54	678.13	694.35
Tepoztlán	743.23	564.33	552.18	530.69	501.68	464.90	497.16
Tetela del Volcán	632.67	849.54	671.68	722.99	545.67	518.64	712.44
Tlalnepantla	702.79	581.31	626.04	362.19	484.55	650.48	642.28

	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012
Tlaltizapán	663.66	471.72	484.03	525.43	570.81	563.15	660.72
Tlaquiltenango	539.05	481.38	459.35	557.10	666.57	553.35	615.37
Tlayacapan	820.72	572.46	393.47	671.02	515.73	582.50	622.82
Totolapan	747.58	647.19	501.47	511.04	387.45	620.60	460.40
Xochitepec	654.62	696.11	545.76	644.93	617.43	600.29	654.63
Yautepec	525.40	580.85	542.89	571.32	693.96	621.37	634.39
Yecapixtla	787.07	599.90	475.91	605.33	583.22	575.64	593.32
Zacatepec	535.54	803.01	722.63	675.44	703.33	743.77	694.17

Fuente: INEGI, 2014; CONAPO, 2010

La tasa de mortalidad general por 100,000 habitantes, debidas a enfermedades infecciosas intestinales (Tabla 7-5), ha ido descendiendo a través del tiempo a nivel nacional y estatal; sin embargo, presenta una amplia variación a nivel de los municipios. Destacan en 2012, tasas superiores a 10 por 100,000 habitantes en los municipios de Atlatlahuacan (14.11), Tetela de Volcán (11.69), Tlalnepantla (18.32) y Yecapixtla (12.67).

Tabla 7-5. Tasa de mortalidad por 100,000 habitantes debida a enfermedades infecciosas intestinales en población general.

	1995	2000	2005	2010	2012
Total	11.42	5.85	4.71	3.44	3.43
Morelos	11.27	5.14	4.12	2.88	3.18
Atlatlahuacan	8.36	18.89	6.04	0.00	14.11
Ayala	2.97	7.13	5.36	0.00	7.66
Cuautla	4.31	6.55	5.52	1.89	1.28
Cuernavaca	11.66	5.41	2.98	2.44	2.56
Emiliano Zapata	14.68	3.65	6.24	3.10	3.33
Huitzilac	23.54	0.00	0.00	0.00	0.00
Jiutepec	10.04	6.26	8.22	3.69	2.13
Jojutla	15.41	1.59	4.20	4.12	2.49
Jonacatepec	10.46	8.04	0.00	0.00	6.79
Ocuituco	0.00	10.92	10.17	0.00	5.84
Tepalcingo	3.93	0.00	3.85	8.11	8.99
Tepoztlán	12.78	4.70	2.70	2.72	2.49
Tetela del Volcán	17.44	0.00	12.52	7.05	11.69
Tlalnepantla	0.00	0.00	0.00	0.00	18.32
Tlaltizapán	8.14	5.32	0.00	2.24	0.00
Tlaquiltenango	19.68	0.00	3.07	0.00	3.01
Tlayacapan	0.00	4.84	6.05	12.89	7.06
Totolapan	27.92	31.56	0.00	0.00	0.00
Xochitepec	33.67	6.76	5.06	6.46	0.00
Yautepec	11.58	5.67	2.19	2.52	4.48

Estrategia para potabilización de agua en las cuencas de los ríos Yautepec y Cuautla, Morelos, con un enfoque holístico

	1995	2000	2005	2010	2012
Yecapixtla	8.41	5.07	2.07	4.50	12.67
Zacatepec	10.34	5.79	3.37	2.90	2.65

Fuente: INEGI, 2014; CONAPO, 2010

En el mismo año 2012, se presentaron tasas de mortalidad superiores a la nacional (3.43) y estatal (3.18), en los municipios de Ayala (7.66), Jonacatepec (6.79), Ocuituco (5.84), Tepalcingo (8.69), Tlayacapan (7.06) y Yautepec (4.48).

7.4.3.2 Mortalidad por leucemias

Las tasas de mortalidad general por 100,000 habitantes, debidas a leucemia, presentaría una amplia variación a través del tiempo a nivel de los municipios. Son de notar, las altas en Emiliano Zapata, Huitzilac y Yecapixtla (Tabla 7-6).

Tabla 7-6. Tasa de mortalidad por 100,000 habitantes debida a leucemias en población general.

	1995	2000	2005	2010	2012
Total	3.58	3.87	4.05	3.96	4.02
Morelos	3.68	4.64	4.57	3.86	4.50
Atlatlahucan	7.30	0.00	0.00	0.00	7.78
Ayala	2.25	3.93	6.52	3.62	4.37
Cuautla	5.74	3.19	4.19	6.21	8.48
Cuernavaca	3.90	4.30	6.12	3.59	4.13
Emiliano Zapata	8.63	7.29	4.89	10.27	4.41
Huitzilac	7.75	15.97	11.79	0.00	7.21
Jiutepec	3.36	5.55	2.90	4.09	1.89
Jojutla	1.65	4.11	7.62	2.15	1.89
Jonacatepec	0.00	0.00	8.31	7.45	0.00
Ocuituco	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Tepalcingo	0.00	3.34	4.83	10.38	0.00
Tepoztlán	3.88	4.23	0.00	4.70	7.32
Tetela del Volcán	0.00	3.72	0.00	0.00	17.38
Tlalnepantla	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Tlaltizapán	1.98	7.70	0.00	2.38	4.60
Tlaquiltenango	0.00	4.60	4.22	0.00	0.00
Tlayacapan	6.81	11.80	9.65	0.00	6.32
Totolapan	8.51	0.00	0.00	0.00	0.00
Xochitepec	4.50	2.06	3.40	0.00	2.92
Yautepec	2.82	3.25	6.30	3.52	4.60
Yecapixtla	0.00	8.34	2.03	7.14	4.03
Zacatepec	2.55	2.53	3.26	0.00	14.44

Fuente: INEGI, 2014; CONAPO, 2010

7.4.3.3 Mortalidad por enfermedades endócrinas y diabetes mellitus

La diabetes mellitus, está considerada actualmente un problema de salud pública, siendo una de las 10 principales causas de enfermedad y una causa de mortalidad que en general va en aumento. Es claro, que esta tendencia se presenta también a nivel del municipio de las cuencas de los ríos Cuautla y Yautepec (Tabla 7-7).

Tabla 7-7. Tasa de mortalidad por 100,000 habitantes debida a diabetes mellitus en población general.

	1995	2000	2005	2010	2012
Total	64.52	77.74	94.92	98.21	93.66
Morelos	57.54	73.28	83.29	102.75	95.35
Atlatlahucan	0.00	22.24	165.13	137.71	118.23
Ayala	32.96	44.03	70.41	92.02	133.69
Cuautla	82.08	81.83	87.16	110.30	93.45
Cuernavaca	70.34	90.50	94.06	95.44	91.95
Emiliano Zapata	36.19	41.33	56.60	92.29	82.70
Huitzilac	90.90	103.06	65.33	156.81	108.53
Jiutepec	37.81	75.78	66.53	81.10	82.48
Jojutla	51.00	92.61	97.15	98.37	87.67
Jonacatepec	19.06	55.47	53.24	87.92	131.49
Ocuituco	32.08	121.23	71.82	130.31	122.40
Tepalcingo	39.69	51.32	62.51	88.70	121.23
Tepoztlán	68.80	57.70	93.22	72.94	70.51
Tetela del Volcán	47.77	71.26	99.14	80.39	75.49
Tlalnepantla	29.07	129.86	0.00	65.71	148.49
Tlaltizapán	46.12	60.73	53.79	89.68	75.34
Tlaquiltenango	50.13	52.35	63.60	114.26	75.35
Tlayacapan	42.88	77.60	92.65	78.55	72.31
Totolapan	30.47	51.49	45.45	52.47	74.64
Xochitepec	53.82	47.44	79.14	116.36	88.37
Yautepec	57.28	61.92	73.42	130.41	99.81
Yecapixtla	54.07	83.69	101.50	79.39	99.39
Zacatepec	77.64	127.65	107.67	150.63	95.86

Fuente: INEGI, 2014; CONAPO, 2010

7.4.3.4 Mortalidad por enfermedades hipertensivas

La hipertensión arterial, también está considerada actualmente como un problema de salud pública. La tendencia de las tasas es al incremento, aun cuando se observan variaciones y decrementos importantes para algunos años tanto a nivel estatal como municipal (Tabla 7-8).

Tabla 7-8. Tasa de mortalidad por 100,000 habitantes debida a enfermedades hipertensivas en población general.

	1995	2000	2005	2010	2012
Total	16.01	15.51	17.71	20.51	20.62
Morelos	14.51	12.27	17.77	20.29	21.68
Atlatlahucan	16.71	6.61	7.91	11.87	21.17
Ayala	10.61	5.07	13.67	29.33	28.87
Cuautla	15.68	12.70	22.16	15.74	24.13
Cuernavaca	12.19	9.09	18.36	19.60	17.49
Emiliano Zapata	28.35	12.54	17.99	5.20	10.36
Huitzilac	0.00	0.00	0.00	26.46	31.19
Jiutepec	11.06	17.26	20.47	13.60	19.64
Jojutla	9.89	9.75	25.63	29.82	24.95
Jonacatepec	57.22	19.45	16.09	20.64	27.69
Ocuituco	12.48	27.10	9.05	7.40	0.00
Tepalcingo	11.18	10.30	4.51	11.20	11.69
Tepoztlán	9.77	13.88	17.35	17.86	20.49
Tetela del Volcán	0.00	9.93	10.00	8.11	28.85
Tlalnepantla	0.00	0.00	24.31	0.00	0.00
Tlaltizapán	8.47	3.37	13.50	12.14	19.82
Tlaquiltenango	19.28	9.58	15.41	34.39	26.61
Tlayacapan	0.00	25.40	10.08	8.43	42.65
Totolapan	9.92	0.00	17.41	12.61	16.10
Xochitepec	13.65	15.11	15.18	17.99	22.37
Yautepec	18.60	15.28	20.71	21.93	24.73
Yecapixtla	12.37	11.01	12.69	25.20	42.38
Zacatepec	17.31	6.51	15.99	19.36	25.40

Fuente: INEGI, 2014; CONAPO, 2010

7.4.3.5 Mortalidad por enfermedades isquémicas del corazón

Las tasas de mortalidad por enfermedades isquémicas del corazón, se mantienen relativamente constantes a nivel nacional y estatal. Al interior del estado, hay diferencias importantes entre los municipios (Tabla 7-9).

