



Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Proyecto DP 1342.1- Analizar la vulnerabilidad y evaluar los costos
del cambio climático en OOAPAS

Jiutepec, Morelos

Octubre, 2013

Jefe de Proyecto:

Héctor David Camacho González

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	2
ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS	5
1. INTRODUCCIÓN	7
2. CAMBIO CLIMÁTICO	9
2.1 Efectos del cambio climático en México	11
2.2 Cambio climático en Organismos Operadores de Agua	14
2.2.1 Análisis de vulnerabilidad al cambio climático	17
2.2.2 Adaptación a los efectos del cambio climático	20
3. COSTOS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO	31
3.1 Experiencias en evaluación de costos.....	33
4. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE COSTOS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO	38
4.1 Índice de vulnerabilidad	40
4.1.1 Selección de indicadores	42
4.1.2 Normalización de datos	45
4.1.3 Ponderación	45
4.1.4 Agregación.....	46
4.2 Identificación de medidas de adaptación.....	49
4.3 Estimación de la demanda	51
4.3.1 Especificaciones del modelo.....	52
4.3.2 Análisis de regresión	53
4.4 Índice de vulnerabilidad con adaptación.....	57
4.4.1 Grado de exposición	57
4.4.2 Sensibilidad.....	58
4.4.4 Capacidad de adaptación	62
4.5 Evaluación de costos de adaptación.....	63
5. IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA; CASO MEXICALI, BAJA CALIFORNIA.....	66
5.1 Operatividad y administración del sistema	68
5.2 Índice de vulnerabilidad	69

5.3 Identificación de medidas de adaptación.....	71
5.4 Estimación de la demanda	72
5.4.1 Análisis de regresión	73
5.4.2 Proyección de la demanda	75
5.5 Índice de vulnerabilidad y evaluación de costos de adaptación	79
5.5.1 Escenario 1	79
5.5.2 Escenario 2	81
5.5.3 Escenario 3	84
5.5.4 Escenario 4	88
6. IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA: CASO MONTERREY, NUEVO LEÓN.....	94
6.1 Operatividad y administración del sistema	96
6.2 Índice de vulnerabilidad	97
6.3 Identificación de medidas de adaptación.....	99
6.4 Estimación de la demanda	100
6.4.1 Análisis de regresión	101
6.4.2 Proyección de la demanda	103
6.5 Índice de vulnerabilidad y evaluación de costos de adaptación	105
6.5.1 Escenario 1	105
6.5.2 Escenario 2	108
6.5.3 Escenario 3	111
6.5.4 Escenario 4	113
7. COMENTARIOS FINALES.....	121
BIBLIOGRAFÍA.....	124
ANEXO.....	128
A1. Pruebas estadísticas	128
A2. Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali	133
A.3 Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, I.P.D.	138

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Anomalía promedio de temperatura media 2061-2090.....	12
Figura 2. 2 Anomalía promedio de precipitación 2061-2090:anual	13
Figura 2. 3 Índice de severidad de la sequía meteorológica. Modelo GFDL-R30	13
Figura 2. 4 Etapas de planeación de los organismos operadores bajo el enfoque del cambio climático y su incertidumbre.....	15
Figura 2. 5 Atributos de enfoque para evaluar la vulnerabilidad (Dessai & Hulme, 2004)	18
Figura 2. 6 Efectos del cambio climático en organismos operadores	21
Figura 3. 1 Ecuación Escenario de referencia relevante para la decisión de adaptación Tipo II:	32
Figura 4. 1 Metodología para el cálculo de los costos de adaptación al cambio climático para Organismos Operadores de Agua Potable	39
Figura 4. 2 Factores de vulnerabilidad (IPCC, 2007)	41
Figura 4. 3 Construcción del índice de vulnerabilidad (Naro et al, 2005).....	42
Figura 4. 4 Identificación de medidas de adaptación (escenarios)	51
Figura 4. 5 Adaptación al cambio climático respecto al escenario de referencia	64
Figura 5. 1 Ubicación geográfica (Mexicali).....	66
Figura 5. 2 Volumen facturado con y sin cambio climático	78
Figura 5. 3 Incremento de la demanda, respecto al escenario base	78
Figura 5. 4 Índice de vulnerabilidad. Escenario 1	79
Figura 5. 5 Índice de vulnerabilidad. Escenario 2	81
Figura 5. 6 Incremento de costos respecto al escenario base.....	84
Figura 5. 7 Índice de vulnerabilidad. Escenario 3	85
Figura 5. 8 Índice de vulnerabilidad. Escenario 4	88
Figura 5. 9 Volumen producido (millones de m ³).....	90
Figura 5. 10 Costos totales	92
Figura 5. 11 Impacto económico del cambio climático y de las medidas de adaptación.....	92
Figura 5. 12 Relación egresos/ingresos	93
Figura 6. 1 Localización.....	94
Figura 6. 2 Incremento de la demanda respecto al escenario base (volumen facturado en millones de m ³)	105
Figura 6. 3 Índice de vulnerabilidad. Escenario 1	106
Figura 6. 4 Índice de vulnerabilidad. Escenario 2	108
Figura 6. 5 Incremento de costos respecto al escenario base.....	110
Figura 6. 6 Índice de vulnerabilidad. Escenario 3	111
Figura 6. 7 Índice de vulnerabilidad. Escenario 4	114
Figura 6. 8 Volumen producido (millones de m ³).....	116
Figura 6. 9 Costos totales	118
Figura 6. 10 Impacto económico del cambio climático y de las medidas de adaptación.....	119
Figura 6. 11 Relación egresos/ingresos	120
Figura A. 1 Prueba de normalidad	128
Figura A. 2 Correlograma de residuos	130
Figura A. 3 ARCH Test.....	131
Figura A. 4 Test CUSUM.....	132

Figura A. 5 Prueba de normalidad	133
Figura A. 6 Correlograma de residuos	133
Figura A. 7 Prueba de correlación LM con 2 rezagos.....	134
Figura A. 8 Prueba de correlación LM con 1 rezago	135
Figura A. 9 Prueba ARCH	136
Figura A. 10 Prueba White:.....	136
Figura A. 11 Prueba CUSUM	137
Figura A. 12 Prueba de normalidad	138
Figura A. 13 Correlograma de residuos	138
Figura A. 14 Prueba de correlación LM con 2 rezagos.....	139
Figura A. 15 Prueba de correlación LM con 1 rezago	139
Figura A. 16 Prueba ARCH	140
Figura A. 17 Prueba White.....	141
Figura A. 18 Prueba CUSUM	141

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Eficiencia física, comercial y global (CONAGUA, 2011)	16
Tabla 2. 2 Efectos del cambio climático: cambios en el ecosistema (EPA, 2010).....	22
Tabla 2. 3 Efectos del cambio climático: cambios en la calidad del agua (EPA, 2010)	22
Tabla 2. 4 Efectos del cambio climático: inundaciones (EPA, 2010).....	23
Tabla 2. 5 Efectos del cambio climático: sequías (EPA, 2010)	23
Tabla 2. 6 Medidas de adaptación. Sequias (EPA, 2010).....	25
Tabla 2. 7 Medidas de adaptación. Alteración de la calidad del agua (EPA, 2010)	26
Tabla 2. 8 Medidas de adaptación. Inundaciones (EPA, 2010).....	27
Tabla 2. 9 Medidas de adaptación. Cambios en el ecosistema (EPA, 2010).....	28
Tabla 2. 10 Medidas de adaptación. Demanda y usos del servicio (EPA, 2010).....	29
Tabla 2. 11 Medidas de adaptación. Demanda y usos del servicio (EPA, 2010) (Continuación)	30
Tabla 4. 1 Selección de Indicadores de vulnerabilidad.....	42
Tabla 4. 2 Asignación de ponderaciones	46
Tabla 4. 3 Normalización y ponderación de rangos	47
Tabla 4. 4 Resultados de índice de vulnerabilidad (valores ponderados)	48
Tabla 5. 1 Plantas potabilizadoras. CESPM	67
Tabla 5. 2 Cobertura de agua potable (2011). CESPM.....	67
Tabla 5. 3 Indicadores (2011). CESPM	68
Tabla 5. 4 Cobertura de medición (2011). CESPM.....	68
Tabla 5. 5 Eficiencia de cobro (2011). CESPM	69
Tabla 5. 6 Índice operativo (2011). CESPM.....	69
Tabla 5. 7 Índice de vulnerabilidad (2011). CESPM	70
Tabla 5. 8 Base de datos utilizada para la estimación de la demanda	73
Tabla 5. 9 Estadística descriptiva de las variables del modelo de demanda	73
Tabla 5. 10 Resultados del análisis de regresión	74
Tabla 5. 11 Supuestos de proyección	75
Tabla 5. 12 Resultados de estimación de la demanda con y sin cambio climático (Volumen facturado en m ³)	77

Tabla 5. 13 Indicadores de vulnerabilidad. Escenario 1	80
Tabla 5. 14 Costos totales. Escenario base.....	80
Tabla 5. 15 Indicadores de vulnerabilidad. Escenario 2	82
Tabla 5. 16 Costos totales. Escenario 2	83
Tabla 5. 17 . Indicadores de vulnerabilidad. Escenario 3	86
Tabla 5. 18 Costos totales (pesos). Escenario 3.....	87
Tabla 5. 19 Indicadores de vulnerabilidad. Escenario 4	89
Tabla 5. 20 Ahorro de agua y costo por reparación de fugas	90
Tabla 5. 21 Costos totales (pesos). Escenario 4.....	91
Tabla 6. 1 Fuentes superficiales. Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey	95
Tabla 6. 2 Indicadores (2011). Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey.....	96
Tabla 6. 3 Cobertura de medición (2011). Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey	97
Tabla 6. 4 Eficiencia de cobro (2011). Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey	97
Tabla 6. 5 Índice operativo (2011). Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey	97
Tabla 6. 6 Índice de vulnerabilidad (2010). Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey	97
Tabla 6. 7 Base de datos utilizada para la estimación de la demanda. Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey	101
Tabla 6. 8 Estadística descriptiva de las variables del modelo de demanda	101
Tabla 6. 9 Resultados del análisis de regresión	102
Tabla 6. 10 Supuestos de proyección	103
Tabla 6. 11 Resultados de estimación de la demanda con y sin cambio climático (Volumen facturado en m ³)	104
Tabla 6. 12 Indicadores de vulnerabilidad. Escenario 1	106
Tabla 6. 13 Costos totales. Escenario base.....	107
Tabla 6. 14 Costos totales. Escenario base.....	109
Tabla 6. 15 Costos totales. Escenario 2	110
Tabla 6. 16 Indicadores de vulnerabilidad. Escenario 3	111
Tabla 6. 17 Costos totales (pesos). Escenario 3.....	112
Tabla 6. 18 Indicadores de vulnerabilidad. Escenario 4	114
Tabla 6. 19 Ahorro de agua y costo por reparación de fugas	116
Tabla 6. 20 Costos totales (pesos). Escenario 4.....	117

1. INTRODUCCIÓN

Aunque se han estudiado y conocen los fenómenos climáticos, existen alteraciones en los mismos que resultan de gran interés para la sociedad sobre todo cuando estos cambios afectan los diferentes sectores socioeconómicos. Tal es el caso del cambio climático observado en los últimos años, cuyos impactos en el sector de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento han llevado a diversos actores a interesarse en el tema.

Si bien el impacto del cambio climático puede analizarse mediante escenarios climáticos generados a través de modelos de simulación, es necesario evaluar sus efectos así como la sensibilidad de los elementos expuestos a nivel local, a fin de contar con herramientas que permitan plantear medidas de adaptación. Debido a que el cambio climático con seguridad desafiará las prácticas existentes de administración del agua, especialmente en situaciones en las que se cuente con menor experiencia sobre la incorporación de acciones que fortalezcan a los sistemas de agua.

Es por ello que este trabajo presenta una propuesta metodológica para el cálculo de los costos de adaptación al cambio climático en un Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (OOAPAS). La metodología que se propone se divide en dos partes: 1) el análisis de vulnerabilidad, que permite evaluar la sensibilidad de los organismos operadores ante los impactos potenciales del cambio climático y su capacidad de adaptación basada en el incremento de la eficiencia física y comercial, y 2) el cálculo de costos, que utiliza la información obtenida en el análisis de vulnerabilidad para determinar las posibles opciones para adaptarse a los impactos que se consideran significativos y el costo que implica aumentar la capacidad de respuesta de un organismo operador.

La implementación de la metodología propuesta para el cálculo de los costos de adaptación al cambio climático en un OOAPAS se presenta en este trabajo para los sistemas de agua de las ciudades de Mexicali y Monterrey. Considerando que en estas ciudades se esperan incrementos de temperatura significativos en los próximos veinte años, lo que podría incrementar la vulnerabilidad de estos organismos operadores.

Para una mejor comprensión del libro, el trabajo se estructura en siete secciones. Las primeras dos secciones describen de manera general los efectos del cambio climático tanto en los recursos

hídricos del país como en los organismos operadores de agua, de acuerdo a los escenarios proyectados por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (Martínez Austria & Patiño Gómez, 2010) para determinar con mayor certidumbre los impactos del cambio climático en el sector hídrico en México.

La tercera sección describe los principales factores que deben considerarse al evaluar la vulnerabilidad de un organismo operador, así como algunas medidas que permitirían afrontar los cambios impuestos por el cambio y la variabilidad climática así como la discusión de distintos acercamientos al cálculo de costos de adaptación. La cuarta sección describe detalladamente la metodología para el cálculo de los costos de adaptación al cambio climático en un OOAPAS. Las secciones cinco y seis presentan la implementación de la metodología en los sistemas de agua de las ciudades de Mexicali y Monterrey para finalmente presentar los comentarios finales de este trabajo.

2. CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático es un fenómeno donde los complejos procesos ambientales que se generan en la biósfera se han visto alterados por acción del hombre a través de su actividad social y económica. Estas alteraciones han sido acumulativas en el tiempo y en la naturaleza, generando impactos en los ecosistemas, modificando los procesos de provisión y existencia de distintos bienes y servicios ambientales tales como la regulación del clima en la atmósfera, la infiltración de agua, la existencia de recursos bióticos entre otros, que a su vez generan impactos en los diferentes sectores económicos de la sociedad.

El cambio climático como problema global se compone de una serie de transformaciones en el clima que no son naturales y que alteran los componentes del sistema climático (Landa, 2010). En los párrafos siguientes se presenta una breve descripción del proceso que altera las componentes ambientales a partir de una revisión de distintos autores y fuentes.

La Tierra absorbe radiación solar (radiación de onda corta), principalmente en la superficie, esta energía es redistribuida por circulaciones atmosféricas y oceánicas e irradiada nuevamente al espacio en longitudes de onda más largas (infrarrojas). Para la Tierra en su conjunto, la energía de la radiación solar que ingresa se equilibra aproximadamente con la radiación terrestre saliente (Magaña, 2004)

Cualquier factor que altere la radiación recibida del Sol o que altere la redistribución de energía dentro de la atmósfera puede afectar el clima. De acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático¹ conocido por el acrónimo en inglés IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), un cambio en la *energía radiativa* neta disponible para el sistema mundial de Tierra-atmósfera se denomina *forzamiento radiativo*. Los forzamientos radiativos positivos tienden a calentar la superficie de la Tierra así como la atmósfera inferior y los forzamientos radiativos negativos tienden a enfriarlas (IPCC, 2008).

¹ Establecido por dos organizaciones de Naciones Unidas, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), y posteriormente ratificada por la Asamblea General de las Naciones Unidas mediante la Resolución 43/53.

Algunos gases en el aire pueden de forma temporal absorber luz infrarroja (IR) térmica, estos se denominan gases de efecto invernadero (GEI), de tal manera que no toda la luz IR emitida por la superficie de la Tierra y la atmósfera escapa directamente al espacio (Baird, 2001). Es decir, la atmósfera absorbe más radiación terrestre que se desprende de la superficie y vuelve a emitirla en altitudes superiores y temperaturas más bajas, así se produce un forzamiento radiativo positivo que tiende a calentar la atmósfera inferior y la superficie (IPCC, 2007). El fenómeno de redirección del IR térmico hacia la tierra se denomina efecto invernadero, el cual es el responsable que la temperatura media de la superficie sea de 15°C, en lugar de -15°C, que correspondería en caso de no existir los gases atmosféricos que absorben la luz infrarroja (Baird, 2001).

El aumento de los gases de efecto invernadero puede redireccionar más energía infrarroja térmica hacia la superficie y por tanto aumentar la temperatura media más allá de 15°C. Para distinguir su efecto del fenómeno que ha ido operando de forma natural durante milenios, a este fenómeno se le conoce como efecto invernadero intensificado² (Baird, 2001). El efecto invernadero ha existido siempre y es parte de la composición natural de la atmósfera, sin embargo, esta situación normal y natural ha sido alterada artificialmente por el humano debido a que la actividad antropogénica ha emitido a la atmósfera diversos gases provenientes de la quema de combustibles fósiles principalmente.

Hoy día existe información documentada de los cambios en el sistema climático ocurridos a partir del siglo pasado tales como disminución del hielo ártico marino, cambios en los patrones de precipitación, incrementos en la temperatura media anual, entre otros. Si bien el cambio climático registra alteraciones en el largo plazo, por pequeña que sea la alteración de los procesos naturales del clima repercute en grandes impactos que hoy día se hacen evidentes, como los cambios en la temperatura y la precipitación. Aunque el cambio climático es un proceso normal en la naturaleza, el problema es que se ha acelerado por la acumulación de los GEI emitidos por actividades humanas (Greenpeace, 2010) y sus efectos han producido impactos negativos en la dinámica social y económica de las sociedades.

² Comúnmente conocido como calentamiento global

2.1 Efectos del cambio climático en México

El cambio climático global representa en la actualidad uno de los principales retos en la humanidad dado los impactos que produce en los componentes ambientales y en las actividades humanas. En la sección anterior se indicó que el cambio climático es un proceso normal, pero la aceleración de éste a través de las actividades antropogénicas ha dado origen a una serie de impactos que modifican las condiciones de vida y de producción de bienes y servicios.

México no escapa a esta situación, ya que su situación geográfica, condiciones climáticas, orográficas e hidrológicas contribuyen a que sea una de las zonas más vulnerables al cambio climático (Greenpeace, 2010).

Hoy en día ya se manifiestan en el territorio nacional gran variedad de alteraciones provocadas por este fenómeno que en muchos casos, no son más que el inicio de una tendencia de impactos que se verán exacerbados a lo largo de este siglo si no se adoptan medidas necesarias para aminorarlos (Greenpeace, 2010). En los párrafos siguientes se presentan resultados de diversos estudios realizados en México en los cuales se evalúan áreas y zonas geográficas del país que presentan mayor vulnerabilidad ante los potenciales efectos del cambio climático.

Los escenarios climáticos permiten estimar aproximaciones futuras de las anomalías de temperatura y precipitación para una región dada y son generados con el empleo de modelos de simulación (CONANP, 2011). El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), elaboró un estudio donde se analizan las causas y se prevén consecuencias del cambio climático en los recursos hídricos de México. Dicho estudio, publicado bajo el título de “Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático”; contiene resultados de diversas investigaciones interdisciplinarias en el tema; entre éstos; se generó una investigación sobre diferentes escenarios para determinar con mayor certidumbre los impactos del cambio climático en el sector hídrico en México. Para la precipitación se estimaron 23 modelos atmosféricos de circulación general, en una malla regular de 0.5º x 0.5º y se consideraron dos escenarios de cambio climático más probables (A1B y SA2) y tres horizontes de tiempo (2030, 2050 y 2100). Para el escenario de emisión A2, las variaciones estacionales proyectadas son lo suficientemente significativas para anticipar que no solo se presentarán cambios importantes en los valores totales de precipitación y temperatura, sino también en la variabilidad estacional de ambas variables. El trabajo del IMTA señala que la variación de la temperatura media anual en el país alcanzará 3.5°C más en el periodo 2061-2090, respecto

del promedio registrado en 1961-1990, mientras que la precipitación se reducirá en promedio un 15%. Así mismo, indica que dada la distribución heterogénea de los recursos hídricos en México, los efectos del cambio climático contrastan, puesto que existen diferencias entre las regiones. Se espera que los estados que más calentamiento experimenten sean Colima, Chiapas y Sonora, con valores por arriba de 3.5 °C, en tanto que Yucatán, Quintana Roo y Baja California Sur son los estados que experimentarán menor incremento de temperatura con alrededor de 2.5°C (Figura 2.1).



Figura 2. 1 Anomalía promedio de temperatura media 2061-2090

Fuente: (Martínez Austria & Patiño Gómez, 2010)

En cuanto a la disminución de la precipitación son dos estados del noroeste, Sonora y Baja California los que tendrán el mayor decremento en precipitación anual con valores de 21% con respecto a la climatología base, en segundo plano se encuentran los estados de la península de Yucatán, sin embargo en esta zona, de abundantes lluvias, los efectos serán menores que las regiones áridas del norte, en las que, con porcentajes menores de precipitación ya enfrentan condiciones de estrés hídrico (Figura 2.2).



Figura 2. 2 Anomalía promedio de precipitación 2061-2090:anual

Se estima que los estados que se ubican en el centro del país así como el estado de Chiapas son los que tendrán menor reducción en la precipitación anual con valores alrededor de -13%. La disminución de la precipitación en el territorio nacional tendrá como efecto el aumento de la temperatura y evapotranspiración ocasionando una menor disponibilidad de agua; tal condición llevará a mayores requerimientos del recurso y que se incremente su extracción, complicando aún más el panorama hídrico del país.

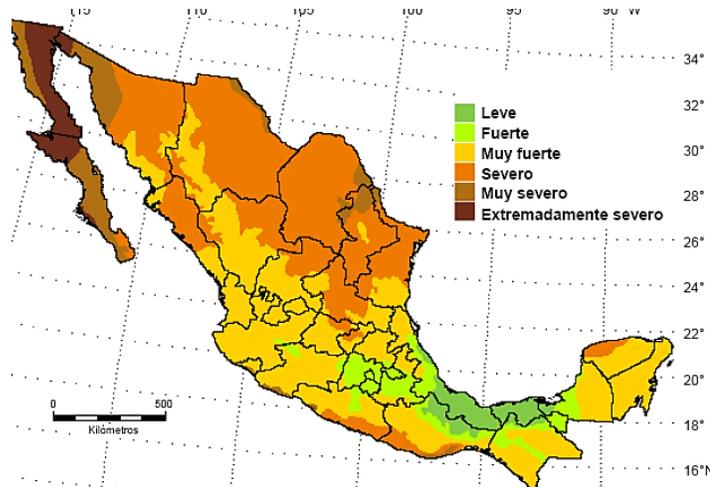


Figura 2. 3 Índice de severidad de la sequía meteorológica. Modelo GFDL-R30

Fuente: (Hernández Cerda, Torres Tapia, & Valdez Madero, 2000)

Los cambios por aumento de la severidad de la sequía meteorológica³ que se sufrirían ante un escenario de cambio climático indican que más del 70% de la superficie presentaría valores de vulnerabilidad a la sequía de muy alto y alto, siendo más afectado el norte, prolongándose por toda la costa del Pacífico y el centro del país (Figura 2.3).

Los datos citados muestran que el cambio climático es un fenómeno real y que resulta evidente la necesidad de incrementar la capacidad de adaptación ante un escenario que pondrá a prueba el equilibrio de los sistemas ambientales y humanos.

2.2 Cambio climático en Organismos Operadores de Agua

El cambio climático traerá consigo un cambio en el ciclo hidrológico que repercutirá directamente tanto en la cantidad como en la calidad del agua disponible para satisfacer las demandas humanas y ambientales. Si bien estas alteraciones implican impactos para todos los sectores de la economía, existen sectores que pueden ser más sensibles que otros. Uno de ellos es el sector de agua potable, alcantarillado y saneamiento, en donde las entidades encargadas de prestar estos servicios a la población son los organismos operadores.

El tema de cambio climático en estas organizaciones hace cuestionar no únicamente la confiabilidad de las fuentes de abastecimiento en cuanto cantidad y calidad; también agrega una variable que no es considerada en la planeación de los organismos operadores por falta de conocimiento en el tema así como por la falta de información para generar sus propios escenarios de cambio climático. Esto coloca a los prestadores de los servicios frente al dilema de cómo desarrollar a corto y largo plazo planes que consideren efectos del cambio climático (WUCA, 2010), ya que los efectos potenciales de éste fenómeno impactarán en gran medida a los organismos operadores, poniendo a prueba tanto la infraestructura existente como las habilidades de los directivos para asegurar la continuidad de los servicios a la población.

³ De acuerdo con la definición de Hernández (2000), se define como función del déficit de precipitación, expresado en porcentaje respecto a la pluviosidad medio anual o estacional de largo periodo y su duración en una determina región

De acuerdo con la Water Utility Climate Alliance, la planeación de los organismos operadores bajo el enfoque del cambio climático y su incertidumbre considera las siguientes etapas:

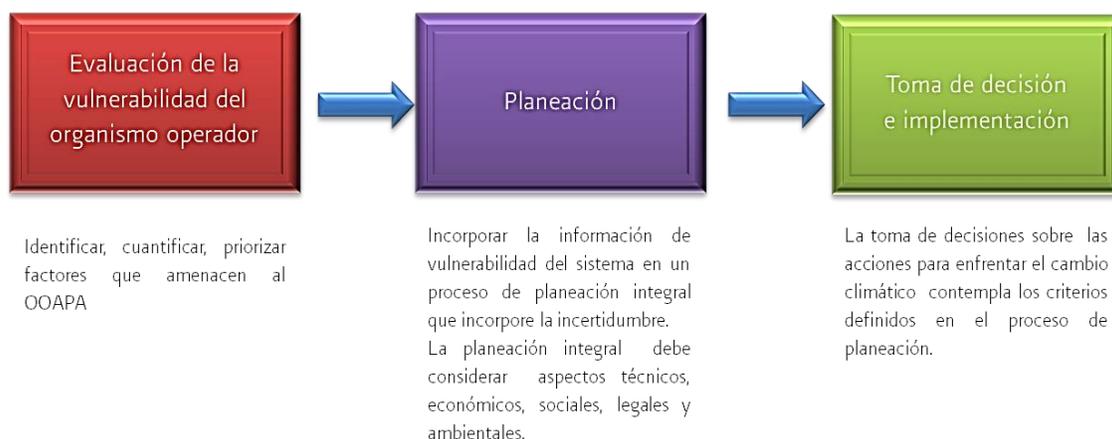


Figura 2. 4 Etapas de planeación de los organismos operadores bajo el enfoque del cambio climático y su incertidumbre.

Es en un proceso como el mencionado anteriormente que la evaluación de la vulnerabilidad y los costos se integran para proporcionar elementos que sirvan en la toma de decisiones sobre las alternativas de acciones a seguir para adaptarse a los efectos del cambio climático.

Cabe mencionar que debido a la gran cantidad de organismos operadores en México y las diferencias de desarrollo entre los mismos, hasta donde sabemos, no se conocen casos en donde se esté realizando un proceso de planeación como el descrito. De acuerdo con el Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores (PIGOO), en México existen 2 517 Organismos Operadores del Agua, de los cuales 637 atienden a ciudades con más de 20,000 habitantes.

Con el propósito de evaluar el desempeño de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), generó un sistema de indicadores que reflejan la situación de las entidades prestadoras de estos servicios públicos a nivel nacional. La

tabla siguiente muestra los resultados de los indicadores⁴ eficiencia, física, comercial y global para algunas ciudades de México:

Tabla 2. 1 Eficiencia física, comercial y global (CONAGUA, 2011)

OOAPAS	Eficiencia (%)		
	Física	Comercial	Global
Tijuana	81	96	78
Monterrey	70	95	67
Mexicali	87	75	66
Aguascalientes	64	92	59
Culiacán	63	88	56
Guadalajara	63	89	56
Tlaxcala	56	93	52
Pachuca	53	92	48
Zacatecas	58	82	48
Torreón	53	86	45
Chilpancingo	62	71	44
Hermosillo	63	68	43
Reynosa	58	71	41
Ciudad de México	56	68	38
Xalapa	40	92	37
Tlalnepantla	46	67	31
Tuxtla Gutiérrez	39	78	31
Mérida	35	86	30
Acapulco	34	82	28
Chetumal	37	68	25
Ensenada	79	93	73
Puerto Vallarta	75	98	74

Los indicadores de gestión de los OOAPAS muestran la capacidad para prestar los servicios públicos que tienen encomendados estos bajo un enfoque de eficiencia. Como se muestra en la Tabla 2.1, existen diferencias entre las localidades, siendo la ciudad de Chetumal la que presenta la menor

⁴La eficiencia física queda definida como: *volumen de agua facturado/volumen de agua producido*; la eficiencia comercial se define como: *importe recaudado/importe facturado*; y la eficiencia global se obtiene: *eficiencia física * eficiencia comercial*.

eficiencia global (25%), mientras que Tijuana se destaca como una de las ciudades con mejor gestión con 78% de eficiencia global.

En términos generales puede comentarse que salvo ciertas y contadas excepciones, la situación actual de los OOAPAS en México se caracterizan por el alto e inaceptable nivel de pérdidas físicas y comerciales, lo que redundando en una incapacidad para cubrir los costos de operación y mantenimiento.

Considerando estas diferencias entre ciudades es posible determinar algunos aspectos que derivan importantes problemas ambientales y económicos de los organismos operadores. Si bien, los indicadores son instrumentos que explican el desempeño de los OOAPAS, también pueden relacionarse con la vulnerabilidad al cambio climático asumiendo que habrá impactos en las zonas urbanas de México complicando aún más la gestión de los organismos operadores debido a los efectos en la infraestructura y su operación.

2.2.1 Análisis de vulnerabilidad al cambio climático

La vulnerabilidad se define como el grado de susceptibilidad o de incapacidad de un sistema para afrontar los efectos adversos del cambio climático, de forma particular, la variabilidad del clima y los fenómenos extremos (IPCC, 2007). La vulnerabilidad dependerá de tres factores: el grado de exposición, la sensibilidad y la capacidad de adaptación.

Esta definición implícitamente supone que cuanto mayor sea el conjunto de acciones encaminadas a la mitigación y adaptación, menor será la vulnerabilidad ante los efectos del cambio climático. En este sentido, el sector de servicios de agua potable y alcantarillado presenta un desafío importante para lograr que en la gestión de los organismos operadores de agua en México se considere la vulnerabilidad ante los efectos del cambio climático, para que se desarrollen acciones de corto-mediano plazo para adaptarse a estos efectos.

Para identificar la vulnerabilidad de un organismo operador pueden aplicarse dos enfoques (Danilenko, Dickson, & Jacobsen, 2010), “*top down*” y “*bottom up*”, a través de los cuales se analizan los principales factores que hacen susceptible a un organismo operador ante escenarios de cambio climático, es decir, se basan en una *evaluación de la vulnerabilidad* (Figura 2.7).

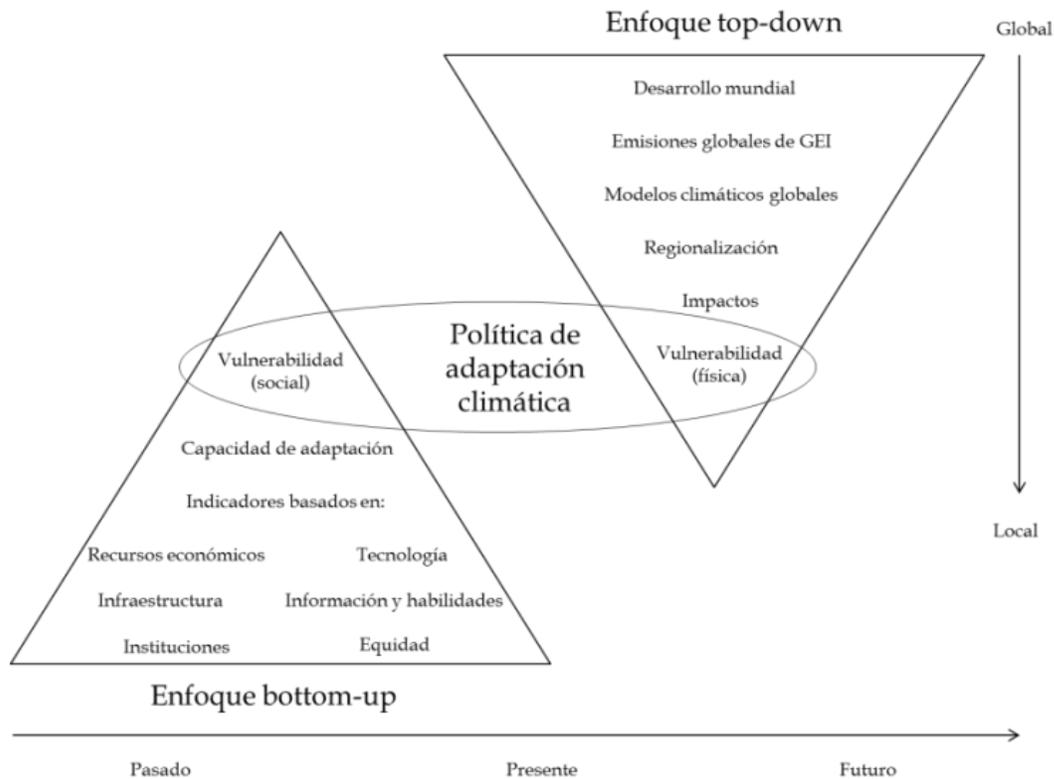


Figura 2. 5 Atributos de enfoque para evaluar la vulnerabilidad (Dessai & Hulme, 2004)

Enfoque “bottom up” se diseñó como una ruta para determinar los impactos del cambio climático en sistemas de agua. La idea central de este enfoque es que las empresas pueden trabajar con sus propios modelos de planeación de recursos hídricos, a fin de evaluar la vulnerabilidad de sus planes de suministro dentro de 20 o 50 años debido a los impactos del cambio climático (Cromwell, Smith, & Raucher, 2007).

Basados en los resultados generales de las investigaciones en materia de cambio climático, las empresas pueden identificar la probabilidad de rutas causa-efecto que podrían afectarle. Del mismo modo, los modelos desarrollados con recursos propios pueden ser aplicados para examinar los escenarios extremos, considerando decrementos en la recarga de acuíferos, incrementos en pérdidas por evaporación y cambio estacionales (Cromwell, Smith, & Raucher, 2007). De este modo el enfoque “bottom up”, permite que las empresas de agua evalúen sus planes actuales y valoren el

efecto del cambio climático en las mismas, de forma que evalúen su propia capacidad de adaptación ante los fenómenos climáticos.

Enfoque “top down”, esta metodología está caracterizada por el uso de Modelos de Circulación General (MCG) a nivel regional (Danilenko, Dickson, & Jacobsen, 2010). Se enfocan en la evaluación de los riesgos a largo plazo del cambio climático; sus principales elementos son los escenarios de cambio climático y los escenarios de base socioeconómica y ambiental (UNFCCC, 2007).

Uno de los problemas que existen con este enfoque es la escala de los modelos de cambio climático, ya que la información es generalmente proporcionada con resoluciones espaciales de varios miles de kilómetros cuadrados (Danilenko, Dickson, & Jacobsen, 2010), lo que dificulta su aplicación de manera puntual.

Los MCG simulan ciertos parámetros climáticos a futuro, tales como la concentración del dióxido de carbono, como resultado de diferentes escenarios generados por el IPCC. Los resultados de un MCG se presentan mediante una resolución espacial y temporal del sistema climático. Es decir mediante una malla de puntos, también llamada grid, cuyas coordenadas geográficas se encuentran uniformemente distribuidas, usualmente a una distancia de 2.5° o 1° (latitud y longitud). En cada punto, los MCG pronostican un valor de alguna variable atmosférica (usualmente precipitación y/o temperatura) (Rivas, Güitron de los Reyes, & Ballinas, 2010).

Aun considerando las diferencias entre estos dos enfoques, no significa que ambos sean contradictorios; de hecho, son complementarios en términos de políticas, pero son claramente diferentes en cuanto a los requerimientos de información climática (Dessai & Hulme, 2004).

Si bien la desventaja del enfoque “*top down*” radica en la escala, ya que estos proporcionan solo un promedio del cambio climático para cada cuadrícula y los climas reales pueden variar considerablemente dentro de varios cientos de kilómetros; la incertidumbre que implica el cambio climático puede ser compensada evaluando diversos modelos y escenarios de forma que en la mayoría de los casos la información resultante puede utilizarse para sustentar la toma de decisiones o planificación ante escenarios futuros desfavorables (EPA, 2010).

De acuerdo a estos dos enfoques, diversos organismos operadores de otros países han comenzado a evaluar el potencial de vulnerabilidad de sus sistemas ante escenarios como el cambio climático, además de proporcionar las técnicas (EPA, 2010) e ilustrar la forma en que las empresas pueden

entender y responder a los riesgos climáticos (EPA, 2011). En su mayoría estos análisis de vulnerabilidad se enfocan a la evaluación de demanda de agua e incorporan elementos de los dos enfoques anteriormente descritos.

Generalmente las evaluaciones de vulnerabilidad usan una variedad de herramientas y modelos que reflejan la situación de un sistema de agua en particular, por lo que no existe actualmente una única herramienta que evalúe la vulnerabilidad en sistemas de agua ante fenómenos como el cambio climático, sin embargo, es importante que se lleven a cabo estudios de este tipo a fin de mejorar el tipo de información y conocimiento disponible para sustentar la toma de decisiones que permitan hacer frente a las alteraciones en la calidad y cantidad de agua.

2.2.2 Adaptación a los efectos del cambio climático

A nivel mundial, se presentará un aumento en los problemas para la prestación del servicio de distribución de agua, ya que las variaciones esperadas de la precipitación y temperatura tendrán modificaciones en la disponibilidad de agua así como en la cantidad y calidad de la misma. Además, dado el incremento de la temperatura del agua y los cambios que ésta experimentará durante eventos extremos como inundaciones y sequías, se presentarán diversos impactos negativos en los ecosistemas, en la salud pública así como en la confiabilidad y operación de sistemas de suministro de agua para diferentes usos (Greenpeace, 2010). En este sentido es importante mencionar que las deficiencias que presentan los OOAPAS y que dificultan la prestación del servicio, se encuentra relacionada a diversos factores que no necesariamente se encuentran vinculados al cambio climático. La falta de disponibilidad de agua (superficial y/o subterránea), una demanda cada vez mayor y más irregular como consecuencia del crecimiento de la población en áreas concentradas, el crecimiento de la urbanización, la mayor intensidad del uso de agua para mejorar el bienestar general, y la necesidad de mejorar la gobernanza del agua, son variables que dificultan enormemente la prestación satisfactoria de los servicios de abastecimiento de agua (IPCC, 2008).