Tabla 7-9. Tasa de mortalidad por 100,000 habitantes debida a enfermedades isquémicas del corazón en población general.

	1995	2000	2005	2010	2012
Total	70.74	70.77	73.19	81.74	79.60
Morelos	62.01	57.86	53.21	65.49	66.93
Atlatlahucan	13.15	13.23	84.52	68.51	80.55
Ayala	35.01	34.42	51.54	77.36	62.43
Cuautla	66.61	65.49	60.41	70.13	59.19
Cuernavaca	90.79	77.04	61.95	65.86	77.10
Emiliano Zapata	48.12	59.18	61.03	59.76	47.46
Huitzilac	42.78	45.45	57.63	80.53	64.38
Jiutepec	61.57	61.10	53.21	70.05	59.31
Jojutla	71.98	65.05	53.85	78.77	82.54
Jonacatepec	22.69	28.21	0.00	127.65	48.47
Ocuituco	19.08	33.51	49.75	37.33	51.81
Tepalcingo	27.91	43.72	30.55	22.07	45.99
Tepoztlán	22.71	22.39	53.20	31.46	36.98
Tetela del Volcán	40.49	81.37	53.19	27.54	90.08
Tlalnepantla	63.12	53.16	0.00	62.33	52.92
Tlaltizapán	52.10	47.98	22.08	69.98	67.24
Tlaquiltenango	49.85	49.88	42.45	75.97	70.40
Tlayacapan	26.26	35.26	19.73	66.44	96.92
Totolapan	20.55	11.55	64.16	26.34	35.40
Xochitepec	58.01	46.17	46.61	54.02	84.72
Yautepec	46.30	44.08	38.15	65.71	69.25
Yecapixtla	28.33	36.47	67.59	75.90	46.53
Zacatepec	89.86	68.90	38.15	72.93	76.96

Fuente: INEGI, 2014; CONAPO, 2010

7.4.3.6 Mortalidad por enfermedades cerebrovasculares

Las tasas de mortalidad por enfermedades cerebrovasculares, se mantienen relativamente constantes a nivel nacional y estatal. Al interior del estado, hay diferencias importantes entre los municipios (Tabla 7-10).

Tabla 7-10. Tasa de mortalidad por 100,000 habitantes debida a enfermedades cerebrovasculares en población general.

	1995	2000	2005	2010	2012
Total	42.48	40.68	37.71	37.58	34.48
Morelos	38.67	34.39	33.93	31.52	27.69
Atlatlahucan	17.55	28.90	13.96	44.11	25.35
Ayala	16.32	11.59	27.73	34.20	39.63
Cuautla	46.52	42.61	34.55	37.21	23.06
Cuernavaca	44.48	44.89	30.68	31.61	25.36
Emiliano Zapata	27.73	14.50	22.63	18.19	24.05

Estrategia para potabilización de agua en las cuencas de los ríos Yautepec y Cuautla, Morelos, con un enfoque holístico

	1995	2000	2005	2010	2012
Huitzilac	30.75	15.88	54.17	42.24	32.12
Jiutepec	48.49	31.11	32.75	23.66	21.53
Jojutla	32.87	53.29	38.45	29.40	44.86
Jonacatepec	62.57	0.00	64.27	30.18	27.99
Ocuituco	61.80	55.40	17.58	32.04	50.21
Tepalcingo	29.68	33.56	36.68	20.05	37.33
Tepoztlán	26.14	30.73	35.43	40.59	27.03
Tetela del Volcán	50.47	62.33	36.90	37.64	71.09
Tlalnepantla	57.99	66.66	48.66	34.25	41.14
Tlaltizapán	21.05	10.45	39.40	23.40	31.41
Tlaquiltenango	45.58	28.13	39.93	27.76	33.55
Tlayacapan	49.65	39.98	38.25	31.38	7.44
Totolapan	26.21	17.61	24.67	17.96	0.00
Xochitepec	29.14	31.73	53.72	32.85	15.89
Yautepec	38.68	26.01	23.77	35.97	22.03
Yecapixtla	16.31	32.54	32.28	18.93	23.30
Zacatepec	60.93	48.66	36.35	30.99	25.51

Fuente: INEGI, 2014; CONAPO, 2010

7.5 Evaluación de la exposición

La evaluación de la exposición a contaminantes regulados y emergentes, se basa en la información obtenida mediante encuesta y los datos de monitoreo de calidad del agua.

7.5.1 Encuesta

La encuesta es básicamente el instrumento para poder estimar la exposición a los contaminantes identificados en el agua de uso y consumo humano, además de que permite identificar los fármacos y productos de mayor uso y consumo entre la población.

Se aplicaron 100 cuestionarios, las características generales de los participantes se presentan en la Tabla 7-11.

Tabla 7-11. Descripción de la muestra.

Variable	N	Número	Promedio	Desviación estándar	Mínimo y máximo
Edad (años)	95		41.1	15.83	14 - 88
Años de residencia en el municipio	95		24.8	17.17	1 - 65
Peso	95		68.01	13.48	40.0 – 125.0
Número de personas/vivienda	95		3.94	1.503	1 - 8

Estrategia para potabilización de agua en las cuencas de los ríos Yautepec y Cuautla, Morelos, con un enfoque holístico

Variable	N	Número	Promedio	Desviación estándar	Mínimo y máximo
Servicio de agua potable en el interior de la vivienda	95	89	No aplica	No aplica	No aplica
Baño en el interior o exterior de la vivienda	95	69	No aplica	No aplica	No aplica
Servicio de drenaje	95	85	No aplica	No aplica	No aplica
Tipo de agua de bebida	95				
De la llave únicamente		6			
De la llave y garrafón o botella		38			
De garrafón o botella únicamente		57			
Tipo de agua para preparar alimentos	95				
De la llave únicamente		6			
De la llave y garrafón o botella		38			
De garrafón únicamente		57			
Vasos de agua en tiempo de calor	95		6.38	2.61	1 -12
Vasos de agua en tiempo de frío o lluvia	95		3.62	1.93	0 - 10
Tazas de café o té/semana	95		4.14	3.80	0 - 15
Platos de sopa aguada/semana	95		2.81	1.89	0 - 10

Los principales problemas de salud manifestados por los participantes, de acuerdo con su diagnóstico médico fueron: alergias, reflujo gástrico, acidez estomacal o esofagitis, hipertensión, circulación sanguínea deficiente, colitis, diabetes y obesidad o sobrepeso (Tabla 7-12).

Tabla 7-12. Principales padecimientos manifestados por los participantes en la encuesta.

Padecimiento	%	Padecimiento	%
Hipertensión arterial	15.73	Reflujo gástrico, acidez estomacal o esofagitis	12.70
Colitis o inflamación intestinal, enfermedad de Crohn	12.10	Mala circulación sanguínea en las piernas	11.09
Obesidad o sobrepeso	11.09	Alergias	8.47
Diabetes	7.46	Depresión	5.85
Trastornos del sueño	5.65	Osteoporosis	4.44
Colésterol elevado	4.03	Migraña	3.83
Parásitos intestinales	3.43	Artritis	3.23
Infecciones respiratorias agudas	3.02	Infecciones intestinales	2.62
Trastornos del humor	2.62	Abortos	2.62

Estrategia para potabilización de agua en las cuencas de los ríos Yautepec y Cuautla, Morelos, con un enfoque holístico

Padecimiento	%	Padecimiento	%
Asma	2.22	Incontinencia urinaria	1.61

De alguna manera, esta información es consistente con el consumo de medicamentos prescritos (Tabla 7-13) y no prescritos, ya que los fármacos de mayor uso, de acuerdo con lo manifestado por los participantes son analgésicos y antiinflamatorios no esteroideos, antihipertensivos, reguladores lipídicos, tratamiento para la gastritis, hipoglucemiantes y antibióticos.

Tabla 7-13. Fármacos que consumen algunos participantes en la encuesta, por prescripción médica.

Fármaco	Indicaciones	Uso entre los participantes (%)
Paracetamol	Analgésico	6.3
Omeprazol	Reflujo gástrico	4.2
Glibenclamida	Hipoglucemiante	4.0
Metformina	Hipoglucemiante	4.0
Diclofenaco	Analgésico, antiinflamatorio y antirreumático no esteroideo	3.6
Ranitidina	Antihistamínico, para tratamiento de gastritis	3.4
Naproxen	Antirreumático y antiinflamatorio no esteroide	2.6
Captopril	Antihipertensivo	2.4
Butilioscina	Espasmolítico	1.6
Insulina	Hipoglucemiante	1.4
Aspirina	Analgésico	1.2
Losartan	Antihipertensivo	1.2
Celebrex	Antiinflamatorio no esteroideo	1.2
Ampicilina	Antibiótico	1.2
Telmisartán	Antihipertensivo	1.0
Ambroxol	Expectorante y mucolítico	1.0
Enalapril	Antihipertensivo	0.8
Salbutamol	Broncodilatador	0.8
Clonazepam	Fármaco de tipo benzodicepínico que actúa sobre el sistema nervioso central, con propiedades ansiolíticas, anticonvulsionantes	0.8
Eutirox (levotiroxina)	Es una hormona tiroidea sintética para el tratamiento de enfermedades y disfunciones de la glándula tiroides	0.6
Pravastatina	Estatina utilizada como regulador lipídico para control de colesterol	0.6
Ibuprofeno	Analgésico, antiinflamatorio no esteroideo	0.4
Amoxicilina	Antibiótico	0.4
Pentoxifilina	Antibiótico	0.4

Fármaco	Indicaciones	Uso entre los participantes (%)
Metamizol	Analgésico, antipirético, antiespasmódico y antiinflamatorio	0.4
Metoprolol	Antihipertensivo	0.2
Clortalidona	Diurético y antihipertensivo	0.2
Meloxicam	Analgésico, antiinflamatorio no esteroideo	0.2
Sistopress	Tratamiento ra hipertensión y angina de pecho	0.2
Valsartan	Antinipertensivo	0.2
Indometacina	Antiinflamatorio no esteroideo derivado indol metilado relacionado con el diclofenaco	0.2
Piroxicam	Analgésico, antiinflamatorio no esteroideo	0.2
Dexametasona	Control de condiciones alérgicas severas o dis-capacitantes que no pueden ser detectadas en ensayos adecuados de tratamientos convencionales en asma bronquial, dermatitis de contacto, dermatitis atópica, enfermedad del suero, rinitis alérgica estacional o perenne, reacciones hipersensibles a fármacos, reacciones de transfusión urticarial, edema laríngeo agudo no infeccioso	0.2
Furosemida	Diurético	0.2
Dicloxacilina	Antibiótico	0.2
Alprazolam	Ansiolítico	0.2
Amitriptilina	Antidepresivo	0.2
Fluoxetina	Antidepresivo	0.2
Penicilina	Antibiótico	0.2

De manera no prescrita, el fármaco de mayor consumo entre los participantes de la encuesta fueron analgésicos como el paracetamol (69.70%), el ácido acetilsalicílico (27.88%), la butilhioscina (30.10%), el naproxeno (18.18%) y el diclofenaco (12.32%). Otros fármacos no prescritos y de alto consumo entre los entrevistados fueron el ambroxol (19.39%), el pepto-bismol (14.95%) y la ranitidina (7.27%).