En este contexto, el cambio climático representa simplemente una carga adicional para los servicios de abastecimiento de agua potable. De forma que, incluso sin esta variable, los sistemas de abastecimiento de agua se enfrentan con el desafío de garantizar el servicio en muchas ciudades. Aunque a nivel local es difícil identificar los efectos del cambio climático, los efectos observados y las proyecciones constituyen un buen punto de partida para preparar el futuro.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) provee una guía de estrategias de adaptación para empresas de agua, que busca básicamente comprender como el cambio climático puede impactar las operaciones y que acciones pueden tomarse en los sistemas de agua para prepararse a dichos efectos. Los impactos son categorizados en diferentes grupos: cambios en el ecosistema, demanda y usos del servicio, deterioro de la calidad del agua, inundaciones y sequias (EPA, 2010). La figura 2.8 presenta cinco grupos de los principales efectos del cambio climático que pueden afectar a los organismos operadores:

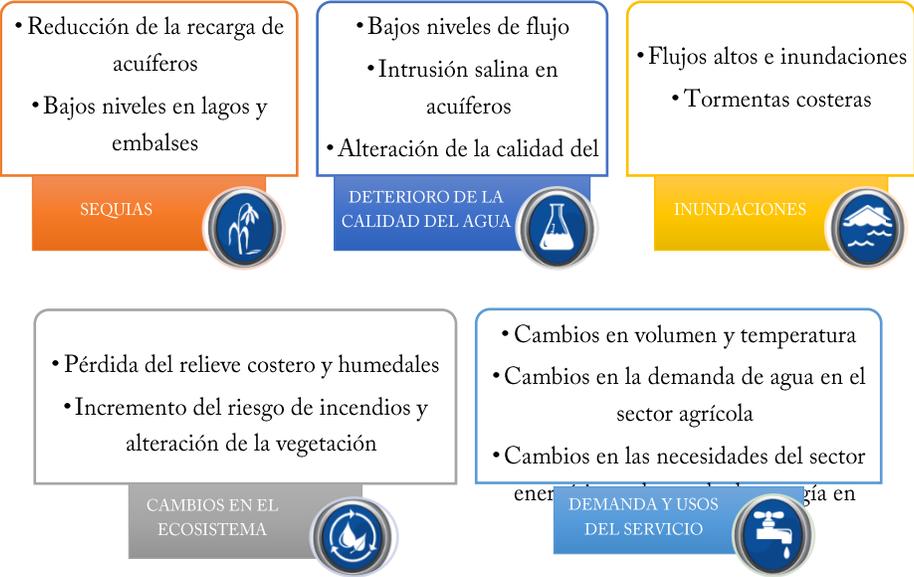


Figura 2. 6 Efectos del cambio climático en organismos operadores

Las tablas que se muestran a continuación, describen algunos de los efectos del cambio climático que pueden experimentar los organismos operadores en los aspectos de cambios en el ecosistema, la calidad del agua, inundaciones y sequías. Así mismo, se comentan algunas implicaciones que pueden originarse con los efectos mencionados.

Tabla 2. 2 Efectos del cambio climático: cambios en el ecosistema (EPA, 2010)

<p>1. Pérdida de relieve costero y humedales</p>	<p>La pérdida de humedales costeros puede reducir la barrera contra las tormentas costeras. <u>Implicaciones para OOPAS:</u> Aumento del riesgo por daño en plantas de tratamiento e infraestructura costera, como las instalaciones de conducción y sistemas de distribución, lo que a su vez causará la interrupción del servicio.</p>
<p>2. Incremento del riesgo de incendios y alteración de la vegetación</p>	<p>El escurrimiento y las inundaciones repentinas en zonas que presentaron incendios, incrementará la sedimentación en reservorios, reduciendo su capacidad y eficiencia ya que un incremento en la carga de contaminantes, como metales pesados y nutrientes, genera altos niveles de turbiedad y crecimiento de algas. Los cambios en la vegetación en zonas de recarga de acuíferos, disminuye la cantidad y calidad de los escurrimientos en dichas zonas, además de que junto con la presencia de lluvias y sequias, causa mayores tasas de erosión y mayor degradación en cuencas lo que ocasiona deterioro en la calidad del agua superficial (sedimentos, nutrientes, etc.) y reduce la capacidad de almacenamiento en las presas. <u>Implicaciones para OOPAS:</u> Aumento de los costos de tratamiento, disminución de la disponibilidad de agua y posibles daños en infraestructura por riesgo de incendios.</p>

Tabla 2. 3 Efectos del cambio climático: cambios en la calidad del agua (EPA, 2010)

<p>1. Bajos niveles de flujo y alteración de la calidad del agua</p>	<p>Una precipitación menor dará lugar a caudales menores, lo que puede conducir a la disminución de la calidad del agua por la reducción en la dilución de los contaminantes provenientes de descargas puntuales, pérdida en la capacidad de disolución de oxígeno en el agua por reducción de la turbulencia e incremento de la temperatura, así como el incremento en la temperatura del agua por incremento de la temperatura del aire y reducción de caudales lo que favorecería el crecimiento de algas. <u>Implicaciones para OOPAS:</u> Requerimientos adicionales de tratamiento en plantas de potabilización, aumentando la demanda de energía, los costos de operación y capital.</p>
<p>2. Intrusión salina en acuíferos</p>	<p>El aumento proyectado del nivel del mar combinado con el aumento de la demanda en zonas costeras, puede dar lugar a la intrusión salina en acuíferos costeros y estuarios. <u>Implicaciones para OOPAS:</u> Incremento de los costos de tratamiento en organismos operadores ubicados en zonas costeras o con tomas en estuarios cercanos a la línea de agua salada.</p>
<p>3. Alteración de la calidad del agua superficial</p>	<p>Los procesos biológicos de tratamiento de agua pueden verse afectados por cambios en la eficiencia de las floraciones microbianas, debido al alto contenido de algas y las temperaturas del influente en días calurosos. <u>Implicaciones para OOPAS:</u> Requerimiento de procesos adicionales de tratamiento que darían lugar a una mayor demanda de energía, costos operativos y nuevas inversiones.</p>

Tabla 2. 4 Efectos del cambio climático: inundaciones (EPA, 2010)

INUNDACIONES

<p>1. Flujos altos e inundaciones</p>	<p>Las inundaciones tendrán un efecto negativo en la infraestructura además de tener un efecto en la calidad del agua al incrementar el arrastre de partículas suspendidas y por ende un aumento de la turbiedad.</p> <p><u>Implicaciones para OOPAS:</u> Aumento de los costos de tratamiento e impactos directos en la infraestructura de servicios, tales como plantas de tratamiento, instalaciones de entrada, transporte de agua y sistemas de distribución además de conducir al desbordamiento en los sistemas combinados y agravar la capacidad de los sistemas de alcantarillado separado que ya podrían verse afectados por el influente e infiltración.</p>
<p>2. Tormentas costeras</p>	<p>Las tormentas tendrán un efecto directo en la infraestructura y aumentar el riesgo de intrusión salina.</p> <p><u>Implicaciones para OOPAS:</u> Las plantas de potabilización no suelen ser tan vulnerables como las plantas de aguas residuales, ya que a menudo se encuentran en elevaciones más altas. Sin embargo, las plantas desaladoras, serían vulnerables al incremento del nivel del mar y las mareas. La intrusión de agua salada en los sistemas de drenaje de aguas residuales puede provocar contraflujos o requerir mayores costos de bombeo.</p>

Tabla 2. 5 Efectos del cambio climático: sequías (EPA, 2010)

SEQUIAS

<p>1. Reducción de la recarga de acuíferos</p>	<p>El descenso de las precipitaciones y el incremento de la evaporación debido a las altas temperaturas, disminuirán los suministros de agua superficial y la recarga de acuíferos lo que aumentará el riesgo de intrusión salina.</p> <p><u>Implicaciones para OOPAS:</u> Aumento de los costos de tratamiento y extracción (al aumentar la profundidad de bombeo) de agua.</p>
<p>2. Disminución de niveles en lagos y embalses</p>	<p>El descenso de las precipitaciones y el incremento de la evaporación debido a las altas temperaturas, disminuirán los niveles en lagos y embalses disminuyendo la disponibilidad en fuentes superficiales.</p> <p><u>Implicaciones para OOPAS:</u> Dificultad para satisfacer las demandas de agua, especialmente en meses de verano, disminución de los flujos de diseño mínimos requeridos por la infraestructura y aumento de los costos de tratamiento por concentración de contaminantes en el influente</p>
<p>3. Cambios en la escorrentía</p>	<p>El aumento de la temperatura y el cambio en los patrones de precipitación alteraran la escorrentía estacional. Estos cambios podrían poner a prueba la capacidad de los embalses para mantener los caudales de escurrimiento, lo que podría causar escasez en el verano debido a los largos periodos de temporadas cálidas y secas y comprometer las metas del ecosistema. Del mismo modo una precipitación anual menor dará lugar a la disminución del flujo en diversos lugares, lo que puede ocasionar la concentración de contaminantes.</p> <p><u>Implicaciones para OOPAS:</u> Disminución en niveles de disponibilidad y aumento de los costos de tratamiento por deterioro de la calidad del agua.</p>

Considerando que los organismos operadores estarán expuestos en mayor o menor medida al cambio climático, estas entidades deberán formular como parte de su planeación, las medidas de adaptación que les permitan afrontar los efectos de este fenómeno. Cabe entonces, describir que el concepto de adaptación se entiende como el conjunto de iniciativas y medidas encaminadas a reducir la vulnerabilidad de los sistemas naturales y humanos ante los efectos reales o esperados de

un cambio climático (IPCC, 2007). La mitigación es la aplicación de políticas destinadas a reducir las emisiones de gases efecto invernadero (IPCC, 2007). De esta forma, mientras las actividades de mitigación de gases efecto invernadero tienden a reducir la magnitud del cambio climático, las actividades de adaptación tienden a reducir los impactos adversos que una determinada magnitud de calentamiento puede causar (Frankhauser, 1998).

A pesar que la mitigación y adaptación al cambio climático son claramente complementarias, difieren en aspectos importantes. Por un lado, los beneficios de la mitigación se espera que sean globales y a largo plazo, mientras que las inversiones en acciones de adaptación se espera que sean locales y a corto o mediano plazo. En consecuencia, mientras que la mitigación requiere una acción colectiva a nivel mundial y por lo tanto la solución de inmensos desafíos políticos, la adaptación se puede abordar a través de acciones locales (World Bank, 2008).

Si bien en materia hídrica se requieren acciones globales que minimicen los impactos en el ciclo hidrológico, a nivel local es necesario generar medidas a corto plazo que permitan hacer frente a los cambios en cantidad y calidad de agua destinada a satisfacer las necesidades de la población. Dichas acciones deben ser tomadas a través de entidades del mismo tipo, como son los sistemas de agua potable. Considerando que un plan de adaptación efectivo incluye un diverso conjunto de acciones, la EPA plantea tres categorías de estrategias o medidas de adaptación:

1. Estrategias de planificación: consideran el uso de modelos, investigación, formación, planificación de la oferta y la demanda, gestión de los recursos naturales, planeación del uso de suelo y acciones de colaboración a escala de cuencas hidrográficas y comunidades.
2. Estrategias operacionales: consideran mejoras en los niveles de eficiencia, monitoreo, inspecciones, conservación, gestión de la demanda, operaciones flexibles y estrategias de sustentabilidad.
3. Estrategias de inversión e infraestructura: consideran la construcción, diversificación de los recursos hídricos, reparaciones, mejoras y actualizaciones, construcción por etapas, adopción de nuevas tecnologías e infraestructura verde.

Las tablas 2.7, 2.8, 2.9, 2.10 y 2.11 presentan las medidas de adaptación ante sequias, alteración de la calidad del agua, inundaciones, cambios en el ecosistema así como demanda y usos del servicio, respectivamente.

Tabla 2. 6 Medidas de adaptación. Sequias (EPA, 2010)

SEQUIAS	
Planeación	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Desarrollar modelos que permitan comprender los posibles cambios en la calidad del agua y los costos que resultarían por los cambios en el tratamiento. ❖ Incorporar las proyecciones de cambio climático en el modelaje de acuíferos. ❖ Hacer uso de los modelos hidrológicos para proyectar los escurrimientos a fin de incorporar los resultados durante la planificación del suministro de agua. ❖ Incluir los impactos del cambio climático y posibles medidas de adaptación a la formación del personal. ❖ Participar en acciones de planeación dentro de la comunidad y colaboraciones regionales relacionadas con cambio climático.
Operación	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Monitoreo de las condiciones actuales del clima, incluyendo precipitación y temperatura. ❖ Financiar y facilitar la implementación de sistemas de reúso de agua, incluyendo el uso de aguas grises en casas y comercios. ❖ Reducir la demanda de agua para actividades agrícolas instalando equipos de riego con tecnología avanzada. ❖ Gestionar la demanda a través de la comunicación con el público y acciones de conservación del recurso. ❖ Conservación del agua y gestión de la demanda a través de la medición y aplicación de descuentos por la conservación del mismo.
Inversión e infraestructura	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Manejo integral de ecosistemas, tales como las cuencas forestales, franjas de vegetación y humedales a fin de regular los escurrimientos. ❖ Construcción de la infraestructura necesaria para el almacenamiento y recuperación de acuíferos (ya sea almacenamiento temporal o bancos de agua a largo plazo). ❖ Diversificación de las fuentes de suministro actual de agua, incluyendo reúso de agua, desalinización y captación de aguas pluviales. ❖ Ampliación de los recursos actuales a través del desarrollo de conexiones regionales que permitan el comercio de agua en tiempos de interrupción del servicio o escasez. ❖ Incremento de la capacidad de almacenamiento de agua, incluyendo la remoción de sedimentos para expandir la capacidad de los embalses existentes y construcción de nuevos embalses y/o presas. ❖ Aumentar o modificar las capacidades de tratamiento, a fin de hacer frente a cambios en la calidad del agua de nuevas fuentes de abastecimiento. ❖ Regular la demanda a fin de adaptarse a los bajos niveles en embalses y el decremento de los flujos estacionales. ❖ Construcción de sistemas de tratamiento de aguas residuales para su uso en industrias, energía, agricultura u hogares.

Tabla 2. 7 Medidas de adaptación. Alteración de la calidad del agua (EPA, 2010)

ALTERACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

Planeación	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Actualización de los modelos y planes de manejo y control de fuego en zonas propensas a incendios debido a las condiciones climáticas proyectadas. ❖ Aplicar los resultados de modelos de aumento del nivel del mar y tormentas costeras en mapas que permitan observar las inundaciones y estimar la intrusión salina en acuíferos y estuarios a fin de incluir dicha información en las actividades de planeación. ❖ Desarrollar modelos que permitan comprender los posibles cambios en la calidad del agua y los costos que resultarían por los cambios en el tratamiento. ❖ Modelado de las condiciones de acuíferos considerando la intrusión salina asociada al aumento del nivel del mar y evaluar la viabilidad de implementar barreras contra la intrusión salina. ❖ Incluir los impactos del cambio climático y posibles medidas de adaptación a la formación del personal. ❖ Participar en acciones de planeación dentro de la comunidad y colaboraciones regionales relacionadas con cambio climático.
Operación	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Implementar los planes de manejo de fuego en cuencas, tales como control de malezas, fuegos controlados y creación de brechas corta fuego. ❖ Controlar la calidad de embalses a través de la inversión en prácticas como la aireación a fin de minimizar la proliferación de algas debido a las altas temperaturas. ❖ Monitorear de las condiciones actuales del clima, incluyendo precipitación y temperatura así como las condiciones del agua superficial, incluyendo la calidad del agua en cuerpos receptores. ❖ Monitorear los cambios de vegetación en las cuencas hidrológicas. ❖ Financiar y facilitar la implementación de sistemas de reúso de agua, incluyendo el uso de aguas grises en casas y comercios, para reducir las descargas a cuerpos receptores. ❖ Reducir la demanda de agua para actividades agrícolas instalando equipos de riego con tecnología avanzada. ❖ Conservación del agua y gestión de la demanda a través de la medición y aplicación de descuentos por la conservación del mismo.
Inversión e infraestructura	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Manejo integral de ecosistemas, tales como las cuencas forestales, franjas de vegetación y humedales a fin de regular los escurrimientos. ❖ Implementar prácticas de manejo en cuencas para limitar el escurrimiento de contaminantes a los embalses. ❖ Implementar o adaptar medidas de control en fuentes de plantas de tratamiento en caso de alteración del flujo calidad del influente. ❖ Ampliación de los recursos actuales a través del desarrollo de conexiones regionales que permitan el comercio de agua en tiempos de interrupción del servicio o escasez. ❖ Diversificación de las fuentes de suministro actual de agua, incluyendo reúso de agua, desalinización y captación de aguas pluviales. ❖ Incremento la capacidad de almacenamiento de agua, incluyendo la remoción de sedimentos para expandir la capacidad de los embalses existentes y construcción de nuevos embalses y/o presas. ❖ Instalar presas de baja presión para separar la cuña salina de las tomas aguas arriba en el depósito de agua dulce. ❖ Implementar barreras y recarga de acuíferos para limitar los efectos de la intrusión salina. Considerar el uso de agua regenerada como barrera de intrusión salina. ❖ Aumentar la capacidad de recolección, tratamiento y descarga de aguas residuales y pluviales. ❖ Instalar sistemas de enfriamiento en el efluente.

Tabla 2. 8 Medidas de adaptación. Inundaciones (EPA, 2010)

INUNDACIONES

Planeación	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Integración de la modelación de inundaciones en los planes de uso de suelo. ❖ Llevar a cabo análisis de eventos de precipitación extrema para comprender los riesgos de impacto en los sistemas de recolección y tratamiento de aguas residuales. ❖ Aplicar los resultados de modelos de aumento del nivel del mar y tormentas costeras en mapas que permitan observar las inundaciones y estimar la intrusión salina en acuíferos y estuarios a fin de incluir dicha información en las actividades de planeación. ❖ Desarrollar modelos que permitan comprender los posibles cambios en la calidad del agua y los costos que resultarían por los cambios en el tratamiento. ❖ Ampliación de los recursos actuales a través del desarrollo de conexiones regionales que permitan el comercio de agua en tiempos de interrupción del servicio o escasez. ❖ Plan de suministro de energía alterna para apoyar las operaciones en caso de pérdida de energía. ❖ Adoptar mecanismos de aseguramiento y otros instrumentos financieros, como bonos de catástrofe para proteger a los organismos contra pérdidas financieras asociadas a la pérdida de infraestructura. ❖ Incluir los impactos del cambio climático y posibles medidas de adaptación a la formación del personal. ❖ Participar en acciones de planeación dentro de la comunidad y colaboraciones regionales relacionadas con cambio climático.
Operación	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Implementar políticas y procedimientos para reparaciones de daños después de las inundaciones. ❖ Monitoreo de las condiciones del agua superficial, como caudales y calidad del agua. ❖ Monitoreo e inspección de integridad de la infraestructura existente. ❖ Monitoreo de las condiciones actuales del clima, incluyendo precipitación y temperatura. ❖ Monitoreo de la calidad del agua y establecimiento de una línea base que permita evaluar la posible relación entre la calidad del agua y los últimos fenómenos meteorológicos y/o tendencias del clima.
Inversión e infraestructura	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Manejo integral de ecosistemas, tales como las cuencas forestales, franjas de vegetación y humedales a fin de amortiguar las inundaciones, regular niveles de sedimentos y nutrientes en flujos de agua. ❖ Establecer medios de protección contra las inundaciones, por ejemplo, muros de contención, diques y puertas retráctiles. ❖ Implementar o adaptar medidas de control en fuentes de plantas de tratamiento en caso de alteración del flujo calidad del influente. ❖ Diversificación de las fuentes de suministro actual de agua, incluyendo reúso de agua, desalinización y captación de aguas pluviales. ❖ Ampliación de los recursos actuales a través del desarrollo de conexiones regionales que permitan el comercio de agua en tiempos de interrupción del servicio o escasez. ❖ Incremento de la capacidad de almacenamiento de agua, incluyendo la remoción de sedimentos para expandir la capacidad de los embalses existentes y construcción de nuevos embalses y/o presas. ❖ Establecimiento de suministros de energía alterna para apoyar las operaciones en caso de pérdida de energía. ❖ Aumentar la capacidad de recolección, tratamiento y descarga de aguas residuales y pluviales. ❖ Aumentar la capacidad de tratamiento para hacer frente a los cambios de calidad del agua.

Tabla 2. 9 Medidas de adaptación. Cambios en el ecosistema (EPA, 2010)

CAMBIOS EN EL ECOSISTEMA

Planeación	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Estudio de respuesta de humedales a oleadas por tormentas. ❖ Actualización de los modelos y planes de manejo y control de fuego para incorporar los cambios en la frecuencia, magnitud y alcance de los mismos debido a las condiciones climáticas proyectadas. ❖ Aplicar los resultados de modelos de aumento del nivel del mar y tormentas costeras en mapas que permitan observar las inundaciones a fin de incluir dicha información en las actividades de planeación física del organismo operador y planes uso de suelo. ❖ Desarrollar modelos que permitan comprender los posibles cambios en la calidad del agua y los costos que resultarían por los cambios en el tratamiento. ❖ Plan de suministro de energía alterna para apoyar las operaciones en caso de pérdida de energía. ❖ Adoptar mecanismos de aseguramiento y otros instrumentos financieros, como bonos de catástrofe para proteger a los organismos contra pérdidas financieras asociadas a la pérdida de infraestructura. ❖ Incluir los impactos del cambio climático y posibles medidas de adaptación a la formación del personal. ❖ Desarrollar planes de restauración costera, incluyendo islas barrera, humedales costeros y dunas. ❖ Integrar los riesgos relacionados con el clima en los planes de mejora a fin de hacer frente a los riesgos actuales y futuros por aumento del nivel de mar y tormentas. ❖ Implementar políticas y procedimientos para reparaciones de daños después de las inundaciones.
Operación	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Implementar los planes de manejo de fuego en cuencas, tales como control de malezas, fuegos controlados y creación de brechas corta fuego. ❖ Monitoreo de las condiciones actuales del clima, incluyendo precipitación y temperatura. ❖ Monitoreo e inspección de integridad de la infraestructura existente. ❖ Monitoreo de las condiciones del agua superficial, como caudales y calidad del agua. ❖ Monitorear los cambios de vegetación en las cuencas hidrológicas.
Inversión e infraestructura	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Manejo integral de ecosistemas, tales como las cuencas forestales, franjas de vegetación y humedales a fin de amortiguar las inundaciones regular niveles de sedimentos y nutrientes en flujos de agua. ❖ Establecer medios de protección contra las inundaciones, por ejemplo, muros de contención, diques y puertas retráctiles. ❖ Implementar o adaptar medidas de control en fuentes de plantas de tratamiento en caso de alteración del flujo calidad del influente. ❖ Construcción de barreras contra inundaciones, presas de control, diques y toda la estructura relacionada con protección a la infraestructura. ❖ Diversificación de las fuentes de suministro actual de agua, incluyendo reúso de agua, desalinización y captación de aguas pluviales. ❖ Ampliación de los recursos actuales a través del desarrollo de conexiones regionales que permitan el comercio de agua en tiempos de interrupción del servicio o escasez. ❖ Incremento la capacidad de almacenamiento de agua, incluyendo la remoción de sedimentos para expandir la capacidad de los embalses existentes y construcción de nuevos embalses y/o presas. ❖ Establecimiento de suministros de energía alterna para apoyar las operaciones en caso de pérdida de energía. ❖ Implementar barreras y recarga de acuíferos para limitar los efectos de la intrusión salina. ❖ Aumentar la capacidad de tratamiento para hacer frente a los cambios de calidad del agua.

Tabla 2. 10 Medidas de adaptación. Demanda y usos del servicio (EPA, 2010)

DEMANDA Y USOS DEL SERVICIO

Planeación	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Desarrollar modelos que permitan comprender los posibles cambios en la calidad del agua y los costos que resultarían por los cambios en el tratamiento. ❖ Modelación de sistemas de alcantarillado para comprender los impactos de los altos niveles de infiltración de aguas subterráneas en la capacidad de la planta y costos operativos. ❖ Hacer uso de los modelos hidrológicos para proyectar los escurrimientos a fin de incorporar los resultados durante la planificación del suministro de agua. ❖ Plan de suministro de energía alterna para apoyar las operaciones en caso de pérdida de energía. ❖ Incluir los impactos del cambio climático y posibles medidas de adaptación a la formación del personal. ❖ Desarrollar planes de gestión energética para instalaciones clave. ❖ Participar en acciones de planeación dentro de la comunidad y colaboraciones regionales relacionadas con cambio climático. ❖ Actualización de planes de contingencia para sequías. ❖ Establecer una relación con la compañía eléctrica local y trabajar conjuntamente en estrategias para reducir los picos de la demanda estacional de agua y energía. ❖ Trabajar con compañías eléctricas para evaluar la viabilidad de utilizar agua tratada o métodos alternativos para satisfacer las necesidades de refrigeración de centrales eléctricas. ❖ Modelación de la demanda de agua en la agricultura bajo diferentes escenarios de cambio climático y tipos de cultivos. Considerar la evaluación del uso de agua tratada para riego. ❖ Comprensión de los modelos existentes de demanda regional de energía bajo futuros escenarios de cambio climático y crecimiento regional.
Operación	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Llevar a cabo pruebas de estrés en sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales para evaluar la tolerancia al calor. ❖ Monitoreo de las condiciones actuales del clima, incluyendo precipitación y temperatura. ❖ Monitorear las condiciones del agua superficial, incluyendo la calidad del agua en cuerpos receptores. ❖ Financiar y facilitar la implementación de sistemas de reúso de agua, incluyendo el uso de aguas grises en casas y comercios. ❖ Mejora de la eficiencia energética en operaciones (ejemplo, instalar sistemas de bombeo de mayor eficiencia energética) ❖ Optimización de las operaciones mediante la restricción de algunas actividades de alto consumo energético en tiempos de verano a fin de reducir la demanda de energía y trabajar con compañías eléctricas en la fijación de precios en temporadas bajas. ❖ Reducir la demanda de agua para actividades agrícolas instalando equipos de riego con tecnología avanzada. ❖ Prácticas de conservación del agua y gestión de la demanda para reducir la demanda de energía y los costos asociados. ❖ Prácticas de gestión de la demanda a través de la comunicación al público de acciones de conservación del agua. ❖ Conservación del agua y gestión de la demanda a través de la medición del recurso y aplicación de descuentos por la conservación del mismo.

Tabla 2. 11 Medidas de adaptación. Demanda y usos del servicio (EPA, 2010) (Continuación)

Inversión e infraestructura	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Manejo de ecosistemas, como humedales costeros a fin de atenuar el impacto del oleaje, tormentas e inundaciones. ❖ Manejo integral de ecosistemas, tales como las cuencas forestales, franjas de vegetación y humedales a fin de regular los escurrimientos. ❖ Manejo integral de ecosistemas, tales como las cuencas forestales, franjas de vegetación y humedales a fin de amortiguar las inundaciones regular niveles de sedimentos y nutrientes en flujos de agua. ❖ Reducir el influente e infiltración en sistemas de alcantarillado a través del incremento de medidas de control para disminuir el volumen de agua bombeada y tratada. ❖ Construcción de la infraestructura necesaria para el almacenamiento y recuperación de acuíferos (ya sea almacenamiento temporal o bancos de agua a largo plazo). ❖ Diversificar las opciones para complementar el suministro actual de agua, a fin de incluir aquellas que requieren menor energía para el tratamiento, transporte y distribución. ❖ Diversificación de las fuentes de suministro actual de agua, incluyendo reúso de agua, desalinización y captación de aguas pluviales. ❖ Ampliación de los recursos actuales a través del desarrollo de conexiones regionales que permitan el comercio de agua en tiempos de interrupción del servicio o escasez. ❖ Incremento de la capacidad de almacenamiento de agua, incluyendo la remoción de sedimentos para expandir la capacidad de los embalses existentes y construcción de nuevos embalses y/o presas. ❖ Aumentar la capacidad de recolección, tratamiento y descarga de aguas residuales y pluviales. ❖ Aumentar la capacidad de tratamiento para hacer frente a los cambios de calidad del agua y hacer frente a requerimientos de tratamiento más estrictos. ❖ Instalar sistemas de enfriamiento en el efluente. ❖ Regular la demanda a fin de adaptarse a la disminución del flujo en fuentes de agua. ❖ Construcción de sistemas de tratamiento de aguas residuales para su uso en industrias, energía, agricultura u hogares. ❖ Establecer fuentes de energía alterna con generación in-situ para apoyar las operaciones en caso de pérdida de energía.
--	--

Algunas de las medidas de adaptación propuestas por la EPA pueden formar parte de las acciones rutinarias de los organismos operadores, sin embargo, es importante destacar que para lograr una adaptación efectiva a los efectos del cambio climático a nivel local, las medidas de adaptación requieren no solamente de la actuación individual de los sistemas de agua; sino estas organizaciones requieren coordinarse con autoridades estatales y federales. Esta coordinación debe pensarse como parte de la planeación encaminada a la gestión integrada de los recursos hídricos de cualquier cuenca donde la ruta en la cual se debe caminar es establecida entre los tres niveles de gobierno y la sociedad; de tal forma que las acciones que se planeen a nivel local respondan a objetivos nacionales pero con impacto local.

3. COSTOS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

Anteriormente se ha hecho mención de los efectos posibles del cambio climático en los organismos operadores y de algunas medidas de adaptación a considerar para disminuir el impacto de los efectos en la operación de los sistemas. Si bien, la adaptación permite reducir los impactos adversos del cambio climático y mejorar los impactos positivos, esta adaptación tendrá costos y no impedirá todos los posibles daños. Por tanto; realizar una estimación de los costos de adaptación implica reconocer tres elementos (Frankhauser, 1998): 1) los costos de mitigación (reducen la totalidad del cambio), 2) los costos de adaptación (reducen los impactos del cambio) y 3) los impactos residuales que no pueden ser mitigados o adaptados.

De acuerdo al IPCC (2007), los costos de adaptación corresponden a los costos vinculados a la planificación, preparación, facilitación y aplicación de medidas de adaptación, incluidos los costos del proceso de transición. Estos costos dependerán de la magnitud del cambio climático y la capacidad de respuesta ante los efectos esperados. Por lo tanto, considerando que la respuesta de adaptación reduce la exposición futura de un receptor a los riesgos del cambio climático. Se puede pensar en la reducción del riesgo, como la eficacia de la respuesta de adaptación o, como los beneficios totales de adaptarse (Metroeconomica, 2004). La Figura 3.1 muestra que la reducción del riesgo viene dada por el impacto estimado del cambio climático en ausencia de adaptación, menos el impacto estimado con adaptación.

Se debe considerar que para cualquier decisión de adaptación ante las nuevas condiciones climáticas existen diferentes opciones que podrían llevarse a cabo, sin embargo, antes de poder evaluar las opciones es necesario definir el enfoque que marcará los objetivos y por lo tanto los costos económicos de la adaptación. La figura 3.1 presenta gráficamente el escenario de referencia relevante para la decisión de adaptación:

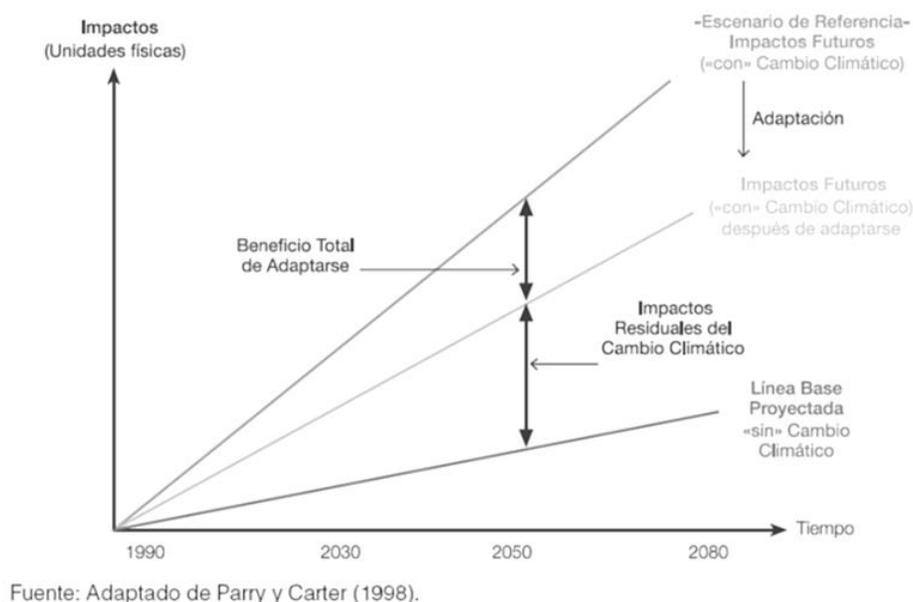


Figura 3. 1 Escenario de referencia relevante para la decisión de adaptación (Metroeconomica, 2004)

En la literatura existen numerosas tipologías para clasificar las medidas de adaptación de forma que se pueden clasificar de acuerdo al tiempo (anticipada o reactiva), a la visión (local vs. regional o corto plazo vs. largo plazo), al propósito (autónomo vs. planificado) y al agente adaptado. El IPCC diferencia entre adaptación autónoma y adaptación planificada; la adaptación autónoma es aquella que no constituye una respuesta consciente a estímulos climáticos, sino que es provocada por cambios ecológicos en los sistemas naturales y cambios en el mercado o el bienestar en los sistemas humanos (IPCC, 2001). Sin embargo, aunque no hayan sido ideadas expresamente para compensar el cambio climático, pueden reducir las repercusiones de ese cambio. La adaptación planificada resulta de una decisión política deliberada, basada en la comprensión de que las condiciones han cambiado o están por cambiar y de que se requieren medidas para volver a un estado deseado, mantenerlo o lograrlo pero no toma en cuenta específicamente el cambio y variabilidad del clima (IPCC, 2001).

La adaptación planificada se enfoca en bajar los costos haciendo frente a los problemas ex ante y la adaptación autónoma hace frente a los impactos adversos ex post. Lecocq y Shalizi (2007) explican que la adaptación autónoma es reactiva y debe considerar entre sus costos la combinación de gastos de sobrevivencia y gastos de reconstrucción. Es decir, utiliza recursos para hacer frente a

eventos en el momento que ocurren. Se debe considerar que este tipo de adaptación no es suficiente para restablecer completamente el status quo por los aspectos irrecuperables; por ejemplo pérdidas que son imposibles de restablecer (tales como paisajes, pérdida de biodiversidad o desaparición de bienes culturales) ó económicamente muy costosos de reparar. Estas pérdidas pueden ser referidas como daños residuales. De esta manera, para la adaptación autónoma, el costo total del cambio climático consistirá de cuatro componentes: costos de mitigación, costos de adaptación proactiva, costos de adaptación reactiva y daños residuales (Lecocq y Shalizi 2007).

Bajo este contexto, la adaptación planificada permitirá a un organismo operador prevenir posibles crisis en el futuro ante la alteración de las variables climáticas y desde el punto de vista económico, reducir los costos totales del cambio climático.

Considerando que el beneficio neto de la acción, en relación con el coste de no hacer nada es uno de los elementos clave que las organizaciones deberían tener en cuenta en cualquier contexto de toma de decisiones, la valoración de costos permite expresar en términos monetarios las consecuencias de la adaptación. Aunque se puede tener una variedad de opciones de adaptación, la valoración económica permite identificar aquella opción que proporciona el mejor resultado. Por lo tanto, las decisiones sobre la adaptación al cambio climático implican, inevitablemente, seleccionar y establecer prioridades entre los riesgos de cambio climático y las diferentes opciones disponibles para adaptarse a los riesgos que se consideren significativos. (Metroeconomica, 2004). La toma de decisiones en cualquiera de estos dos contextos implica elegir entre los impactos a que están expuestos los diferentes receptores vulnerables y el coste financiero de invertir en adaptación.

Este análisis de opciones de adaptación permitiría al responsable de la toma de decisiones aceptar o rechazar una determinada opción de adaptación, elegir una opción entre un numero variado de alternativas o bien elegir la escala y el tiempo adecuados para emprender una opción de adaptación.

3.1 Experiencias en evaluación de costos

A nivel mundial la estimación de los costos de adaptación es diversa y abarca una variedad de sectores, los principales son agricultura, agua, bosques, biodiversidad, energía, salud, elevación del

nivel de mar y eventos extremos. Las metodologías son diversas desde modelos de valoración integrada, modelos de equilibrio general computables y los de enfoque sectorial. Cada modelo tiene diversas características, es utilizado para distintos propósitos y conduce a distintos resultados. De acuerdo con Frankhauser (1998), la evaluación de los costos globales de adaptación puede dividirse en dos generaciones basadas en diferentes metodologías para el cálculo de los costos de adaptación.

La primera generación de trabajos se basan en las aportaciones del Banco Mundial con la elaboración del Marco de inversiones para la energía limpia (Investment Framework for Clean Energy and Development) (UNFCCC, 2007), que identifica la magnitud de las inversiones necesarias así como los costos de adaptación, que son calculados sobre la base de la sensibilidad de la inversión actual del clima. Los costos de inversión en capital futuro se calculan usando un factor de margen sobre el beneficio (mark-up). Este trabajo del Banco Mundial fue posteriormente actualizado por Stern (2006) empleando la misma metodología pero con diferentes mark-ups.

El trabajo y los resultados del Banco Mundial también fueron empleados por Oxfam (2007) y el Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo (UNDP, 2007). La evaluación de Oxfam añade tres elementos: 1) los costos de la comunidad a nivel de proyecto llevados a cabo por las Organizaciones No Gubernamentales (ONG's), 2) los costos de adaptación inmediata necesarias para los gobiernos de países desarrollados y 3) los costos de adaptación que no están incluidos por el Banco Mundial. Contrario a los estudios previos que consideran los costos actuales de adaptación, la UNDP evalúa las inversiones anuales requeridas para la adaptación del el año 2015 considerando el costo de tres elementos: 1) el costo de desarrollar inversiones para protegerse contra el clima, 2) el costo de fortalecer programas de protección social y 3) el costo de fortalecer los sistemas de respuesta a desastres.

Los estimadores de primera generación están fuertemente relacionados a los mark-ups seleccionados y pueden considerarse como estimadores de largo plazo, lo que les resta confiabilidad debido a que, aun cuando estas estimaciones están basadas en la misma metodología, éstas presentan un amplio rango de costos. Lo que señala el problema fundamental del enfoque, además de que existe limitada información empírica sobre la relación entre el nivel de inversión que se considera "sensible al clima" y el tipo de mark-ups aplicados (Parry, 2009). Sin embargo, no

obstante que se les denomina globales sólo consideran países subdesarrollados, estas deficiencias motivaron al cambio de metodología a una de segunda generación.