7.5.2 Datos de monitoreo de contaminantes regulados y emergentes identificados en las fuentes de abastecimiento (2014)

7.5.2.1 Contaminantes regulados

En todas los sitios analizados, se detectó contaminación de origen fecal indicada por coliformes fecales, relacionada entre otros factores, a las deficiencias en las prácticas de desinfección del agua.

En lo que respecta a la calidad fisicoquímica, el arsénico total se identifica como un factor de riesgo para la población en localidades del municipio de Tlalquilténango que se abastecen del manantial Huautla (190 µg/L), el pozo Huaxtla (30 µg/L), Rancho Viejo (90 µg/L) y pozo San José de Pala (40 µg/L) en el municipio de Tlalquilténango, así como en la Unidad Paseo Texoyuca (75 µg/L) en el municipio de Emiliano Zapata, al rebasar el límite permisible de 25 µg/L establecido en la modificación del año 2000 de la NOM-127-SSA1-1994.

7.5.2.2 Contaminantes emergentes

Los resultados de laboratorio acerca de la contaminación por compuestos orgánicos que califican como contaminantes emergentes, prueban en buena medida, que la actual normativa de agua potable es insuficiente para proteger la salud de la población. En las fuentes de abastecimiento se identificaron concentraciones ultratraza (ng/L) de fármacos, hormonas, personal, metabolitos de drogas de abuso y DEET (Tabla 7-14), el cual ha mostrado ser resistente a los procesos convencionales de tratamiento de agua.

Tabla 7-14. Fármacos, hormonas y productos para el cuidado personal identificados en las fuentes de abastecimiento seleccionadas (ng/L).

Parámetro	Municipio	Tlalquitenango				Ocuituco		
		Valor guía (µg/L) ^a	Huatla			Toma de agua Xicatlacotla ^b	Planta potabilizadora	
			Tanque de distribución ^b	Influyente presa ^b	Efluente presa ^b		Influyente ^b	Efluente ^b
Albuterol	Sin valor	No detectado	No detectado	No detectado	0.84	0.38	0.791	
Amfetamina	Sin valor	4.12	3.35	1.83	1.82	2.62	1.9	
Androstenediona	Sin valor	No detectado	No detectado	2.27	No detectado	No detectado	No detectado	
Anhydrotetracycline [ATC]	Sin valor	15.5	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado	
Atenolol	Sin valor	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado	0.781	
Benzoilecgonina	Sin valor	No detectado	No detectado	No detectado	1.12	No detectado	No detectado	
Carbamazepina	100	No detectado	No detectado	No detectado	10.3	No detectado	No detectado	
DEET	2,500	1.36	2.95	1.6	6.79	No detectado	No detectado	
Desogestrel	Sin valor	No detectado	No detectado	No detectado	235	301	No detectado	
Erythromicina-H ₂ O	17.5	2.43	5.55	No detectado	2.44	No detectado	No detectado	
Lincomicina	3,500	No detectado	No detectado	No detectado	8.62	No detectado	No detectado	
Mestranol	2.5 ng/L	51.7	105	104	71.7	171	No detectado	
Metformina	250	No detectado	6.73	4.23	38.1	11.6	18.2	
Metoprolol	25	No detectado	No detectado	No detectado	3.61	No detectado	No detectado	
Naproxeno	220	No detectado	No detectado	No detectado	6.46	No detectado	No detectado	
Oxycodona	Sin valor	No detectado	No detectado	No detectado	1.1	No detectado	No detectado	
Sulfacloropiridazina	Sin valor	No detectado	No detectado	No detectado	2.36	No detectado	No detectado	
Sulfametazina	35	No detectado	No detectado	No detectado	1.78	No detectado	No detectado	
Sulfametoxazol	35	No detectado	No detectado	No detectado	44		0.685	

^a Australian Guidelines for Water Recycling: Augmentation of Drinking Water Supplies (2008)

^b Concentración en ng/L

Tabla 5.14. Continuación

Parámetro	Municipio Valor guía (µg/L) ^a	Cuatla Manantial los Sabinos ^b	Emiliano Zapata Pozo unidad Paseo Tezoyuca ^b	Tlaltizapán Manantial Tecoloapan ^b	Tepoztlán Manantial Santa Cruz ^b	Jiutepec Manantial Las Fuentes ^b
Albuterol	Sin valor	No detectado	No detectado	1.3	0.594	0.404
Amphetamine	Sin valor	3.51	1.62	3.3	1.73	1.75
Androstenedione	Sin valor	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado
Anhydrotetracycline [ATC]	Sin valor	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado
Atenolol	Sin valor	No detectado	0.651	1.52	0.648	No detectado
Benzotropine	Sin valor	0.516	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado
Betamethasone	Sin valor	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado	2.44
Desogestrel	Sin valor	365	No detectado	168	249	No detectado
Equilenin	30 ng/L	No detectado	No detectado	1.19	No detectado	No detectado
Mestranol	2.5 ng/L	77.5	70.7	73	70.9	95.8
Metformin	250	41	11.6	34.1	10.5	14.6
Metoprolol	25	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado
Naproxen	220	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado
Oxycodone	Sin valor	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado
Sulfachloropyridazine	Sin valor	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado
Sulfamethazine	35	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado
Sulfametoxazol	35	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado	8.21

^a Australian Guidelines for Water Recycling: Augmentation of Drinking Water Supplies (2008)

^b Concentración en ng/L

Para algunos de estos contaminantes, hay valores guía o estándares de calidad propuestos por agencias internacionales o instancias gubernamentales responsables del abastecimiento, de agua, salud pública y medio ambiente. En este marco, con excepción del mestranol y del sulfametoxazol en la toma de agua de Xicatlacotla, las concentraciones detectadas de DEET y otros fármacos y hormonas, aún en el agua cruda, se encuentran por debajo de los valores guía propuestos por la Agencia de Salud de Australia [2008] (Tabla 7-14).

Por otro lado, la presencia de estos fármacos en el agua se explica con el tipo de padecimientos más frecuentes en la población, tales como enfermedades infecciosas, hipertensión y diabetes, como se ejemplifica en la Tabla 7-15 (listado de compuestos identificados y sus usos terapéuticos).

Tabla 7-15. Fármacos, hormonas y productos para el cuidado personal identificados en fuentes de abastecimiento y agua de consumo humano en la zona de interés.

Compuesto emergente	Observaciones
Albuterol	Se utiliza para prevenir y tratar síntomas como resoplo (silbido al respirar), respiración entrecortada y contractura torácica, provocados por enfermedades pulmonares como el asma y la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (COPD por su sigla en inglés; un grupo de enfermedades que afectan al pulmón y a las vías aéreas). Pertenecen a una clase de medicamentos llamados broncodilatadores. Funciona al relajar y abrir los bronquios, permitiendo el paso normal de aire a los pulmones, facilitando la respiración.
Amfetamina	Estimulante del sistema nervioso central
Androstenediona	La androstenediona es una hormona producida de manera natural en el cuerpo por las glándulas suprarrenales, los ovarios (en las mujeres) y los testículos (en los hombres). El cuerpo produce primero la DHEA, luego metaboliza la DHEA en androstenediona, y finalmente, transforma la androstenediona en testosterona, la principal hormona sexual masculina. La androstenediona también se transforma en estrógeno. Mejora el desempeño físico.
Anhidrotetraciclina [ATC]	Antibiótico de amplio espectro
Atenolol	Antihipertensivo
Benzoilecgonina	Metabolito de cocaína
Benzotropina	Agente anticolinérgico y antihistamínico prescrito como terapia coadyuvante en el tratamiento de todas las formas de parkinsonismo
Betametasona	
Carbamazepina	Antiepiléptico y analgésico, se indica para el tratamiento de la migraña
DEET	Repelente de insectos utilizado en productos para el cuidado personal

Compuesto emergente	Observaciones
Desogestrel	
Equilenin	
Eritromicina-H ₂ O	Antibiótico de amplio espectro
Lincomicina	Antibiótico de amplio espectro
Mestranol	Anticonceptivo oral. Indicado en polimenorrea, hipermenorrea, sangrados intermenstruales, dismenorrea, endometriosis, esterilidad funcional. Tratamiento de síndrome climatérico y alteraciones relacionadas
Metformina	Hipoglucemiante
Metoprolol	Antihipertensivo
Naproxeno	Analgésico antiinflamatorio no esteroideo
Oxycodona	
Sulfacloropiridazina	
Sulfametazina	Antibiótico
Sulfametoxazol	Antibiótico de amplio espectro

7.5.3 Toxicidad del arsénico y contaminantes emergentes presentes en agua de consumo humano

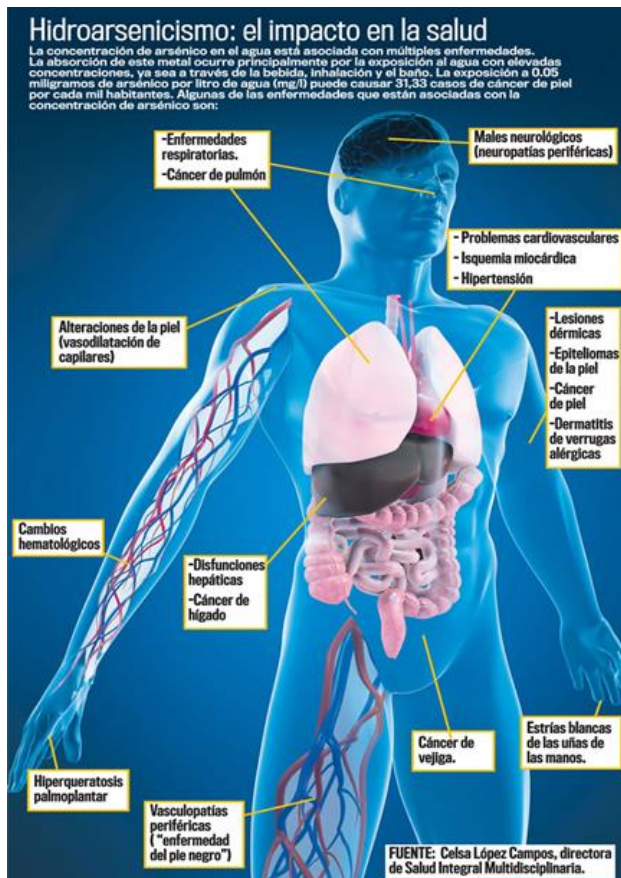
Solamente para un pequeño grupo de los compuestos identificados se tiene información acerca de los efectos adversos a la salud, y también para un pequeño grupo del universo de contaminantes es posible tomar medidas regulatorias en materia de agua y saneamiento.