El conjunto de trabajos de segunda generación fue iniciada en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (United Nations Framework on Climate Change, UNFCCC por sus siglas en inglés) presentando los flujos financieros y de inversión necesarios para hacer frente al cambio climático (UNFCCC, Investment and Financial Flows to Address Climate Change, 2007). Las estimaciones de la UNFCCC examinan las inversiones y flujos financieros para adaptación al cambio climático para el año 2030 en cinco sectores: agricultura, bosques y pesquerías, oferta de agua, salud humana, zonas costeras e infraestructura.

Posteriormente, el Banco Mundial llevó a cabo un exhaustivo estudio de costos de adaptación global en el proyecto, “La Economía de Adaptación al Cambio Climático” (Economics of Adaptation to Climate Change, EACC por sus siglas en inglés) (World Bank, 2008). El estudio toma una aproximación similar al de UNFCCC pero considera más detalles en infraestructura así como los efectos de equilibrio general. Se centra en los costos de la adaptación proporcionando resultados a corto plazo y no calcula los beneficios económicos de la adaptación o los daños residuales.

En ambos tipos de enfoque, las estimaciones de costos y beneficios de adaptación tienen limitaciones que se resaltan en la cobertura de sectores particulares (forestal, agua, pesquerías, etc) así como en la escala geográfica. Por lo que el analista se ve obligado a elaborar supuestos que pueden ocasionar sesgos en la agregación de resultados finales (Watkiss, 2011).

A nivel nacional se han realizado algunos trabajos que generan una estimación de los costos que traerían dichos cambios en el clima. En los párrafos siguientes se describen algunos de los principales estudios que tratan el tema de estimación de los costos del cambio climático:

El titulado “Estudio sobre la economía del cambio climático en México” realizado por el Instituto Nacional de Ecología y la Universidad Iberoamericana (INE, 2007), es una primera aproximación a los costos del cambio climático en México. El estudio aplica distintos métodos de valoración económica para determinar el impacto del cambio climático en algunos sectores como la agricultura, ecosistemas, agua y salud.

En el sector hídrico, la valoración se determina a través del método de costos inducidos, de modo que evalúa cómo el cambio climático afecta la disponibilidad del agua de una cuenca. La pérdida económica se calcula multiplicando el precio del agua por el cambio en el volumen de agua aprovechable en determinadas cuencas.

Estudios más recientes como “La economía del cambio climático en México”, realizado por la Secretaría de Hacienda y Crédito Público, Medio Ambiente y Recursos Naturales y coordinado por Luis Miguel Galindo (Galindo, 2009) identifica, analiza y cuantifica los costos económicos del cambio climático en diversos sectores, además de proponer algunas medidas de adaptación y mitigación. El análisis del impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos del país se considera como el impacto de la temperatura sobre la oferta y la demanda de agua. La demanda de agua se estima con un modelo de sección cruzada, lo que permite identificar el aumento del consumo asociado a la variable de temperatura, mientras que el impacto en la disponibilidad de agua es estimada a través de un modelo econométrico con datos panel que considera la disponibilidad natural para cada una de las 13 regiones hidrológicas del país como una función de la temperatura y la precipitación. En base a los resultados de disponibilidad y consumo, se calcula un índice de vulnerabilidad y los costos asociados al cambio climático.

En organismos operadores de agua, los recursos disponibles sugieren una falta de orientación en materia de evaluación, ya que los trabajos realizados para tal fin son escasos, especialmente a nivel global. Uno de estos trabajos es la evaluación realizada por Kirshen (2007), en este trabajo se estiman los costos adicionales de infraestructura necesarios al año 2030 para proveer suficiente agua en cerca de 200 ciudades. Los costos estimados son los costos totales asociados a la construcción e infraestructura adicional necesaria (depósitos de almacenamiento, pozos, desalinización e infraestructura con fines de reúso de agua) para cubrir la demanda proyectada bajo escenarios de crecimiento poblacional, económico y el cambio climático esperado bajo dos escenarios.

Otros trabajos analizan bajo diversos enfoques los costos de las medidas de adaptación; algunos consideran los costos como el cambio en la calidad del agua, asumiendo que los costos de adaptación al cambio climático y crecimiento de la población representan los costos de tratamiento extras para cumplir con un determinado nivel de calidad del agua (Kirshen P. , 2000). Otras evaluaciones analizan los beneficios y costos de adaptarse al cambio climático a través del cálculo

del incremento de la capacidad de almacenamiento (Kirshen et al, 2005) (Callaway, 2007), el aumento de costos asociados a la desviación de agua y la construcción de nueva infraestructura ante un cambio en la disponibilidad por el retroceso de los glaciares (Vergara et al, 2007) o bien considerando bases de datos de costos promedios generados ya para diversas medidas de adaptación en participación con expertos, agencias y datos reportados por diversas empresas de abastecimiento de agua (NACWA-AWWA, 2009).

En México, los costos del cambio climático en el sector de abastecimiento público se han evaluado a través de los costos del suministro de agua (costos de producción) para consumo humano, los cuales son analizados con datos para las 32 entidades de la república y pronosticados para el 2050 y 2100 (Galindo, 2009). Los resultados obtenidos muestran una trayectoria de costos ascendente para los años 2050 y 2100 con un incremento de 25% y 4.12% respectivamente; dichos incrementos reflejan el efecto del cambio en las variables climáticas y el crecimiento de la población en los costos de producción.

En su mayoría, los estudios han incorporado información del clima en sus procesos de planificación utilizando un enfoque top-down el cual permite identificar los impactos del cambio climático y medidas de adaptación a partir de la información obtenida de Modelos de Circulación General. Sin embargo, aun conociendo las posibles medidas de adaptación en los sistemas operadores, no existe un consenso generalizado sobre la metodología que podría aplicarse para determinar los costos de adaptación en los organismos operadores.

No obstante, considerando el marco actual y problemática de los organismos operadores del país, la proyección de los costos de suministro de agua permite generar una aproximación a la cantidad de recursos que deberán invertirse para garantizar el abastecimiento adicional del recurso hídrico y los costos estimados que traería consigo un cambio en la temperatura media. Lo anterior será un reto para los sistemas de agua del país.

4. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE COSTOS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

Este capítulo describe detalladamente la propuesta metodológica para el cálculo de los costos de adaptación al cambio climático para Organismos Operadores de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. La metodología consta de tres elementos fundamentales: 1) un índice de vulnerabilidad, 2) una función de demanda *ad-hoc* que incorpora como variables independientes la tarifa, el ingreso, la temperatura y la precipitación; y 3) el cálculo de los costos asociados a los dos primeros elementos.

El primer elemento de la metodología se centra en una evaluación de la vulnerabilidad, que comprende el análisis de un conjunto de variables sensibles a la variabilidad natural del clima y el cambio climático. Esta evaluación se basa en el cálculo de un índice de vulnerabilidad que permite identificar los factores que disminuyen la capacidad de respuesta de un organismo operador de agua y para los cuales se plantean medidas de adaptación, enfocadas a mejorar el desempeño y operación del organismo operador.

El esquema metodológico en el que se basa la evaluación de costos de adaptación se presenta en la Figura 4.1 y cada una de las etapas se describe en los siguientes párrafos:

Índice de vulnerabilidad: dadas las condiciones geográficas, estado actual de los recursos hídricos y niveles de eficiencia del organismo operador, se calcula un índice de vulnerabilidad que permite evaluar las variables que ante un escenario de cambio climático podrían incrementar el nivel de susceptibilidad de un organismo operador.

Identificación de medidas de adaptación: considerando el nivel de vulnerabilidad y las variables que aumentan el nivel de susceptibilidad del organismo operador, se plantean un conjunto de escenarios que permitan evaluar el efecto de implementar mejoras físicas y administrativas en el organismo operador, a fin de incrementar su capacidad de adaptación.

Estimación de la demanda: para el organismo operador analizado se calcula una función de demanda entre cuyas variables exógenas debe estar el precio, el ingreso, la temperatura y la

precipitación. Los valores de demanda se calculan para las nuevas condiciones climáticas derivadas de los escenarios de cambio climático asumidos en el análisis de vulnerabilidad.

Índice de vulnerabilidad con adaptación: se definen los incrementos porcentuales de los indicadores de acuerdo a los escenarios planteados en la segunda etapa, estos incrementos pueden ser definidos a través de una meta, por ejemplo la media nacional o los niveles de desempeño del organismo operador menos vulnerable del país. Estos incrementos permiten evaluar el conjunto de opciones disponibles a través del índice de vulnerabilidad y definir la opción o escenario que proporciona el mejor resultado.

Evaluación de costos: Una vez evaluado el nivel de vulnerabilidad con la implementación de las medidas de adaptación, se calculan los costos asociados a dichas medidas. Los costos de adaptación se obtienen a partir de costos unitarios para cada una de las diferentes etapas consideradas en el proceso de producción de agua (producción, distribución, administración y comercialización) y la variación del volumen facturado y producido en cada uno de los escenarios planteados.



Figura 4. 1 Metodología para el cálculo de los costos de adaptación al cambio climático para Organismos Operadores de Agua Potable

4.1 Índice de vulnerabilidad

Antes de valorar económicamente las medidas de adaptación es necesario identificar y medir los efectos del cambio climático y una vez identificados, es posible determinar las medidas y su importancia económica expresadas en términos monetarios. La identificación y evaluación de los riesgos son requisitos previos para la valoración.

La respuesta del medio hidrológico al cambio climático es compleja y desde la perspectiva de evaluar sus efectos en el sector de agua potable, alcantarillado y saneamiento; el análisis de vulnerabilidad permite valorar y determinar la capacidad de un organismo operador para adaptarse a dichos efectos.

El análisis de vulnerabilidad en organismos operadores generalmente está enfocado a evaluar los cambios de la demanda y disponibilidad de agua a través de proyecciones obtenidas de Modelos de Circulación General.

En el campo de recursos hídricos se han desarrollado diversos índices que proveen una evaluación cuantitativa de la vulnerabilidad. En ocasiones la evaluación de la vulnerabilidad incorpora únicamente aspectos físicos que consisten en índices de disponibilidad o presión del recurso (Lu, 2004) (Vorosmarty et al, 2000). Sin embargo, con el desarrollo de evaluaciones integrales, se han realizado diversos análisis y se han propuesto otro tipo de índices que difieren en el enfoque utilizado para la generación de indicadores, adoptando un enfoque causa-efecto (UNEP, 2008), o bien la integración de factores humanos, sociales, políticos y físicos (Sullivan & Meigh, 2005).

En México, algunos de los análisis de vulnerabilidad planteados se han enfocado al estudio y evaluación de aspectos críticos y tendencias del agua en diversas regiones (INE, 2002) así como análisis orientados a evaluar los efectos del cambio climático en la disponibilidad del agua de acuerdo a factores de disponibilidad, presión, contaminación, temperatura y precipitación (INE-IMTA-SEMARNAT, 2008). El estudio más reciente denominado “La Economía del Cambio Climático” (Galindo, 2009), estima un índice de vulnerabilidad de acuerdo al efecto de los cambios de temperatura y precipitación en la disponibilidad natural y demanda de agua a fin de obtener un rango de variación del posible incremento del índice de acuerdo a las variaciones entre escenarios de 2007 y un escenario de 2050 y 2100 con cambio climático.

Bajo este contexto, un análisis de vulnerabilidad que integre las proyecciones climáticas y el enfoque cuantitativo utilizado en el marco de recursos hídricos, permitirá estimar el efecto de los

impactos del cambio climático y evaluar las diferentes dimensiones de la problemática en los organismos operadores que favorecen el incremento de la vulnerabilidad.

Así, considerando la disponibilidad de información, los conceptos planteados por el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático y la guía metodológica para la construcción de indicadores compuestos propuesta por la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) (Naro et al, 2005), se plantea evaluar la respuesta de los organismos operadores al cambio climático través de un índice numérico adimensional que permita valorar la susceptibilidad y el nivel de respuesta con base a tres componentes; grado de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación (figura 4.2).



Figura 4. 2 Factores de vulnerabilidad (IPCC, 2007)

Considerando estos tres factores se generó un índice que permitiera evaluar de forma individual el grado de vulnerabilidad en un organismo operador basado en la agregación lineal y ponderada de dichos factores, siguiendo la metodología de la figura 4.3.

$$I_v = GE + SE + CA \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde I_v es el índice de vulnerabilidad, GE es el grado de exposición, SE es la sensibilidad y CA es la capacidad de adaptación.



Figura 4. 3 Construcción del índice de vulnerabilidad (Naro et al, 2005)

4.1.1 Selección de indicadores

Los indicadores que se encuentran asociados al termino de vulnerabilidad y que plantea el IPCC son: grado de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación (IPCC, 2007). De acuerdo a los indicadores que plantea el IPCC, se determinó el conjunto de variables que permitieran evaluar cada uno de los indicadores. En los siguientes párrafos se describen tanto los indicadores como las variables:

- *Grado de exposición*: se refiere a la magnitud y escala de variación del clima al cual se está expuesto;
- *Sensibilidad*: es el nivel de susceptibilidad de un sistema a los efectos del cambio climático;
- *Capacidad de adaptación*: es la habilidad de un sistema para ajustarse a diversos efectos del cambio climático con el propósito de aprovechar potenciales beneficios o bien, afrontar los retos que se impongan.

Con base en lo anterior, se obtuvo información del PIGOO, la cual es proporcionada por organismos operadores de forma voluntaria para que sea analizada y evaluada. Sin embargo, debido que existen organismos con distinto desarrollo de capacidades para generar la información, la selección de las variables para elaborar los indicadores se basó en la relevancia, calidad y disponibilidad de información de un conjunto de 14 organismos operadores del país que presentaron homogeneidad en los datos. La tabla 4.1 muestra la selección de indicadores para cálculo de la vulnerabilidad.

Tabla 4. 1 Selección de Indicadores de vulnerabilidad

Factores de vulnerabilidad	Variables	Indicador	Fuente de información
a) Grado de exposición	Temperatura	Temperatura promedio anual (°C)	(Martínez Austria & Patiño Gómez, 2010)

Factores de vulnerabilidad	Variables	Indicador	Fuente de información
	Precipitación	Precipitación promedio anual (mm)	
b) Sensibilidad	Población/Ingreso/Precio (Demanda)	Consumo (l/h/d)	(IMTA, 2009)
	Confiabilidad de infraestructura	Grado de confiabilidad: Gastos de mtto./Ingreso total	(IMTA, 2009)
	Relación Demanda-Oferta	Demanda/Oferta	(IMTA, 2009)
	Presión hídrica	Grado de presión (%): Vol. Concesionario/Agua renovable	(CONAGUA, 2011)
	Eficiencia económica	Tarifa/Costos de producción	(IMTA, 2009)
c) Capacidad de adaptación	Desempeño	Eficiencia física (%)	(IMTA, 2009)
		Eficiencia comercial (%)	(IMTA, 2009)

En los párrafos siguientes se describe con mayor detalle cada uno de los indicadores seleccionados, así como su importancia en la evaluación de vulnerabilidad:

a) Grado de exposición

Precipitación y temperatura: El descenso de las precipitaciones y el incremento de la evaporación debido a las altas temperaturas causará efectos sustanciales en la disponibilidad del recurso y en la calidad de agua, lo que implicaría aumento de costos de operación y generaría dificultad para satisfacer las crecientes demandas de agua.

b) Sensibilidad

Consumo: Representa el consumo doméstico medido del que dispone una persona para sus necesidades diarias. Considerando el resultado de los futuros cambios climáticos, un incremento de la demanda de agua se traduce en mayores costos de operación que sumados a la problemática de escasez de agua y crecimiento de la población incrementan el grado de presión sobre los recursos hídricos y por consiguiente el nivel de vulnerabilidad del organismo operador.

Grado de confiabilidad: Representa los gastos de mantenimiento en relación al ingreso total del organismo operador. Considerando que las redes e infraestructura requieren mantenimiento y rehabilitación apropiada. Si estas medidas no son efectivas y rutinariamente implementadas, el periodo de vida de la infraestructura y redes será excedida de forma que bajo fenómenos como el

cambio climático resultaran desproporcionados y constantes incrementos en los costos de mantenimiento.

Demanda/Oferata: Representa una relación entre el consumo y la capacidad instalada en las fuentes de abastecimiento, de forma que es un indicativo de la disponibilidad del recurso. Bajo un escenario de disminución de los suministro de agua superficial y la recarga de acuíferos por descenso de las precipitaciones se dificulta la capacidad de un organismo operador para cubrir los consumos mínimos requerimientos por la población.

Grado de presión: Representa una relación entre el aprovechamiento del agua para diferentes usos (agrícolas, industriales, humanos) respecto a la disponibilidad superficial y subterránea por región, lo que indica el grado de presión que se ejerce sobre los recursos hídricos. Bajo un escenario de cambio en la disponibilidad, se intensificaría la competencia entre los distintos usos lo que podría aumentar el grado de presión de los recursos y generar deficiencias en el suministro de agua.

Tarifa/Costos de producción: Representa una relación entre las tarifas de agua y el costo que tiene proporcionar esa cantidad de agua (costos de mantenimiento, operación y administración). Ya que las tarifas no necesariamente reflejan el costo que tiene para un Organismo Operador proporcionar determinado volumen de agua, dicha relación refleja el nivel de subsidio en las tarifas domésticas que ante escenarios de cambio climático podría aumentar en relación a los costos de operación e inducir a un incorrecto uso del recurso.

c) Capacidad de adaptación

Eficiencia física: Representa el cociente entre el volumen de agua facturado entre el volumen de agua producido, es indicativa no sólo de la capacidad administrativa (en facturación y medición) de los organismos operadores, sino una condición crucial para el uso sostenible del agua: las pérdidas en el sistema de distribución, tanto por el mal estado de la red, como por robos y agua no contabilizada.

Eficiencia comercial: Representa el cociente del primer importe recaudado dividido entre el importe del agua facturada por el suministro del agua, es el indicador simple que de manera más cercana valora el desempeño total de los organismos operadores, tanto en dimensiones administrativas, como físicas.

4.1.2 Normalización de datos

Dado que los indicadores seleccionados para la construcción del índice valoran dimensiones diferentes y por lo tanto están medidos en distintas escalas y unidades, se hizo necesario normalizar la información para que fuera posible su agregación de manera comparable.

La normalización de datos consiste en transformar los resultados de los indicadores en una nueva escala empleando la distancia entre los valores máximos y mínimos que el indicador adquiere y se obtiene con la siguiente ecuación:

$$Vn = \frac{(Vo - Vmin) \cdot (Qmax - Qmin)}{(Vmax - Vmin)} + Qmin \quad (\text{Ec. 2})$$

en donde Vn es el valor normalizado, Vo es el valor original, $Vmax$ es el valor máximo original, $Vmin$ es el valor mínimo original, $Qmax$ es el valor máximo del nuevo intervalo y $Qmin$ es el valor mínimo del nuevo intervalo. El intervalo propuesto corresponde a una escala de 1 a 10, teniendo en cuenta que el 10 corresponde al valor del indicador que representa un mayor grado de vulnerabilidad mientras que el 1 representa el valor con menor grado de vulnerabilidad.

4.1.3 Ponderación

La ponderación supone la necesidad de establecer diferentes factores de peso que den cuenta de la importancia relativa de cada indicador sobre el índice. El peso de cada indicador varía de acuerdo a las condiciones del organismo operador analizado, se asignó la misma jerarquía a todos los indicadores a fin de ver reflejada su importancia una vez calculado el índice. Sin embargo, a fin de representar y dar importancia a la escala obtenida para cada indicador, se definieron 3 rangos partiendo de los valores máximos y mínimos del total de los organismos operadores analizados. Dichos rangos representan diferentes niveles de vulnerabilidad y tiene un efecto diferente en el cálculo del índice, por lo tanto se definió una ponderación para cada rango definido dependiendo del grado de vulnerabilidad que represente. La asignación de ponderaciones se muestra en la tabla 4.2.

Tabla 4. 2 Asignación de ponderaciones

Ponderación	Grado de vulnerabilidad
1	Bajo
2	Medio
3	Alto

El valor normalizado de cada indicador debe de ser multiplicado por la ponderación a fin de que el nuevo valor sea representativo del efecto que tiene el indicador en el índice de vulnerabilidad. El valor ponderado se obtiene con la siguiente ecuación:

$$Vp = Vn \cdot P \quad (\text{Ec. 3})$$

en donde Vp es el valor ponderado, Vn es el valor normalizado y P es la ponderación.

4.1.4 Agregación

Una vez determinada la ponderación se procede a agregar todos los indicadores para generar el índice de vulnerabilidad. El método utilizado representa una agregación lineal ponderada que consiste en una suma de los valores ponderados obtenidos de cada indicador, los cuales finalmente representan la suma del grado de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación de acuerdo a las características de cada organismo operador. El índice de vulnerabilidad se obtiene con la siguiente ecuación:

$$I_v = \sum_{i=1}^N W_i \cdot Vn_i \quad (\text{Ec. 4})$$

en donde I_v es índice de vulnerabilidad, W_i es la ponderación del indicador i y Vn_i es el valor normalizado del indicador i . La tabla 4.3 muestra la normalización y ponderación de rangos.

Tabla 4. 3 Normalización y ponderación de rangos

Factores de vulnerabilidad	Indicador	Rango		Ponderación
		Real	Normalizado	
Grado de exposición	Temperatura promedio anual (°C)	17.0 – 22.0	1.00 – 4.46	1
		22.0 – 26.0	4.46 – 7.23	2
		26.0 – 30.0	7.23 - 10.00	3
	Precipitación promedio anual (mm)	100.0 – 750.0	10.00 – 7.00	1
		750.0 – 1400.0	7.00 – 4.00	2
		1400.0 – 2050.0	4.00 - 1.00	3
Sensibilidad	Consumo (l/h/d)	100 – 150	1.00 - 2.29	1
		150 - 300	2.29 - 6.14	2
		300 - 450	6.14 -10.00	3
	Grado de confiabilidad: Gastos de mtto./Ingreso total	0 - 0.15	10.00 – 7.00	3
		0.15 - 0.30	7.00 – 4.00	2
		0.30 - 0.45	4.00 – 1.00	1
	Demanda/Oferta	0.20 - 0.40	1.00 – 3.25	1
		0.40 - 0.70	3.25 – 6.63	2
		0.70 – 1.0	6.63 – 10.00	3
	Grado de presión (%): Vol. Concesionado/Agua renovable	0 - 20	1.00 - 2.50	1
		20 - 40	2.50 – 4.00	2
		40 - 120	4.00 - 10.00	3
Tarifa/Costos de producción	0 - 1.0	10.00 – 6.40	3	
	1.0 – 1.75	6.40 – 3.70	2	
	1.75 – 2.50	3.70 – 1.00	1	
Capacidad de adaptación	Eficiencia física (%)	0.40- 0.50	10.00 – 8.50	3
		0.50 – 0.70	8.50 – 5.50	2
		0.70 – 1.00	5.50 – 1.00	1
	Eficiencia comercial (%)	0.40- 0.50	10.00 – 8.50	3
		0.50 – 0.70	8.50 – 5.50	2
		0.70 – 1.00	5.50 – 1.00	1

Para fines de comparación, en la Tabla 4.4 se presentan los resultados obtenidos de algunos organismos operadores del país de acuerdo a datos de 2009. Como lo muestra la tabla 4.1, los OOAPAS de las ciudades de Hermosillo, Puebla, Veracruz, Zacatecas y Tampico, son los más sensibles al cambio climático. Sin embargo, Veracruz se ve favorecido por sus niveles de desempeño, que si bien, no son los más altos del país, les permiten reducir su vulnerabilidad, ya

que ante un escenario de cambio climático su potencial de adaptación es mayor. Por su parte, Hermosillo, Puebla, Zacatecas y Tampico requerirán herramientas y conocimientos para hacer frente a los desafíos de operación regular así como las operaciones bajo condiciones climáticas. Este grupo de OOAPAS es el que registra la mayor diferencia entre la planificación sistemática del cambio climático, la adaptación y la falta de ella.

Los OOAPAS de Gómez Palacio y Campeche presentan riesgos climáticos bajos, sin embargo, estos organismos que operan al margen, pueden ser desafiados por su baja capacidad de adaptación ya que pequeños cambios climáticos pueden tener un impacto importante.

Tabla 4. 4 Resultados de índice de vulnerabilidad (valores ponderados)

Factores de vulnerabilidad		Campeche	Ensenada	G. Palacio	Hermosillo	Puebla	Tampico	Veracruz	Zacatecas
Grado de exposición	Temperatura	28.03	11.44	4.05	11.28	9.56	23.04	25.12	3.76
	Precipitación	9.49	27.55	25.16	26.25	9.91	22.25	2.35	25.37
	SUBTOTAL	37.52	38.99	29.21	37.53	19.47	45.29	27.47	29.13
Sensibilidad	Demanda	7.36	1.18	2.27	8.09	1.51	20.92	18.68	9.37
	Confiabilidad de la infraestructura	1.51	11.94	1.88	25.55	25.51	3.62	25.43	26.16
	Disponibilidad	6.57	11.87	8.52	6.75	9.89	26.15	12.59	7.28
	Presión hídrica	1.69	19.49	12.14	23.39	14.11	2.42	1.39	13.96
	Eficiencia económica	19.43	20.71	8.75	22.13	23.33	21.71	21.54	8.19
	SUBTOTAL	36.56	65.19	33.56	85.91	74.35	74.82	79.63	64.96
Capacidad de adaptación	Eficiencia física	3.72	3.81	15.01	15.10	15.21	15.07	4.35	14.48
	Eficiencia comercial	16.45	4.05	3.35	3.50	4.72	4.49	1.55	3.95
	SUBTOTAL	20.17	7.86	18.36	18.60	19.93	19.56	5.90	18.43
INDICE DE VULNERABILIDAD		96.7	103.4	83.1	132.1	111.2	130.3	103.7	114.8

Si bien, un organismo operador de agua puede presentar distintos grados de vulnerabilidad dependiendo la variable analizada, un organismo operador que presente un desempeño “aceptable” en la prestación de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento, puede haber desarrollado capacidades para afrontar los efectos del cambio climático, tomando en consideración la existencia de excedentes de ingresos disponibles para invertirse en mejoras a la operación e infraestructura.

El cálculo del índice de vulnerabilidad es una herramienta que permitirá plantear aquellas variables que pueden poner a prueba la capacidad de respuesta de la organización y posteriormente evaluar los costos que implican plantear un conjunto de medidas enfocadas a reducir dicha vulnerabilidad.

El objetivo es que los organismos operadores incorporen los resultados del análisis de vulnerabilidad en el proceso de planificación, que bajo el enfoque de cambio climático implica definir impactos, evaluar sus efectos (a través de un análisis de vulnerabilidad), así como las diferentes alternativas disponibles para adaptarse a los impactos que se consideran significativos además del costo económico que implica invertir en medidas de adaptación que permitan minimizar dichos impactos.

4.2 Identificación de medidas de adaptación

El índice de vulnerabilidad permite evaluar y sintetizar el nivel de susceptibilidad de un organismo operador ante un escenario de cambio climático teniendo en consideración 1) el grado de desarrollo que posea como organización, 2) su situación geográfica, 3) las fuentes de agua y su disponibilidad, 4) la cantidad de habitantes a servir, 5) el nivel socioeconómico, entre otros aspectos. Este conjunto de variables puede poner a prueba la capacidad de respuesta de la infraestructura existente ante los efectos de cambio climático, pero más aún, la capacidad de organización para prever, planear y tomar decisiones que coadyuven en la adaptación. Bajo este contexto, se plantean un conjunto de escenarios que permitan evaluar el efecto de implementar mejoras físicas y administrativas en el organismo operador, a fin de incrementar su capacidad de adaptación o bien disminuir su nivel de vulnerabilidad. El escenario de referencia o base se define

en este contexto por la situación que supone crecimiento sin cambio climático y a partir del cual se medirán la eficacia de las respuestas de adaptación y el costo que implica mejorar el desempeño del organismo operador. Los escenarios planteados se presentan en la figura 4.4 y se describen en los siguientes párrafos:

Escenario 1 (Escenario base)

En el escenario de referencia o base (también se denomina caso sin cambio climático) no se considera ninguna inversión económica en las variables que intervienen en el cálculo del índice, únicamente se satisface la demanda dado el crecimiento esperado de las variables: nivel de precios, Producto Interno Bruto y población.

Escenario 2 (Escenario con cambio climático)

En el escenario 2, las variables de sensibilidad y capacidad de adaptación permanecen constantes a excepción de la demanda en el que los volúmenes consumidos se calculan para las nuevas condiciones climáticas derivadas de los escenarios de cambio climático empleados. En este trabajo se empleó el escenario de cambio climático SRES-A2 generado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (Martínez Austria & Patiño Gómez, 2010). El IMTA consideró dos escenarios de cambio climático más probables (A1B y SA2) en tres horizontes de tiempo (2030, 2050 y 2100) y para la precipitación se estimaron 23 modelos atmosféricos de circulación general en una malla regular de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. En este trabajo se seleccionó el escenario de emisión SRES-A2, dado que las variaciones estacionales proyectadas son lo suficientemente significativas para anticipar que no solo se presentarán cambios importantes en los valores totales de precipitación y temperatura, sino también en la variabilidad estacional de ambas variables. La diferencia entre los costos generados en este escenario y el resto representaran los costos de adaptación al cambio climático.

Escenario 3 (Incremento de la eficiencia comercial)

En el escenario 3 se considera el aumento de la eficiencia en cobranza a través de la mejora en el sistema de lectura, facturación y cobro lo que representa un aumento en los costos de producción e ingresos.

Escenario 4 (Incremento de la eficiencia física)

En el escenario 4 se considera que se realizan mejoras en la infraestructura a fin de disminuir el volumen de agua no contabilizada, lo que implica aumento en los costos de producción que se cubren en la totalidad con el incremento de las tarifas.

En términos generales, las mejoras administrativas y operativas, y su efecto en el nivel de vulnerabilidad de determinado organismo operador se evalúa estimando la demanda y recalculando el índice de vulnerabilidad bajo estas nuevas condiciones.

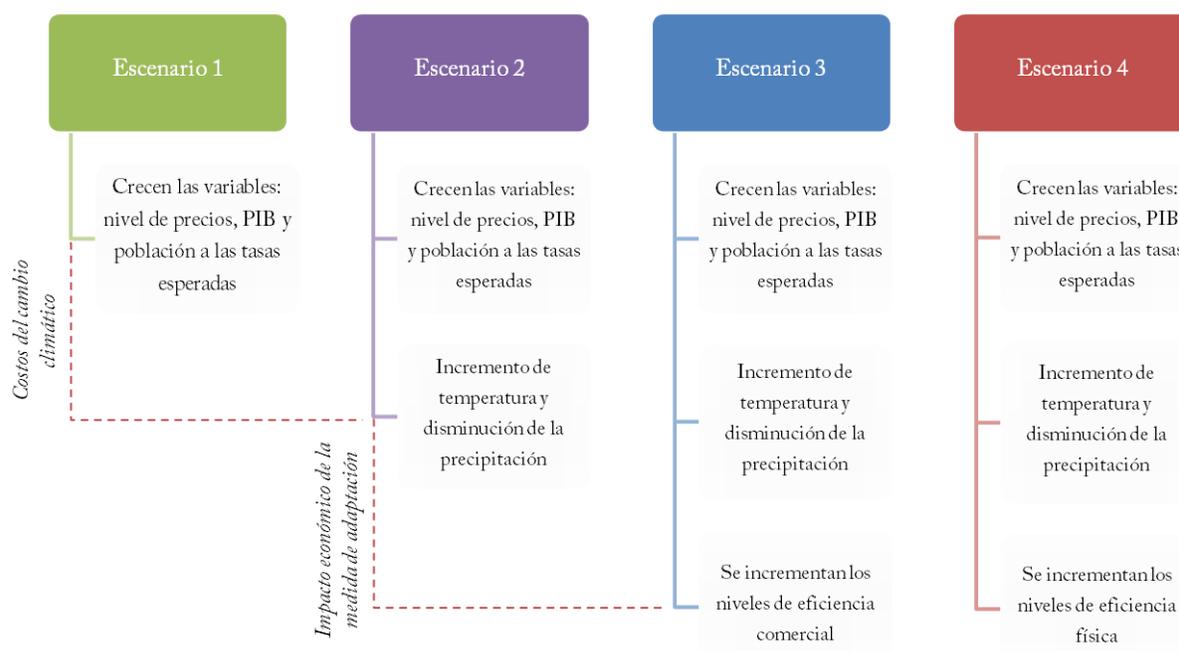


Figura 4. 4 Identificación de medidas de adaptación (escenarios)

4.3 Estimación de la demanda

El incremento de la población en un país trae aparejada mayor demanda de bienes servicios, entre los más importantes están los públicos, pues de ellos depende en buena medida la calidad de vida y el bienestar de las personas. Si bien el crecimiento de la economía puede satisfacer con facilidad la solicitud creciente de muchos bienes y servicios, existen los que están limitados a la disponibilidad de recursos naturales y por lo tanto resienten de manera particular el aumento demográfico, tal es el caso del agua (Salazar et al, 2010).

Considerando que el crecimiento demográfico así como menor disponibilidad del recurso agua, obligará a los organismos operadores a aumentar y/o mejorar la infraestructura, además impondrá un reto que implica incrementar la capacidad para gestionar los servicios de captación, suministro y tratamiento de agua. Es por ello que la estimación de la demanda busca bajo los escenarios descritos en el punto anterior, determinar si el volumen de agua a consumirse en un futuro requerirá nuevas fuentes de abastecimiento, o bien, el efecto de implementar medidas que favorezcan una gestión más eficiente le permitirán cubrir los consumos requeridos.

4.3.1 Especificaciones del modelo

La estimación de la demanda se basa en un análisis de regresión lineal ya que permite investigar la relación estadística que existe entre una variable dependiente con una o más variables independientes. Es decir, la cantidad de agua consumida se considera como una función del precio, del ingreso y de variables climatológicas que influyen en el consumo, por lo tanto la especificación del modelo está dada por la siguiente ecuación:

$$Q_{CON} = \beta_1 PRE_{PROM} + \beta_2 PIB + \beta_3 PREC_{PROM} + \beta_4 TEMP_{PROM} + \varepsilon \quad (\text{Ec. 5})$$

en donde Q_{CON} es la cantidad de agua consumida, PRE_{PROM} es la tarifa media por metro cubico, PIB es el Producto Interno Bruto, $PREC_{PROM}$ es la precipitación promedio, $TEMP_{PROM}$ es la temperatura promedio, β es el parámetros de regresión y ε es el termino de error.

La variable PRE_{PROM} indica la sensibilidad de la demanda ante cambios de esta variable y se espera que se presente una relación negativa dado que a mayor precio la cantidad demandada es menor. Las variables $LPIB$, $PREC_{PROM}$ y TEM_{PROM} responden a la necesidad de incluir el ingreso y los cambios climáticos existentes en la entidad y se espera que las correlaciones de estas variables resulten positivas dado que a mayor ingreso mayor demanda y a mayor temperatura se consume una mayor cantidad de agua.

Dada la falta de información desagregada por sectores, el análisis de la demanda parte de datos que se basan en el consumo total de la ciudad; así, la cantidad de agua consumida se calcula como la relación entre el volumen facturado y la población atendida. Considerar el volumen facturado como el consumo total supone que existen pérdidas en la red debido a fugas y tomas clandestinas,

por lo tanto el volumen obtenido corresponde al líquido consumido en realidad. La ecuación para determinar el Q_{CON} es la siguiente:

$$Q_{CON} = Vf/Pa \quad (\text{Ec. 6})$$

en donde Vf es el volumen facturado y Pa es la población atendida.

4.3.2 Análisis de regresión

El análisis de regresión es el estudio de la dependencia de la variable dependiente respecto a una o más variables independientes o explicativas y se realiza con el objeto de estimar el valor promedio poblacional de la primera en términos de los valores conocidos de las segundas (Gujarati, 2003). El análisis de regresión lineal permite investigar la relación estadística que existe entre una variable dependiente (y) con una o más variables independientes ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$) y se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_n X_n \quad (\text{Ec. 7})$$

en donde el coeficiente β de cada variable independiente mide por separado el efecto de este sobre la variable dependiente Y . Para poder encontrar el mejor estimador de los parámetros en una regresión lineal se pueden usar métodos como los Mínimos Cuadrados Ordinarios, el Método Generalizado de Momentos, el método de las opciones Binarias, entre otros.

El método que en esta metodología se emplea para obtener los parámetros de regresión en la demanda de agua es el de Mínimos Cuadrados Ordinarios el cual intenta reducir al mínimo la sumatoria de los errores al cuadrado.

$$\min Q = \sum (Y_i - \hat{\alpha} - \hat{\beta}_{x_i} - \hat{\beta}_{x_i})^2 \quad (\text{Ec. 8})$$

Este método se atribuye a Carl Friededrich Gauss un matemático alemán y el principio de los mínimos cuadrados ordinarios está dado por la ecuación:

$$Y = B_1 + B_2 X + u_i \quad (\text{Ec. 9})$$

Y la función estimada está dada por la ecuación:

$$\hat{Y} = \hat{B}_1 + \hat{B}_2 X + \hat{u}_i = \hat{Y}_1 + \hat{u}_i \quad (\text{Ec. 10})$$

en donde \hat{Y} es el valor estimado (media condicional de Y_i), en donde los residuos (\hat{u}_i) son las diferencias entre los valores observados y los estimados de Y y están dadas por la siguiente expresión:

$$\hat{u}_i = Y_i - \hat{Y}_i = Y_i - \hat{\beta}_1 - \hat{\beta}_2 X_i \quad (\text{Ec. 11})$$

Dados n pares de observaciones de Y y X se determina la función de regresión muestral de tal manera que esté lo más cercana posible a la Y observada, y que la suma de los residuos $\sum \hat{u}_i = \sum Y_i - \hat{Y}_i$ sea la menor posible.

Si se adopta el criterio de minimizar los errores los residuos \hat{u}_1, \hat{u}_4 reciben el mismo peso en la suma $\hat{u}_1 + \hat{u}_2 + \hat{u}_3 + \hat{u}_4$ aunque los dos primeros estén más cerca de la función de regresión que los dos últimos, es decir, a todos los residuos se les da la misma importancia sin considerar que tan cerca o que tan dispersas estén las observaciones individuales de la función estimada, debido a lo anterior la suma algebraica de los residuos es cero.

A partir de $\sum \hat{u}_i^2 = f(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2)$, es decir la suma de los residuos elevados al cuadrado es algún tipo de función de los estimadores $\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$ para cada conjunto dado de datos con diferentes y por consiguiente valores diferentes de $\sum \hat{u}_i^2$.

El método de mínimos cuadrados ordinarios escoge $\hat{\beta}_1$ y $\hat{\beta}_2$ de tal manera que para un conjunto de datos la $\sum \hat{u}_i^2$ sea la más pequeña posible. Para la estimación de $\hat{\beta}_1$ y $\hat{\beta}_2$ se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\hat{\beta}_2 = \frac{\sum X_i Y_i}{\sum X_i^2} \quad (\text{Ec. 12})$$

$$\hat{\beta}_1 = \bar{Y} - \hat{\beta}_2 \bar{X} \quad (\text{Ec. 13})$$

Estos estimadores se conocen como estimadores de mínimos cuadrados ya que se derivan del principio de mínimos cuadrados y cuentan con las siguientes propiedades numéricas:

- Los estimadores MCO están expresados únicamente en términos de las cantidades observables.
- Son estimadores puntuales, esto es que dada la muestra cada estimador proporcionara un solo valor puntual del parámetro poblacional relevante.

- Una vez obtenidos los estimadores de MCO de la información muestral la recta de regresión muestral se obtiene fácilmente, teniendo las siguientes propiedades:
 - Pasa a través de las medias muestrales de Y y X
 - El valor promedio de \hat{Y} es igual al valor medio de Y real, es decir:

$$\begin{aligned}\bar{\hat{Y}} &= \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 \bar{X}_i \\ \hat{Y} &= (\bar{Y} - \hat{\beta}_2 \bar{X}) + \hat{\beta}_2 X_i \\ \hat{Y} &= \bar{Y} + \hat{\beta}_2 (X_i - \bar{X})\end{aligned}$$

Sumando ambos lados de esta última igualdad sobre los valores muestrales y dividiendo entre el tamaño de la muestra se obtiene que

$$\bar{\hat{Y}} = \bar{Y}$$

El valor de la media de los residuos es cero.

- Como resultado de la propiedad anterior la regresión muestral

$$Y_i = \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 X_i + \hat{u}_i$$

- Los residuos \hat{u}_i no están correlacionados con el valor predicho de Y_i ,

$$\sum \hat{Y}_i \hat{u}_i = 0$$

- Los residuos \hat{u}_i no están correlacionados con X_i esto es

$$\sum \hat{X}_i \hat{u}_i = 0$$

Los supuestos del modelo de regresión lineal:

1. El modelo de regresión es lineal con los parámetros

$$Y_i = \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 X_i + \hat{u}_i$$

2. Los valores de X son fijos en muestreo repetido, los valores que toma el regresor X son considerados fijos en muestreo repetido por lo tanto X no es estocástica.
3. El valor medio de la perturbación u_i es igual a cero, dado el valor de X, la media o el valor esperado del término aleatorio de perturbación u_i es cero.

$$E(u_i | X_i) = 0$$

4. Homocedasticidad o igual varianza de u_i dado el valor de X la varianza de u_i es la misma para todas las observaciones, esto es, las varianzas condicionales de u_i son idénticas $var(u_i|X_i) = \sigma^2$
5. No existe autocorrelación entre las perturbaciones. dados dos valores cualesquiera de X, la correlación entre dos u_i cualquiera es cero.

$$cov(u_i, u_j | X_i, X_j) = 0 \text{ donde } i \neq j$$

6. La covarianza entre u_i y X_i es cero, o $cov(u_i, X_i) = 0$
7. El número de observaciones n debe ser mayor que el número de parámetros por estimar, alternativamente el número de observaciones n, debe ser mayor que el número de variables.
8. La variabilidad en los valores de X. No todos los valores de X en una muestra dada deben ser iguales, técnicamente, $Var(x)$ debe ser un número finito.
9. El modelo de regresión está correctamente especificado. Alternativamente no hay un sesgo de especificación o error en el modelo utilizado para el análisis empírico.
10. No hay multicolinealidad perfecta, es decir no hay relaciones perfectamente lineales entre las variables explicativas.

La precisión de los estimadores MCO esta medida por sus errores estándar, estos no son otra cosa que la desviación estándar de la distribución muestral del estimador y la distribución muestral de un estimador es una probabilidad o distribución de frecuencias del estimador. Las distribuciones muestrales son utilizadas para inferir los valores de los parámetros de la población con base en los valores de los estimadores calculados de una o más muestras.

Los valores estimados de mínimos cuadrados poseen propiedades óptimas o ideales, las cuales están contenidas en el teorema de Gauss–Markov, considerando la propiedad de mejor estimador lineal insesgado (MELI), se dice que un estimador es MELI si cumple con lo siguiente:

- Es lineal: función lineal de una variable aleatoria tal como la variable dependiente Y en el modelo de regresión.
- Es insesgado: su valor promedio o el valor esperado $E(\hat{\beta}_2)$ es igual al verdadero valor β^2 .

- Tiene varianza mínima dentro de la clase de todos los estimadores lineales insesgados; un estimador insesgado con varianza mínima es conocido como estimador eficiente.

La bondad de ajuste:

El coeficiente de determinación R^2 mide la relación de todas las variables independientes en conjunto respecto a la variable dependiente, es decir, brinda la información de proporción de la variación total en Y que puede ser explicada por la variación en las variables X.

Pueden observarse dos propiedades de R^2 :

- Es una cantidad no negativa
- Sus límites son $0 \leq r^2 \leq 1$. Un r^2 de 1 significa un ajuste perfecto, es decir $\hat{Y}_i = Y_i$ para cada i, por otra parte un $r^2=0$ significa que no hay relación alguna entre la variable dependiente y las variables explicativas.

4.4 Índice de vulnerabilidad con adaptación

Considerando que para cualquier decisión de adaptación a los cambios climáticos proyectados existen diferentes opciones que permitirían mantener o cumplir determinadas condiciones, resulta necesario evaluar las opciones en relación con los diferentes resultados o consecuencias de cada una de ellas.

Así, tomando en cuenta los escenarios planteados, se definen para cada uno de ellos los incrementos porcentuales de los indicadores de desempeño (eficiencia física y comercial) de acuerdo a las metas establecidas por el organismo operador, así como los cambios en las variables climáticas consideradas para un periodo determinado, para finalmente recalcular el índice de vulnerabilidad bajo estos escenarios y determinar la mejor opción disponible para afrontar los riesgos que implica el cambio climático.

4.4.1 Grado de exposición

Los datos de precipitación y temperatura corresponden a los valores anuales de acuerdo a los escenarios climáticos en México proyectados por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (Martínez Austria & Patiño Gómez, 2010) y que están descritos en el punto 4.2 de este trabajo. En el trabajo citado se muestra por entidad federativa el cambio estimado para precipitación y

temperatura de acuerdo al escenario SRES-A2 proyectado para el siglo XXI. Los cambios proyectados en precipitación se presentan de forma porcentual y los de temperatura de superficie en grados centígrados (°C), ambos en relación al periodo base 1961-1990.

4.4.2 Sensibilidad

El factor de vulnerabilidad llamado sensibilidad es el nivel de susceptibilidad de un sistema operador a los efectos del cambio climático y se determina empleando diferentes variables e indicadores. La descripción del cálculo de cada uno de los indicadores para este factor se describe a continuación:

a) Consumo

El consumo corresponde al volumen de agua consumido Q_{CON} obtenido de la estimación de la demanda (Ec. 5). Su cálculo se describe en el punto 4.3.1 de este trabajo.

b) Grado de confiabilidad

El grado de confiabilidad se determina empleando la ecuación:

$$GC_n = Gm_n / I_n \quad (\text{Ec. 14})$$

en donde GC_n es el grado de confiabilidad, Gm_n son los gastos de mantenimiento en el año n (en pesos) e I_n son los ingresos en el año n (en pesos).

c) Gastos de mantenimiento

El índice de gastos de mantenimiento se determina empleando la ecuación:

$$Gm_n = (Vp_{n+1} - Vp_n)(Cm_n) + (I_n)(Ym) \quad (\text{Ec. 15})$$

en donde Gm_n son los gastos de mantenimiento en el año n (pesos), Vp_{n+1} es el volumen producido en el año n+1 (en m³), Vp_n es el volumen producido en el año n (en m³), Cm_n es el costo de mantenimiento en el año n (pesos/m³), I_n son los ingresos en el año n (pesos) y Ym es la

relación de gastos de mantenimiento respecto a los ingresos totales. Los I_n ingresos en el año n se determina empleando la siguiente ecuación:

$$I_n = I_{n-1} + (Vc_{n+1} - Vc_n)(Tf_n) \quad (\text{Ec. 16})$$

en donde I_{n-1} son los ingresos en el año n-1 (pesos), Vc_{n+1} es el volumen cobrado en el año n+1 (m^3), Vc_n es el volumen cobrado en el año n (m^3), y Tf_n es la tarifa promedio en el año n (pesos/ m^3).

d) Disponibilidad

La disponibilidad D_n se determina empleando la siguiente ecuación:

$$D_n = Vf_n / Ci_n \quad (\text{Ec. 17})$$

en donde Vf_n es el volumen facturado en el año n (m^3) y Ci_n es la capacidad instalada en el año n (m^3).

e) Volumen facturado

El volumen facturado Vf_n en el año n (m^3) se determina empleando la siguiente ecuación:

$$Vf_n = Q_{CON} \quad (\text{Ec. 18})$$

en donde Q_{CON} es la cantidad de agua consumida obtenida de la estimación de la demanda (Ec. 5) en el año n (m^3).

f) Capacidad instalada

La capacidad instalada Ci_n en el año n (m^3) se determina con:

$$Ci_n = cte \quad (\text{Ec. 19})$$

en donde cte es una constante determinada.

g) Grado de presión:

El grado de presión GP_n en el año n se determina empleando la siguiente ecuación:

$$GP_n = Vtc_n / Arm_n = cte \quad (\text{Ec. 20})$$

en donde Vtc_n es el volumen total de agua concesionado en el año n (millones de m^3) y Arm_n es el volumen de agua renovable media en el año n (millones de m^3).

h) Eficiencia económica:

La eficiencia económica EE_n en el año n se determina empleando la siguiente ecuación:

$$EE_n = Tf_n / Ct_n \quad (\text{Ec. 21})$$

en donde Tf_n es la tarifa media en el año n (pesos/ m^3) y Ct_n son los costos totales de producción en el año n (pesos/ m^3).

i) Precio promedio

La tarifa media Tf_n en el año n (pesos/ m^3) está dada por:

$$Tf_n = PRE_{PROM} \quad (\text{Ec. 22})$$

en donde PRE_{PROM} es el precio promedio en el año n (pesos/ m^3).

j) Costos totales

Los costos totales de producción Ct_n en el año n (pesos/ m^3) se determinan empleando la siguiente ecuación:

$$Ct_n = E_n / Vpf_n \quad (\text{Ec. 23})$$

en donde E_n son los egresos (pesos/m³) y Vpf_n es el volumen producido tras reparación de fugas en el año n (m³). E_n se determina empleando la siguiente ecuación:

$$E_n = E_{n-1} + ((Vf_{n+1} - Vf_n)(Cc_n)) + ((Vpf_{n+1} - Vpf_n)(Cp_n)) + ((Vc_{n+1} - Vc_n)(Cc_n)) + ((Vpf_{n+1} - Vpf_n)(Cd_n)) + ((Vf_{n+1} - Vf_n)(Ca_n)) \quad (\text{Ec. 24})$$

En donde E_{n-1} son los egresos en el año n-1 (pesos), Vf_{n+1} es el volumen facturado en el año n+1(m³), Vf_n es el volumen facturado en el año n (m³), Vpf_{n+1} es el volumen producido tras reparación de fugas en el año n+1 (m³), Vpf_n es el volumen producido tras reparación de fugas en el año n (m³), Vc_{n+1} es el volumen cobrado en el año n+1 (m³), Vc_n es el volumen cobrado en el año n (m³), Cc_n es el costo de comercialización en el año n (pesos/m³), Cp_n es el costo de producción en el año n (pesos/m³), Cd_n es el costo de distribución en el año n (pesos/m³) y Ca_n es el costo de administración en el año n (pesos/m³).

El volumen producido tras reparación de fugas en el año n Vpf_n se determina empleando la siguiente ecuación:

$$Vpf_n = Vp_n - \left(\left(\frac{Vf_n}{Ef_{n-1}} - Vf_n \right) - \left(\frac{Vf_n}{Ef_n} - Vf_n \right) \right) \quad (\text{Ec. 25})$$

En donde Vp_n es el volumen producido en el año n (m³), Ef_{n-1} es la eficiencia física en el año n-1 (antes de la mejora) y Ef_n es la eficiencia física en el año n (con mejora). El volumen producido Vp_n se determina empleando la siguiente ecuación:

$$Vp_n = Vf_n / Ef_{n-1} \quad (\text{Ec. 26})$$

En donde Vf_n es el volumen facturado en el año n (m³) y Ef_n es la eficiencia física en el año n.

4.4.4 Capacidad de adaptación

El factor de vulnerabilidad llamado capacidad de adaptación es la habilidad de un sistema para ajustarse a diversos efectos del cambio climático con el propósito de aprovechar potenciales beneficios o bien, afrontar los retos que se impongan. La descripción del cálculo de cada uno de los indicadores para este factor se describe a continuación:

a) Eficiencia física

La eficiencia física EF_n se determina empleando la siguiente ecuación:

$$EF_n = Ef_{n-1} + \frac{Ef_2 - Ef_1}{P_2 - P_1} \quad \text{Ec. 27}$$

en donde Vf_n es el volumen facturado en el año n (m^3), Vpf_n es el volumen producido tras reparación de fugas en el año n (m^3), Ef_1 es la eficiencia física al inicio del periodo proyectado, Ef_2 es la eficiencia física esperada al final del periodo proyectado y $P_2 - P_1$ es el periodo proyectado.

b) Eficiencia comercial

La eficiencia comercial EC_n se determina empleando la siguiente ecuación:

$$EC_n = \frac{Vc_n}{Vf_n} = (Ec_{n-1} + \frac{Ec_2 - Ec_1}{P_2 - P_1}) \quad \text{Ec. 28}$$

en donde Vc_n es el volumen cobrado en el año n (m^3), Vf_n es el volumen facturado en el año n (m^3), Ec_n es la eficiencia comercial en el año n-1, Ec_1 es la eficiencia comercial al inicio del periodo proyectado, Ec_2 es la eficiencia comercial esperada al final del periodo proyectado y $P_2 - P_1$ es el periodo proyectado.

4.5 Evaluación de costos de adaptación

Una vez evaluado el nivel de vulnerabilidad, la evaluación de costos tiene la finalidad de expresar el efecto de la adaptación en términos monetarios. La función de costos refleja la tecnología utilizada en la producción de un bien, ésta tiene propiedades específicas en relación a los precios, a saber: es no decreciente, homogénea de grado uno, cóncava y continua. Un problema en la determinación de las funciones de costos de adaptación al cambio climático es que deben ser pronosticadas para largos periodos de tiempo, lo que haría muy plausible la propiedad de la concavidad en precios. Sin embargo, el nivel de incertidumbre y la ausencia de mercados con un funcionamiento adecuado nos hacen suponer una función de costos pasiva, es decir, una en donde los agentes no reaccionan eligiendo distintas canastas de insumos, sino que la canasta óptima determinada en el momento actual se conserva y por tanto la función de costos es lineal y aditiva.

Los organismos operadores de agua potable utilizan diversos procedimientos para la producción del bien agua potable, así, se parte del hecho que la función de costos puede generarse a partir de estos procesos y que para cada uno de ellos es posible determinar una función de costos particular. Los procesos de producción que interesan son los que tienen que ver directamente con el índice de vulnerabilidad, es decir únicamente aquellos que están relacionados con los factores de sensibilidad y capacidad de adaptación.

Bajo ese contexto, el costo de disminuir el nivel de vulnerabilidad de un organismo operador, está dado por el impacto estimado del cambio climático en ausencia de adaptación, menos el impacto estimado con adaptación, ambos evaluados a través del índice de vulnerabilidad y los escenarios anteriormente descritos. Dicha adaptación, dada por un incremento en los niveles de desempeño de un organismo operador, representa los costos de inversión que implican mejorar la infraestructura más la diferencia entre los egresos bajo un escenario de cambio climático con y sin adaptación (Figura 4.5).

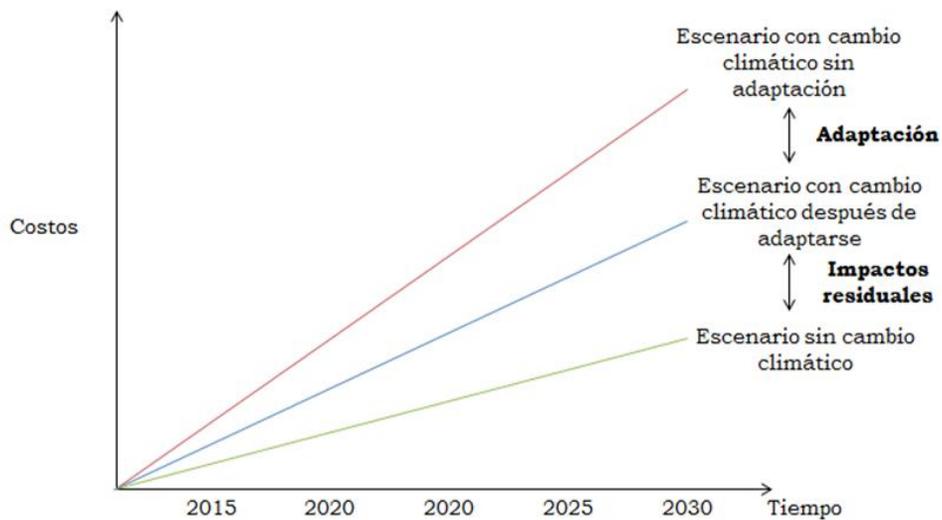


Figura 4. 5 Adaptación al cambio climático respecto al escenario de referencia

El hecho de plantear una función de costos lineal y aditiva facilita el cálculo y minimiza la cantidad de información necesaria para el cálculo de la función de costos de largo plazo. Así, para calcular los costos totales de adaptación, se propone utilizar un pronóstico de los costos unitarios de cada una de las partes en las que se dividió el costo de producción de agua potable.

Estos costos unitarios representan los costos de producción, distribución, administración y comercialización que implican la extracción, distribución y suministro de agua potable.

El costo de adaptación (Ec. 29) o el impacto económico de la medida de adaptación, se supone proporcional al volumen de agua producida y facturada en cada uno de los escenarios planteados, considerando dos elementos: el costo de inversión (Ec. 30) que implican incrementar los niveles de eficiencia física y comercial (costos por reparación de fugas y costos de comercialización); y la diferencia del costo de producir, facturar y/o cobrar determinado volumen de agua bajo un escenario de cambio climático con y sin la implementación de medidas de adaptación (Ec. 31). El costo de adaptación, el costo de inversión y los egresos en el año se determinan empleando las ecuaciones 29 y 30 respectivamente.

$$Costos_{adaptación} = CI_n + \left(Egresos_{con\ cambio\ climático\ con\ adaptación} - Egresos_{con\ cambio\ climático\ sin\ adaptación} \right) \text{ Ec. 29}$$

en donde CI_n son los costos de inversión y se determinan empleando la siguiente ecuación:

$$CI_n = Cr_n (Vp_n - Vpf_n)$$

Ec. 30

en donde Cr_n es el costo por reparación de fugas ($\$/m^3$), Vp_n es el volumen producido (m^3) y Vpf_n es el volumen producido tras reparación de fugas (m^3).

Los egresos E_n en el año n (pesos) se determinan empleando la siguiente ecuación:

$$E_n = E_{n-1} + ((Vf_{n+1} - Vf_n)(Cc_n)) + ((Vpf_{n+1} - Vpf_n)(Cp_n)) + ((Vc_{n+1} - Vc_n)(Cc_n)) + ((Vpf_{n+1} - Vpf_n)(Cd_n)) + ((Vf_{n+1} - Vf_n)(Ca_n)) \quad \text{Ec. 31}$$

en donde Vf_{n+1} es el volumen facturado en el año n+1 (m^3), Vf_n es el volumen facturado en el año n (m^3), Vp_{n+1} es el volumen producido en el año n+1 (m^3), Vp_n es el volumen producido en el año n (m^3), Vc_{n+1} es el volumen cobrado en el año n+1 (m^3), Vc_n es el volumen cobrado en el año n (m^3), Cc_n es el costo de comercialización en el año n (pesos/ m^3), Cp_n es el costo de producción en el año n (pesos/ m^3), Cd_n es el costo de distribución en el año n (pesos/ m^3) y Ca_n es el costo de administración en el año n (pesos/ m^3).

De acuerdo con el nivel o el grado al que desea llevarse la adaptación, los costos se verán afectados, dado que en términos generales, la adaptación puede tener como objetivo: (I) el mantenimiento de un determinado nivel de servicio, (II) lograr un nuevo nivel de servicio "óptimo", o (III) el cumplimiento de algún nuevo estándar (Parry, 2009).

Dichos objetivos, deberán ser planteados por los tomadores de decisiones a través de la comprensión de los efectos del cambio climático para una adecuada gestión del agua, teniendo en consideración que dichas medidas podrían no eliminar todas las consecuencias del cambio climático, por lo que habrá impactos residuales. Estos impactos se producirán debido a que la adaptación puede retrasarse al cambio climático o bien en ausencia de cambio climático, podrán presentarse hechos que superen los estándares de diseño.

5. IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA; CASO MEXICALI, BAJA CALIFORNIA.

Mexicali se localiza al noreste del Estado de Baja California, en las coordenadas $30^{\circ} 57' 40'' - 32^{\circ} 43' 00''$ latitud norte y $115^{\circ} 21' 50'' - 115^{\circ} 40' 20''$ longitud oeste. Limita al norte con el Estado de California (E.U.), al noreste con el Estado de Arizona (E.U.) y con el Estado de Sonora, al este con el Golfo de California; al sur con el municipio de Ensenada y al oeste con los municipios de Ensenada y Tecate (Figura 5.1). Su división política comprende 14 delegaciones municipales: Colonia Progreso, Hechicera, Ciudad Morelos, Bataquez, Cerro Prieto, Colonia Venustiano Carranza, Colonias Nuevas, San Felipe, Los Algodones, Estación Delta, Guadalupe Victoria, Benito Juárez, González Ortega y Hermosillo. De acuerdo con INEGI, el municipio de Mexicali alberga 936,826 habitantes, lo que representa cerca del 30% de la población total del estado.

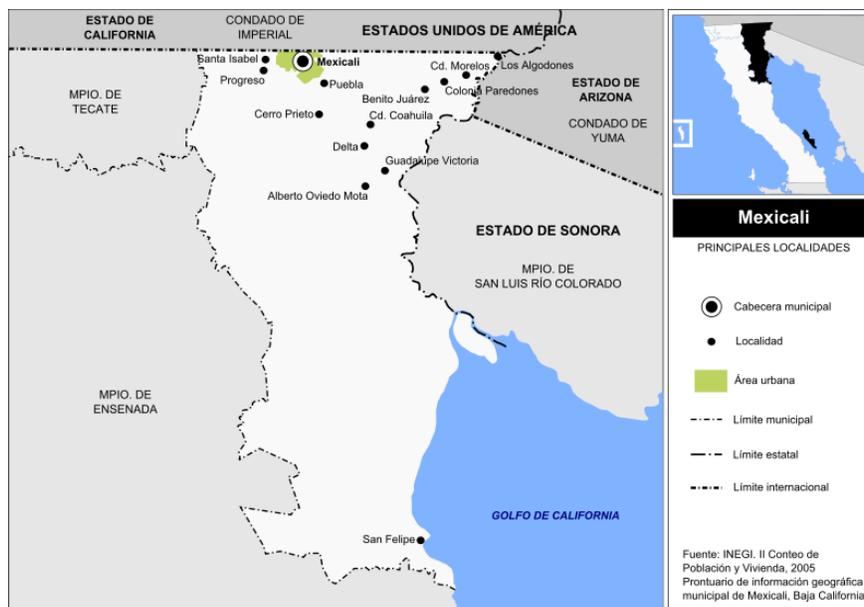


Figura 5. 1 Ubicación geográfica (Mexicali)

El municipio de Mexicali es operado por la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali (CESPM), creada mediante decreto de fecha 10 de diciembre de 1967. Actualmente además de la

cabecera municipal opera 80 localidades que representan el 92% del total de la población municipal, el resto son operados por comités de agua integrados por los mismos usuarios.

Mexicali se abastece de agua del Río Colorado de acuerdo al Tratado Sobre la Distribución de Aguas Internacionales entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de Norte América, relativo a la utilización de las aguas de los Ríos Colorado, Tijuana y Bravo, firmado en Washington, D. C. el 3 de febrero de 1944, con el interés de los dos países para disponer de las aguas de estos tres ríos.

El agua del Río Colorado se capta en México en la estructura derivadora denominada "Presa Morelos", que se encuentra en el poblado fronterizo de "Los Algodones", B.C. El agua fluye por los canales del Distrito de Riego no. 14, donde el canal Benassini abastece a dos de las tres plantas potabilizadoras de la ciudad (Planta Potabilizadora No. 1 y Planta Potabilizadora No. 2) y el canal Reforma abastece a la tercera denominada Planta Potabilizadora No. 3, en total, en la ciudad, las plantas en su conjunto tienen la capacidad para potabilizar 5550 litros por segundo (lps). Mientras que los permisos concesionados para explotación de agua superficial y subterránea para la zona urbana suman 3413 lps.

Tabla 5. 1 Plantas potabilizadoras. CESPМ

Planta potabilizadora	Ubicación	Capacidad de tratamiento	Caudal producido
No. 1	Colonia Pro Hogar	1800 lps	379 lps
No. 2	Colonia Calles	2500 lps	1582 lps
No. 3	Colonia Xochimilco	1250 lps	548 lps

La ciudad cuenta con una cobertura del servicio de agua potable mayor al 99%, lo que significa 2,888.2 kilómetros lineales de tubería que forman la red del sistema que abastece de agua la mancha urbana y un total de 335,835 tomas, de las cuales, el 93.4% corresponden a tomas domésticas y el resto comercial e industrial.

Tabla 5. 2 Cobertura de agua potable (2011). CESPМ

	Población total	Población servida	Cobertura (%)	No. de tomas
Ciudad de Mexicali	788,944	785,102	99.51	300,509
Localidades con sistemas operados por organismo operador	101,434	99,006	97.61	35,326

Localidades con sistemas no operados por organismo operador	75,814	66,979	88.00	-
Localidades menores de 100 habitantes con autoabastecimiento	2506	-	-	-

5.1 Operatividad y administración del sistema

El CESPM presta sus servicios a una población de 785,102 habitantes y cuenta con 300,509 conexiones, algunos otros indicadores de operatividad y administración se presentan en la Tabla 5.3 y corresponden al año 2011.

Tabla 5. 3 Indicadores (2011). CESPM

Concepto	Unidad	Acumulado a diciembre de 2011
Población servida	Habitantes	785,102
Conexiones	Conexiones	300,509
Cobertura de agua potable	%	99.51
Volumen generado	m3	82,128,615.00
Volumen facturado	m3	71,423,458.00
Volumen cobrado	m3	60,246,205.00
Eficiencia física	%	86.46
Eficiencia comercial	%	89.60
Eficiencia global	%	77.46

La producción de agua potable respecto a la proporción de agua facturada presenta pérdidas por robos o fugas en la red cercanas a 10,000 m³. Considerando que la medición es un requisito para la facturación y la cobranza, se puede observar una destacada cobertura de medición que refleja la salud financiera y la inducción al pago por parte de los consumidores, lo que se relaciona con el uso eficiente del agua. La tabla 5.4 presenta la información sobre la cobertura de medición del CESPM para el año 2011.

Tabla 5. 4 Cobertura de medición (2011). CESPM

No. de conexiones domésticas	No. de medidores instalados	No. de conexiones sin medidor	Cobertura de medición (%)
280,594	279,152	1,442	99.5

En lo relativo a la eficiencia en la cobranza por concepto de venta de agua al término del año 2011, Mexicali presentó ingresos menores a su facturación anual ya que recauda cerca del 90% del volumen que facturan que si bien no cubre los costos de producción, es un porcentaje alto ya que en otros organismos operadores del país este indicador refleja el déficit existente que se traduce en

poca disponibilidad de recursos financieros para hacer frente a los compromisos de inversión y de mantenimiento de los servicios. La Tabla 5.5 presenta la información sobre la eficiencia de cobro del CESPМ para el año 2011.

Tabla 5. 5 Eficiencia de cobro (2011). CESPМ

Facturación anual (pesos)	Volumen anual facturado (m ³)	Ingresos anuales por venta de agua (pesos)
776,835,352	71,423,458	696,019,051

Respecto a la operatividad en sus balances anuales de ingresos y egresos totales, los egresos superaron los ingresos, lo que genera un déficit de 147,457,532 pesos. La Tabla 5.6 presenta la información del Índice operativo del CESPМ para el año 2011.

Tabla 5. 6 Índice operativo (2011). CESPМ

Ingresos (pesos)	Egresos (pesos)	Índice operativo
982,146,536	1,129,604,068	0.87

5.2 Índice de vulnerabilidad

De acuerdo a la información proporcionada por la Comisión Estatal del Agua de Baja California, se evaluó el grado de susceptibilidad de la CESPМ medido a través del índice de vulnerabilidad. Los valores de los indicadores de vulnerabilidad presentados en la tabla 5.7, corresponden a datos para la ciudad de Mexicali en el periodo correspondiente al 2011.

Tabla 5. 7 Índice de vulnerabilidad (2011). CESPM

Factores de vulnerabilidad	Indicador	Rango		Ponderación (Grado de vulnerabilidad)	Mexicali 2011	
		Real	Normalizado		Valor normalizado	Valor ponderado
Grado de exposición	Temperatura promedio anual (°C)	17.0 – 22.0	1.00 – 4.46	1	3.49	3.49
		22.0- 26.0	4.46 – 7.23	2		
		26.0 – 30.0	7.23 - 10.00	3		
	Precipitación promedio anual (mm)	100.0 - 750.0	10.00 - 7.00	3	9.76	29.28
		750.0 - 1400.0	7.00 -4.00	2		
1400.0 - 2050.0		4.00 - 1.00	1			
Sensibilidad	Consumo (l/h/d)	100 – 150	1.00 - 2.29	1	3.23	6.46
		150 - 300	2.29 - 6.14	2		
		300 - 450	6.14 -10.00	3		
	Grado de confiabilidad :	0 - 0.15	10.00 – 7.00	3	9.11	27.32
		0.15 - 0.30	7.00 – 4.00	2		
	Costos de mto./Ingreso total	0.30 - 0.45	4.00 – 1.00	1	3.23	3.23
		0.20 - 0.40	1.00 – 3.25	1		
		0.40 - 0.70	3.25 – 6.63	2		
	Demanda/ Oferta	0.70 – 1.0	6.63 – 10.00	3	6.50	19.49
		0 - 20	1.00 - 2.50	1		
	Grado de presión (%): Vol.	20 - 40	2.50 – 4.00	2	9.88	29.63
		40 - 120	4.00 - 10.00	3		
	Concesionario/Agua renovable	0 - 1.0	10.00 – 6.40	3	1.00	1.00
1.0 -1.75		6.40 – 3.70	2			
1.75 – 2.50		3.70 – 1.00	1			
Tarifa/Costos de producción	Eficiencia física (%)	0.40- 0.50	10.00 – 8.50	3	2.89	2.89
		0.50 – 0.70	8.50 – 5.50	2		
		0.70 – 1.00	5.50 – 1.00	1		
	Eficiencia comercial (%)	0.40- 0.50	10.00 – 8.50	3	4.19	4.19
		0.50 – 0.70	8.50 – 5.50	2		
		0.70 – 1.00	5.50 – 1.00	1		
ÍNDICE DE VULNERABILIDAD						125.98

Considerando que el principal impacto potencial de la administración de los recursos hídricos va a provenir de una posible disminución en la cantidad de agua del Río Colorado, y dado que el desarrollo no solo de Mexicali, sino de Baja California depende en gran medida de los caudales de este río, lo que ocurra determinara los patrones de crecimiento del estado.

Por lo tanto, los bajos niveles de precipitación aunados a los modelos climáticos que pronostican una disminución en los caudales del Río Colorado (SEMARNAT-INE-Gobierno de Baja California, 2012), incrementan considerablemente el grado de exposición de la CESPMP ya que ante un escenario de cambio climático se generarían importantes impactos en la distribución actual del agua.

Por otra parte, el grado de presión indica bajos niveles de disponibilidad, dado que la población crece y en términos generales la disponibilidad de agua permanece invariable, lo que favorece una mayor competencia por el recurso y considerando un decremento de la precipitación posiblemente un reto para cubrir la demanda de agua.

La eficiencia económica presenta un valor menor a uno, es decir, la tarifa es menor a los costos de producción. Este indicador representa cerca de un 24% del índice, un grado de sensibilidad alto y que podría verse incrementado si se considera que mantener los niveles de eficiencia actuales implica aumentar la capacidad económica del organismo operador.

La variable confiabilidad de la infraestructura representa un 22% del índice, es decir, un 4.5% de los ingresos totales del organismo son destinados a mantenimiento de la infraestructura; si bien la eficiencia física actualmente no se ve afectada, las medidas deberán ser rutinariamente implementadas para mantener las condiciones operativas actuales a fin no exceder el periodo de vida de la infraestructura y ante cambios en la calidad o condiciones climáticas no resulten desproporcionados incrementos en dichos costos.

5.3 Identificación de medidas de adaptación

Considerando los resultados obtenidos del análisis de vulnerabilidad, se construyeron recomendaciones de adaptación fundamentadas en la gestión del agua a partir de los siguientes escenarios:

Escenario 1 (escenario base):

Crece las variables: nivel de precios, PIB y población a las tasas esperadas, la tarifa permanece constante y no hay inversión económica en ninguna de las variables que intervienen en el cálculo del índice, por lo que es de esperarse que la vulnerabilidad aumente al igual que los costos de operación que deberán satisfacer el incremento de la demanda.

Escenario 2:

Crece las variables: nivel de precios, PIB y población a las tasas esperadas, de acuerdo a los escenarios proyectados la temperatura aumenta 2.9° C y la precipitación disminuye 10% respecto a la climatología base (1961-1990), no hay inversión económica en ninguna de las variables que intervienen en el cálculo del índice por lo que es de esperarse que la vulnerabilidad aumente. Se satisface la demanda por lo que aumentan los costos de operación.

Escenario 3:

Crece las variables: nivel de precios, PIB y población a las tasas esperadas, de acuerdo a los escenarios proyectados la temperatura aumenta 2.9° C y la precipitación disminuye 10% respecto a la climatología base (1961-1990), se incrementan los niveles de eficiencia comercial en 6 puntos porcentuales.

Escenario 4:

Crece las variables: nivel de precios, PIB y población a las tasas esperadas, de acuerdo a los escenarios proyectados la temperatura aumenta 2.9° C y la precipitación disminuye 10% respecto a la climatología base (1961-1990), se incrementan los niveles de eficiencia física en 3 puntos porcentuales.

5.4 Estimación de la demanda

Se considera que el consumo de agua está en función del precio, ingreso y de variables climatológicas que influyen en el mismo, así a fin de determinar las correlaciones entre estas variables y estimar el volumen consumido al año 2030 en la ciudad de Mexicali se aplicó el análisis de regresión bajo los supuestos descritos en la metodología de evaluación.

La base de información sobre volumen facturado, tarifa, Producto Interno Bruto y población, se obtuvo para un periodo de 2002-2011 de acuerdo a las publicaciones del PIGOO.

La variable climatológica, corresponde a la temperatura promedio anual del estado de Baja California para el periodo 2002-2011 de acuerdo al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (Servicio Meteorológico Nacional, 2010). En la tabla 5.8 se muestran los datos utilizados para la estimación de la demanda:

Tabla 5. 8 Base de datos utilizada para la estimación de la demanda

Año	Volumen facturado anual (m ³)	Población	PIB (\$)	Temperatura promedio anual (°C)	Tarifa media (\$/m ³)	Volumen consumido per cápita anual (m ³)
		POB	PIB	TEMP_{PROM}	PRE_{PROM}	Q_{CON}
2002	68017378.00	554,562.62	61,012,642,171.52	18.60	2.88	122.6505
2003	67935865.00	572,888.53	61,649,431,143.19	19.50	3.17	118.5848
2004	69922965.00	639,749.63	62,247,631,037.69	19.20	3.49	109.2974
2005	70351722.00	656,410.06	68,520,187,639.60	19.50	3.75	107.1765
2006	71877512.00	672,420.18	68,129,586,320.70	19.30	3.95	106.8937
2007	71032024.00	688,728.35	67,788,168,007.13	18.80	4.24	103.1350
2008	70936088.00	705,504.59	67,501,408,856.09	19.60	4.45	100.5466
2009	71937098.00	752,304.49	70,014,397,120.59	19.60	5.36	95.6223
2010	70022134.00	767,079.84	71,631,731,960.90	20.60	5.69	91.2840
2011	71423458.00	785,102.01	73,314,685,203.45	18.60	5.90	90.9735

5.4.1 Análisis de regresión

La estadística descriptiva de las variables del modelo demanda de agua que se describen a continuación, así como el valor del estadístico Jarque-Bera para contrastar la normalidad de la serie y su correspondiente nivel de probabilidad asociado, rechazándose la hipótesis nula de normalidad si dicha probabilidad es muy baja.

Tabla 5. 9 Estadística descriptiva de las variables del modelo de demanda

Estadístico	Q_con	PIB	PRE_prom	TEMP_prom
Media	104.6164	6.72E+10	7.9597	19.5663
Mediana	105.0144	6.80E+10	8.2630	19.5000
Máximo	122.6505	7.33E+10	9.1740	20.9636
Mínimo	90.9734	6.10E10	5.5280	18.6000
Desviación estándar	10.6329	4.24E+09	1.1516	0.7271
Simetría	0.2936	-0.2752	-1.0410	0.7346
Kurtosis	2.1002	1.8580	3.0119	2.7354
Jarque-Bera	0.4810	0.5079	1.8062	0.9285
Probabilidad JB	0.7862	0.7757	0.4053	0.6285
Observaciones	10	10	10	10

Los resultados obtenidos del modelo y las pruebas estadísticas a los que fueron sometidos los datos para soportar su validez, se presentan en la tabla 5.10.

Tabla 5. 10 Resultados del análisis de regresión

Dependent variable: Q_con		Sample: 2002 2011		
Method: least squares		Included observations: 10		
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
PIB	9.67E-10	4.57E-10	2.1150	0.0788
PRE_PROM	-15.1259	1.3641	-11.0884	0.0000
TEMP_PROM	5.2298	1.4099	3.7092	0.0100
R-squared	0.9548	Mean dependent var		104.6164
Adjusted R-squared	0.9322	S.D. dependent var		10.6328
S.E. of regression	2.7672	Akaike info criterion		5.1627
Sum squared resid	45.9471	Schwarz criterion		5.2838
Log likelihood	-21.8139	Durbin-Watson stat		2.5063

De acuerdo a los resultados de la estimación, la demanda para la ciudad de Mexicali está dada por la siguiente ecuación:

$$Q_{CON} = 9.67E^{-10}PIB - 15.12 PRE_{PROM} + 5.22 TEMP_{PROM} \quad \text{Ec. 32}$$

En donde Q_{CON} es la cantidad de agua consumida, PIB es el producto Interno Bruto, PRE_{PROM} es el precio promedio y $TEMP_{PROM}$ es la temperatura promedio.