7.5.3.1 Arsénico

Se ha documentado ampliamente que la exposición humana a arsénico a través del agua de consumo, es una causa importante de enfermedad en muchas partes del mundo incluyendo México. Es el único contaminante para el cual existe evidencia epidemiológica de su carcinogenicidad en humanos, por lo que está clasificado en el Grupo I, carcinogénico de humanos, por la Agencia Internacional de Investigación en Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés), así como por otras agencias internacionales.

Además de cáncer de la piel, pulmón y vejiga, y probablemente de hígado, el arsénico es responsable de una gama de efectos sistémicos adversos, incluyendo hiperqueratosis y enfermedad vascular periférica, alteración en la función de algunas glándulas, alteraciones en el sistema nervioso central y cardiovascular (Figura 7-7). En algunos de los municipios

de la zona de estudio, este contaminante representa un riesgo para la salud de la población.



La estimación de la dosis crónica diaria da como resultado cocientes de peligro superiores a la unidad, lo que indica que la población estaría ingiriendo dosis superiores a las que se consideran aceptables como se ve a continuación.

Sitio	Conc. en agua (mg/L)	Dosis crónica diaria (mg.kg/d)	Cociente de peligro
Manantial Huautla	0.19	0.0063	20.89
Pozo Huaxtla	0.03	0.0008	2.79
Rancho Viejo	0.09	0.0031	10.17
Quilamula	0.05	0.0015	5.03
Pozo San José de Pala	0.04	0.0014	4.58
Unidad Paseo Texoyuca	0.075	0.0025	8.44

Figura 7-7. Efectos a la salud humana asociados con la exposición a arsénico a través del agua de consumo

Es claro, que el agua de estas fuentes de abastecimiento debe ser tratada para su potabilización, hasta cumplir con el límite permisible establecido en la modificación del año 2000 de la NOM-127-SSA1-1994.

7.5.3.2 Contaminantes emergentes

La gama de efectos o impactos, van desde un alto grado de toxicidad hasta ausencia de efectos conocidos. La exposición a corto plazo puede causar irritación de los ojos y las vías

respiratorias, dolor de cabeza, mareo, trastornos visuales, fatiga, pérdida de coordinación, reacciones alérgicas de la piel, náusea y trastornos de la memoria, en tanto que la exposición a largo plazo, que es la que preocupa ya que puede causar alteraciones al sistema endócrino, lesiones del hígado, los riñones y el sistema nervioso central, pueden tener efectos reproductivos, del desarrollo y ser cancerígenos. Como se ejemplifica en la Tabla 7-16.

Tabla 7-16. Uso terapéutico y posibles impactos negativos a la salud de los fármacos y hormonas identificados en aguas residuales

Nombre	Datos toxicológicos/Impacto en la salud	Fuente de información
Estrona	Reconocido carcinógeno.	ACToR: Aggregated Computational Toxicology Resource
Androsterona	Trastornos hepáticos, en la coagulación de la sangre y aumento de glóbulos rojos, también puede producir impotencia sexual en hombres.	http://es.Ciclopaedia.net/wiki/Androsterona
Furosemida	Sospecha Tóxico gastrointestinal o hepática, riñón y neurotóxica.	ACToR: Aggregated Computational Toxicology Resource
Meprobamato	Sospecha de riesgo de toxicidad cardiovascular o sangre, gastrointestinal o hepática, respiratoria, piel, órganos, neurotóxica y reconocido desarrollo tóxico.	ACToR: Aggregated Computational Toxicology Resource
Progesterona	Reconocido carcinógeno	ACToR: Aggregated Computational Toxicology Resource
Testosterona	Reconocido carcinógeno.	ACToR: Aggregated Computational Toxicology Resource
Teofillina	Sospecha de riesgo de toxicidad cardiovascular o sangre, endocrinos, gastrointestinal o hepática, sistema reproductivo, respiratorio y neurotóxico.	ACToR: Aggregated Computational Toxicology Resource
Difenhidramina	Insuficiencia hepática y renal.	
Cloxacilina	Insuficiencia hepática, renal y edema pulmonar.	www.humv.es/webfarma/Informacion_Medicamentos/.../Cloxacilina , http://www.vademecum.es/principios-activos-cloxacilina-J01CF02
4-Androstenediona	El 11 de abril de 2004, la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos prohibió la venta de androstenediona, alegando que el medicamento posee un riesgo significativo para la salud asociado con los esteroides.	
Sulfadiazina	Sospecha de riesgo de toxicidad gastrointestinal o hepática y riñón.	ACToR: Aggregated Computational Toxicology Resource
Mestranol	Reconocido carcinógeno.	
Benzotropina	Sobredosis tienen impacto sobre sistema nervioso central.	http://www.dhhs.saccounty.net/BHS/Documents/Provider-Forms/Medication-Info-Sheets/Med-Info-Spanish.pdf
Lincomicina	Insuficiencia renal.	http://www.vademecum.es/principios-activos-lincomicina-J01FF02

Estrategia para potabilización de agua en las cuencas de los ríos Yautepec y Cuautla, Morelos, con un enfoque holístico

Nombre	Datos toxicológicos/Impacto en la salud	Fuente de información
Carbamazepina	Reconocido desarrollo tóxico, sospecha de riesgo de toxicidad cardiovascular o sangre, gastrointestinal o hepática, respiratorio y neurotóxico.	ACToR: Aggregated Computational Toxicology Resource
Benzoylecgonine	Desconocido.	
Sulfamethoxazol	Sospecha de riesgo de toxicidad endocrina.	ACToR: Aggregated Computational Toxicology Resource
10-hidroxi amitriptilina	Desconocido	
Naproxeno	Insuficiencia hepática y renal.	http://www.vademecum.es/principios-activos-naproxeno-M01AE02
Metoprolol	Desconocido.	
Diltiazem	No se ha mostrado evidencia científica sobre daños a la salud.	http://www.facmed.unam.mx/bmnd/gi_2k8/prods/PRODS/Diltiazem.htm
Norfloxacin	Insuficiencia renal.	http://www.onmeda.es/medicamentos/principio-activo-norfloxacin-efectos-secundarios-J01MA06.html
Ciprofloxacino	Insuficiencia hepática y renal.	http://www.vademecum.es/medicamento-ciprofloxacino+normon+efg_prospecto_6230_0

El único contaminante emergente para el cual se identificó riesgo fue para el mestranol, dado que dio un cociente muy superior a la unidad (Tabla 7-17).

7.6 MODELO CONCEPTUAL DE EXPOSICIÓN

De manera general, diversos estudios han confirmado la presencia de productos farmacéuticos en aguas residuales municipales y efluentes tratados, y éstos han sido identificados como una de las principales fuentes de contaminación del agua potable por productos farmacéuticos, como se ilustra en la Figura 7-8.

Tabla 7-17. Cocientes de peligro estimados a partir del consumo promedio de agua y la dosis aceptable diaria para cada contaminante emergente.

Contaminante	ADI (ng/kg/d) *	Huatla: Tanque de distribución	Presa Huatla		Toma de agua Xicatlacotla	Efluente potabilizadora Ocuilco	Manantial Los Sabinos	Pozo unidad Paseo Tezoyuca	Manantial Tecoloapan	Manantial Santa Cruz	Manantial Las Fuentes
			Influyente	Efluente							
Albuterol	2,800	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.01E-04	9.47E-06	0.00E+00	0.00E+00	1.89E-05	1.51E-05	5.14E-06
Atenolol	2,000	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.31E-05	0.00E+00	1.25E-05	3.09E-05	2.31E-05	0.00E+00
Carbamazepina	2,800	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.24E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
DEET	750,000	6.10E-07	1.32E-06	7.18E-07	3.05E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Equilenin	0.86	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.63E-02	0.00E+00	0.00E+00
Eritromicina-H ₂ O	5,000	1.64E-04	3.74E-04	0.00E+00	1.64E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Lincomicina	1,000,000	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.90E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Mestranol	0.071	2.45E+02	4.98E+02	4.93E+02	3.40E+02	0.00E+00	3.30E+01	3.81E+01	4.18E+01	7.11E+01	4.80E+01
Metformina	7,100	0.00E+00	3.19E-04	2.01E-04	1.81E-03	8.59E-05	1.75E-04	6.26E-05	1.95E-04	1.05E-04	7.32E-05
Metoprolol	71	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.71E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Naproxeno	6,300	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.45E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Sulfametazina	10,000	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.99E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Sulfametoxazol	10,000	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.48E-03	2.30E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.92E-05
TOTAL		2.45E+02	4.98E+02	4.93E+02	3.40E+02	1.11E-04	3.30E+01	3.81E+01	4.19E+01	7.11E+01	4.80E+01

* Australian Guidelines for Water Recycling: Augmentation of Drinking Water Supplies (2008)