El hecho de que el coeficiente estimado para la variable precio promedio sea de signo negativo, señala que cuando se incrementa el precio, la demanda de agua se ve reducida. El signo de los coeficientes de las variables PIB y temperatura es positivo, lo que indica que un incremento de los ingresos y de la temperatura traerá consigo un mayor consumo de agua.

La R^2 (R-squared) igual a 0.9548 (Tabla 5.10) indica una importante correlación entre las variables independientes con respecto al volumen consumido, por lo que no se necesitan otras variables para determinar el comportamiento presente y futuro del volumen consumido, además de que las pruebas de significación realizadas con t, para los coeficientes tienen una probabilidad de casi cero, lo cual corrobora que las variables PIB, temperatura y precio explican satisfactoriamente el volumen consumido.

Del mismo modo, los resultados de las pruebas estadísticas a las que fue sometido el modelo indican que los residuos presentan una distribución normal, no autocorrelación, homocedasticidad y permanencia estructural, lo que comprueba la validez del modelo.

La descripción de las pruebas estadísticas a las que fue sometido el modelo y los resultados obtenidos para la ciudad de Mexicali se detallan en los anexos.

5.4.2 Proyección de la demanda

Con esta función de demanda se calcula la cantidad demandada de agua para cada uno de los escenarios propuestos bajo los siguientes supuestos:

- ✓ Se espera para un escenario base un crecimiento del PIB en México de un 3.5% anual en promedio y una modificación de las tarifas de acuerdo a una tasa de inflación del 3% anual.
- ✓ El crecimiento poblacional corresponde a la proyección 2005-2030 generada por el Consejo Nacional de Población (CONAPO), con base al Censo de Población del INEGI 2005.
- ✓ La temperatura promedio se considera como la climatología base 1961-1990 más los incrementos de temperatura anuales de acuerdo al escenario climático SREV-A2 proyectado para el siglo XXI para la ciudad de Mexicali de acuerdo al Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el Cambio Climático (Martínez Austria & Patiño Gómez, 2010) La Tabla 5. 11 presenta los supuestos de proyección.

Tabla 5. 11 Supuestos de proyección

Año	Población	PIB (pesos)	Precio promedio (tarifa) (pesos/m ³)	Temperatura promedio (°C)
2010	767,080.00	71,631,731,960.90	5.69	20.600
2011	777,487.21	74,138,842,579.53	5.87	21.249
2012	791,441.80	76,733,702,069.81	6.04	21.425
2013	805,386.68	79,419,381,642.25	6.22	21.396
2014	819,314.57	82,199,059,999.73	6.41	21.358
2015	833,240.83	85,076,027,099.72	6.60	21.573
2016	847,164.67	88,053,688,048.21	6.80	21.630
2017	861,076.37	91,135,567,129.90	7.00	21.546
2018	874,950.02	94,325,311,979.45	7.21	21.690
2019	888,768.64	97,626,697,898.73	7.43	21.772
2020	902,528.98	101,043,632,325.18	7.65	21.562
2021	916,210.81	104,580,159,456.56	7.88	21.696
2022	929,800.37	108,240,465,037.54	8.12	21.867

2023	943,272.57	112,028,881,313.86	8.36	21.648
2024	956,601.51	115,949,892,159.84	8.61	21.770
2025	969,766.96	120,008,138,385.44	8.87	21.699
2026	982,758.38	124,208,423,228.93	9.14	21.734
2027	995,567.70	128,555,718,041.94	9.41	21.703
2028	1,008,185.19	133,055,168,173.41	9.69	21.773
2029	1,020,602.76	137,712,099,059.48	9.99	21.734
2030	1,032,805.04	142,532,022,526.56	10.28	21.688

Los resultados obtenidos de la estimación de la demanda con y sin cambio climático para dos de los escenarios se presentan en la Tabla 5.12.

Tabla 5. 12 Resultados de estimación de la demanda con y sin cambio climático (Volumen facturado en m³)

Año	Escenario 1 (sin cambio climático)	Escenario 2 (con cambio climático)	Incremento porcentual
2010	69,724,560.34	69,724,560.34	0.000%
2011	71,116,384.49	73,185,115.01	2.909%
2012	72,273,061.78	75,110,242.56	3.926%
2013	73,431,055.16	76,192,285.10	3.760%
2014	74,590,623.63	77,238,706.16	3.550%
2015	75,754,096.95	79,383,234.96	4.791%
2016	76,922,506.55	80,864,241.87	5.124%
2017	78,095,961.60	81,724,893.75	4.647%
2018	79,273,477.20	83,619,808.00	5.483%
2019	80,454,702.47	85,250,828.51	5.961%
2020	81,640,643.62	85,518,224.53	4.750%
2021	82,831,040.41	87,410,846.50	5.529%
2022	84,026,089.90	89,506,405.80	6.522%
2023	85,225,363.43	89,705,539.65	5.257%
2024	86,428,079.79	91,578,584.29	5.959%
2025	87,634,280.02	92,495,571.42	5.547%
2026	88,845,008.77	93,952,168.54	5.748%
2027	90,061,684.22	95,074,874.41	5.566%
2028	91,285,377.13	96,730,309.95	5.965%
2029	92,517,808.12	97,820,749.76	5.732%
2030	93,759,809.68	98,880,385.54	5.461%

La variable de temperatura incorporada en la función de demanda refleja su efecto en los niveles de consumo acumulados al 2030, los cuales suman un total 85,075,961.37 m³ consumidos, los cuales, en términos económicos implica un incremento de los costos de producción considerando que ninguna medida de adaptación es implementada.

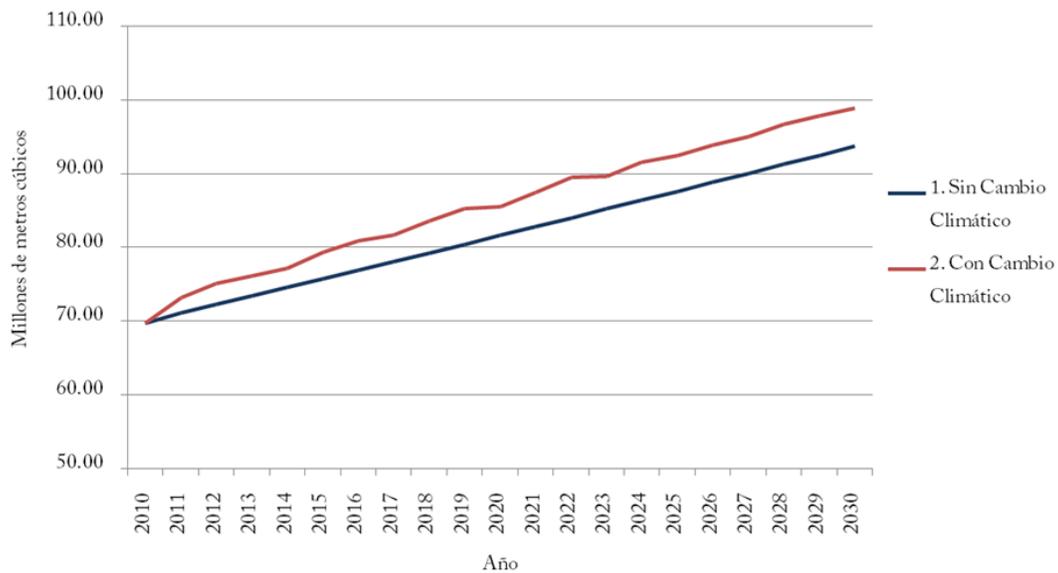


Figura 5. 2 Volumen facturado con y sin cambio climático

Si bien la demanda no presenta un crecimiento lineal ya que las condiciones climáticas varían año con año, esta tiende a incrementar a lo largo del tiempo, lo que a largo plazo implicaría aun costos mayores para el organismo operador. En la figura 5.3 se presenta el volumen facturado con y sin cambio climático y la figura 5.4 muestra el incremento de la demanda respecto al escenario base.

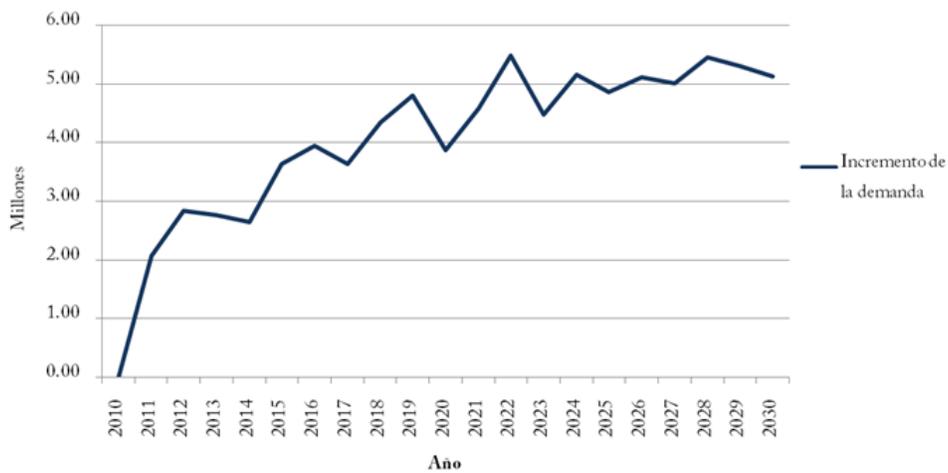


Figura 5. 3 Incremento de la demanda, respecto al escenario base

5.5 Índice de vulnerabilidad y evaluación de costos de adaptación

Los resultados obtenidos del índice de vulnerabilidad y los costos de adaptación obtenidos para cada uno de los escenarios planteados, se describen a continuación.

5.5.1 Escenario 1

Corresponde a un escenario sin cambio climático, en el que no se presentan incrementos de temperatura y disminución de la precipitación, la población, el PIB y la tarifa crecen a las tasas esperadas y los niveles de desempeño permanecen constantes.

Bajo dichos supuestos, el índice de vulnerabilidad se incrementa 6.5 puntos, de 125.9 a 132.4. Este incremento dado por el crecimiento poblacional, implica mayores consumos ya que si bien el consumo per cápita se mantiene en promedio en 186 l/h/d (litros por hora por día), el indicador de disponibilidad aumenta ya que el crecimiento de la población incrementa el volumen consumido total y considerando que la capacidad instalada no cambia, se reduce el volumen disponible para satisfacer las demandas de agua potable futuras (Figura 5.5).

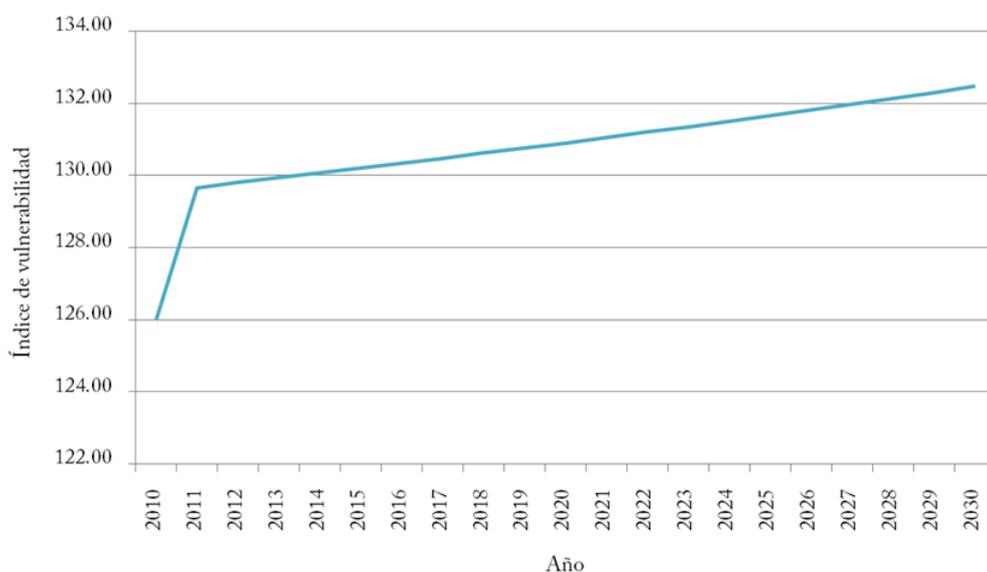


Figura 5. 4 Índice de vulnerabilidad. Escenario 1

Tabla 5. 13 Indicadores de vulnerabilidad. Escenario 1

Año	Temperatura promedio anual (°C)	Precipitación promedio anual (mm)	Consumo (l/h/d)	Grado de confiabilidad	Disponibilidad	Grado de presión (%)	Eficiencia económica	Eficiencia física	Eficiencia comercial
2010	186.773	152.000	186.773	0.045	0.398	0.733	0.478	0.874	0.787
2011	187.951	138.840	187.951	0.046	0.406	0.733	0.481	0.874	0.787
2012	187.640	138.840	187.640	0.046	0.413	0.733	0.484	0.874	0.787
2013	187.346	138.840	187.346	0.046	0.420	0.733	0.487	0.874	0.787
2014	187.069	138.840	187.069	0.046	0.426	0.733	0.489	0.874	0.787
2015	186.812	138.840	186.812	0.046	0.433	0.733	0.492	0.874	0.787
2016	186.575	138.840	186.575	0.046	0.439	0.733	0.494	0.874	0.787
2017	186.361	138.840	186.361	0.046	0.446	0.733	0.497	0.874	0.787
2018	186.171	138.840	186.171	0.046	0.453	0.733	0.499	0.874	0.787
2019	186.008	138.840	186.008	0.046	0.460	0.733	0.501	0.874	0.787
2020	185.872	138.840	185.872	0.046	0.466	0.733	0.504	0.874	0.787
2021	185.766	138.840	185.766	0.046	0.473	0.733	0.506	0.874	0.787
2022	185.692	138.840	185.692	0.046	0.480	0.733	0.508	0.874	0.787
2023	185.652	138.840	185.652	0.046	0.487	0.733	0.510	0.874	0.787
2024	185.649	138.840	185.649	0.046	0.494	0.733	0.512	0.874	0.787
2025	185.684	138.840	185.684	0.046	0.501	0.733	0.515	0.874	0.787
2026	185.761	138.840	185.761	0.046	0.508	0.733	0.517	0.874	0.787
2027	185.882	138.840	185.882	0.046	0.515	0.733	0.519	0.874	0.787
2028	186.050	138.840	186.050	0.046	0.522	0.733	0.521	0.874	0.787
2029	186.267	138.840	186.267	0.046	0.529	0.733	0.523	0.874	0.787
2030	186.538	138.840	186.538	0.046	0.536	0.733	0.525	0.874	0.787

Los costos obtenidos para este escenario se presentan en la tabla 5.14 y estos, no incluyen ningún efecto climático por lo que corresponden a los costos que implica únicamente el crecimiento de la población y que permitirá evaluar el impacto del cambio climático en los costos de producción, suministro y distribución de agua potable.

Tabla 5. 14 Costos totales. Escenario base

Año	Costos totales (pesos)	Año	Costos totales (pesos)	Año	Costos totales (pesos)
2010	950,459,203.26	2017	1,260,591,982.85	2024	1,662,554,528.94
2011	991,733,880.48	2018	1,311,687,484.05	2025	1,729,158,914.84
2012	1,032,409,009.43	2019	1,364,757,268.06	2026	1,798,327,950.92
2013	1,074,644,887.14	2020	1,419,887,135.26	2027	1,870,178,378.22
2014	1,118,501,529.52	2021	1,477,151,413.91	2028	1,944,827,679.33
2015	1,164,062,685.05	2022	1,536,632,699.75	2029	2,022,409,167.96
2016	1,211,403,325.03	2023	1,598,408,643.22	2030	2,103,049,066.85

5.5.2 Escenario 2

Corresponde al escenario con cambio climático, semejante al escenario base, el PIB, el precio y la tarifa, crecen a las tasas esperadas mientras que los niveles de desempeño permanecen constantes. Si bien, para el caso específico de la CESPМ la temperatura es la única variable climática considerada en el modelo de estimación de la demanda, la precipitación se incluye en el análisis de vulnerabilidad ya que una disminución de esta variable podría resultar en una mayor competencia de agua entre los diferentes usos.

El índice de vulnerabilidad se incrementa en promedio 8.5 puntos, 2 puntos más que en el escenario base; la tendencia creciente de la vulnerabilidad al igual que las caídas se explican como consecuencia del incremento de la temperatura que si bien varía anualmente, tiende a incrementar durante el periodo proyectado (Figura 5.6).

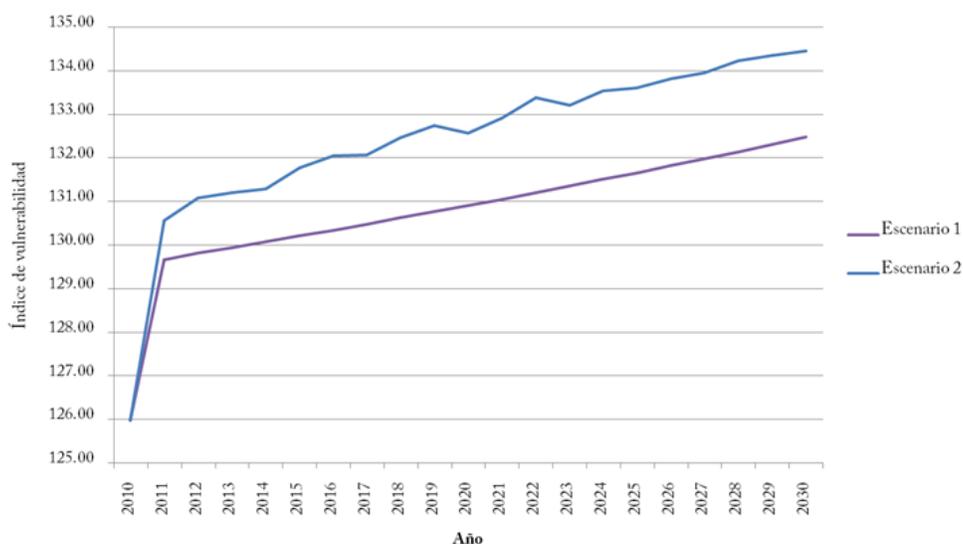


Figura 5. 5 Índice de vulnerabilidad. Escenario 2

Al igual que el escenario base, el consumo y la disponibilidad se ven afectados por el crecimiento de la población sin embargo, el grado de exposición, dado por las variaciones de temperatura reflejan el peso de dicha variable en el cálculo del índice que por sí sola vuelve más susceptible al organismo operador.

Dichas variaciones de temperatura incrementan el consumo en promedio a 197 l/h/d, que respecto al escenario base representa cerca de 10 l/h/d lo que no solo implica mayor volumen de producción

sino también inversiones para mantener los niveles de eficiencia actuales. La Tabla 5. 15 muestra los indicadores de vulnerabilidad del Escenario 2.

Tabla 5. 15 Indicadores de vulnerabilidad. Escenario 2

Año	Temperatura promedio anual (°C)	Precipitación promedio anual (mm)	Consumo (l/h/d)	Grado de confiabilidad	Disponibilidad	Grado de presión (%)	Eficiencia económica	Eficiencia física	Eficiencia comercial
2010	20.600	152.000	186.773	0.045	0.398	0.733	0.478	0.874	0.787
2011	21.249	138.146	193.419	0.047	0.418	0.733	0.486	0.874	0.787
2012	21.425	137.452	195.006	0.046	0.429	0.733	0.490	0.874	0.787
2013	21.396	136.757	194.390	0.045	0.435	0.733	0.493	0.874	0.787
2014	21.358	136.063	193.710	0.045	0.441	0.733	0.495	0.874	0.787
2015	21.573	135.369	195.761	0.046	0.454	0.733	0.499	0.874	0.787
2016	21.630	134.675	196.136	0.046	0.462	0.733	0.502	0.874	0.787
2017	21.546	133.981	195.021	0.045	0.467	0.733	0.504	0.874	0.787
2018	21.690	133.286	196.379	0.046	0.478	0.733	0.507	0.874	0.787
2019	21.772	132.592	197.096	0.046	0.487	0.733	0.510	0.874	0.787
2020	21.562	131.898	194.700	0.045	0.489	0.733	0.511	0.874	0.787
2021	21.696	131.204	196.037	0.046	0.499	0.733	0.514	0.874	0.787
2022	21.867	130.510	197.803	0.046	0.511	0.733	0.518	0.874	0.787
2023	21.648	129.815	195.412	0.045	0.513	0.733	0.518	0.874	0.787
2024	21.770	129.121	196.712	0.046	0.523	0.733	0.521	0.874	0.787
2025	21.699	128.427	195.985	0.045	0.528	0.733	0.523	0.874	0.787
2026	21.734	127.733	196.439	0.046	0.537	0.733	0.525	0.874	0.787
2027	21.703	127.039	196.229	0.045	0.543	0.733	0.527	0.874	0.787
2028	21.773	126.344	197.147	0.046	0.553	0.733	0.529	0.874	0.787
2029	21.734	125.650	196.944	0.045	0.559	0.733	0.531	0.874	0.787
2030	21.688	124.956	196.725	0.045	0.565	0.733	0.533	0.874	0.787

Si bien, los indicadores de desempeño permanecen constantes al incrementarse la demanda (ya sea únicamente por el crecimiento de la población o considerando el cambio climático) el organismo operador se ve obligado a incrementar el volumen producido y cobrado en la misma proporción que la demanda, lo que implica mayores costos de producción.

Para el escenario 2, esta diferencia de los costos de producción totales está dada por los cambios de temperatura, la cual tiende a incrementar con el tiempo al igual que los costos como se puede observar en la Tabla 5.15.

En la tabla 5.16 se pueden observar en primer lugar los costos totales de producción, distribución y suministro de agua potable bajo los supuestos del escenario base y un incremento de temperatura y en segundo lugar el impacto del cambio climático que únicamente representa los costos que

implica un incremento de la temperatura promedio anual de la ciudad y que al periodo de proyección suman 1,084 millones de pesos. La figura 5. 7 presenta la gráfica del incremento de costos respecto al escenario base.

Tabla 5. 16 Costos totales. Escenario 2

Año	Costos totales (pesos)	Impacto económico del cambio climático (pesos)
2010	950,459,203.26	0.00
2011	1,010,700,978.86	18,967,098.39
2012	1,059,202,001.18	26,792,991.75
2013	1,101,502,907.44	26,858,020.30
2014	1,145,031,707.69	26,530,178.17
2015	1,201,512,472.59	37,449,787.54
2016	1,253,299,131.89	41,895,806.87
2017	1,300,320,208.81	39,728,225.96
2018	1,360,696,990.21	49,009,506.16
2019	1,420,461,137.06	55,703,868.99
2020	1,466,273,770.06	46,386,634.80
2021	1,533,582,227.69	56,430,813.78
2022	1,606,185,087.02	69,552,387.27
2023	1,656,973,727.00	58,565,083.77
2024	1,731,902,006.39	69,347,477.45
2025	1,796,575,969.66	67,417,054.81
2026	1,871,279,545.82	72,951,594.90
2027	1,943,935,974.13	73,757,595.91
2028	2,027,340,668.74	82,512,989.41
2029	2,105,181,247.82	82,772,079.86
2030	2,185,372,419.68	82,323,352.83
Total	31,727,789,382.99	1,084,952,548.92



Figura 5. 6 Incremento de costos respecto al escenario base

5.5.3 Escenario 3

De acuerdo al índice de vulnerabilidad planteado, los niveles de desempeño determinan la capacidad de respuesta de un organismo operador ante un escenario de cambio climático, por lo tanto, un incremento de la eficiencia física o comercial se verá reflejado en una menor vulnerabilidad y menores impactos económicos. La figura 5.8 muestra el índice de vulnerabilidad del Escenario 3. Si bien, los niveles de desempeño de la CESPMP son aceptables, el escenario 3 plantea pasar de una eficiencia comercial a 79 a 85% ya que el escenario 3 busca mejorar la cobranza y aumentar la recaudación del organismo operador de manera que se cuenten con excedentes monetarios que permitan hacer frente a las nuevas condiciones impuestas por un escenario de cambio climático. De acuerdo a dicho escenario, el índice de vulnerabilidad se incrementa en cerca de 7.5 puntos tomando como referencia el valor al 2010, un punto menos que el escenario de cambio climático.

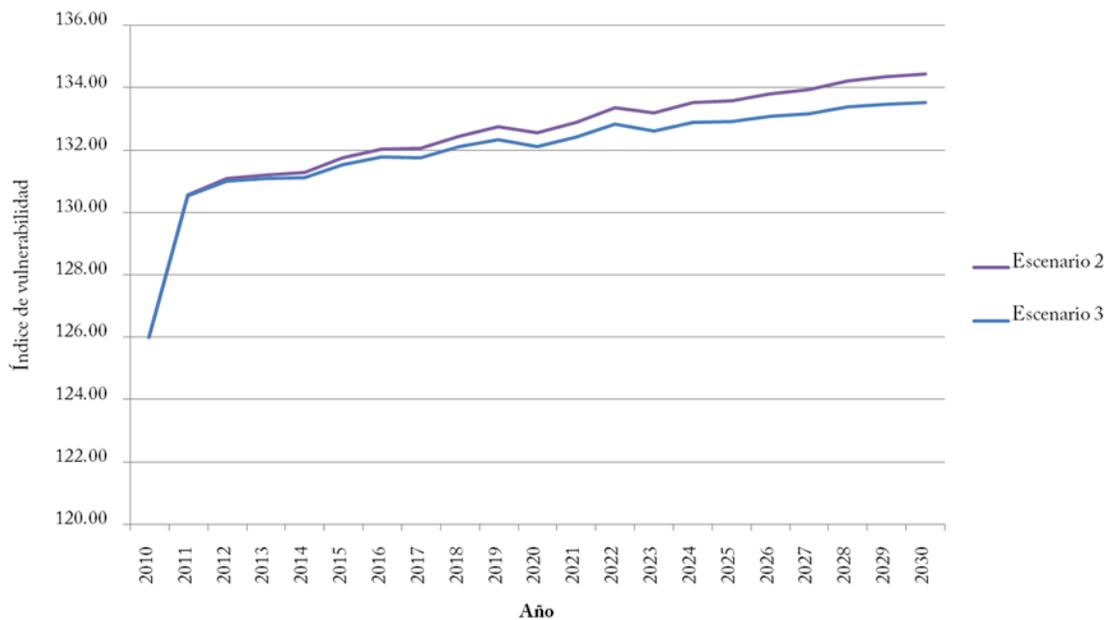


Figura 5. 7 Índice de vulnerabilidad. Escenario 3

El efecto de mejorar la eficiencia comercial en el nivel de vulnerabilidad de este organismo operador es bajo, ya que la eficiencia comercial actual ya es alta, sin considerar que la eficiencia económica disminuye, ya que mejorar la eficiencia implica una serie de medidas administrativas y operativas que incrementan los costos de producción y considerando que no hay un incremento de la tarifa la vulnerabilidad se incrementa. La Tabla 5. 17 muestra los indicadores de vulnerabilidad del Escenario 3.

Tabla 5. 17 . Indicadores de vulnerabilidad. Escenario 3

Año	Temperatura promedio anual (°C)	Precipitación promedio anual (mm)	Consumo (l/h/d)	Grado de confiabilidad	Disponibilidad	Grado de presión (%)	Eficiencia económica	Eficiencia física	Eficiencia comercial
2010	20.600	152.000	186.773	0.045	0.398	0.733	0.478	0.874	0.787
2011	21.249	138.146	193.419	0.047	0.418	0.733	0.486	0.874	0.790
2012	21.425	137.452	195.006	0.046	0.429	0.733	0.490	0.874	0.794
2013	21.396	136.757	194.390	0.045	0.435	0.733	0.492	0.874	0.797
2014	21.358	136.063	193.710	0.045	0.441	0.733	0.494	0.874	0.800
2015	21.573	135.369	195.761	0.046	0.454	0.733	0.498	0.874	0.803
2016	21.630	134.675	196.136	0.046	0.462	0.733	0.501	0.874	0.806
2017	21.546	133.981	195.021	0.045	0.467	0.733	0.502	0.874	0.809
2018	21.690	133.286	196.379	0.046	0.478	0.733	0.506	0.874	0.812
2019	21.772	132.592	197.096	0.046	0.487	0.733	0.508	0.874	0.816
2020	21.562	131.898	194.700	0.045	0.489	0.733	0.509	0.874	0.819
2021	21.696	131.204	196.037	0.046	0.499	0.733	0.512	0.874	0.822
2022	21.867	130.510	197.803	0.046	0.511	0.733	0.515	0.874	0.825
2023	21.648	129.815	195.412	0.045	0.513	0.733	0.515	0.874	0.828
2024	21.770	129.121	196.712	0.046	0.523	0.733	0.518	0.874	0.831
2025	21.699	128.427	195.985	0.045	0.528	0.733	0.519	0.874	0.834
2026	21.734	127.733	196.439	0.046	0.537	0.733	0.522	0.874	0.837
2027	21.703	127.039	196.229	0.045	0.543	0.733	0.523	0.874	0.841
2028	21.773	126.344	197.147	0.046	0.553	0.733	0.525	0.874	0.844
2029	21.734	125.650	196.944	0.045	0.559	0.733	0.527	0.874	0.847
2030	21.688	124.956	196.725	0.045	0.565	0.733	0.528	0.874	0.850

Si bien, el índice se ve afectado en poca medida y los costos resultan aún mayores respecto al escenario con cambio climático; el volumen cobrado se incrementa, lo que se traduce en mayores ingresos para el organismo operador que podrán invertirse en mejoras a la operación e infraestructura que ante fenómenos como el cambio climático incrementarían la capacidad de adaptación del organismo operador.

Por lo tanto, desde el punto de vista económico, resulta con mayores costos mejorar la eficiencia comercial que no plantear ninguna medida de adaptación, no obstante, el impacto económico de la medida de adaptación que representa una mejora en la eficiencia comercial se traduce en un beneficio al aumentar la capacidad de respuesta y a largo plazo también en excedentes de ingresos que tendera a disminuir el déficit económico que existe actualmente en el organismo operador. La Tabla 5. 18 muestra los costos totales del Escenario 3.

Tabla 5. 18 Costos totales (pesos). Escenario 3

Año	Costos totales (pesos)	Impacto económico del cambio climático (pesos)	Impacto económico de la medida de adaptación (pesos)
2010	950,459,203.26	0.00	0.00
2011	1,011,086,267.70	19,352,387.22	385,288.84
2012	1,060,016,574.25	27,607,564.83	814,573.07
2013	1,102,779,553.09	28,134,665.95	1,276,645.65
2014	1,146,809,046.90	28,307,517.37	1,777,339.21
2015	1,203,864,332.02	39,801,646.97	2,351,859.44
2016	1,256,260,262.47	44,856,937.44	2,961,130.58
2017	1,303,916,372.23	43,324,389.38	3,596,163.42
2018	1,365,028,341.33	53,340,857.28	4,331,351.12
2019	1,425,577,985.82	60,820,717.76	5,116,848.77
2020	1,472,148,086.86	52,260,951.60	5,874,316.79
2021	1,540,385,125.13	63,233,711.22	6,802,897.44
2022	1,614,012,324.34	77,379,624.59	7,827,237.32
2023	1,665,727,050.46	67,318,407.24	8,753,323.47
2024	1,741,814,194.79	79,259,665.85	9,912,188.40
2025	1,807,624,309.14	78,465,394.29	11,048,339.48
2026	1,883,609,141.28	85,281,190.36	12,329,595.46
2027	1,957,590,415.68	87,412,037.46	13,654,441.55
2028	2,042,491,329.36	97,663,650.03	15,150,660.63
2029	2,121,839,072.94	99,429,904.98	16,657,825.12
2030	2,203,628,648.97	100,579,582.13	18,256,229.30
Total	31,876,667,638.03	1,233,830,803.96	148,878,255.04

Así, el impacto económico que generaría el cambio climático bajo un escenario en el que se mejora la eficiencia comercial sumaría cerca de 1,233 millones de pesos, es decir 148 millones de pesos más que el escenario de cambio climático sin adaptación.

5.5.4 Escenario 4

Como se ha mencionado, los niveles de desempeño de la CESPMM son altos, sin embargo al igual que el escenario 3, un incremento de la eficiencia física permitiría mejorar la distribución y suministro de agua potable, reduciendo los costos de producción.

El escenario 4 corresponde a un incremento de la eficiencia física de 87 a 90% que se traduce en una reducción del agua no contabilizada y por lo tanto volúmenes de producción menores a los considerados en un escenario de cambio climático. La figura 5.9 muestra el índice de vulnerabilidad del Escenario 4.

Bajo este escenario el índice de vulnerabilidad es ligeramente menor al escenario 2 ya que el índice se incrementa en 8.1 puntos, sin embargo su efecto en la vulnerabilidad es todavía menor que el escenario 3, dado que el incremento porcentual planteado de la eficiencia física resulta menor al planteado en la eficiencia comercial.

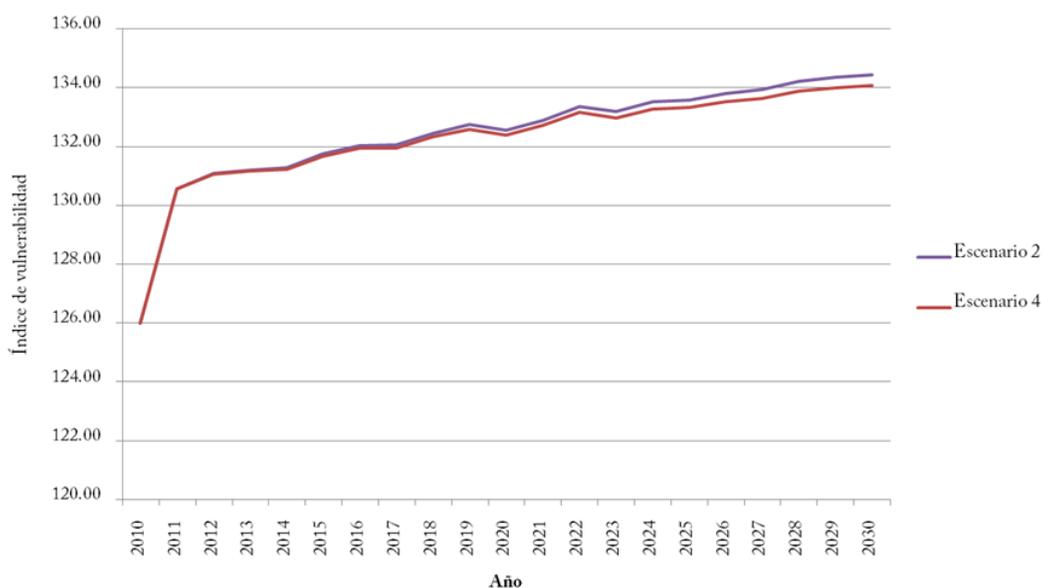


Figura 5. 8 Índice de vulnerabilidad. Escenario 4

Considerando que reducir los niveles de agua no contabilizada también implica un incremento de los costos de producción, el indicador de eficiencia económica resulta ligeramente menor al escenario 3, ya que si bien, se produce un menor volumen de agua, es necesario realizar inversiones que permitan reducir las pérdidas de agua en la red.

Tabla 5. 19 Indicadores de vulnerabilidad. Escenario 4

Año	Temperatura promedio anual (°C)	Precipitación promedio anual (mm)	Consumo (l/h/d)	Grado de confiabilidad	Disponibilidad	Grado de presión (%)	Eficiencia económica	Eficiencia física	Eficiencia comercial
2010	20.600	152.000	186.773	0.045	0.398	0.733	0.478	0.874	0.787
2011	21.249	138.146	193.419	0.047	0.418	0.733	0.486	0.875	0.787
2012	21.425	137.452	195.006	0.046	0.429	0.733	0.490	0.876	0.787
2013	21.396	136.757	194.390	0.045	0.435	0.733	0.492	0.878	0.787
2014	21.358	136.063	193.710	0.045	0.441	0.733	0.493	0.879	0.787
2015	21.573	135.369	195.761	0.046	0.454	0.733	0.497	0.880	0.787
2016	21.630	134.675	196.136	0.046	0.462	0.733	0.500	0.882	0.787
2017	21.546	133.981	195.021	0.045	0.467	0.733	0.501	0.883	0.787
2018	21.690	133.286	196.379	0.046	0.478	0.733	0.504	0.884	0.787
2019	21.772	132.592	197.096	0.046	0.487	0.733	0.506	0.886	0.787
2020	21.562	131.898	194.700	0.045	0.489	0.733	0.506	0.887	0.787
2021	21.696	131.204	196.037	0.046	0.499	0.733	0.509	0.888	0.787
2022	21.867	130.510	197.803	0.046	0.511	0.733	0.512	0.890	0.787
2023	21.648	129.815	195.412	0.045	0.513	0.733	0.512	0.891	0.787
2024	21.770	129.121	196.712	0.046	0.523	0.733	0.515	0.892	0.787
2025	21.699	128.427	195.985	0.045	0.528	0.733	0.516	0.893	0.787
2026	21.734	127.733	196.439	0.046	0.537	0.733	0.518	0.895	0.787
2027	21.703	127.039	196.229	0.045	0.543	0.733	0.519	0.896	0.787
2028	21.773	126.344	197.147	0.046	0.553	0.733	0.521	0.897	0.787
2029	21.734	125.650	196.944	0.045	0.559	0.733	0.522	0.899	0.787
2030	21.688	124.956	196.725	0.045	0.565	0.733	0.523	0.900	0.787

La Tabla 5.19 muestra el costo que implica reducir el agua no contabilizada y el impacto en el volumen producido tras realizar mejoras en la redes de agua. El costo por reparación de fugas representa el costo de inversión considerado en la ecuación de costos de adaptación planteada en la metodología. La figura 5.10 muestra el volumen producido en millones de m³ y la Tabla 5. 20 muestra el ahorro de agua y costo por reparación de fugas de este escenario.