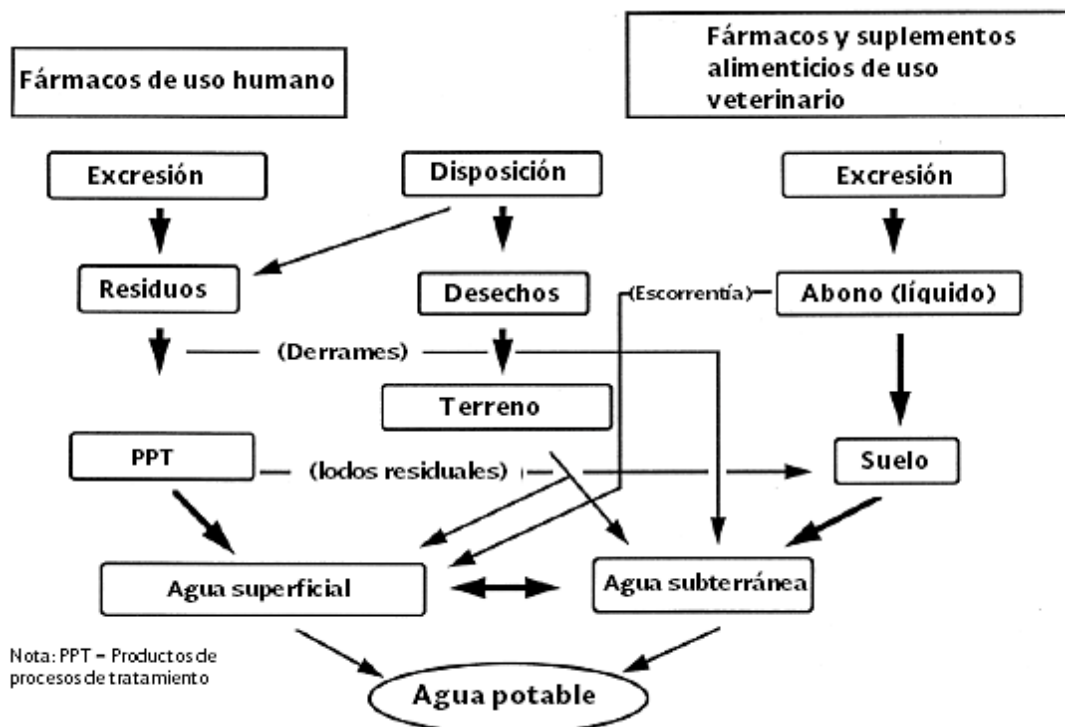


Figura 7-8. Destino y transporte de productos farmacéuticos en el ambiente

Fuente: WHO, 2011

En la Figura 7-9 y Figura 7-10, se ilustran los modelos conceptuales del posible movimiento y transporte de contaminantes en el ambiente, para las zonas de estudio. Este es un modelo dinámico que considera que los contaminantes no se mantienen estáticos, sino que se distribuirán en los diferentes compartimientos ambientales de acuerdo con sus características fisicoquímicas.

De estas características dependen las posibles vías de exposición humana a los contaminantes emergentes presentes en el ambiente, con lo que se obtiene el modelo conceptual de exposición de la población que reside en los municipios de las cuencas de los ríos Cuautla y Yautepec (Figura 7-11).

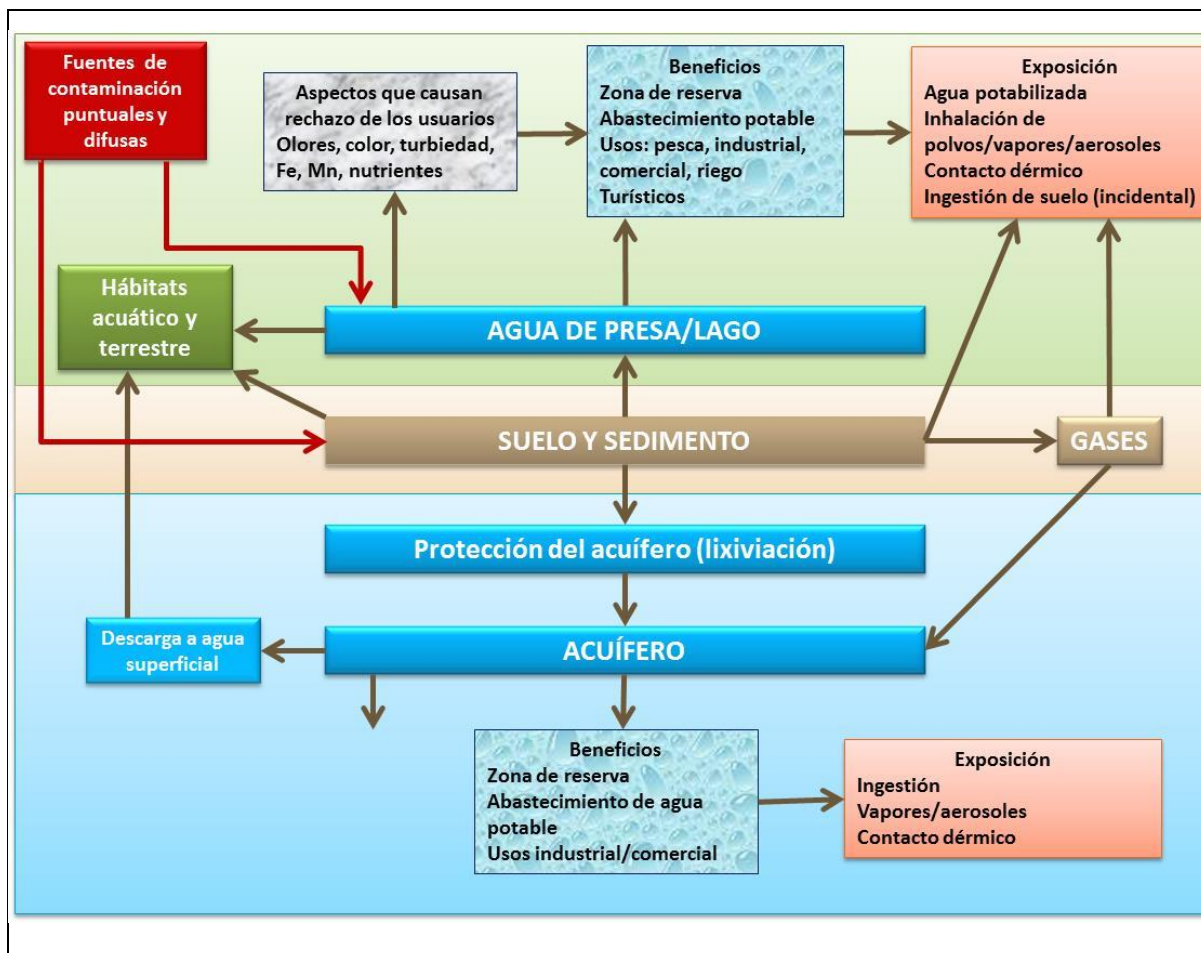


Figura 7-9. Modelo conceptual de ingreso de contaminantes al ambiente acuático

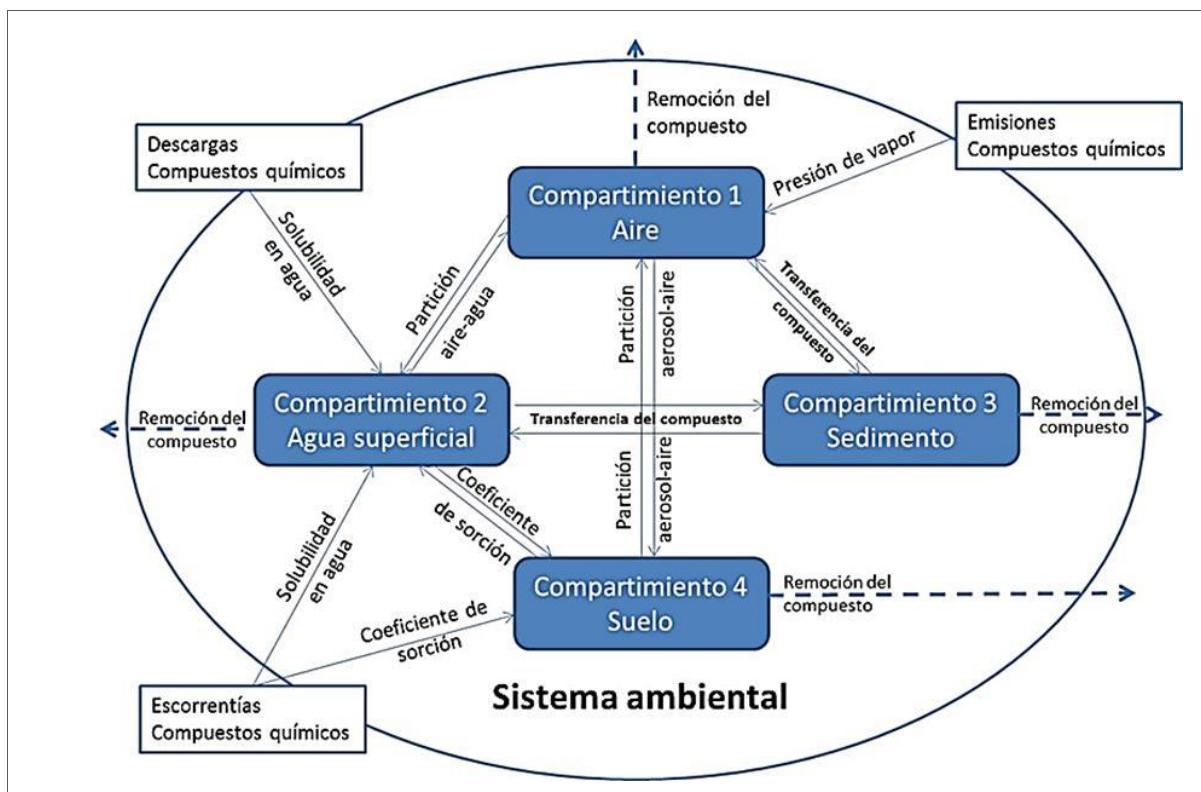


Figura 7-10. Modelo conceptual de transformación y transporte de acuerdo con las características fisicoquímicas de los contaminantes emergentes.

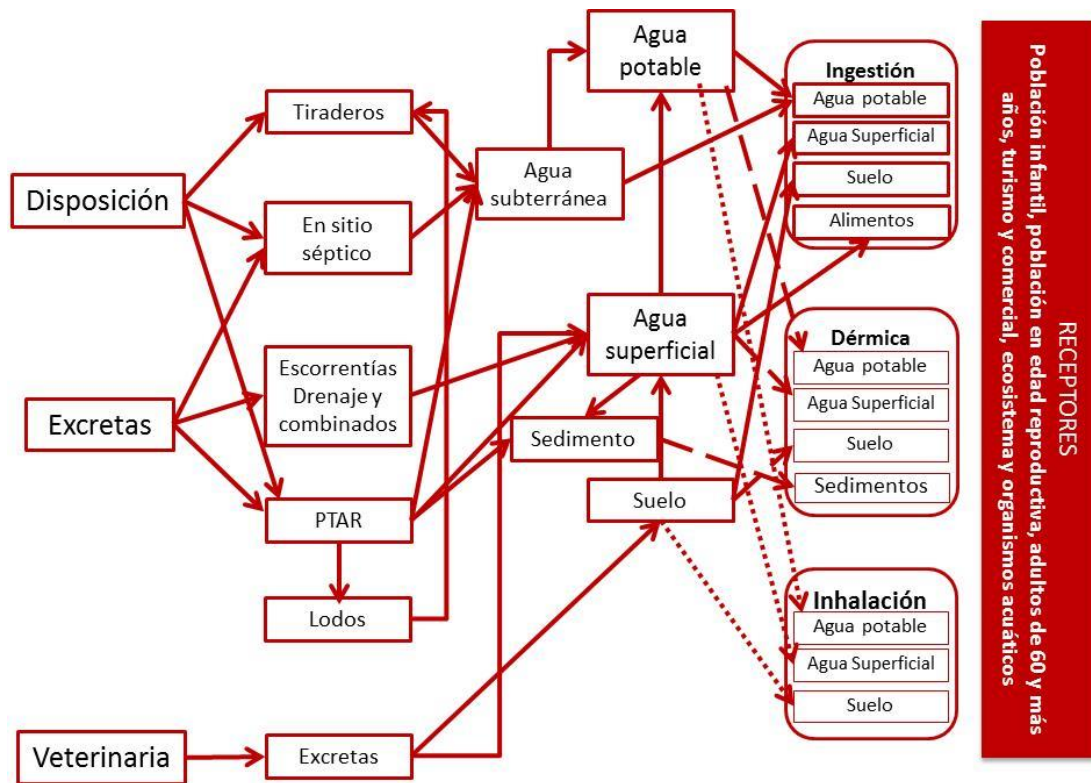


Figura 7-11. Modelo conceptual de las principales rutas de exposición potencial a contaminantes emergentes y no regulados.

8 BIBLIOGRAFÍA

Ascenzi P., Bocedi A., and Marino M. (2006). Structure-function relationship of estrogen receptor alpha and beta: Impact on human health. *Mol. Aspects Med.* 27, 299–402.

Boyd G.R., Palmeri J.M., Zhang S., Grimm D.A. (2004). Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) and endocrine disrupting chemicals (EDCs) in stormwater canals and Bayou St. John in New Orleans, Louisiana, USA. *Science Total Environmental* 333(1-3):137-48.

Bundy M. M., Doucette W. J., McNeill L. and Ericson J. F. (2007). Removal of Pharmaceuticals and related compounds by a bench-scale drinking water treatment system. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA.* 52.6. pp. 105-115. IWA Publishing 2007.

Chen J., Lipska B. K., Halim N., Ma Q. D., Matsumoto M., Melhem S., Kolachana B. S., Hyde T. M., Herman M. M., Apud J. (2004a). Functional analysis of genetic variation in catechol-O-methyltransferase (COMT): Effects on mRNA, protein, and enzyme activity in postmortem human brain. *Am. J. Hum. Genet.* 75, 807–821.

Colborn T., Dumanosky D. & Myers J.P. (1996). *Our Stolen Future: Are We Threatening Our Fertility, intelligence, and Supervival? A Scientific Detective Story.* Plume, New York.

Colborn T., Vom S.F.S., Soto M.A. (1993). Developmental Effects of Endocrine-Disrupting Chemicals in Wildlife and Humans. *Environmental Health Perspectives* Vol. 101, Number 5.

Cornwell, D., Bishop, M., Gould, R., *Handbook of Practice Water Treatment Plant Waste Management.* AWWA Research Foundation, 1987.

Davey C.J., Bodwell E. J., Gosse A. J., Hamilton W. J. Arsenic as an Endocrine Disruptor: (2007). Effects of Arsenic on Estrogen Receptor–Mediated Gene Expression In Vivo and in Cell Culture. *Toxicological Sciences* 98(1), 75–86 (2007)

Dean, D.M. Sanders, M.M., (1996). Ten years after: Reclassification of steroid-responsive genes. *Molecular Endocrinology* 10, 1489-1495.

Dojlido J. and Best G.A. (1993). Chemistry of water and water pollution. Ed. Ellis Horwood.

Greenbert, E.A.; Clescer, S.L.; Eaton, D.A. Standard Methods for the examination of Water and Wastewater. APHA, AWWA, WEF, 1992.

Kazeto Y., Place R. A., Trant J. M. (2004). Effects of endocrine disrupting chemicals on the expression of CYP19 genes in zebrafish (*Danio rerio*) juveniles. *Aquatic Toxicology* 69:25-34

Kolpin D.W., Furlong E.T., Meyer M.T., Thurman E.M., Zaugg S.D. Barber L.B. Buxton H.T. Pharmaceuticals, hormones, and other organic wastewater contaminants in U.S. streams, 1999-2000: a national reconnaissance. *Environmental Science & Technology* 15; 36(6):1202-11.

Martín-Domínguez A., Rivera Huerta M. de L., Piña S. M. y Pérez C. S. (2008). Incidencia del gradiente de velocidad en la eficiencia de la electrocoagulación para remover arsénico en un reactor a flujo pistón. *Interciencia*. v.33 n.7.

Muller P.Y., Janovjak H., Miserez A.R. Dobbie Z. (2002). Processing of Gene Expression Data Generated by Quantitative Real-Time RT-PCR. *BioTechniques* Vol. 32. No. 6.

Norma Oficial Mexicana NOM 052 SEMARNAT-2005 Que establece las características, el procedimiento de identificación clasificación y los listados de residuos peligrosos. Diario Oficial de la Federación, 23 de junio de 2006.

Norris, D.O.; Carr J.A., eds., *Endocrine Disruption*, New York: Oxford University Press, 2006.

Prieto G. F., Báez R. O. A., Scoot W., Gaytán O. J. C., Zúñiga E. A. (2006). Acumulación, toxicidad y teratogénesis provocada por presencia de arsénico en aguas en el pez cebra (*Danio rerio*). *Revista AquaTIC*, nº 24 – 2006.

Routledge E.J., Parker J., Odum J., Ashby J., Sumpter J.P. (1998). Some alkyl hydroxy benzoate preservatives (parabens) are estrogenic. *Toxicol Appl Pharmacol.* 153(1):12-9.

Schenck K, Rosenblum L., Wiese Th. E., Wymer L., Dugan N., Williams D., Mash H., Merriman B., and Speth Th. (2012). Removal of estrogens and estrogenicity through drinking water treatment. *Journal of Water and Health.* 10.1, 2012. doi: 10.2166/wh.2011.135.

Shanle E.K. & Xu W. (2011). Endocrine disrupting chemicals targeting estrogen receptor signaling: Identification and mechanisms of action. *Chem Res Toxicol* 24(1):6-19.

Snyder S.A., Westerhoff P., Yonn Y. Sedlak L.D. (2003). Pharmaceuticals, Personal Care Products, and Endocrine Disruptors in Water: Implications for the Water Industry. *Environmental Engineering Science.* Vol. 20, No.5:449-469.

Staples, C.A.; Dom, P. B.; Klecka, G.M.; O'Blook, S.T.; Harris, L. R. (1998). A review of the environmental fate, effects, and exposures of Bisphenol A, *Chemosphere* 36, 2149-2173.

Tišler T., Zagorc-Končan J., 2002. Acute and Chronic Toxicity of Arsenic to some aquatic organisms. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 69:421-429.

Treas J., Tyagi T., and Singh K. P. Chronic Exposure to Arsenic, Estrogen, and Their Combination Causes Increased Growth and Transformation in Human Prostate Epithelial Cells Potentially by Hypermethylation-Mediated Silencing of MLH1. 2013 Wiley Periodicals, Inc. DOI 10.1002/pros.22701 Published online in *Wiley Online Library* (wileyonlinelibrary.com).

Watson W.H. Yager D.J. (2007). Arsenic: Extension of its Endocrine Disruption Potential to Interference with Estrogen Receptor-Mediated Signaling. *Toxicological Sciences* 98(1), 1-4.

Wigel N.L. (1996). Steroid hormone receptors and their regulation by phosphorylation *Biochemical Journal* 319, 657-667.

Yager, J. D., and Chen, J. Q. (2007). Mitochondrial estrogen receptors – new insights into specific functions. *Trends Endocrinol. Metab.* 18, 89–91.

Ying G.G.; Williams B., Kookana R. (2002). Environmental fate of alkylphenols and alkylphenol ethoxylates— a review. *Environmental International Journal* 28:215-226.

9 ANEXOS

9.1 Determinación de 17 β -estradiol

El Kit para la determinación de esta hormona cuenta con:

- 1.- Placa Microtituladora recubierto con anticuerpo
- 2.- Seis estándares: 0, 3, 6, 9, 15, 25 ng/L
- 3.- Solución anticuerpo 6 mL
- 4.- E₂-HRP, 6mL
- 5.- 25 mL Diluyente cero
- 6.- 100 mL de Solución de lavado concentrado 5X
- 7.- Solución de Color (TMB) 16 mL
- 8.- Solución de paro, 12 mL

Se recomienda el uso de una pipeta multicanal o una pipeta paso a paso para añadir el conjugado de anticuerpo, enzima, solución de sustrato, y la solución de paro a fin de igualar los periodos de las incubaciones y las muestras sobre toda la placa de microtitulación. Utilice únicamente los reactivos y estándares de un lote de paquete en una de las pruebas, ya que se han ajustado en combinación. Adicionalmente se recomienda tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

1. Ajuste la placa de microtitulación y los reactivos a temperatura ambiente antes de su uso.
2. Retire el número de tiras de placa de microtitulación necesarias de la bolsa de papel de aluminio. Las tiras restantes se almacenan en la bolsa de papel de aluminio cerrada. Guarde el kit restante en el refrigerador (4-8 ° C).