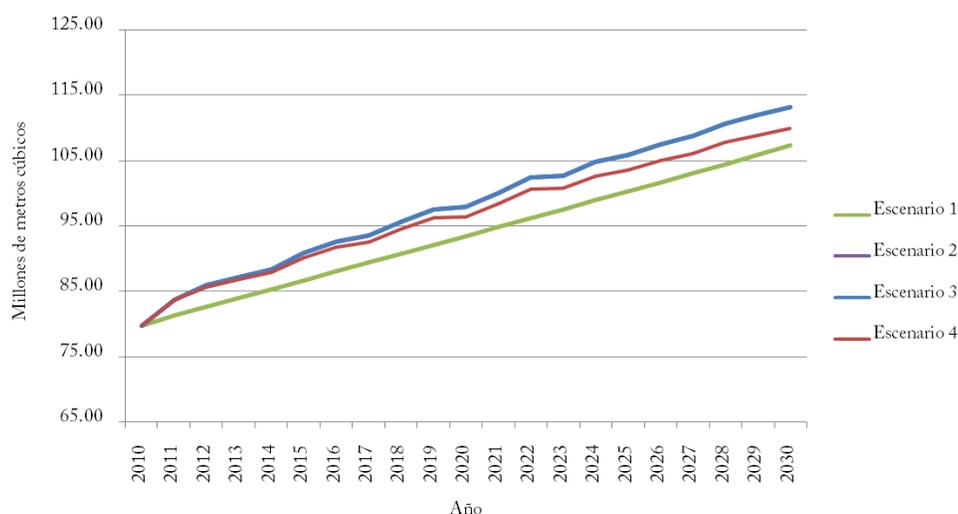


Figura 5. 9 Volumen producido (millones de m³)

Tabla 5. 20 Ahorro de agua y costo por reparación de fugas

Año	Volumen producido (m ³)	Volumen producido con reparación de fugas (m ³)	Ahorro de agua por reparación (m ³)	Costo por reparación de fugas (\$)
2010	79,788,091.24	79,788,091.24	0.00	0.00
2011	83,748,116.95	83,623,102.97	125,013.99	1,467,914.22
2012	85,822,800.81	85,694,880.81	127,919.99	1,547,097.67
2013	86,929,406.27	86,800,029.70	129,376.57	1,611,655.25
2014	87,992,137.01	87,861,373.40	130,763.61	1,677,801.76
2015	90,300,840.02	90,166,844.61	133,995.40	1,770,846.33
2016	91,849,035.07	91,712,944.28	136,090.79	1,852,494.58
2017	92,689,060.74	92,551,928.49	137,132.26	1,922,671.31
2018	94,697,883.77	94,557,986.46	139,897.31	2,020,282.05
2019	96,402,358.26	96,260,153.01	142,205.25	2,115,219.80
2020	96,562,080.65	96,419,849.60	142,231.05	2,179,071.70
2021	98,553,737.75	98,408,786.59	144,951.16	2,287,367.82
2022	100,768,006.95	100,620,016.75	147,990.20	2,405,384.54
2023	100,843,876.15	100,695,991.71	147,884.44	2,475,775.47
2024	102,798,516.13	102,647,986.02	150,530.11	2,595,669.43
2025	103,675,812.36	103,524,219.59	151,592.78	2,692,413.30
2026	105,154,493.11	105,000,962.72	153,530.38	2,808,631.65
2027	106,255,699.03	106,100,787.01	154,912.02	2,918,923.96
2028	107,948,204.80	107,791,054.36	157,150.44	3,049,934.36
2029	109,006,181.82	108,847,721.87	158,459.95	3,167,609.51
2030	110,026,806.49	109,867,095.05	159,711.44	3,288,405.58
Total	2,031,813,145.38	2,028,941,806.242	2,871,339.14	45,855,170.27

En este escenario los costos totales incluyen las inversiones realizadas por reparación de fugas, sin embargo, es posible observar que aun con el incremento de costos, se obtienen ahorros respecto al escenario sin adaptación ya que como se ha mencionado, el volumen a producir resulta menor por lo que los costos de producción, administración y cobranza disminuyen, generando beneficios

económicos. Es decir, el impacto económico que generaría el cambio climático bajo un escenario en el que se reducen las pérdidas de agua, sumaría 955 millones de pesos, es decir 129 millones de pesos menos que el escenario de cambio climático sin adaptación. La Tabla 5. 21 muestra los costos totales del Escenario 4.

Tabla 5. 21 Costos totales (pesos). Escenario 4

Año	Costos totales (pesos)	Impacto económico del cambio climático (pesos)	Impacto económico de la medida de adaptación (pesos)
2010	950,459,203.26	0.00	0.00
2011	1,011,706,628.87	19,972,748.39	1,005,650.01
2012	1,059,773,242.04	27,364,232.61	571,240.86
2013	1,101,587,420.15	26,942,533.01	84,512.71
2014	1,144,586,589.34	26,085,059.82	-445,118.35
2015	1,200,478,338.90	36,415,653.85	-1,034,133.69
2016	1,251,625,222.95	40,221,897.93	-1,673,908.94
2017	1,297,966,553.61	37,374,570.76	-2,353,655.20
2018	1,357,574,316.69	45,886,832.64	-3,122,673.52
2019	1,416,509,680.16	51,752,412.09	-3,951,456.90
2020	1,461,498,348.85	41,611,213.59	-4,775,421.22
2021	1,527,827,618.89	50,676,204.98	-5,754,608.80
2022	1,599,351,170.91	62,718,471.16	-6,833,916.11
2023	1,649,132,198.43	50,723,555.20	-7,841,528.57
2024	1,722,831,557.24	60,277,028.31	-9,070,449.15
2025	1,786,284,088.16	57,125,173.32	-10,291,881.49
2026	1,859,619,273.61	61,291,322.69	-11,660,272.21
2027	1,930,854,635.18	60,676,256.97	-13,081,338.95
2028	2,012,662,917.47	67,835,238.13	-14,677,751.27
2029	2,088,885,982.64	66,476,814.68	-16,295,265.18
2030	2,167,361,350.03	64,312,283.18	-18,011,069.65
Total	31,598,576,337.38	955,739,503.31	- 129,213,045.61

Los costos totales en cada escenario se observan en la figura 5.11, el escenario 4 que considera un incremento de la eficiencia física genera los mayores beneficios económicos ya que el volumen a producir resulta menor debido a la reducción del agua no contabilizada.

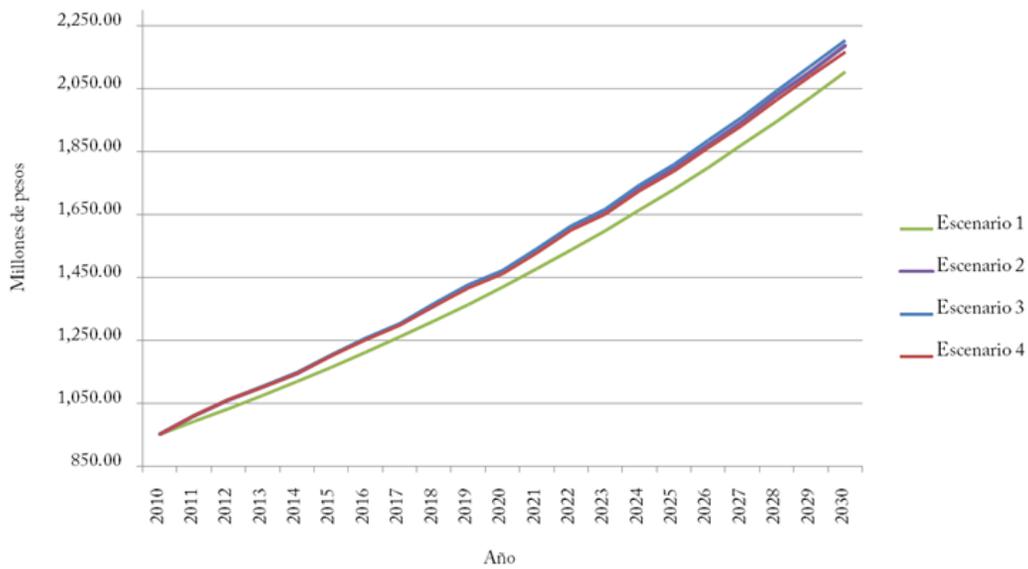


Figura 5. 10 Costos totales

Bajo este contexto, las medidas de adaptación que busquen un uso eficiente del agua tenderán a disminuir los impactos económicos del cambio climático, ya que estas mejoras o medidas se traducen en menores volúmenes producidos y por ende en menores costos, que se traducen en un impacto económico menor.

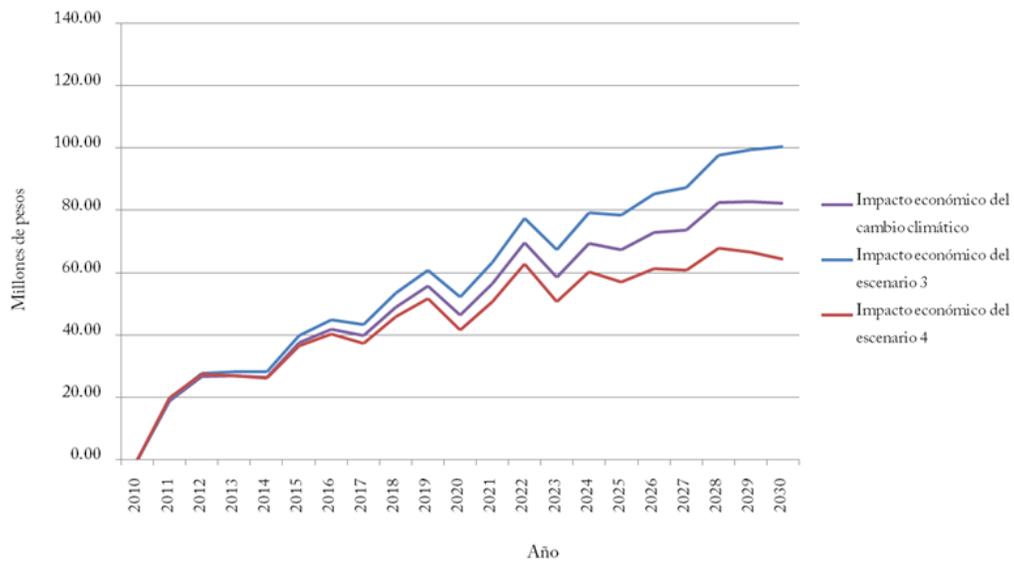


Figura 5. 11 Impacto económico del cambio climático y de las medidas de adaptación

Sin embargo, las medidas encaminadas a aumentar la capacidad económica del organismo operador, si bien incrementan los costos totales, los ingresos se ven favorecidos al incrementar el volumen cobrado. La figura 5.12 muestra el impacto económico del cambio climático y de las medidas de adaptación y la figura 5.13 muestra la relación egresos/ingresos para los cuatro escenarios.

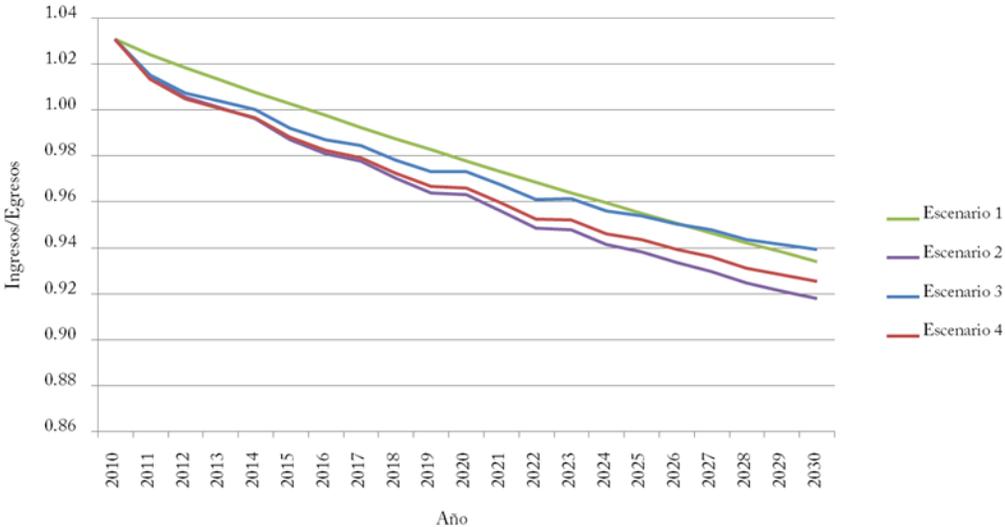


Figura 5. 12 Relación egresos/ingresos

En la CESP, aun cuando el incremento de la eficiencia comercial representa la medida de adaptación más costosa, su efecto en la condición del organismo operador se traduce en mayores ingresos que tenderán a disminuir el déficit económico que existe actualmente, aun comparado con un escenario sin cambio climático. De esta forma, plantear un escenario en el que se incremente la eficiencia física y comercial, generará mayores beneficios, ya que favorecería un uso eficiente del agua y generaría excedentes monetarios que incrementarían la capacidad económica del organismo operador y por lo tanto invertir en mejoras administrativas, operativas y/o físicas, no resultaría en efectos adversos.

6. IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA: CASO MONTERREY, NUEVO LEÓN.

El Área Metropolitana de Monterrey (AMM) es la zona conformada por la ciudad de Monterrey, su municipio homónimo y once municipios más del estado de Nuevo León. El estado limita al norte y al este con Tamaulipas; al sur y oeste con San Luis Potosí y Zacatecas; y al norte con Coahuila, Tamaulipas y el estado norteamericano de Texas (Figura 6.1).

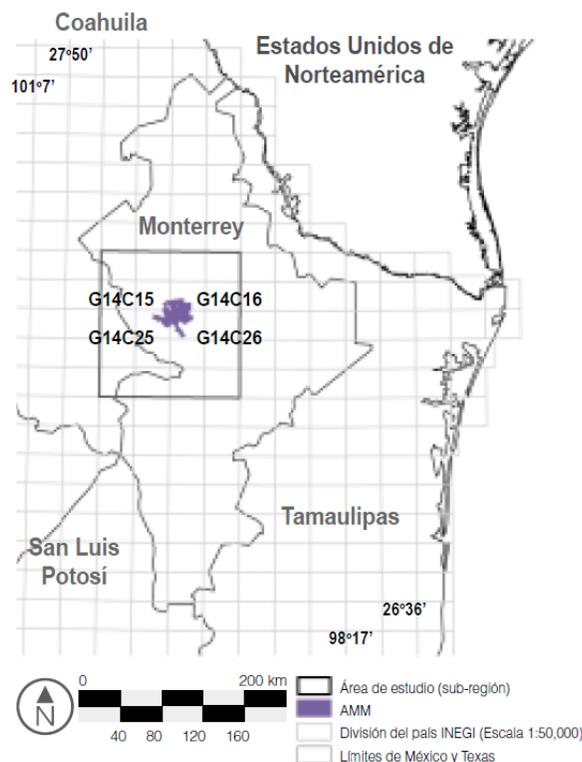


Figura 6. 1 Localización

El área metropolitana tiene una superficie territorial de 6,680 km² y está integrada por doce municipios: Monterrey, Guadalupe, Apodaca, San Nicolás de los Garza, General Escobedo, Santa Catarina, Juárez, García, San Pedro Garza García, Cadereyta Jiménez, Santiago y Salinas Victoria. En 2010 había cerca de 3.9 millones de habitantes, lo que representa un poco más del 80% de la población total del estado de Nuevo León.

En 1956, el Gobierno del Estado, mediante Decreto expedido el 30 de abril del mismo año, expidió la Ley que crea a Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, con el carácter de Institución Pública Descentralizada, con personalidad jurídica propia, cuyo objetivo sería prestar el servicio público municipal de agua y drenaje a los habitantes de la Ciudad de Monterrey, operando y administrando el sistema de agua y drenaje, pudiendo convenir con los municipios circunvecinos, la extensión de dichos servicios.

Una década después en 1980, el área metropolitana tenía ya una población de 1 millón 988 mil 012 habitantes, brindando el servicio al 87 por ciento de la población.

Una fuerte sequía a principios de esta década, obligó al gobierno a implementar diversas acciones para disminuir el problema de la falta de suministro, se realizó un Programa de Emergencia para perforar pozos en el área metropolitana e inclusive, se obtuvo la colaboración de varias industrias que cedieron temporalmente el suministro de agua de sus pozos, para incorporarlos a la red de agua potable de la ciudad. Para el año 2000 se tenía una cobertura del servicio del 99.59 por ciento del área metropolitana que contaba con 3 millones 244 mil 415 habitantes.

Actualmente, la zona metropolitana, se abastece de las fuentes superficiales que aportan en promedio en 60% (6,900 litros por segundo) del agua potable suministrada. La Tabla 6. 1 muestra las fuentes superficiales del Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey.

Tabla 6. 1 Fuentes superficiales. Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey

Fuentes superficiales	Capacidad NAMO	Volumen almacenado
La Boca	39.5 Mm3	Volumen: 21.1 Mm3
Cerro Prieto	300.0 Mm3	Volumen 120.6 Mm3
Cuchillo	1,123.0 Mm3	Volumen 263.5 Mm3
Total	1,462.5 Mm3	405.2 Mm3

El resto del suministro corresponde a fuentes subterráneas que incluyen 43 pozos profundos de entre 70 y 1,000 metros de profundidad (Sistemas Mina, Buenos Aires y AMM), 65 pozos someros de no más de 100 metros de profundidad (AMM), 1 manantial (La Estanzuela), 3 túneles (Cola de Caballo I y II, y San Francisco) y 1 galería filtrante (La Huasteca).

El agua es conducida a la planta potabilizadora de San Roque y distribuida a la zona metropolitana y zona conurbada a través de dos anillos de transferencia con una línea de conducción de 73 y 70 kilómetros de longitud respectivamente que circundan la ciudad y una serie de tanques de almacenamiento y estaciones de bombeo.

Actualmente, el AMM cuenta con una cobertura del servicio de agua potable cercana al 100%, que representa 12,592.91 km de tubería para abastecer de agua potable a un total de 1,112,611 tomas de las cuales, el 94% corresponde al sector doméstico y el resto al comercial, industrial y público.

6.1 Operatividad y administración del sistema

En cuanto a operatividad y administración, el sistema Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey sirve a una población de 4,040,414 habitantes y cuenta con 1,112,557.00 Conexiones. La tabla 6.2 muestra algunos indicadores de este sistema correspondientes al año 2011.

Tabla 6. 2 Indicadores (2011). Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey

Concepto	Unidad	Acumulado a diciembre de 2011
Población servida	Habitantes	4,040,414
Conexiones	Conexiones	1,112,557.00
Cobertura de agua potable	%	99.58
Volumen generado	m3	377,328,240.00
Volumen facturado	m3	270,050,578.00
Volumen cobrado	m3	261,624,999.97
Eficiencia física	%	71.57
Eficiencia comercial	%	96.88
Eficiencia global	%	69.33

Si bien, existe un programa de sectorización en la ciudad con el propósito de optimizar la distribución de agua, regulando los caudales y presiones para disminuir a su vez las pérdidas de agua por fugas en la red de distribución, cerca de 100,000 m³ de agua se pierde o no es contabilizada lo que se traduce en pérdidas económicas importantes. Sin embargo, la eficiencia comercial cercana al 100% se puede observar que es resultado de la destacada cobertura de medición que ha favorecido el uso eficiente del agua y una sobresaliente cultura de pago. La Tabla 6. 3 muestra la cobertura de medición del año 2011 del sistema Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey.

Tabla 6. 3 Cobertura de medición (2011). Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey

No. de conexiones	No. de medidores instalados	No. de conexiones sin medidor	Cobertura de medición (%)
1,112,557	1,112.557	0	100%

En lo relativo a la eficiencia de cobro por concepto de venta de agua (Tabla 6.4), esta presenta un déficit dado que únicamente el 78% del concepto de facturación se recauda, sin embargo esto no ha impedido que los costos de producción puedan ser cubiertos con los mismos ingresos de la empresa.

Tabla 6. 4 Eficiencia de cobro (2011). Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey

Facturación anual (pesos)	Volumen anual facturado (m ³)	Ingresos anuales por venta de agua (pesos)
3,647,221,915.00	270,050,578.00	2,829,046,979.12

Los datos de la tabla 6.5 muestran que de acuerdo a los balances anuales de ingresos y egresos totales existe autosuficiencia financiera que se traduce en capacidad operativa para cubrir las actividades y compromisos que implica el suministro de agua potable.

Tabla 6. 5 Índice operativo (2011). Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey

Ingresos (pesos)	Egresos (pesos)	Índice operativo
3,570,626,600.00	3,275,162,738.00	1.09

6.2 Índice de vulnerabilidad

De acuerdo a la información publicada en el anuario estadístico sobre la operación de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, se evaluó el grado de susceptibilidad del organismo operador a través del índice de vulnerabilidad descrito en la metodología.

Los valores de los indicadores se corresponden a datos para el Área Metropolitana de Monterrey en el periodo correspondiente al 2010 se muestran en la tabla 6.6

Tabla 6. 6 Índice de vulnerabilidad (2010). Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey

Factores de vulnerabilidad	Indicador	Rango		Ponderación (Grado de vulnerabilidad)	AMM 2010	
		Real	Normalizado		Valor normalizado	Valor ponderado
Grado de exposición	Temperatura promedio anual (°C)	17.0 – 22.0	1.00 – 4.46	1	4.03	4.03
		22.0- 26.0	4.46 – 7.23	2		
		26.0 – 30.0	7.23 - 10.00	3		
	Precipitación promedio anual (mm)	100.0 - 750.0	10.00 - 7.00	3	7.63	22.88
		750.0 - 1400.0	7.00 - 4.00	2		
		1400.0 - 2050.0	4.00 - 1.00	1		
Sensibilidad	Consumo (l/h/d)	100 – 150	1.00 - 2.29	1	1.90	1.90
		150 - 300	2.29 - 6.14	2		
		300 - 450	6.14 -10.00	3		
	Grado de confiabilidad: Costos de mto./Ingreso total	0 - 0.15	10.00 – 7.00	3	9.57	28.72
		0.15 - 0.30	7.00 – 4.00	2		
		0.30 - 0.45	4.00 – 1.00	1		
	Demanda/Oferita	0.20 - 0.40	1.00 – 3.25	1	1.96	1.96
		0.40 - 0.70	3.25 – 6.63	2		
		0.70 – 1.0	6.63 – 10.00	3		
	Grado de presión (%): Vol. Concesionado/Agua renovable	0 - 20	1.00 - 2.50	1	6.70	20.10
		20 - 40	2.50 – 4.00	2		
		40 - 120	4.00 - 10.00	3		
	Tarifa/Costos de producción	0 - 1.0	10.00 – 6.40	3	5.78	11.57
		1.0 -1.75	6.40 – 3.70	2		
		1.75 – 2.50	3.70 – 1.00	1		
Capacidad de adaptación	Eficiencia física (%)	0.40- 0.50	10.00 – 8.50	3	5.27	5.27
		0.50 – 0.70	8.50 – 5.50	2		
		0.70 – 1.00	5.50 – 1.00	1		
	Eficiencia comercial (%)	0.40- 0.50	10.00 – 8.50	3	1.16	1.16
		0.50 – 0.70	8.50 – 5.50	2		
		0.70 – 1.00	5.50 – 1.00	1		
ÍNDICE DE VULNERABILIDAD						97.59

El AMM se encuentra ubicada en la Cuenca Hidrológica del Río San Juan, en una región semidesértica, de transición entre el subtropical y el desierto, con periodos cíclicos de sequias prolongadas y recurrentes y por contraste de lluvias torrenciales esporádicas (Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, I.P.D., 2011), lo que incrementa considerablemente su grado de exposición.

Considerando que ante un escenario de cambio climático los niveles de precipitación serian aun menores, y tomando en cuenta que ya existe una fuerte presión sobre los recursos hídricos, un

cambio en la disponibilidad en un futuro generaría una mayor competencia entre los distintos usos, dificultando posiblemente el abastecimiento de agua potable además de que el abastecimiento de agua en esta zona siempre ha sido un reto ante el crecimiento económico y demográfico constante que la ha caracterizado.

La variable confiabilidad de la infraestructura representa una de las variables con mayor incidencia, ya que un 2% de los ingresos totales del organismo son destinados a mantenimiento de la infraestructura lo que se refleja en pérdidas de agua de cerca de 100,000 m³ y que podrían incrementarse ante cambios en la calidad del agua o de las propias condiciones climáticas.

Si bien, la eficiencia económica representa un 12% del índice dado que la relación es cercana a uno, los costos de producción no superan la tarifa lo que se ve reflejado en la capacidad económica del organismo operador, sin embargo, se debe tener en cuenta que mantener los niveles de eficiencia actuales o mejorarlos implica invertir en mejoras operativas y administrativas, lo que se traduce en mayores costos de producción.

6.3 Identificación de medidas de adaptación

Considerando los resultados obtenidos del análisis de vulnerabilidad, se construyeron recomendaciones de adaptación fundamentadas en la gestión del agua a partir de los siguientes escenarios:

Escenario 1 (escenario base):

Crece las variables: nivel de precios, PIB y población a las tasas esperadas, la tarifa permanece constante y no hay inversión económica en ninguna de las variables que intervienen en el cálculo del índice, por lo que es de esperarse que la vulnerabilidad aumente al igual que los costos de operación que deberán satisfacer el incremento de la demanda.

Escenario 2:

Crece las variables: nivel de precios, PIB y población a las tasas esperadas, de acuerdo a los escenarios proyectados (2061-2090) la temperatura aumenta 3.43° C y la precipitación disminuye 12.72% respecto a la climatología base (1961-1990), no hay inversión económica en ninguna de las

variables que intervienen en el cálculo del índice por lo que es de esperarse que la vulnerabilidad aumente. Se satisface la demanda por lo que aumentan los costos de operación.

Escenario 3:

Crece las variables: nivel de precios, PIB y población a las tasas esperadas, de acuerdo a los escenarios proyectados (2061-2090) la temperatura aumenta 3.43° C y la precipitación disminuye 12.72% respecto a la climatología base (1961-1990), se incrementa el nivel de eficiencia comercial a un 100%.

Escenario 4:

Crece las variables: nivel de precios, PIB y población a las tasas esperadas, de acuerdo a los escenarios proyectados (2061-2090) la temperatura aumenta 3.43° C y la precipitación disminuye 12.72% respecto a la climatología base (1961-1990), se incrementa el nivel de eficiencia física a un 80%.

6.4 Estimación de la demanda

Se considera que el consumo de agua está en función del precio, ingreso y de variables climatológicas que influyen en el, así, a fin de determinar las correlaciones entre estas variables y estimar el volumen consumido al año 2030 en la ZMM se aplicó el análisis de regresión bajo los supuestos descritos en la metodología de evaluación.

La base de información sobre volumen facturado y tarifa, corresponde a datos obtenidos del anuario estadístico sobre la operación de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, Anuario estadístico sobre la operación de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, I.P.D. en el AMM, 2013); el Producto Interno Bruto y la población atendida, se obtuvo para un periodo de 2002-2011 de acuerdo a las publicaciones del Programa de Indicadores de Gestión en Organismos Operadores del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2009).

La variable climatológica, corresponde a la temperatura promedio anual del estado de Nuevo León para el periodo 2002-2011 de acuerdo al Servicio Meteorológico Nacional (CONAGUA, Servicio

Meteorológico Nacional, 2010). En la tabla 6.7 se muestran los datos utilizados para la estimación de la demanda.

Tabla 6. 7 Base de datos utilizada para la estimación de la demanda. Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey

Año	Volumen facturado anual (m ³)	Población	PIB (\$)	Temperatura promedio anual (°C)	Tarifa media (\$/m ³)	Volumen consumido per cápita anual (m ³)
		POB	PIB	TEMP_{PROM}	PRE_{PROM}	Q_{CON}
2002	231,986,737.0	3,363,417.0	370,533,789,184.31	17.33	6.37	68.97
2003	229,030,698.0	3,428,433.0	372,137,135,213.29	16.78	6.24	66.80
2004	229,610,333.0	3,494,931.0	371,335,462,198.80	16.23	6.19	65.70
2005	229,508,170.0	3,562,612.0	371,736,298,706.04	16.09	6.31	64.42
2006	243,154,624.0	3,611,022.0	371,535,880,452.42	22.34	6.61	67.34
2007	242,028,088.0	3,664,628.0	371,904,450,711.72	21.72	6.89	66.04
2008	258,181,906.0	3,718,966.0	372,297,428,018.04	22.06	7.82	69.42
2009	259,414,627.0	3,843,121.0	379,798,258,100.48	22.50	8.88	67.50
2010	256,548,302.0	3,847,876.0	363,408,011,025.24	21.38	9.19	66.67
2011	270,050,578.0	4,040,414.0	379,836,709,677.51	22.80	10.93	66.84

6.4.1 Análisis de regresión

La estadística descriptiva de las variables del modelo demanda de agua que se describen a continuación, así como el valor del estadístico Jarque-Bera para contrastar la normalidad de la serie y su correspondiente nivel de probabilidad asociado, rechazándose la hipótesis nula de normalidad si dicha probabilidad es muy baja.

Tabla 6. 8 Estadística descriptiva de las variables del modelo de demanda

Estadístico	Q_con	PIB	PRE_prom	TEMP_prom
Media	66.9700	3.72E+11	7.5520	19.9230
Mediana	66.8200	3.72E+11	6.7950	21.5500
Máximo	69.4200	3.80E+11	10.9300	22.8000
Mínimo	64.4200	3.63E+11	6.1900	16.0900
Desviación estándar	1.4733	4.68E+09	1.6214	2.8985
Simetría	0.1259	0.0566	0.9872	-0.3918
Kurtosis	2.5616	3.2449	2.7180	1.2719
Jarque-Bera	0.1065	0.0303	1.6573	1.5001
Probabilidad JB	0.9481	0.9849	0.4366	0.4723
Observaciones	10	10	10	10

Los resultados obtenidos del modelo y las pruebas estadísticas a los que fueron sometidos los datos para soportar su validez, se describen a continuación.

Tabla 6.9 Resultados del análisis de regresión

Dependent variable: Q_con		Sample: 2002 2011		
Method: least squares		Included observations: 10		
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
PIB	1.82E-10	4.86E-12	37.3256	2.47E-08
PRE_PROM	-0.4687	0.2101	-2.2312	0.0672
TEMP_PROM	0.2501	0.1175	2.1286	0.0774
R-squared	0.8389	Mean dependent var		66.9700
Adjusted R-squared	0.7584	S.D. dependent var		1.4733
S.E. of regression	0.7243	Akaike info criterion		2.4818
Sum squared resid	3.1472	Schwarz criterion		2.6029
Log likelihood	-8.4091	Durbin-Watson stat		2.2458

De acuerdo a los resultados de la estimación, la demanda para la ZMM está dada por la siguiente ecuación:

$$Q_{CON} = 1.82E^{-10}PIB - 0.4687 PRE_{PROM} + 0.2501 TEMP_{PROM} \quad \text{Ec. 33}$$

en donde Q_{CON} es la cantidad de agua consumida, PIB es el Producto Interno Bruto, PRE_{PROM} es el precio promedio y $TEMP_{PROM}$ es la temperatura promedio.

El signo de los coeficientes estimados, indican una disminución de la demanda ante un incremento de la tarifa y un mayor consumo de agua a ingresos y temperaturas mayores; la capacidad explicativa conjunta de las variables es elevada ya que estas explican el 83.89% de la variabilidad del volumen consumido lo que indica una importante correlación entre las variables independientes con respecto al volumen consumido el cual está determinado en su mayoría por la variable PIB.

Del mismo modo, los resultados de las pruebas estadísticas a las que fue sometido el modelo indican que los residuos presentan una distribución normal, no autocorrelación, homocedasticidad y permanencia estructural, lo que comprueba la validez del modelo.

La descripción de las pruebas estadísticas a las que fue sometido el modelo y los resultados obtenidos para la ZMM se detallan en el Anexo Técnico.

6.4.2 Proyección de la demanda

Con esta función de demanda se calcula la cantidad demandada de agua para cada uno de los escenarios propuestos bajo los siguientes supuestos:

- ✓ Se espera para un escenario base un crecimiento del PIB en México de un 3.5% anual en promedio y una modificación de las tarifas de acuerdo a una tasa de inflación del 3% anual.
- ✓ El crecimiento poblacional corresponde a la proyección 2005-2030 generada por el Consejo Nacional de Población (CONAPO), con base al Censo de Población del INEGI 2005.
- ✓ La temperatura promedio se considera como la climatología base 1961-1990 más los incrementos de temperatura anuales de acuerdo al escenario climático A2 proyectado para el siglo XXI para el estado de Nuevo León de acuerdo al Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el Cambio Climático (Montero Martínez, Martínez Jiménez, Castillo Pérez, & Espinosa Tamarindo, 2010). La Tabla 6. 10 muestra los supuestos de proyección.

Tabla 6. 10 Supuestos de proyección

Año	Población	PIB (pesos)	Precio promedio (tarifa) (pesos/m ³)	Temperatura promedio (°C)
2010	3,847,876.00	363,408,011,025.24	9.19	21.383
2011	3,964,007.60	376,127,291,411.12	9.47	22.335
2012	4,042,588.35	389,291,746,610.51	9.75	22.745
2013	4,121,399.27	402,916,957,741.88	10.04	22.427
2014	4,200,516.79	417,019,051,262.84	10.34	22.273
2015	4,279,882.96	431,614,718,057.04	10.65	22.565
2016	4,359,456.00	446,721,233,189.04	10.97	22.612
2017	4,439,196.93	462,356,476,350.66	11.30	22.462
2018	4,519,072.73	478,538,953,022.93	11.64	22.704
2019	4,599,048.90	495,287,816,378.73	11.99	22.656
2020	4,679,086.96	512,622,889,951.99	12.35	22.310
2021	4,759,148.34	530,564,691,100.31	12.72	22.925
2022	4,839,205.90	549,134,455,288.82	13.10	22.524
2023	4,919,222.93	568,354,161,223.93	13.50	22.735
2024	4,999,174.99	588,246,556,866.76	13.90	22.735
2025	5,079,017.71	608,835,186,357.10	14.32	22.976
2026	5,158,716.22	630,144,417,879.60	14.75	22.901
2027	5,238,235.04	652,199,472,505.39	15.19	23.053

2028	5,317,528.60	675,026,454,043.07	15.65	22.641
2029	5,396,568.68	698,652,379,934.58	16.11	22.835
2030	5,475,318.51	723,105,213,232.29	16.60	22.897

Los resultados obtenidos de la estimación de la demanda con y sin cambio climático se muestran en la tabla 6.11.

Tabla 6. 11 Resultados de estimación de la demanda con y sin cambio climático (Volumen facturado en m³)

Año	Escenario 1 (sin cambio climático)	Escenario 2 (con cambio climático)	Incremento de la demanda
2010	257,870,003.19	257,870,003.19	0.00
2011	271,185,785.58	271,910,572.43	724,786.86
2012	285,471,257.33	286,619,527.33	1,148,270.00
2013	300,440,386.77	301,284,997.15	844,610.38
2014	316,130,079.38	316,824,722.95	694,643.56
2015	332,568,734.56	333,582,509.69	1,013,775.12
2016	349,787,902.93	350,873,953.25	1,086,050.32
2017	367,819,117.14	368,760,485.42	941,368.27
2018	386,697,335.35	387,922,693.02	1,225,357.67
2019	406,457,097.29	407,658,426.15	1,201,328.85
2020	427,134,916.25	427,953,339.79	818,423.55
2021	448,767,440.37	450,314,600.48	1,547,160.11
2022	471,395,189.85	472,491,342.56	1,096,152.71
2023	495,057,237.60	496,425,482.05	1,368,244.44
2024	519,796,104.03	521,198,510.58	1,402,406.55
2025	545,653,444.60	547,377,747.47	1,724,302.87
2026	572,674,711.12	574,324,112.98	1,649,401.87
2027	600,905,646.82	602,773,246.49	1,867,599.68
2028	630,390,877.19	631,750,331.75	1,359,454.55
2029	661,182,185.59	662,813,500.83	1,631,315.25
2030	693,329,482.40	695,078,377.79	1,748,895.39

De acuerdo a las proyecciones, un incremento de temperatura implica un mayor consumo que proyectado al 2030 suma cerca de 25,093,548.01 m³ adicionales, si bien es una variación pequeña ya que el volumen adicional es menor al 1%, deberá tomarse en consideración que estos incrementos tienden a ser mayores a lo largo del tiempo, lo que a largo plazo implicaría aun costos mayores para el organismo operador. La Figura 6. 3 muestra la gráfica con el Incremento de la demanda respecto al escenario base.

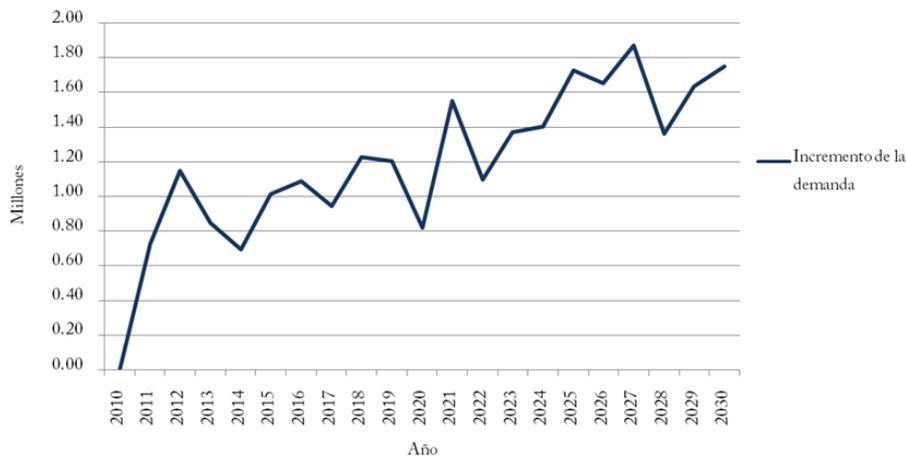


Figura 6. 2 Incremento de la demanda respecto al escenario base (volumen facturado en millones de m³)

Del mismo modo, el crecimiento demográfico aunado posiblemente a una menor disponibilidad natural de agua por la disminución de la precipitación obligara al organismo operador a encontrar fuentes potenciales de abastecimiento y asegurar que la calidad de las mismas sea apropiada para este uso, incrementando así los costos de extracción, potabilización y tratamiento, así como de las redes de distribución, sobre todo si se toma en consideración que ya existe un nivel de vulnerabilidad importante en la ZMM. La figura 6. 3 muestra el incremento de la demanda respecto al escenario base.

6.5 Índice de vulnerabilidad y evaluación de costos de adaptación

Los resultados obtenidos del índice de vulnerabilidad y los costos de adaptación obtenidos para cada uno de los escenarios planteados, se describen a continuación.

6.5.1 Escenario 1

Corresponde a un escenario sin cambio climático, en el que no se presentan incrementos de temperatura y disminución de la precipitación; la población, el PIB y la tarifa crecen a las tasas esperadas y los niveles de desempeño permanecen constantes.

En el escenario base, el índice de vulnerabilidad se incrementa 25.8 puntos, de 97.6 a 123.4. Este incremento esta dado en su totalidad por el crecimiento poblacional que implica mayores consumos. La figura 6.4 muestra el índice de vulnerabilidad y la Tabla 6.12 muestra los indicadores de vulnerabilidad del Escenario 1.