3. El estándar de control, la disolución de anticuerpos, enzimas conjugadas, del sustrato y de paro están listas para su uso y no requieren ninguna dilución adicional.
4. La disolución de lavado es una disolución concentrada 5X y necesita ser diluida con agua desionizada. En un contenedor de 1L diluir la solución 5X 1:5 (es decir, 100 mL de la solución de lavado 5X más 400 mL de agua desionizada agua). La solución diluida se utiliza para lavar los pocillos de microtitulación.
5. La solución de paro tiene que ser manejada con cuidado, ya que contiene H_2SO_4 diluido.

9.1.1 Procedimiento del Ensayo

- 1.- Añadir 50 μ L de las soluciones estándar, control o muestras en los pocillos de las tiras de prueba, de acuerdo con el plan de trabajo. Se recomienda el uso de duplicados o triplicados.
- 2.- Añadir 50 μ L de la disolución de anticuerpo E_2 sucesivamente a cada pocillo usando una pipeta multi-canal o una pipeta paso a paso. Cubra los pozos con parafilm para evitar la contaminación y la evaporación. Mezclar bien el contenido de los pozos moviendo el soporte de las tiras con un movimiento circular rápido en la mesa de trabajo para un total de 20-30 segundos. Tenga cuidado de no derramar el contenido. Se incuba a temperatura ambiente durante 30 minutos.
- 3.- Añadir 50 μ L de solución de conjugado HRP E_2 a los pocillos individuales sucesivamente utilizando una pipeta multicanal o una pipeta paso a paso. Cubrir los pocillos con parafilm y mezclar el contenido moviendo el soporte de tiras en un movimiento circular rápido en la mesa de trabajo durante unos 30 segundos. Tenga cuidado de no derramar contenido. Incubar las tiras por noventa (90) minutos a temperatura ambiente.

4.- Después de la incubación, retire la cubierta y vigorosamente agite el contenido de los pozos en un fregadero. Lavar las tiras cuatro veces utilizando la solución tampón de lavado 1X. Utilice al menos un volumen de 250 μL de solución tampón de lavado para cada paso de lavado. El resto del búfer en los pozos se debe quitar acariciando la placa y secar con toallas de papel.

5. Añadir 150 μL de solución de sustrato-color a los pozos utilizando una pipeta multicanal o una pipeta paso a paso. Las tiras se incuban durante 20 minutos a temperatura ambiente. Proteja las bandas de la luz solar.

6. Añadir 100 μl de solución de paro a los pocillos en el mismo orden que para la disolución de sustrato- color utilizando una pipeta multicanal o una pipeta paso a paso.

7. Leer la absorbancia a 450 nm utilizando un fotómetro de microplacas ELISA dentro de los 15 minutos posteriores al paro la reacción.

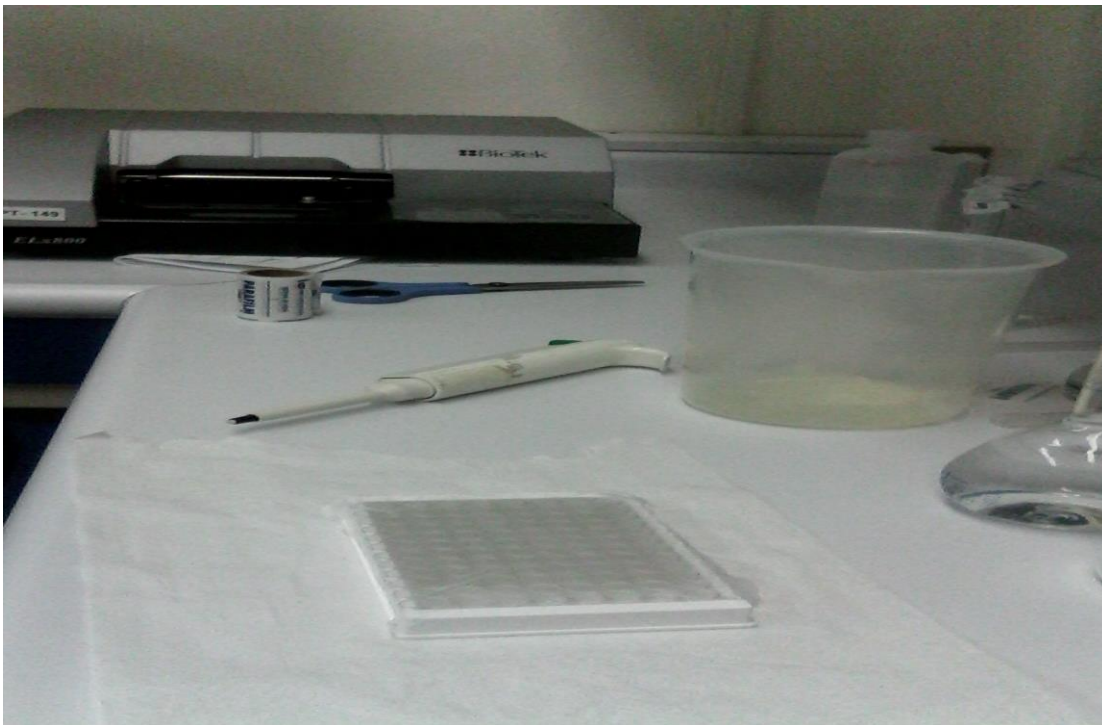
9.1.2 Evaluación

La evaluación de la prueba ELISA puede realizarse utilizando programas de evaluación de ELISA comercial (de 4 parámetros, Logit /Log o, alternativamente, punto a punto). Para una evaluación manual, calcule el valor medio de absorbancia para cada uno de los estándares. Calcular el valor ($\%B/B_0$) para cada estándar dividiendo el valor de absorbancia media para cada estándar por el Estándar Cero (Standard 0). Construya una curva estándar trazando el ($\%B/B_0$) para cada serie en una lineal vertical (y) eje frente a la concentración de E_2 correspondiente en logarítmica (x) eje horizontal en papel cuadriculado. ($\%B/B_0$) para los controles y las muestras serán entonces los niveles de concentración en ppt de E_2 por interpolación usando la curva estándar.

9.1.3 Desarrollo de la técnica



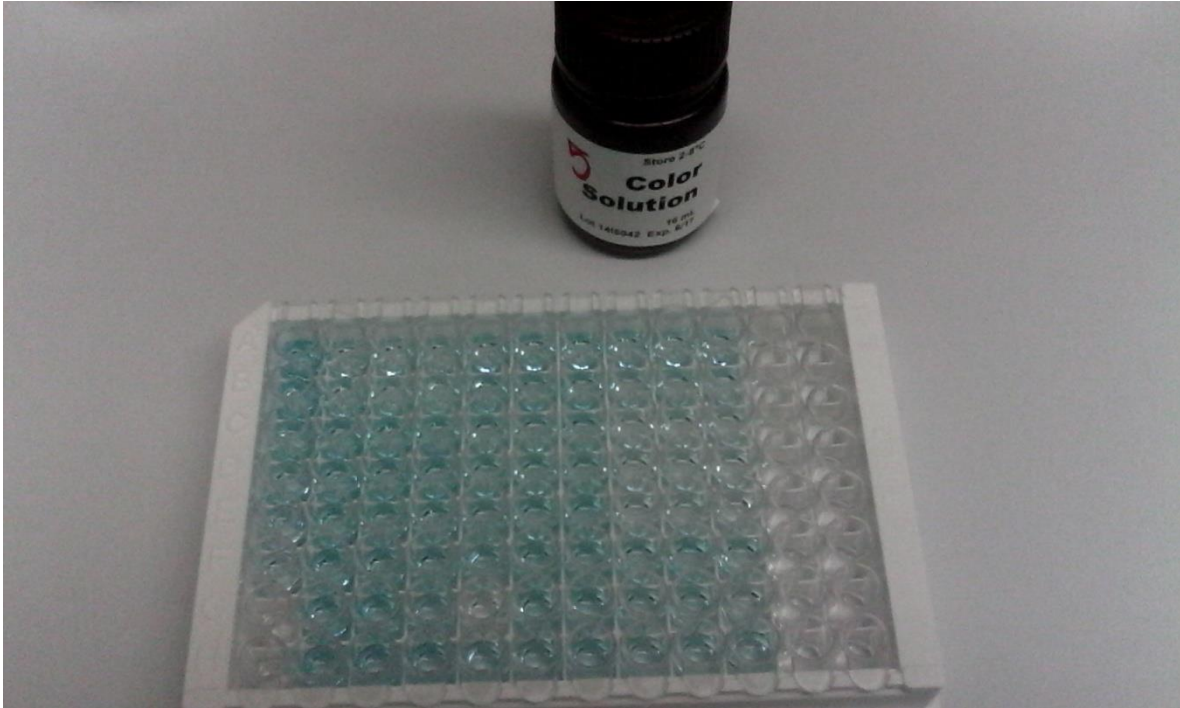
Kit 17 β -estradiol ELISA Abraxis.



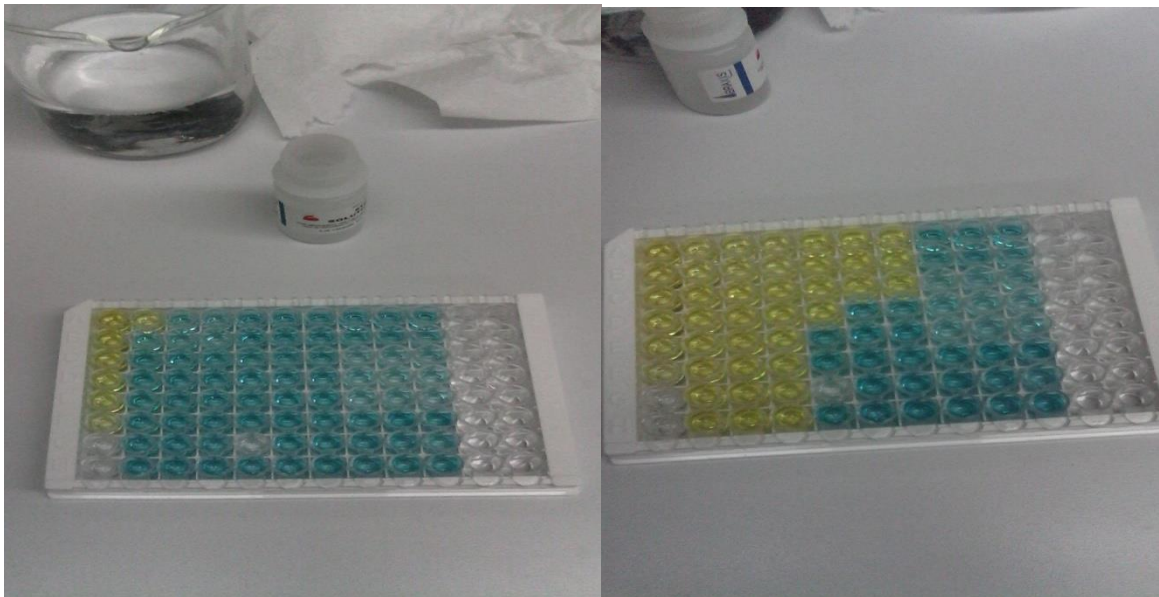
Adición de estándares y muestras más anticuerpo E₂, se agita con cuidado y se deja en incubación durante 30 min a temperatura ambiente.



Adición de solución de conjugado HRP E₂ se agita con cuidado y se deja incubar durante 90 min a temperatura ambiente.



Después de transcurridos 90 min de la incubación se deshecha el contenido de los pocillos y se enjuaga con la solución de lavado por 4 veces, posteriormente se adiciona la solución de color y se deja incubar durante 20 min.



Al terminar el periodo de 20 min se adiciona la disolución de paro a cada uno de los pocillos en el orden en que se agregó la solución de color.



Se realizan las lecturas a 450 nm mediante un equipo lector de placas marca BioTek.

9.2 Resultados de análisis de arsénico en laboratorio acreditado.



**LABORATORIO Y ASESORIA EN CONTROL DE LA
CONTAMINACION, S.A. DE C.V.**

Río Amacuzac 103
Col. Vista Hermosa
C.P. 62290
Cuernavaca, Mor.

Tel. (777) 314 30 68
con 3 líneas
Fax (777) 318 70 62

Correo electrónico: lablacc@prodigy.net.mx

INFORME DE PRUEBA

Hoja 1 de 1

CLIENTE: INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua
Subcoordinación de Potabilización
Domicilio: Paseo Cuauhnahuac N° 8532
Col. Progreso
Jiutepec, Morelos
Tel. (777) 329-36-00
At'n.: M. en I. Ivan Villegas Mendoza N° de folio: 7039

DESCRIPCIÓN Y TIPO DE MUESTRA: Muestra de agua identificada como: "PERMEADO OSMOSIS"			
Fecha de recepción	Muestreado por	Fecha de análisis	Fecha de emisión
27 de noviembre del 2015	El cliente	1 al 3 de diciembre del 2015	4 de diciembre del 2015

DETERMINACIONES		
PARÁMETRO (unidades)	RESULTADO	MÉTODO: NMX-AA
Arsénico; mg/L.	<0,0010	051-SCFI-2001 Gen. de Hidr.

OBSERVACIONES: Muestra etiquetada con fecha de muestreo: 4 de noviembre del 2015 a las 13:00 horas.

Certifico que los análisis reportados, fueron realizados con los métodos aquí asentados.
Aprobación de CONAGUA N° CNA-GCA-1220 expedida el 10 de agosto del 2015.
Acreditación de la Entidad Mexicana de Acreditación: N° AG-113-035/09.

Ing. Carlos Salazar Salazar
Gerente de Laboratorio

ESTE INFORME AMPARA SOLO LA MUESTRA SOMETIDA A PRUEBA
ESTE DOCUMENTO NO PODRÁ SER REPRODUCIDO EN FORMA TOTAL O PARCIAL SIN LA AUTORIZACIÓN POR ESCRITO DE ESTE LABORATORIO

(CONFIDENCIAL)
FOR-011-13

Análisis de concentración de arsénico del efluente de ósmosis inversa.



**LABORATORIO Y ASESORIA EN CONTROL DE LA
CONTAMINACION, S.A. DE C.V.**

Río Amacuzac 103
Col. Vista Hermosa
C.P. 62290
Cuernavaca, Mor.

Tel. (777) 314 30 68
con 3 líneas
Fax (777) 318 70 62
Correo electrónico: lablacc@prodigy.net.mx

INFORME DE PRUEBA

Hoja 1 de 1

CLIENTE: INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua Subcoordinación de Potabilización Domicilio: Paseo Cuauhnahuac N° 8532 Col. Progreso Jiutepec, Morelos Tel. (777) 329-36-00 At'n.: M. en I. Ivan Villegas Mendoza	N° de folio: 7038
---	-------------------

DESCRIPCIÓN Y TIPO DE MUESTRA: Muestra de agua identificada como: "PERMEADO NANO - 90"			
Fecha de recepción	Muestreado por	Fecha de análisis	Fecha de emisión
27 de noviembre del 2015	El cliente	1 al 3 de diciembre del 2015	4 de diciembre del 2015

DETERMINACIONES		
PARÁMETRO (unidades)	RESULTADO	MÉTODO: NMX-AA
Arsénico; mg/L.	0,0035	051-SCFI-2001 Gen. de Hidr.

OBSERVACIONES: Muestra etiquetada con fecha de muestreo: 4 de noviembre del 2015 a las 17:00 horas.

Certifico que los análisis reportados, fueron realizados con los métodos aquí asentados.
 Aprobación de CONAGUA N° CNA-GCA-1220 expedida el 10 de agosto del 2015.
 Acreditación de la Entidad Mexicana de Acreditación: N° AG-113-035/09.

Ing. Carlos Salazar Salazar
 Gerente de Laboratorio

ESTE INFORME AMPARA SOLO LA MUESTRA SOMETIDA A PRUEBA
 ESTE DOCUMENTO NO PODRÁ SER REPRODUCIDO EN FORMA TOTAL O PARCIAL SIN LA AUTORIZACIÓN POR ESCRITO DE ESTE LABORATORIO

(CONFIDENCIAL)
 FOR-011-13

Análisis de concentración de arsénico del efluente de la membrana NE 4040-90.



**LABORATORIO Y ASESORIA EN CONTROL DE LA
CONTAMINACION, S.A. DE C.V.**

Río Amacuzac 103
Col. Vista Hermosa
C.P. 62290
Cuernavaca, Mor.

Tel. (777) 314 30 68
con 3 líneas
Fax (777) 318 70 62
Correo electrónico: lablacc@prodigy.net.mx

INFORME DE PRUEBA

Hoja 1 de 1

CLIENTE: INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua
Subcoordinación de Potabilización
Domicilio: Paseo Cuauhnahuac N° 8532
Col. Progreso
Jiutepec, Morelos
Tel. (777) 329-36-00
At'n.: M. en I. Ivan Villegas Mendoza

N° de folio: 7037

DESCRIPCIÓN Y TIPO DE MUESTRA: Muestra de agua identificada como: "PERMEADO NANO - 70"			
Fecha de recepción	Muestreado por	Fecha de análisis	Fecha de emisión
27 de noviembre del 2015	El cliente	1 al 3 de diciembre del 2015	4 de diciembre del 2015

DETERMINACIONES		
PARÁMETRO (unidades)	RESULTADO	MÉTODO: NMX-AA
Arsénico; mg/L.	0,0013	051-SCFI-2001 Gen. de Hidr.

OBSERVACIONES: Muestra etiquetada con fecha de muestreo: 4 de noviembre del 2015 a las 15:00 horas.

Certifico que los análisis reportados, fueron realizados con los métodos aquí asentados.
Aprobación de CONAGUA N° CNA-GCA-1220 expedida el 10 de agosto del 2015.
Acreditación de la Entidad Mexicana de Acreditación: N° AG-113-035/09.

Ing. Carlos Salazar Salazar
Gerente de Laboratorio

ESTE INFORME AMPARA SOLO LA MUESTRA SOMETIDA A PRUEBA
ESTE DOCUMENTO NO PODRÁ SER REPRODUCIDO EN FORMA TOTAL O PARCIAL SIN LA AUTORIZACIÓN POR ESCRITO DE ESTE LABORATORIO

(CONFIDENCIAL)
FOR-011-13

Análisis de concentración de arsénico del efluente de la membrana NE 4040-70.



**LABORATORIO Y ASESORIA EN CONTROL DE LA
CONTAMINACION, S.A. DE C.V.**

Río Amacuzac 103
Col. Vista Hermosa
C.P. 62290
Cuernavaca, Mor.

Tel. (777) 314 30 68
con 3 líneas
Fax (777) 318 70 62
Correo electrónico: lablacc@prodigy.net.mx

INFORME DE PRUEBA

Hoja 1 de 1

CLIENTE: INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua
Subcoordinación de Potabilización
Domicilio: Paseo Cuauhnahuac N° 8532
Col. Progreso
Jiutepec, Morelos
Tel. (777) 329-36-00
At'n.: M. en I. Ivan Villegas Mendoza N° de folio: 7274

DESCRIPCIÓN Y TIPO DE MUESTRA: Muestra de agua identificada como:
"A C R A"

Fecha de recepción	Muestreado por	Fecha de análisis	Fecha de emisión
9 de diciembre del 2015	El cliente	14 al 17 de diciembre del 2015	18 de diciembre del 2015

DETERMINACIONES		
PARÁMETRO (unidades)	RESULTADO	MÉTODO: NMX-AA
Arsénico; mg/L.	0,1990	051-SCFI-2001 Gen de Hid

OBSERVACIONES: Muestra etiquetada con fecha de muestreo: 4 de diciembre del 2015 a las 17:00 horas.

Certifico que los análisis reportados, fueron realizados con los métodos aquí asentados.
Aprobación de CONAGUA N° CNA-GCA-1220 expedida el 10 de agosto del 2015.
Acreditación de la Entidad Mexicana de Acreditación: N° AG-113-035/09.

Ing. Carlos Salazar Salazar
Gerente de Laboratorio

ESTE INFORME AMPARA SOLO LA MUESTRA SOMETIDA A PRUEBA
ESTE DOCUMENTO NO PODRÁ SER REPRODUCIDO EN FORMA TOTAL O PARCIAL SIN LA AUTORIZACIÓN POR ESCRITO DE ESTE LABORATORIO

(CONFIDENCIAL)
FOR-011-13

Análisis de concentración de arsénico del agua cruda.