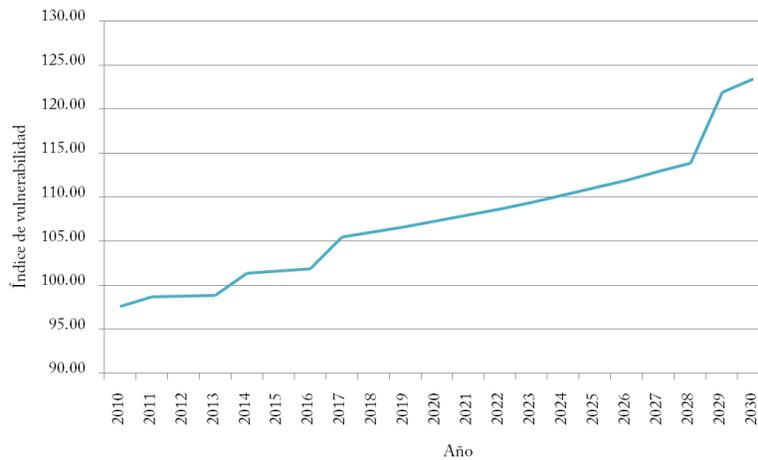


Figura 6. 3 Índice de vulnerabilidad. Escenario 1

A diferencia de la ciudad de Mexicali, en donde el consumo presenta variaciones muy pequeñas, el consumo per cápita en la ZMM se incrementa considerablemente de 135 a 259 l/h/d ya que en este caso la demanda se encuentra fuertemente influida por el nivel de ingresos de la población la cual también tiende a crecer. Adicionalmente, este incremento de la demanda implica que el indicador de disponibilidad se incremente, ya que considerando que la capacidad instalada no cambia, se reduce el volumen disponible y por lo tanto se requieren nuevas fuentes o infraestructura para dotar de agua potable a la población. La Tabla 6. 12 muestra los Indicadores de vulnerabilidad del Escenario 1.

Tabla 6. 12 Indicadores de vulnerabilidad. Escenario 1

Año	Temperatura promedio anual (°C)	Precipitación promedio anual (mm)	Consumo (l/h/d)	Grado de confiabilidad	Disponibilidad	Grado de presión (%)	Eficiencia económica	Eficiencia física	Eficiencia comercial
2010	21.383	614.000	134.895	0.021	0.285	0.760	1.171	0.715	0.990
2011	21.600	550.430	139.392	0.021	0.300	0.760	1.199	0.715	0.990
2012	21.600	550.430	143.935	0.021	0.316	0.760	1.228	0.715	0.990
2013	21.600	550.430	148.638	0.021	0.332	0.760	1.257	0.715	0.990
2014	21.600	550.430	153.507	0.021	0.350	0.760	1.286	0.715	0.990
2015	21.600	550.430	158.548	0.021	0.368	0.760	1.314	0.715	0.990
2016	21.600	550.430	163.767	0.021	0.387	0.760	1.342	0.715	0.990
2017	21.600	550.430	169.170	0.021	0.407	0.760	1.369	0.715	0.990
2018	21.600	550.430	174.764	0.021	0.428	0.760	1.396	0.715	0.990
2019	21.600	550.430	180.555	0.021	0.450	0.760	1.423	0.715	0.990
2020	21.600	550.430	186.550	0.021	0.473	0.760	1.449	0.715	0.990
2021	21.600	550.430	192.757	0.021	0.497	0.760	1.475	0.715	0.990
2022	21.600	550.430	199.183	0.021	0.522	0.760	1.500	0.715	0.990
2023	21.600	550.430	205.836	0.021	0.548	0.760	1.525	0.715	0.990
2024	21.600	550.430	212.723	0.021	0.575	0.760	1.549	0.715	0.990
2025	21.600	550.430	219.853	0.021	0.604	0.760	1.573	0.715	0.990
2026	21.600	550.430	227.235	0.021	0.634	0.760	1.596	0.715	0.990
2027	21.600	550.430	234.877	0.021	0.665	0.760	1.619	0.715	0.990
2028	21.600	550.430	242.789	0.021	0.698	0.760	1.641	0.715	0.990
2029	21.600	550.430	250.980	0.021	0.732	0.760	1.662	0.715	0.990
2030	21.600	550.430	259.460	0.021	0.767	0.760	1.683	0.715	0.990

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede observar en la tabla 6.13 una tasa de crecimiento de los costos mayor a la los obtenidos para ciudad de Mexicali, ya que si bien el escenario evalúa únicamente el crecimiento de la población, de acuerdo a los obtenidos del análisis de regresión, en el AMM el consumo está determinado en su mayoría por el nivel de ingresos de las población medido a través del PIB.

Tabla 6. 13 Costos totales. Escenario base

Año	Costos totales (pesos)	Año	Costos totales (pesos)	Año	Costos totales (pesos)
2010	2,829,376,000.00	2017	4,244,739,034.31	2024	6,520,924,701.26
2011	2,991,844,873.96	2018	4,507,365,434.01	2025	6,944,445,238.28
2012	3,167,335,072.98	2019	4,788,435,949.53	2026	7,398,074,143.88
2013	3,354,888,113.66	2020	5,089,293,662.84	2027	7,883,981,439.48
2014	3,555,431,586.46	2021	5,411,369,209.18	2028	8,404,464,657.37
2015	3,769,899,999.72	2022	5,756,215,983.75	2029	8,962,037,100.75
2016	3,999,308,830.37	2023	6,125,475,803.85	2030	9,559,354,308.34

6.5.2 Escenario 2

Corresponde al escenario con cambio climático, semejante al escenario base, el PIB, el precio y la tarifa, crecen a las tasas esperadas mientras que los niveles de desempeño permanecen constantes. En este escenario, el índice de vulnerabilidad se incrementa en poco más de 6 puntos respecto al escenario base; esta diferencia representa por lo tanto el efecto de la temperatura en el grado de exposición, consumo y disponibilidad. La figura 6.5 muestra el índice de vulnerabilidad y la Tabla 6.14 muestra los indicadores de vulnerabilidad del Escenario 2.

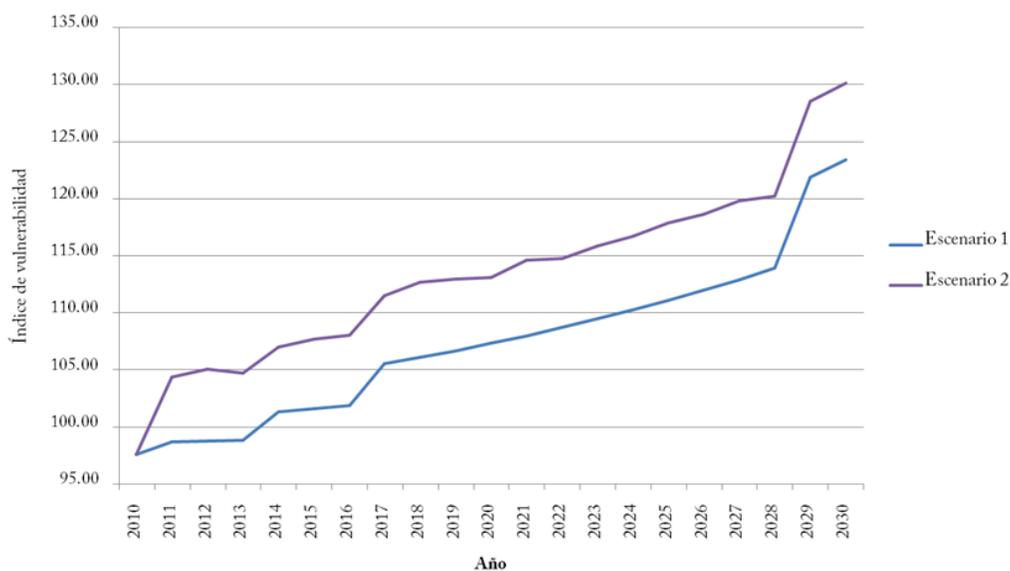


Figura 6. 4 Índice de vulnerabilidad. Escenario 2

El grado de exposición se ve influenciado fuertemente desde el primer año de proyección por la alteración de las variables climatológicas; la precipitación, que si bien no es considerada en el modelo de estimación de la demanda, en el índice de vulnerabilidad la disminución de esta variable advierte un reto para el abastecimiento de agua potable de la ciudad ante una menor disponibilidad de agua y en consecuencia una mayor competencia entre los diferentes usos. Sin embargo, también deber considerarse que de acuerdo a las proyecciones, el incremento del consumo per cápita pasara de 135 a 260 l/h/d por lo que será necesario un uso más eficiente del recurso o bien la

búsqueda de nuevas fuentes de abastecimiento. La Tabla 6. 13 muestra los Costos totales de Escenario base.

Tabla 6. 14 Costos totales. Escenario base

Año	Temperatura promedio anual (°C)	Precipitación promedio anual (mm)	Consumo (l/h/d)	Grado de confiabilidad	Disponibilidad	Grado de presión (%)	Eficiencia económica	Eficiencia física	Eficiencia comercial
2010	21.383	614.000	134.895	0.021	0.285	0.760	1.171	0.715	0.990
2011	22.340	516.123	139.765	0.021	0.301	0.760	1.198	0.715	0.990
2012	22.750	515.423	144.514	0.021	0.317	0.760	1.225	0.715	0.990
2013	22.430	514.723	149.056	0.021	0.333	0.760	1.249	0.715	0.990
2014	22.270	514.022	153.845	0.021	0.351	0.760	1.274	0.715	0.990
2015	22.560	513.322	159.032	0.021	0.369	0.760	1.299	0.715	0.990
2016	22.610	512.622	164.276	0.021	0.388	0.760	1.324	0.715	0.990
2017	22.460	511.922	169.603	0.021	0.408	0.760	1.347	0.715	0.990
2018	22.700	511.222	175.318	0.021	0.429	0.760	1.371	0.715	0.990
2019	22.660	510.522	181.089	0.021	0.451	0.760	1.394	0.715	0.990
2020	22.310	509.821	186.908	0.021	0.474	0.760	1.415	0.715	0.990
2021	22.920	509.121	193.422	0.021	0.498	0.760	1.438	0.715	0.990
2022	22.520	508.421	199.646	0.021	0.523	0.760	1.459	0.715	0.990
2023	22.730	507.721	206.405	0.021	0.549	0.760	1.480	0.715	0.990
2024	22.740	507.021	213.297	0.021	0.577	0.760	1.500	0.715	0.990
2025	22.980	506.321	220.548	0.021	0.606	0.760	1.520	0.715	0.990
2026	22.900	505.621	227.890	0.021	0.635	0.760	1.539	0.715	0.990
2027	23.050	504.920	235.607	0.021	0.667	0.760	1.557	0.715	0.990
2028	22.640	504.220	243.313	0.021	0.699	0.760	1.575	0.715	0.990
2029	22.830	503.520	251.599	0.021	0.733	0.760	1.593	0.715	0.990
2030	22.900	502.820	260.114	0.021	0.769	0.760	1.609	0.715	0.990

En este escenario los costos totales suman 118,830 millones de pesos, sin embargo evaluando únicamente el efecto de la temperatura sobre los costos de producción, se estima que el impacto económico del cambio climático sumado al 2030 es de 213 millones de pesos. La Figura 6. 6 muestra la gráfica del Incremento de costos respecto al escenario base y la Tabla 6. 15 muestra los Costos totales del Escenario 2.



Figura 6. 5 Incremento de costos respecto al escenario base

Tabla 6. 15 Costos totales. Escenario 2

Año	Costos totales (pesos)	Costos del cambio climático (pesos)
2010	2,829,376,000.00	0.00
2011	3,003,602,890.60	4,223,144.13
2012	3,190,170,868.95	6,913,203.54
2013	3,385,416,841.43	5,279,096.40
2014	3,595,541,092.59	4,509,592.90
2015	3,823,725,078.69	6,760,605.04
2016	4,066,536,501.96	7,485,967.00
2017	4,325,218,841.31	6,741,822.66
2018	4,605,546,704.61	9,013,018.72
2019	4,903,744,095.57	9,151,405.34
2020	5,220,691,974.15	6,560,682.51
2021	5,569,221,153.66	12,496,122.81
2022	5,933,379,655.60	9,295,952.43
2023	6,329,898,901.35	11,880,909.21
2024	6,753,074,450.21	12,588,364.99
2025	7,209,432,094.91	15,865,020.90
2026	7,695,249,089.81	15,739,525.87
2027	8,219,041,293.51	18,329,244.90
2028	8,773,793,825.68	14,075,519.62
2029	9,376,569,011.17	17,262,169.11
2030	10,021,483,989.12	19,064,960.17

Total	118,830,714,354.89	213,236,328.26
-------	--------------------	----------------

6.5.3 Escenario 3

El escenario 3 plantea un incremento la eficiencia comercial a fin de generar excedentes monetarios que permitan incrementen la capacidad financiera del organismo operador. De acuerdo a este escenario, la medida de adaptación considera como el incremento de la eficiencia comercial, permite reducir el índice de vulnerabilidad en menos de un punto respecto al escenario con cambio climático.

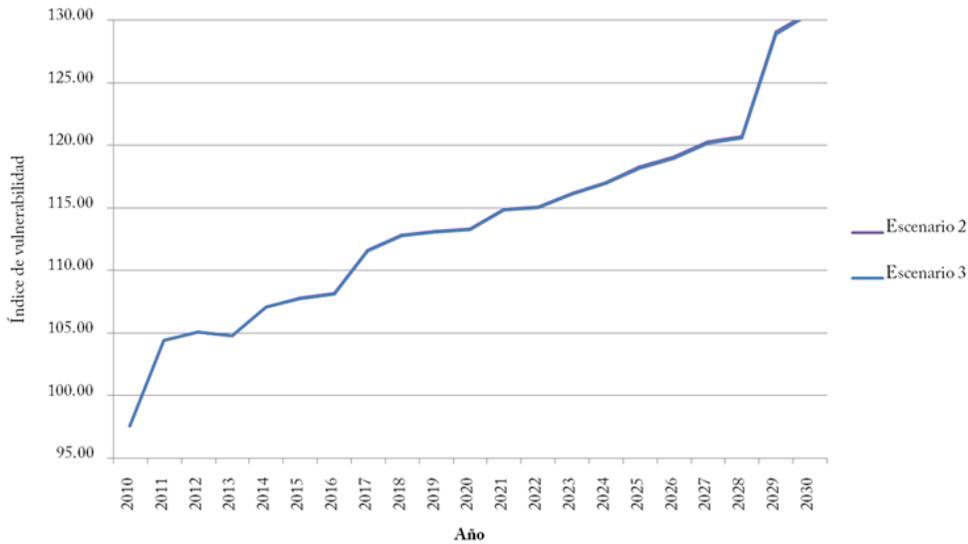


Figura 6. 6 Índice de vulnerabilidad. Escenario 3

La figura 6.7 muestra el índice de vulnerabilidad y la Tabla 6.16 muestra los indicadores de vulnerabilidad del Escenario 3. Si bien, se incrementan los ingresos del organismo operador, el beneficio obtenido con esta medida impacta en poco el índice de vulnerabilidad, ya que la capacidad económica del organismo operador es buena al tomar en cuenta que el 99% del volumen que se factura es cobrado. Del mismo modo, el incremento de la eficiencia comercial se encuentra asociada a un conjunto de medidas administrativas y operativas que incrementan los costos de producción y por lo tanto la eficiencia económica se ve reducida levemente a diferencia del escenario con cambio climático. La Tabla 6. 17 muestra los costos totales del Escenario 3.

Tabla 6. 16 Indicadores de vulnerabilidad. Escenario 3

Año	Temperatura promedio anual (°C)	Precipitación promedio anual (mm)	Consumo (l/h/d)	Grado de confiabilidad	Disponibilidad	Grado de presión (%)	Eficiencia económica	Eficiencia física	Eficiencia comercial
2010	21.383	614.000	134.895	0.021	0.285	0.760	1.171	0.715	0.990
2011	22.340	516.123	139.765	0.021	0.301	0.760	1.198	0.715	0.990
2012	22.750	515.423	144.514	0.021	0.317	0.760	1.225	0.715	0.991
2013	22.430	514.723	149.056	0.021	0.333	0.760	1.249	0.715	0.991
2014	22.270	514.022	153.845	0.021	0.351	0.760	1.274	0.715	0.992
2015	22.560	513.322	159.032	0.021	0.369	0.760	1.299	0.715	0.992
2016	22.610	512.622	164.276	0.021	0.388	0.760	1.323	0.715	0.993
2017	22.460	511.922	169.603	0.021	0.408	0.760	1.347	0.715	0.993
2018	22.700	511.222	175.318	0.021	0.429	0.760	1.370	0.715	0.994
2019	22.660	510.522	181.089	0.021	0.451	0.760	1.393	0.715	0.994
2020	22.310	509.821	186.908	0.021	0.474	0.760	1.415	0.715	0.995
2021	22.920	509.121	193.422	0.021	0.498	0.760	1.437	0.715	0.995
2022	22.520	508.421	199.646	0.021	0.523	0.760	1.458	0.715	0.996
2023	22.730	507.721	206.405	0.021	0.549	0.760	1.479	0.715	0.996
2024	22.740	507.021	213.297	0.021	0.577	0.760	1.499	0.715	0.997
2025	22.980	506.321	220.548	0.021	0.606	0.760	1.519	0.715	0.997
2026	22.900	505.621	227.890	0.021	0.635	0.760	1.538	0.715	0.998
2027	23.050	504.920	235.607	0.021	0.667	0.760	1.556	0.715	0.998
2028	22.640	504.220	243.313	0.021	0.699	0.760	1.574	0.715	0.999
2029	22.830	503.520	251.599	0.021	0.733	0.760	1.591	0.715	0.999
2030	22.900	502.820	260.114	0.021	0.769	0.760	1.608	0.715	1.000

Tabla 6. 17 Costos totales (pesos). Escenario 3

Año	Costos totales (pesos)	Impacto económico del cambio climático (pesos)	Impacto económico de la medida de adaptación (pesos)
2010	2,829,376,000.00	0.00	0.00
2011	3,003,702,840.61	4,323,094.14	99,950.01
2012	3,190,387,903.93	7,108,425.16	217,034.97
2013	3,385,769,317.75	5,573,509.58	352,476.31
2014	3,596,050,127.37	4,931,854.99	509,034.78
2015	3,824,415,126.05	7,338,431.81	690,047.37
2016	4,067,433,611.00	8,233,148.63	897,109.04
2017	4,326,351,821.96	7,682,486.01	1,132,980.65
2018	4,606,949,687.82	10,184,085.63	1,402,983.21
2019	4,905,452,510.90	10,575,590.77	1,708,415.33
2020	5,222,744,497.80	8,274,648.69	2,052,523.65
2021	5,571,668,174.62	14,562,291.07	2,447,020.96
2022	5,936,264,625.60	11,726,066.43	2,884,970.00
2023	6,333,281,113.48	14,748,953.68	3,382,212.13

2024	6,757,013,322.06	15,938,932.70	3,938,871.85
2025	7,213,997,257.72	19,762,247.80	4,565,162.82
2026	7,700,511,590.09	20,235,556.25	5,262,500.28
2027	8,225,085,721.57	23,506,870.21	6,044,428.06
2028	8,780,702,703.81	20,001,394.01	6,908,878.13
2029	9,384,449,836.83	24,062,875.51	7,880,825.65
2030	10,030,444,396.85	26,829,261.63	8,960,407.73
Total	118,892,052,187.83	265,599,724.68	61,337,832.94

Aun cuando sería deseable alcanzar el máximo nivel de eficiencia posible, como se plantea en este escenario, en realidad podrían presentarse determinadas circunstancias y obstáculos fuera del alcance del organismo operador que le impedirían cubrir dicha meta por lo que dadas las condiciones actuales de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, considerar el incremento de la eficiencia comercial como medida de adaptación resulta costosa y con pocos beneficios ya que el impacto económico que generaría el cambio climático bajo este escenario sumaría cerca de 265 millones de pesos, es decir 61 millones de pesos más que el escenario de cambio climático sin adaptación.

6.5.4 Escenario 4

El escenario 4 está relacionado con la conservación del agua en el sistema de abastecimiento por lo que implica un incremento de los niveles de eficiencia física de 72 a 80%. Bajo este escenario, el índice de vulnerabilidad es ligeramente menor al escenario 2, sin embargo al igual que la eficiencia comercial, el impacto es mínimo. La figura 6.8 muestra el índice de vulnerabilidad y la Tabla 6.18 muestra los indicadores de vulnerabilidad del Escenario 4.

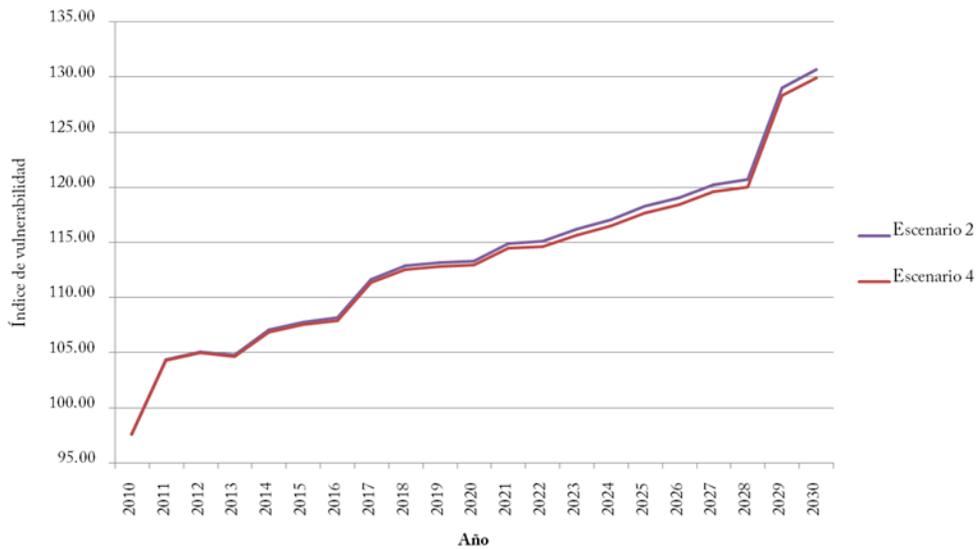


Figura 6. 7 Índice de vulnerabilidad. Escenario 4

Las pérdidas de agua por fugas obliga a suministrar cantidades crecientes de agua para satisfacer la demanda, lo que conduce a la sobreexplotación de las fuentes de agua generando no solo daños a los ecosistemas, también ocasionando un deterioro en la calidad el agua y un problema real en el organismo operador para la prestación de estos servicios. Así, la implementación de esta medida de adaptación que se traduce en una reducción del agua no contabilizada, favorece la variable de disponibilidad ya que el volumen de producción disminuye lo que permite incrementar el número de usuario aun cuando la capacidad instalada permanezca constante.

Tabla 6. 18 Indicadores de vulnerabilidad. Escenario 4

Año	Temperatura promedio anual (°C)	Precipitación promedio anual (mm)	Consumo (l/h/d)	Grado de confiabilidad	Disponibilidad	Grado de presión (%)	Eficiencia económica	Eficiencia física	Eficiencia comercial
2010	21.383	614.000	134.895	0.021	0.285	0.760	1.171	0.715	0.990
2011	22.340	516.123	139.765	0.021	0.301	0.760	1.201	0.720	0.990
2012	22.750	515.423	144.514	0.021	0.317	0.760	1.224	0.724	0.990
2013	22.430	514.723	149.056	0.021	0.333	0.760	1.244	0.728	0.990
2014	22.270	514.022	153.845	0.021	0.351	0.760	1.265	0.732	0.990
2015	22.560	513.322	159.032	0.021	0.369	0.760	1.286	0.736	0.990
2016	22.610	512.622	164.276	0.021	0.388	0.760	1.307	0.741	0.990
2017	22.460	511.922	169.603	0.021	0.408	0.760	1.326	0.745	0.990
2018	22.700	511.222	175.318	0.021	0.429	0.760	1.346	0.749	0.990
2019	22.660	510.522	181.089	0.021	0.451	0.760	1.365	0.753	0.990
2020	22.310	509.821	186.908	0.021	0.474	0.760	1.383	0.758	0.990
2021	22.920	509.121	193.422	0.021	0.498	0.760	1.402	0.762	0.990
2022	22.520	508.421	199.646	0.021	0.523	0.760	1.419	0.766	0.990
2023	22.730	507.721	206.405	0.021	0.549	0.760	1.436	0.770	0.990
2024	22.740	507.021	213.297	0.021	0.577	0.760	1.452	0.775	0.990
2025	22.980	506.321	220.548	0.021	0.606	0.760	1.469	0.779	0.990
2026	22.900	505.621	227.890	0.021	0.635	0.760	1.484	0.783	0.990
2027	23.050	504.920	235.607	0.021	0.667	0.760	1.499	0.787	0.990
2028	22.640	504.220	243.313	0.021	0.699	0.760	1.513	0.792	0.990
2029	22.830	503.520	251.599	0.021	0.733	0.760	1.527	0.796	0.990
2030	22.900	502.820	260.114	0.021	0.769	0.760	1.541	0.800	0.990

La 6.20 muestra el costo que implica reducir el agua no contabilizada y el impacto en el volumen producido tras realizar mejoras en la redes de agua. El costo por reparación de fugas representa el costo de inversión considerado en la ecuación de costos de adaptación planteada en la metodología. La Figura 6. 9 muestra el Volumen producido para los cuatro escenarios y la Tabla 6. 19 muestra el Ahorro de agua y costo por reparación de fugas.

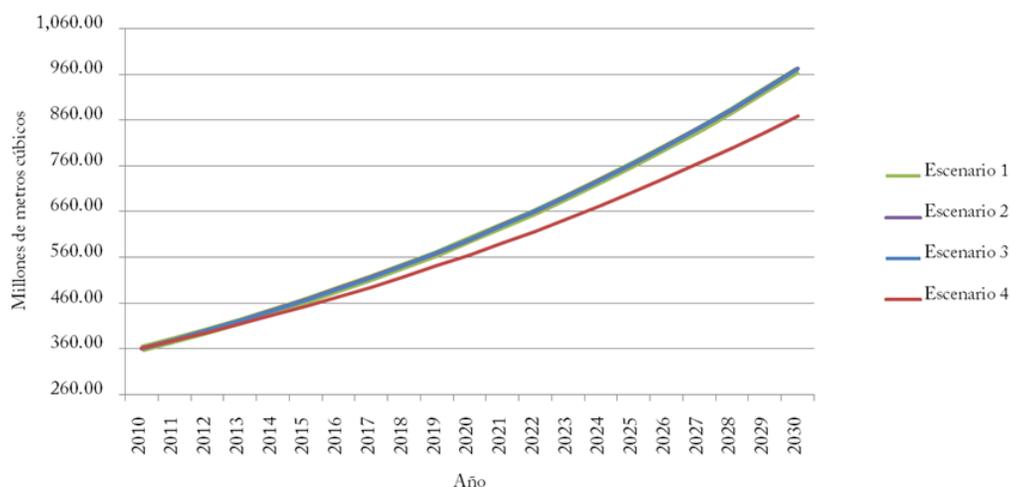


Figura 6. 8 Volumen producido (millones de m³)

Tabla 6. 19 Ahorro de agua y costo por reparación de fugas

Año	Volumen producido (m ³)	Volumen producido con reparación de fugas (m ³)	Ahorro de agua por reparación (m ³)	Costo por reparación de fugas (\$)
2010	360,506,085.83	360,506,085.83	0.00	0.00
2011	380,135,009.69	377,897,631.71	2,237,377.98	26,271,292.26
2012	398,339,938.06	396,009,129.05	2,330,809.01	28,189,410.19
2013	416,271,739.85	413,850,175.69	2,421,564.16	30,165,637.39
2014	435,195,806.27	432,678,797.86	2,517,008.41	32,295,232.62
2015	455,564,445.66	452,944,783.85	2,619,661.80	34,620,728.55
2016	476,423,440.37	473,699,495.41	2,723,944.96	37,078,873.16
2017	497,847,315.98	495,017,062.22	2,830,253.75	39,681,748.43
2018	520,740,045.27	517,796,381.41	2,943,663.86	42,509,976.53
2019	544,139,494.04	541,080,846.74	3,058,647.30	45,495,587.16
2020	568,018,077.41	564,843,053.91	3,175,023.50	48,643,413.45
2021	594,357,025.65	591,053,243.58	3,303,782.07	52,134,560.31
2022	620,160,972.53	616,732,812.82	3,428,159.71	55,720,190.76
2023	647,973,531.62	644,411,319.52	3,562,212.11	59,636,005.71
2024	676,569,257.79	672,870,177.23	3,699,080.55	63,785,180.12
2025	706,667,717.72	702,825,085.83	3,842,631.89	68,248,326.24
2026	737,423,828.18	733,435,640.93	3,988,187.26	72,958,515.37
2027	769,766,360.81	765,625,650.48	4,140,710.33	78,021,181.19
2028	802,431,530.42	798,138,202.90	4,293,327.52	83,323,770.91
2029	837,382,665.01	832,926,179.00	4,456,486.01	89,085,017.12
2030	873,471,914.19	868,847,972.24	4,623,941.95	95,205,429.86

Aun con el incremento de costos generado por las inversiones operativas y administrativas, se obtienen ahorros respecto al escenario sin adaptación ya que como se ha mencionado, el volumen a producir resulta menor por lo que los costos de producción, administración y cobranza disminuyen en la misma proporción, generando beneficios económicos. Estos beneficios

económicos representan ahorros aun comparados con un escenario sin adaptación o sin cambio climático los cuales suman cerca de 3,000 millones de pesos en ambos casos.

Tabla 6. 20 Costos totales (pesos). Escenario 4

Año	Costos totales (pesos)	Impacto económico del cambio climático (pesos)	Impacto económico de la medida de adaptación (pesos)
2010	2,829,376,000.00	0.00	0.00
2011	3,022,301,650.13	22,921,903.66	18,698,759.53
2012	3,202,013,228.53	18,733,749.76	11,842,359.58
2013	3,389,188,440.85	8,992,632.69	3,771,599.42
2014	3,589,939,374.32	-1,178,898.06	-5,601,718.27
2015	3,807,268,128.18	-9,808,566.06	-16,456,950.50
2016	4,037,590,546.11	-21,609,916.26	-28,945,955.85
2017	4,281,990,278.44	-36,679,057.52	-43,228,562.87
2018	4,545,968,242.87	-50,797,359.32	-59,578,461.74
2019	4,825,625,171.17	-69,251,748.96	-78,118,924.40
2020	5,121,652,626.33	-92,817,222.79	-99,039,347.82
2021	5,446,266,849.44	-110,839,034.11	-122,954,304.22
2022	5,783,816,006.68	-140,722,552.50	-149,563,648.92
2023	6,150,192,200.23	-168,339,959.58	-179,706,701.12
2024	6,539,648,779.38	-201,425,609.97	-213,425,670.83
2025	6,958,139,378.21	-236,095,631.71	-251,292,716.69
2026	7,401,848,193.63	-278,427,840.21	-293,400,896.18
2027	7,878,531,137.71	-323,047,713.65	-340,510,155.80
2028	8,381,289,137.98	-379,412,171.83	-392,504,687.71
2029	8,925,774,142.95	-434,612,818.37	-450,794,868.22
2030	9,506,101,726.52	-497,513,408.71	-515,382,262.60
Total	115,624,521,239.66	-3,001,931,223.49	-3,206,193,115.23

Finalmente, en la figura 6.10 se observan los costos totales para cada escenario; el escenario 1, 2 y 3 presentan diferencias poco significativas, sin embargo el escenario 4 que plantea la reducción de agua no contabilizada disminuye en mayor medida los costos aun comparado con un escenario sin cambio climático.

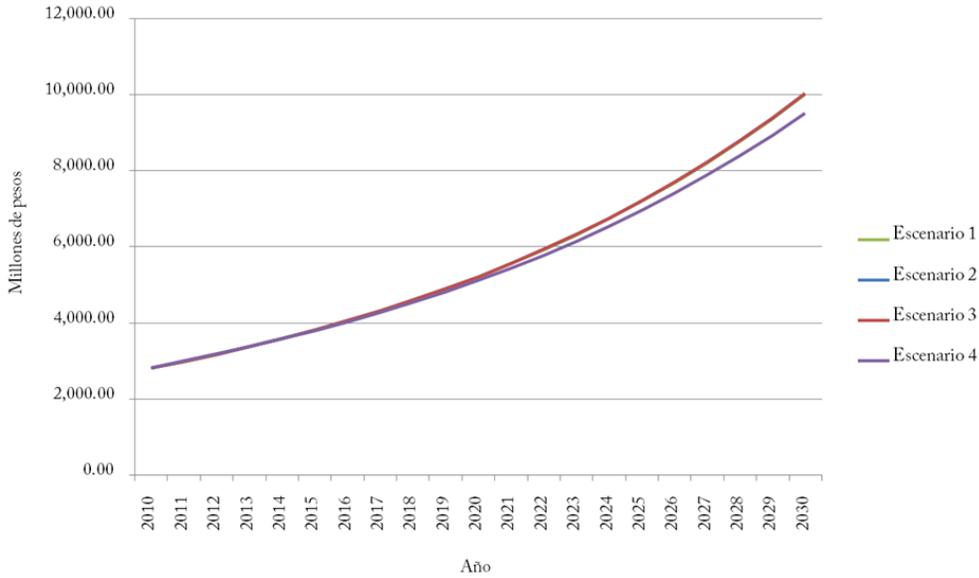


Figura 6. 9 Costos totales

Por lo tanto, el impacto económico de implementar la medida de adaptación enfocada a mejorar la eficiencia física se traduce en un beneficio ya que tiende a generar ahorros de hasta 500 millones de pesos. La Figura 6. 11 muestra la gráfica del Impacto económico del cambio climático y de las medidas de adaptación.



Figura 6. 10 Impacto económico del cambio climático y de las medidas de adaptación

Por otro lado, las medidas encaminadas a aumentar la capacidad económica del organismo operador, resultan en mayores costos, lo que se refleja en un impacto económico mayor al generado por el cambio climático. Si bien, los ingresos se ven favorecidos por el incremento de la eficiencia comercial, estos resultan todavía mayores cuando se reduce el volumen de agua no contabilizada, ya que, el impacto de incrementar un 8% el nivel de eficiencia física es mayor que plantear un incremento a la eficiencia comercial cuando esta ya tiene un valor cercano al 100%. La Figura 6. 12 muestra la relación egresos/ingresos.

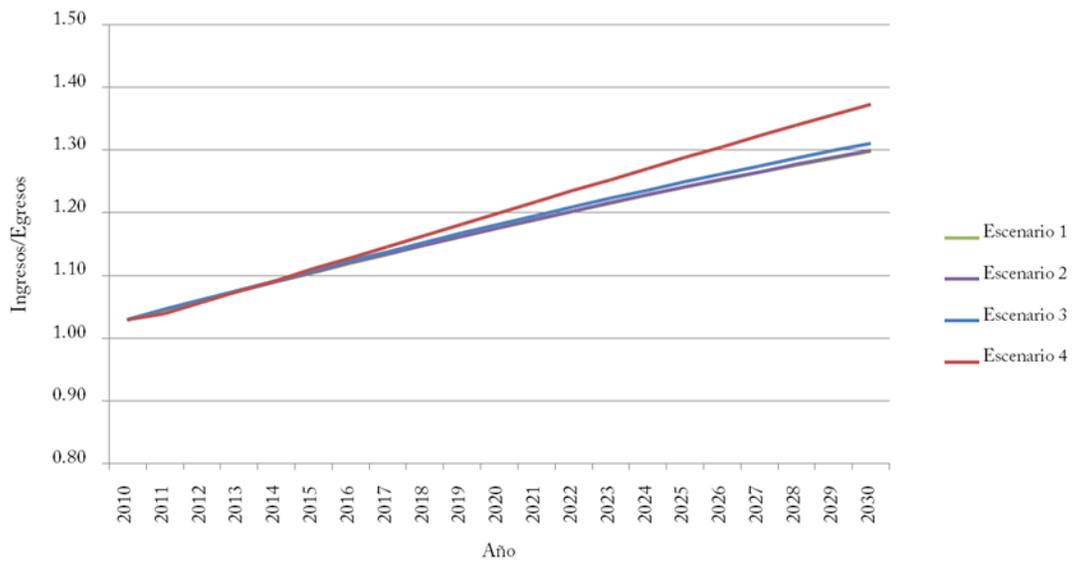


Figura 6. 11 Relación egresos/ingresos

Por lo tanto, aun cuando Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey sobresale por sus niveles de desempeño ya que sus porcentajes suelen ser más altos en comparación con los de otras ciudades, un incremento de la eficiencia física, más que favorecer al organismo operador en términos económicos, permitirá disminuir la vulnerabilidad ante un escenario de menor disponibilidad en el que resultara necesario un uso eficiente del agua para cubrir las crecientes demandas de agua.

7. COMENTARIOS FINALES

Como se mostró en este trabajo, es evidente que el tema del cambio climático obliga a pensar de manera distinta en la gestión de los servicios públicos como lo es el agua potable en ciudades. Los organismos operadores de agua potable en México, tienen la responsabilidad de ofrecer servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento a una población urbana que crece continuamente, sin embargo; bajo un escenario de cambio climático, la planeación en estas entidades públicas o privadas se vuelve necesaria para que se instauren políticas de prestación de estos servicios de forma más efectiva, con una visión de largo plazo y estableciendo medidas que permitan en el tiempo, adaptarse a los efectos de un fenómeno que si bien guarda incertidumbre, es inminente y debe considerarse como una variable más en la planeación de la gestión de los servicios de agua potable.

Aunque se han realizado algunos estudios sobre costos de adaptación a nivel global, es evidente la falta de trabajos que aborden el tema desde una perspectiva sectorial de la prestación de servicios de agua potable en ciudades. En este sentido, el trabajo desarrollado en este documento es una propuesta metodológica que relaciona el cálculo de los costos de adaptación al cambio climático con la vulnerabilidad.

Para realizar los cálculos que se han mostrado en este trabajo, fue necesario definir la reacción que podría tener un planificador encargado de manejar el organismo operador de agua potable. A estas posibles formas de reacción se les denominó escenarios. A partir de estos escenarios, se planteó una metodología para el cálculo de los costos de adaptación para el cambio climático en un organismo operador tomando en cuenta los costos unitarios de producción en el organismo operador.

La función de costos se construyó asumiendo que los agentes tienen un comportamiento pasivo, es decir, que no modifican su canasta de insumos para buscar una óptima en cada periodo de tiempo, este supuesto debería ser modificado conforme se cuente con mayor información sobre las posibilidades del cambio técnico ante el cambio climático.

En este ejercicio solo se hicieron cálculos con los parámetros relacionados con indicadores de desempeño, sin embargo en otros casos podría ser distinto y por tanto ser necesario realizar cálculos a partir de otras variables, lo que implicaría contar con información más desagregada de los costos unitarios.

El resultado de la evaluación de costos se presenta bajo dos conceptos; el impacto económico del cambio climático que representaría el efecto de implementar la medida en los egresos del organismo operador; y el impacto económico de implementar la medida de adaptación en el que se pueden observar los costos de adaptación o bien, los beneficios económicos de adaptarse.

Si bien, en este trabajo se analizaron dos organismos operadores con niveles de eficiencia por arriba de la media nacional, a partir de los resultados, se pueden resumir varios aspectos importantes.

Por un lado la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali, en términos de disponibilidad, es un caso especial debido a que cuenta con el suministro de agua potable asegurado como consecuencia del convenio que los gobiernos de México y de Estados Unidos para transferir agua de la cuenca del río Colorado, lo que aparentemente podría producir una situación de menor vulnerabilidad en el organismo, sin embargo esto se traduce en una fuerte dependencia sobre los caudales de este río, que definitivamente también se verán alterados ante un escenario de cambio climático.

Respecto a Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, el impacto económico de reducir las pérdidas resulta considerablemente significativo y con múltiples beneficios, ya que además de los importantes ahorros que implicaría un uso más eficiente del agua, la capacidad de respuesta a los crecientes niveles de producción de agua dados por el crecimiento económico de la zona se vería favorecida en las mismas dimensiones.

Si bien, aun cuando la opción de no reaccionar ante el cambio climático no resulto ser la opción más costosa en términos monetarios, es importante mencionar que si existe un incremento en la

vulnerabilidad, que indudablemente obligará a los organismos operadores a adaptarse a las nuevas condiciones impuestas por el cambio climático, las cuales no solo estarán asociadas a un incremento de la demanda, sino también a una mayor presión sobre las fuentes de agua, una disponibilidad menor, cambios en la calidad del agua, por mencionar algunas; incrementando así los costos operativos y administrativos en una mayor proporción.

Finalmente, la metodología desarrollada pretende aportar una aproximación al cálculo de los costos de adaptación al cambio climático para el sector agua potable, pero también es un esfuerzo interdisciplinario para abordar un tema complejo que involucra aspectos técnicos, administrativos, sociales y ambientales como lo es la capacidad de respuesta de un organismo operador.

BIBLIOGRAFÍA

- Baird, C. (2001). *Química Ambiental. Segunda Edición*. Barcelona: Reverté, S.A.
- Callaway, J. e. (2007). *The Berg River Dynamic Spatial Equilibrium Model: A new tool for assessing the benefits and costs of alternatives for coping with water demand growth, climate variability, and climate change in the Western Cape*. Washington, DC: AIACC Working Papers.
- CONAGUA. (2010). *Servicio Meteorológico Nacional*. Recuperado el octubre de 2012, de smn.conagua.gob.mx
- CONAGUA. (2011). *Estadísticas del Agua en México, edición 2011*. México: SEMARNAT.
- CONAGUA. (2011). *Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Edición 2011*. México: SEMARNAT.
- CONANP. (2011). *Guía para la elaboración de programas de adaptación al cambio climático en áreas naturales protegidas*. México: Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza A. C. y The Nature Conservancy (TNC).
- Cromwell, J. E., Smith, J. B., & Raucher, R. S. (2007). *Implications of Climate Change for Urban Water Utilities*. Washington, D.C.: Association of Metropolitan Water Agencies.
- Danilenko, A., Dickson, E., & Jacobsen, M. (2010). *Climate Change and Urban Water Utilities: Challenges & Opportunities*. España: Water Sector Board of the Sustainable Development Network of the World Bank Group.
- Dessai, S., & Hulme, M. (2004). *Does climate adaptation policy need probabilities?. Review*. Norwich, UK: School of Environmental Sciences, University of East Anglia.
- EPA. (2010). *Adaptation Strategies Guide for Water Utilities*. United States: Environmental Protection Agency.
- EPA. (2010). *Climate Change Vulnerability Assessments: A Review of Water Utility Practices*. Washington: United States Environmental Protection Agency.
- EPA. (2011). *Climate Change Vulnerability Assessment: Four Case Studies of Water Utility Practices*. Washington: United States Environmental Protection Agency.
- Frankhauser, S. (1998). *The Costs of Adapting to Climate Change*. Washington, DC: Global Environment Facility.
- Galindo, L. M. (2009). *La Economía del Cambio Climático en México. Síntesis*. México: SHCP, SEMARNAT.
- Galton, F. (1886). *Family Likeness in Stature. Proceedings of royal society. Vol. 40*. Londres.
- Greenpeace. (2010). *México ante el cambio climático*. México DF: Greenpeace.
- Gujarati, D. (2003). *Econometría* (Cuarta edición ed.). México: MacGraw Hill.
- Hernández Cerda, M. E., Torres Tapia, A. L., & Valdez Madero, G. (2000). Sequía Meteorológica. En C. Gay García, *México: Una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México* (págs. 28-37). México: INE, UNAM, US Country Studies Program.

- IMTA. (2009). *Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores*. Recuperado el 25 de Junio de 2012, de Instituto Mexicano de Tecnología del Agua: <http://www.pigoo.gob.mx>
- INE. (2002). *Cambio global y recursos hídricos en México: Hidropolítica y conflictos contemporáneos por el agua*. México: Instituto Nacional de Ecología.
- INE, U. I. (2007). *Estudio sobre la economía del cambio climático en México*. México: INE.
- INEGI. (2004). *Panorama Censal de los Organismos Operadores de Agua en México: Censos Económicos 2004*. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI. (2009). *Panorama Censal de los Organismos Operadores de Agua en México: Censos Económicos 2009*. México: INEGI.
- INE-IMTA-SEMARNAT. (2008). *Evaluación de la afectación de la calidad del agua en cuerpos de agua superficiales y subterráneos por efecto de la variabilidad y el cambio climático y su impacto en la biodiversidad, agricultura, salud, turismo e industria*. México: INE-IMTA-SEMARNAT.
- IPCC. (2001). *Cambio climático 2001: impactos, adaptación y vulnerabilidad. Contribución del grupo de Trabajo II al Tercer Informe de Evaluación*. Ginebra.
- IPCC. (2007). *Cambio Climático 2007, Informe de síntesis, Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Cuarto Informe de Evaluación del IPCC*. Ginebra, Suiza.
- IPCC. (2008). *El cambio climático y el agua. Documento Técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra.
- Kirshen, P. (2000). Climate's Long-term Impacts on Urban Infrastructures and Services: The Case of Metro Boston. En R. M. Kirshen, K. Donaghy, & H. P., *Responses, Climate Change and Variability: Consequences and* (págs. 191-255).
- Kirshen, P. (2007). *Adaptation Options and Cost in Water Supply*. United States: Tufts University.
- Kirshen, P., McCluskey, M., Vogel, R., & Strzepek, K. (2005). *Global analysis of changes in water supply yields and costs under climate change: A case study in China*. USA.
- Landa, R. (2010). *Cambio Climático y Desarrollo Sustentable para América Latina y el Caribe. Conocer para Comunicar*. México D.F: British Council. PNUD México, Cátedra UNESCO-IMTA, FLACSO México.
- Landa, R., Magaña, V., & Neri, C. (2008). *Agua y Clima: Elementos para la Adaptación al Cambio Climático*. México: SEMARNAT, CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, UNAM.
- Lu, X. X. (2004). *Vulnerability of water discharge of large Chinese rivers to environmental changes: an overview*. Singapore: National University of Singapore.
- Magaña, V. O. (2004). El cambio climático global: comprender el problema. En J. Martínez, & A. Fernández, *Cambio climático: una visión desde México* (págs. 17-27). México: INE-SEMARNAT.
- Martínez Austria, P. F., & Patiño Gómez, C. (2010). *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. Volumen III. Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Metroeconomica. (2004). *Costing the impacts of climate change in the UK*. Reino Unido: UKCIP.

- NACWA-AWWA. (2009). *Confronting Climate Change: An Early Analysis of Water and Wastewater Adaptation Costs*. NACWA-AWWA.
- Naro, M., Saisana, M., Saltelli, A., Tarantola, S., Hoffman, A., & Giovannini, E. (2005). *Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide*. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD).
- Ortiz Pérez, M. A., & Méndez Linares, A. P. (2000). Repercusiones por ascenso del nivel del mar en el litoral del Golfo de México. En C. Gay García, *México: Una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México* (págs. 73-85). México: INE, UNAM, US Country Studies Program.
- Oxfam. (2007). Adapting to Climate Change. What is Needed in Poor Countries and Who Should Pay? *Oxfam Briefing Paper 104*.
- Parry, M. (2009). *Assessing the Costs of Adaptation to Climate Change: A review of the UNFCCC and Other Recent Estimates*. London: International Institute for Environment and Development and Grantham Institute for Climate Change.
- Pearson, K., & Lee, A. (1903). *On the Laws of Inheritance. Biometrika. Vol 2*.
- Rivas, I., Güitron de los Reyes, A., & Ballinas, H. (2010). Vulnerabilidad Hídrica Global: Aguas Superficiales. En P. F. Martínez Austria, & C. Patiño Gómez, *Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el Cambio Climático* (págs. 81-113). México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Salazar Adams, A., & Pineda Pablos, N. (2010). *Factores que afectan la demanda de agua para uso doméstico en México* (Vol. XXII). Sonora.
- SEMARNAT-INE-Gobierno de Baja California. (2012). *Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Baja California*. Baja California: SEMARNAT-INE-Gobierno de Baja California.
- Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, I. (2011). *Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, I.P.D.* Recuperado el Julio de 2013, de www.sadm.gob.mx
- Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, I. (2013). *Anuario estadístico sobre la operación de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, I.P.D. en el AMM*. Monterrey, Nuevo León: Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, I.P.D.
- Stern, N. (2006). *Stern Review: La economía del cambio climático*. UK: Cabinet Office - HM Treasury.
- Sullivan, C. A., & Meigh, J. (2005). *Targeting attention on local vulnerabilities using and integrated index approach: the example of the climate vulnerability index*. Stochastic Environmental Research & Risk Assessment.
- UNDP. (2007). *Human Development Report 2007/08*. New York: Palgrave McMillan.
- UNEP, P. (2008). *Methodical Guidelines for Vulnerability Assessment of Freshwater Resources*. Thailand: United Nations Environment Programme.
- UNFCCC. (2007). *Investment and Financial Flows to Address Climate Change*. Bonn: Climate Change Secretariat.
- UNFCCC. (2007). *Manual sobre Evaluaciones de Vulnerabilidad y Adaptación*. Germany: United Nations Framework Convention on Climate Change.

- Vergara, W., Deeb, A. M., Valencia, A. M., Bradley, R. S., Franco, B., Zarzar, A., . . . Haeussling, S. M. (2007). *Economic Impacts of Rapid Glacier Retreat in the Andes*.
- Vorosmarty, C. I., Green, P., Salisbury, J., & Lammers, R. (2000). *Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth*. Science.
- Watkiss, P. (2011). *Aggregate Economic Measures of Climate Change Damages: Explaining the Differences and Implications*. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change.
- World Bank. (2008). *The Economic of Adaptation to Climate Change. Informe Metodológico*. World Bank.
- WUCA. (2010). *Decision support planning methods: incorporating climate change uncertainties into water planning*. Denver, Arizona: WUCA.

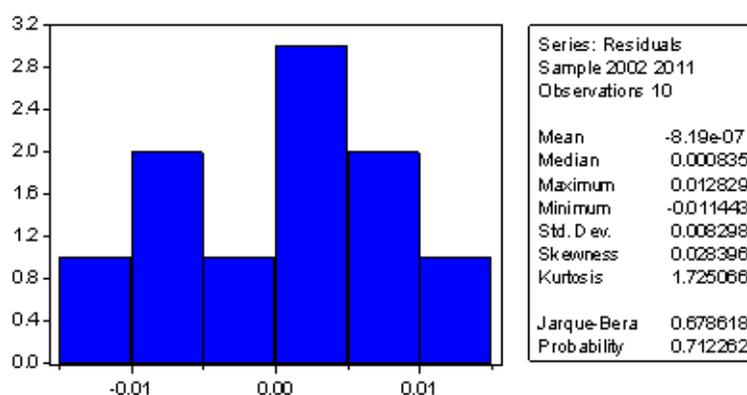
ANEXO

A1. Pruebas estadísticas

Las pruebas estadísticas que dan validez y a las cuales son sometidos los datos considerados en el modelo de regresión para la estimación de la demanda, se describen en los siguiente párrafos, considerando que dado que las perturbaciones (errores) de los datos no son observables, estas se estudian con los residuos.

Prueba de normalidad

El histograma de frecuencias del error además de los estadísticos básicos (media, mediana, máxima, mínimo, desviación típica, apuntamiento y curtosis) se muestra en la Figura A.1 y presenta el resultado de un contraste de tipo Jarque-Bera para analizar la normalidad de la distribución de errores.



El test de Jarque-Bera, analiza la relación entre los coeficientes de asimetría y curtosis o apuntamiento de los residuos de la ecuación y los correspondientes a los de una distribución normal, de forma tal que si estas relaciones son suficientemente diferentes se rechazaría la hipótesis nula de normalidad de los residuos.

El valor del contraste viene acompañado con el correspondiente nivel de probabilidad asociado al rechazo de la hipótesis nula siendo cierta, de forma tal que si dicho valor de probabilidad fuera inferior al 5%, se rechazaría la hipótesis nula, con el 95% de confianza, y se admite la no normalidad del residuo.

Pruebas de autocorrelación

El fenómeno de la autocorrelación residual, consiste en la existencia de un determinado nivel de correlación entre las perturbaciones (errores) de los sucesivos períodos. En el contexto de regresión, el modelo clásico de regresión lineal supone que no existe tal autocorrelación en las perturbaciones. Expresado en forma sencilla, el modelo clásico supone que el término de perturbación relacionado con una observación cualquiera no está influido por el término de perturbación relacionado con cualquier otra observación.

Se tomaron en cuenta 3 distintas pruebas para demostrar no autocorrelación en el modelo; el estadístico Durbin-Watson, la prueba del correlograma y la de LM test.

- 1) *Durbin-Watson*: además de la observación directa del gráfico de residuos, el estadístico Durbin-Watson, es la forma más habitual de contrastar la existencia de autocorrelación de primer orden. A partir de este estadístico se puede interpretar que:
 - Si hay autocorrelación positiva las diferencias entre residuos que distan un periodo es muy pequeña por lo que el valor del estadístico será próximo a cero.
 - Si hay autocorrelación negativa los residuos serán prácticamente iguales pero de signo contrario, su diferencia será por tanto grande y el estadístico será más próximo al límite superior que se establece en cuatro.
 - Si no hay autocorrelación, la relación entre los residuos será intermedia y por tanto, el valor del estadístico experimental también alcanzará un valor intermedio.
- 2) *Prueba del correlograma*: la autocorrelación, está representada gráficamente (Figura A2) en la primera y numéricamente en la tercer columna con el nombre de AC, su línea vertical continua representa el cero y las punteadas sus límites de confianza; las barras a su izquierda expresan valores negativos y las de la derecha positivos. Si ninguna

autocorrelación rebasa los límites de confianza, se acepta la hipótesis nula considerando que los coeficientes de autocorrelación no son significativamente diferentes de cero.

Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob	
		1	0.543	0.543	15.069	0.000
		2	0.365	0.099	22.019	0.000
		3	0.441	0.299	32.389	0.000
		4	0.415	0.105	41.770	0.000
		5	0.260	-0.076	45.546	0.000
		6	0.127	-0.152	46.469	0.000
		7	0.107	-0.062	47.138	0.000
		8	0.118	0.030	47.970	0.000
		9	0.083	0.053	48.396	0.000
		10	-0.119	-0.230	49.297	0.000
		11	-0.116	-0.019	50.175	0.000
		12	-0.029	0.038	50.232	0.000

Figura A. 2 Correlograma de residuos

3) *Correlation LM test*: el test de correlación serial de Breusch-Godfrey (*Serial Correlation LM test*), se basa en la estimación de un modelo auxiliar en el que los errores del modelo son explicativos por sus propios retardos junto con las variables independientes del modelo original, de forma tal que si este modelo es significativo, se está en presencia de autocorrelación en los errores. El contraste de Breusch-Godfrey se especifica con la finalidad de analizar si existe o no autocorrelación de orden superior a uno; para ello, en la hipótesis alternativa se incluyen especificaciones más generales que la del modelo autorregresivo de primer orden y que se pueden generalizar a cualquier especificación. Así, considerando que es un modelo anual, las pruebas son realizadas con 1 y 2 retardos. Los resultados presentan los contrastes en la forma habitual de nulidad conjunta de todos los coeficientes asociados a los residuos desplazados (test F) junto con un contraste de validación global del modelo (Obs-R-squared), así como la estimación del modelo auxiliar utilizado para el contraste.

La interpretación del contraste se realiza en la forma habitual de rechazar la hipótesis nula, en este caso la ausencia de autocorrelación de cualquier orden inferior a p (siendo p el número de retardos seleccionados), siempre que la probabilidad asociada a los estadísticos sea inferior al 5%.

Pruebas de heteroscedasticidad

Una primera alternativa que nos puede indicar la presencia de heteroscedasticidad en un modelo es la observación directa del gráfico de residuos que, en presencia de varianzas no constantes tendería a presentar períodos con amplia volatilidad agrupados en el tiempo.

Se consideraron dos pruebas o tipos diferentes de contrastes de heteroscedasticidad, test de White y test ARCH de heteroscedasticidad autorregresiva, ambos tienen en común el planteamiento de una regresión auxiliar en la que el cuadrado de los residuos (aproximación a la varianza) se hace depender de un conjunto de variables explicativas de forma tal que si el modelo, o las variables en su conjunto, son significativas se debe rechazar la hipótesis nula de homocedasticidad.

Para el primero de los contrastes el test de White, las variables explicativas del modelo auxiliar son las mismas del modelo original y sus cuadrados, o bien incluyendo los productos cruzados en la modalidad del test ampliado.

Por su parte el test ARCH utiliza como variables explicativas de la regresión auxiliar los propios valores desplazados del residuo al cuadrado.

El resultado de ambos tipos de contraste se presenta en un formato muy similar, apareciendo en primer lugar los contrastes habituales de nulidad de todos los parámetros (F-statistic) y de representatividad global del modelo auxiliar (Obs*R-squared), rechazándose la hipótesis nula de homocedasticidad si la probabilidad asociada a cada uno de los estadísticos es inferior al 5%. Al igual que en otras pruebas, también se presentan los resultados de la estimación del modelo auxiliar utilizado (Figura A. 3 ARCH Test).

ARCH Test:				
F-statistic	1.676248	Probability	0.215000	
Obs*R-squared	1.708790	Probability	0.191142	
Test Equation:				
Dependent Variable: RESID^2				
Method: Least Squares				
Sample(adjusted): 1981 1997				
Included observations: 17 after adjusting endpoints				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	0.179123	0.087760	2.041052	0.0592
RESID^2(-1)	0.310227	0.239613	1.294700	0.2150
R-squared	0.100517	Mean dependent var	0.253895	
Adjusted R-squared	0.040552	S.D. dependent var	0.278149	
S.E. of regression	0.272451	Akaike info criterion	0.347416	
Sum squared resid	1.113444	Schwarz criterion	0.445441	
Log likelihood	-0.953032	F-statistic	1.676248	
Durbin-Watson stat	1.937183	Prob(F-statistic)	0.215000	

Figura A. 3 ARCH Test

Cambio estructural

Una de las hipótesis básicas que mayores implicaciones tiene sobre la posterior utilización de los modelos econométricos es la permanencia estructural, que supone que los valores de los parámetros permanecen constantes a lo largo de todo el periodo de estimación.

El Test CUSUM presenta un gráfico (Figura A. 4) con el valor calculado del test CUSUM para cada uno de los períodos, junto con las bandas de confianza de dicho contraste al 5% de significatividad. Si alguno de los valores calculados supera dichos límites de significatividad se podrá rechazar la hipótesis nula de permanencia estructural y asumir entonces que se ha producido un cambio en los valores de los parámetros.

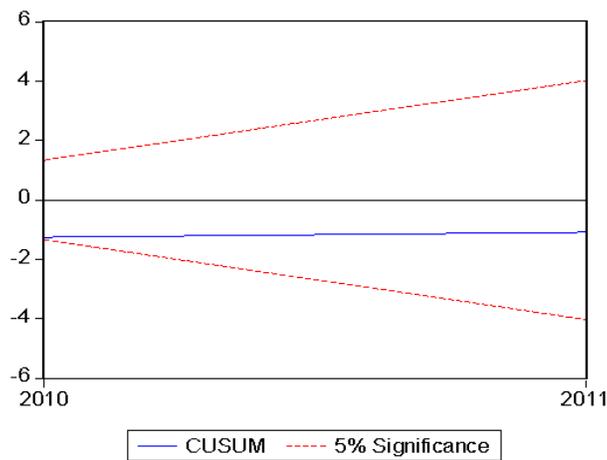


Figura A. 4 Test CUSUM

A2. Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali

Normalidad

La normalidad se demuestra gráficamente (Figura A.5) y con la prueba Jarque-Bera la cual es de 0.22 con una probabilidad muy elevada, 0.89, por lo que se asume la hipótesis nula y se afirma que la distribución de residuos es normal.

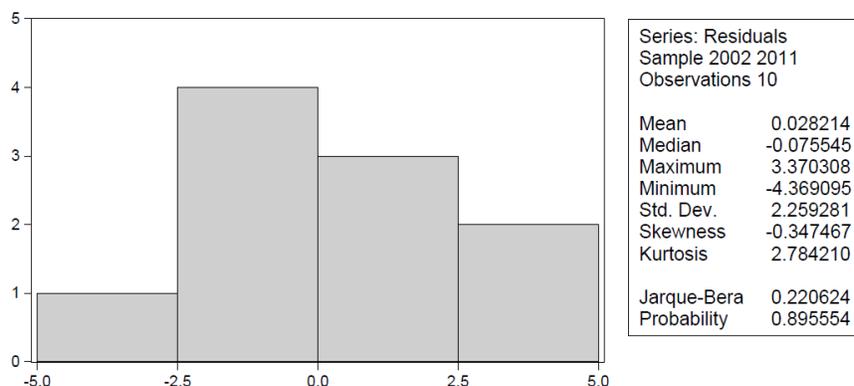


Figura A. 5 Prueba de normalidad

Autocorrelación

- 1) *Durbin-Watson*: el valor del estadístico Durbin-Watson, 2.5, alcanza un valor cercano del valor de referencia 2, lo que contrasta la existencia de autocorrelación.
- 2) *Prueba del correlograma*: dado que ningún coeficiente de correlación rebasa los límites de confianza, se acepta la hipótesis nula de no autocorrelación. La Figura A. 6 muestra el correlograma de residuos.

Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob	
		1	-0.340	-0.340	1.5380	0.215
		2	-0.072	-0.211	1.6147	0.446
		3	-0.130	-0.273	1.9044	0.592
		4	-0.139	-0.404	2.2922	0.682
		5	0.155	-0.237	2.8703	0.720
		6	0.078	-0.145	3.0530	0.802
		7	-0.066	-0.258	3.2266	0.863
		8	0.036	-0.207	3.3028	0.914

Figura A. 6 Correlograma de residuos

- 3) *Correlación LM test*: Las probabilidades mayores a 5% para dos y un retardo aceptan la hipótesis nula, decisión que se corrobora con el valor de F de 0.52 y 0.42 respectivamente.

Las Figura A. 7 y A-8 presentan la prueba de correlación LM con 2 rezagos y prueba de correlación LM con 1 rezago, respectivamente.

Breusch-Godfrey Serial Correlation LM Test:				
F-statistic	0.771540	Prob. F(2,4)	0.5207	
Obs*R-squared	2.782545	Prob. Chi-Square(2)	0.2488	
Test Equation: Dependent Variable: RESID Method: Least Squares Date: 07/03/13 Time: 12:09 Sample: 2002 2011 Included observations: 10 Presample missing value lagged residuals set to zero.				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
PIB	-3.58E-10	5.76E-10	-0.622487	0.5674
PRE_PROM	0.999204	1.693052	0.590179	0.5868
TEMP_PROM	0.992689	1.717632	0.577940	0.5943
D_1	1.421562	2.507605	0.566900	0.6011
RESID(-1)	-0.697831	0.568904	-1.226623	0.2872
RESID(-2)	-0.564958	0.624069	-0.905281	0.4165
R-squared	0.278255	Mean dependent var	0.028214	
Adjusted R-squared	-0.623927	S.D. dependent var	2.259281	
S.E. of regression	2.879079	Akaike info criterion	5.236527	
Sum squared resid	33.15638	Schwarz criterion	5.418078	
Log likelihood	-20.18264	Hannan-Quinn criter.	5.037366	
Durbin-Watson stat	2.055763			

Figura A. 7 Prueba de correlación LM con 2 rezagos

Breusch-Godfrey Serial Correlation LM Test:				
F-statistic	0.750639	Prob. F(1,5)	0.4259	
Obs*R-squared	1.303808	Prob. Chi-Square(1)	0.2535	
Test Equation:				
Dependent Variable: RESID				
Method: Least Squares				
Date: 07/03/13 Time: 12:09				
Sample: 2002 2011				
Included observations: 10				
Presample missing value lagged residuals set to zero.				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
PIB	-7.67E-11	4.76E-10	-0.161398	0.8781
PRE_PROM	0.187715	1.410122	0.133120	0.8993
TEMP_PROM	0.217694	1.461968	0.148904	0.8874
D_1	0.394585	2.195597	0.179717	0.8644
RESID(-1)	-0.382899	0.441945	-0.866395	0.4259
R-squared	0.130381	Mean dependent var	0.028214	
Adjusted R-squared	-0.565315	S.D. dependent var	2.259281	
S.E. of regression	2.826644	Akaike info criterion	5.222910	
Sum squared resid	39.94957	Schwarz criterion	5.374202	
Log likelihood	-21.11455	Hannan-Quinn criter.	5.056942	
Durbin-Watson stat	2.003849			

Figura A. 8 Prueba de correlación LM con 1 rezago

Heteroscedasticidad

- 1) *Prueba ARCH (1 rezago)*: La probabilidad de 0.44 acepta la hipótesis nula de homocedasticidad. La Figura A. 9 presenta los resultados de la Prueba ARCH.

Heteroskedasticity Test: ARCH				
F-statistic	0.651804	Prob. F(1,7)	0.4460	
Obs*R-squared	0.766648	Prob. Chi-Square(1)	0.3813	
Test Equation:				
Dependent Variable: RESID^2				
Method: Least Squares				
Date: 07/03/13 Time: 12:10				
Sample (adjusted): 2003 2011				
Included observations: 9 after adjustments				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	5.729365	2.952316	1.940634	0.0934
RESID^2(-1)	-0.295913	0.366526	-0.807344	0.4460
R-squared	0.085183	Mean dependent var	4.222546	
Adjusted R-squared	-0.045505	S.D. dependent var	6.711559	
S.E. of regression	6.862565	Akaike info criterion	6.883170	
Sum squared resid	329.6636	Schwarz criterion	6.926997	
Log likelihood	-28.97426	Hannan-Quinn criter.	6.788590	
F-statistic	0.651804	Durbin-Watson stat	1.749622	
Prob(F-statistic)	0.446030			

Figura A. 9 Prueba ARCH

- 2) *Prueba White*: La probabilidad de 0.39 acepta la hipótesis nula de homocedasticidad. La Figura A. 10 presenta los resultados de la Prueba *White*.

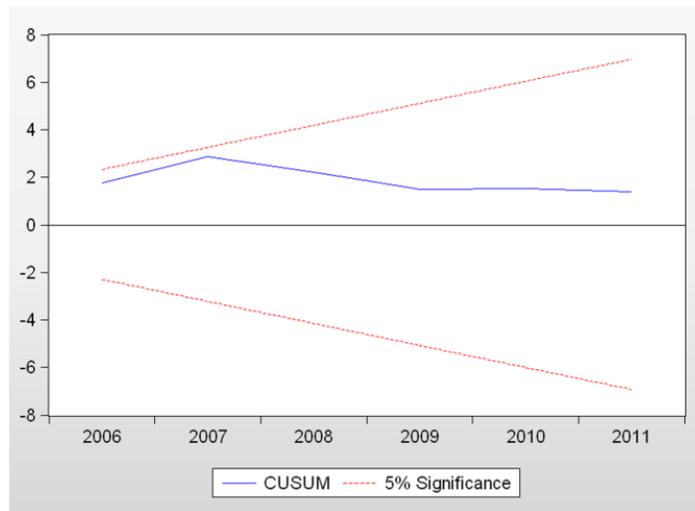
Heteroskedasticity Test: White				
F-statistic	1.254294	Prob. F(4,5)	0.3964	
Obs*R-squared	5.008573	Prob. Chi-Square(4)	0.2864	
Scaled explained SS	1.592121	Prob. Chi-Square(4)	0.8102	
Test Equation:				
Dependent Variable: RESID^2				
Method: Least Squares				
Date: 07/03/13 Time: 12:10				
Sample: 2002 2011				
Included observations: 10				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-42.08869	62.68718	-0.671408	0.5317
PIB^2	1.61E-20	1.03E-20	1.555106	0.1806
PRE_PROM^2	-1.128698	0.691062	-1.633281	0.1633
TEMP_PROM^2	-0.012954	0.133204	-0.097249	0.9263
D_1^2	2.379845	5.406960	0.440145	0.6782
R-squared	0.500857	Mean dependent var	4.594712	
Adjusted R-squared	0.101543	S.D. dependent var	6.436233	
S.E. of regression	6.100710	Akaike info criterion	6.761540	
Sum squared resid	186.0933	Schwarz criterion	6.912833	
Log likelihood	-28.80770	Hannan-Quinn criter.	6.595573	
F-statistic	1.254294	Durbin-Watson stat	3.280999	
Prob(F-statistic)	0.396422			

Figura A. 10 Prueba White:

Cambio estructural

La prueba CUSUM (Figura A.11) indica que el modelo no sufre cambios estructurales ya que ninguno de los valores calculado supera los límites de significatividad.

Figura A. 11 Prueba CUSUM



A.3 Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, I.P.D.

Normalidad

La normalidad se demuestra gráficamente (Figura A.12) y con la prueba Jarque-Bera la cual es de 0.38 con una probabilidad de 0.82, por lo que se asume la hipótesis nula y se afirma que la distribución de residuos es normal.

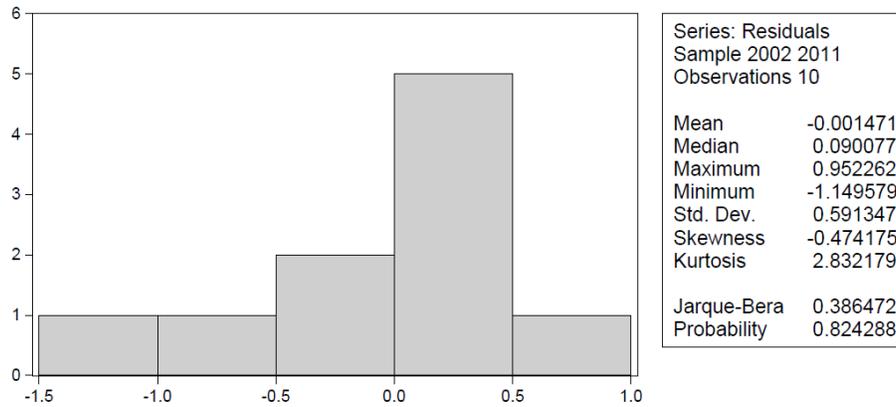


Figura A. 12 Prueba de normalidad

Autocorrelación

- 1) *Durbin-Watson*: el valor del estadístico Durbin-Watson, 2.5, alcanza un valor cercano del valor de referencia 2, lo que contrasta la existencia de autocorrelación.
- 2) *Prueba del correlograma*: dado que ningún coeficiente de correlación rebasa los límites de confianza, se acepta la hipótesis nula de no autocorrelación. La Figura A. 13 muestra los resultados del Correlograma de residuos.

Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob	
		1	-0.156	-0.156	0.3245	0.569
		2	-0.092	-0.119	0.4501	0.798
		3	0.050	0.016	0.4924	0.921
		4	-0.283	-0.293	2.0897	0.719
		5	0.084	-0.006	2.2589	0.812
		6	-0.099	-0.174	2.5517	0.863
		7	-0.086	-0.132	2.8474	0.899
		8	0.049	-0.130	2.9904	0.935

Figura A. 13 Correlograma de residuos

- 4) *Correlación LM test*: Las probabilidades mayores a 5% para dos y un retardo aceptan la hipótesis nula, decisión que se corrobora con el valor de F de 0.57 y 0.24 respectivamente. Las Figura A.14 y A.15 presentan la prueba de correlación LM con 2 rezagos y prueba de correlación LM con 1 rezago, respectivamente.

Figura A. 14 Prueba de correlación LM con 2 rezagos

Breusch-Godfrey Serial Correlation LM Test:				
F-statistic	0.575648	Prob. F(2,4)	0.6030	
Obs*R-squared	2.234911	Prob. Chi-Square(2)	0.3271	
Test Equation:				
Dependent Variable: RESID				
Method: Least Squares				
Date: 07/23/13 Time: 17:14				
Sample: 2002 2011				
Included observations: 10				
Presample missing value lagged residuals set to zero.				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
PRE_PROM	0.189144	0.287323	0.658297	0.5463
TEMP_PROM	-0.277692	0.288624	-0.962123	0.3905
PIB	1.10E-11	1.16E-11	0.952043	0.3950
D1	-0.027975	0.566112	-0.049416	0.9630
RESID(-1)	-0.965672	0.927341	-1.041335	0.3565
RESID(-2)	-0.804583	0.841950	-0.955620	0.3934
R-squared	0.223491	Mean dependent var	-0.001471	
Adjusted R-squared	-0.747145	S.D. dependent var	0.591347	
S.E. of regression	0.781641	Akaike info criterion	2.628866	
Sum squared resid	2.443849	Schwarz criterion	2.810417	
Log likelihood	-7.144332	Hannan-Quinn criter.	2.429705	
Durbin-Watson stat	2.681885			

Figura A. 15 Prueba de correlación LM con 1 rezago

Breusch-Godfrey Serial Correlation LM Test:				
F-statistic	0.242294	Prob. F(1,5)	0.6434	
Obs*R-squared	0.462125	Prob. Chi-Square(1)	0.4966	
Test Equation:				
Dependent Variable: RESID				
Method: Least Squares				
Date: 07/23/13 Time: 17:15				
Sample: 2002 2011				
Included observations: 10				
Presample missing value lagged residuals set to zero.				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
PRE_PROM	0.035311	0.235919	0.149674	0.8869
TEMP_PROM	-0.050643	0.162442	-0.311764	0.7678
PIB	1.88E-12	6.45E-12	0.290845	0.7828
D1	0.049099	0.555453	0.088395	0.9330
RESID(-1)	-0.296859	0.603086	-0.492233	0.6434
R-squared	0.046212	Mean dependent var	-0.001471	
Adjusted R-squared	-0.716818	S.D. dependent var	0.591347	
S.E. of regression	0.774827	Akaike info criterion	2.634499	
Sum squared resid	3.001786	Schwarz criterion	2.785792	
Log likelihood	-8.172497	Hannan-Quinn criter.	2.468532	
Durbin-Watson stat	2.076742			

Heteroscedasticidad

3) *Prueba ARCH (1 rezago)*: La probabilidad de 0.35 acepta la hipótesis nula de homocedasticidad. La Figura A. 16 muestra los resultados de la Prueba ARCH.

Heteroskedasticity Test: ARCH				
F-statistic	0.980787	Prob. F(1,7)	0.3550	
Obs*R-squared	1.106042	Prob. Chi-Square(1)	0.2929	
Test Equation:				
Dependent Variable: RESID^2				
Method: Least Squares				
Date: 07/23/13 Time: 17:16				
Sample (adjusted): 2003 2011				
Included observations: 9 after adjustments				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	0.455958	0.198655	2.295231	0.0554
RESID^2(-1)	-0.352501	0.355937	-0.990347	0.3550
R-squared	0.122894	Mean dependent var	0.335919	
Adjusted R-squared	-0.002407	S.D. dependent var	0.471607	
S.E. of regression	0.472174	Akaike info criterion	1.530192	
Sum squared resid	1.560639	Schwarz criterion	1.574020	
Log likelihood	-4.885865	Hannan-Quinn criter.	1.435612	
F-statistic	0.980787	Durbin-Watson stat	1.306085	
Prob(F-statistic)	0.354995			

Figura A. 16 Prueba ARCH

4) *Prueba White*: La probabilidad de 0.46 acepta la hipótesis nula de homocedasticidad. La Figura A. 17 muestra los resultados de la Prueba White.

Heteroskedasticity Test: White				
F-statistic	1.055737	Prob. F(4,5)	0.4641	
Obs*R-squared	4.578740	Prob. Chi-Square(4)	0.3333	
Scaled explained SS	1.514132	Prob. Chi-Square(4)	0.8241	
Test Equation:				
Dependent Variable: RESID^2				
Method: Least Squares				
Date: 07/23/13 Time: 17:16				
Sample: 2002 2011				
Included observations: 10				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	4.929218	7.958146	0.619393	0.5628
PRE_PROM^2	0.000703	0.008016	0.087743	0.9335
TEMP_PROM^2	-0.001986	0.001795	-1.106823	0.3188
PIB^2	-2.99E-23	6.03E-23	-0.496443	0.6406
D1^2	0.424864	0.396701	1.070993	0.3331
R-squared	0.457874	Mean dependent var	0.314725	
Adjusted R-squared	0.024173	S.D. dependent var	0.449658	
S.E. of regression	0.444190	Akaike info criterion	1.521724	
Sum squared resid	0.986524	Schwarz criterion	1.673017	
Log likelihood	-2.608622	Hannan-Quinn criter.	1.355757	
F-statistic	1.055737	Durbin-Watson stat	3.387928	
Prob(F-statistic)	0.464103			

Figura A. 17 Prueba White

Cambio estructural

La prueba CUSUM indica que el modelo no sufre cambios estructurales ya que ninguno de los valores calculado supera los límites de significatividad. La Figura A. 18 muestra los resultados de la prueba CUSUM.

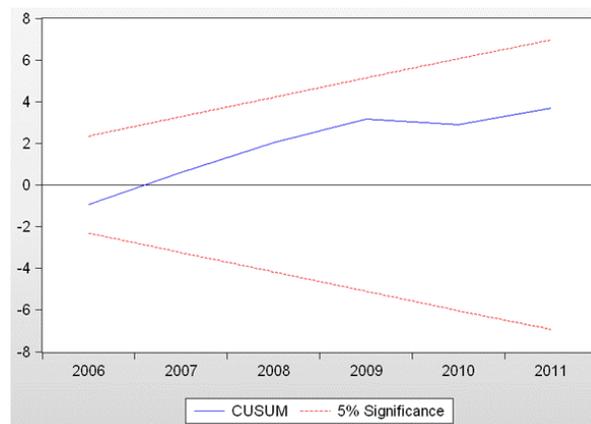


Figura A. 18 Prueba CUSUM