



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN ECONOMÍA

FACULTAD DE ECONOMÍA ♦ DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

La generación de agua residual en México y su impacto en la emisión de gases de efecto invernadero a través del metano ( $\text{CH}_4$ ) y del óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ).

## ENSAYO

Que para obtener el grado de:

Especialista en economía Ambiental y Ecológica

## PRESENTA:

Rosa Carmina Ramirez Contreras

## TUTORA:

Mtra. Karina Caballero Güendulain

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, octubre de 2020



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

# La generación de agua residual en México y su impacto en la emisión de gases de efecto invernadero a través del metano (CH<sub>4</sub>) y del óxido nitroso (N<sub>2</sub>O).

## Contenido

Introducción. ....	3
Capítulo 1. El marco teórico. ....	5
1.1 Las externalidades. ....	6
1.2 La internalización de las externalidades. ....	9
Capítulo 2. Las Aguas residuales. ....	10
2.1 Los gases de efecto invernadero (GEI). ....	10
2.2 Descripción de las aguas residuales. ....	12
2.3 Referencias normativas. ....	13
Capítulo 3. Panorama internacional y nacional respecto al tratamiento de aguas residuales y las emisiones a la atmósfera. ....	15
3.1 Panorama internacional. ....	15
3.2 El tratamiento de aguas residuales en México y las emisiones a la atmósfera. ....	16
Capítulo 4. Descripción de los procesos de tratamiento de aguas residuales municipales. ....	19
Capítulo 5. La generación de agua residual municipal en México y su disposición. ....	21
5.1 Metodología para estimar los GEI en el proceso de tratamiento y desalojo de agua residual municipal. ....	21
5.2 Emisión neta de metano (CH <sub>4</sub> ) ....	23
5.3 Emisión neta de óxido nitroso (N <sub>2</sub> O) ....	25
Capítulo 6. Resultados. ....	28
Conclusiones. ....	31
Bibliografía. ....	35
Glosario de siglas. ....	38
Relación de figuras, cuadros y gráficas. ....	38
Anexos: ....	39

# **La generación de agua residual en México y su impacto en la emisión de gases de efecto invernadero a través del metano (CH<sub>4</sub>) y del óxido nitroso (N<sub>2</sub>O).**

## **Introducción.**

El tratamiento de las aguas residuales en el país es un tema no resuelto que exige especial atención dada la situación del recurso desde la cantidad y la calidad del mismo. La disponibilidad de recursos hídricos está intrínsecamente ligada a la calidad del agua. El tratamiento podría significar un ahorro considerable a efecto de dar suficiencia en la disponibilidad mediante el reuso destinado a diversas actividades, incluido el consumo humano.

Este tema visto desde la política pública, la legislación y la gestión del medio ambiente en nuestro país, es una asignatura pendiente de urgente atención. Desde el aspecto de las políticas públicas el recurso hídrico sigue abordándose como un tema sectorial carente una visión global para el medio ambiente y, por lo tanto, sin un enfoque de sustentabilidad, entendiéndose por esto la conservación de los recursos naturales en el tiempo.

Desde el aspecto de la legislación, la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) no define la atención del subsector con planteamientos integrales de alto impacto a los ecosistemas, al no abordar normativamente las medidas preventivas y de internalización con visión de conjunto. La visión parcial (sectorial) del recurso hídrico, solamente se enfoca en la contaminación de los cuerpos receptores y no en las emisiones que, por el tipo de tratamiento y la demanda de energía para los propios procesos de tratamiento, se están generando a la atmósfera, de lo que da cuenta el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (SEMARNAT-INECC, 2018).

Asimismo, el incumplimiento de las normas al no prever la capacidad de estados y municipios en la viabilidad técnica, económica, ambiental y social de la misma.

Desde el punto de vista de la gestión, el organismo público responsable de la administración del recurso, de acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales (LAN) en los artículos 3, fracción XII, 4 y 9, es la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la que continúa enfocando la política hídrica con una visión sectorial orientada principalmente a la dotación de servicios a través de infraestructura, sin considerar los costos ambientales y sociales, además de los económicos.

La idea del presente trabajo surge de la cuantificación que el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero hace respecto a la aportación de metano ( $\text{CH}_4$ ) en las aguas residuales municipales colectadas y tratadas, y de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) derivado de las aguas residuales colectadas y descargadas en el drenaje sin tratamiento alguno (SEMARNAT-INECC, 2018). Hay que señalar que dicha aportación no resulta demasiado significativa a comparación de las aportaciones de otro tipo de residuos; sin embargo, a partir de dicha cuantificación surgen algunos aspectos que, a mi consideración, es importante tratar, ya que, aunque poco significativo en el contexto global de las emisiones de  $\text{CO}_2\text{e}$  en nuestro país, cualquier aportación tendiente a mejorar las condiciones de deterioro del medio ambiente, debieran ser instrumentadas. A continuación, se señalan dichas consideraciones:

- El Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero solamente considera el tratamiento del agua residual colectada. Misma que, y de acuerdo a las cifras de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), hasta 2015 era del 91.5 % a nivel nacional. Luego entonces cabe preguntar, si a partir de este dato el agua no recolectada y vertida a diversos cuerpos receptores o al suelo mismo, ¿cuánto genera de los gases considerados como de efecto invernadero?
- Las estadísticas oficiales no reportan un incremento significativo en la cobertura de saneamiento y el dato se asume como acumulado constante, sin considerar la vida útil de la infraestructura y los costos de operación de la misma.
- No obstante que la cifra reportada por la CONAGUA de agua recolectada a nivel nacional (91.5%), la diferencia entre lo recolectado y tratado es de 48%.

¿Por qué no se trata el total del agua recolectada y en qué condiciones se vierte a los cuerpos receptores el excedente no tratado?

- Entonces, el volumen de aguas residuales no recolectadas y el volumen de las aguas recolectadas, pero no tratadas, deben sumarse como aguas crudas vertidas en cuerpos receptores.
- La regulación jurídico-administrativa (Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, Ley de Aguas Nacionales y las normas oficiales mexicanas en materia de aguas residuales municipales, no contempla las disposiciones técnicas (tipos de procesos) que no incurran en un mayor impacto a la atmósfera.

El presente trabajo se centra en la reflexión de uno de los aspectos menos evidenciados respecto al impacto que las aguas residuales municipales tienen en la emisión de gases de efecto invernadero. Por lo tanto, el objetivo es demostrar que existe un efecto directo en la calidad del aire, debido a la disposición de las aguas residuales municipales y su tratamiento, y no solamente en la calidad del agua de los cuerpos receptores que las reciben.

## **Capítulo 1. El marco teórico.**

El fundamento de la teoría económica y específicamente de la economía ambiental para explicar el impacto que en este caso se origina tanto por el no tratamiento de las aguas residuales municipales como por los procesos de tratamiento utilizados, es a través de las externalidades: *“...cuando el comportamiento de un agente cualquiera (consumidor o empresa), afecta al bienestar de otro (su función de producción, o su función de producción de utilidad), sin que este último haya elegido esa modificación, y sin que exista un precio, una contraparte monetaria que lo compense”*. (Azqueta et.al, 2007)<sup>1</sup>.

Si bien es cierto que el principal impacto que las aguas residuales generan en la sociedad es en la salud y en la contaminación de cuerpos receptores al descargar aguas crudas, además de la sobreexplotación de los acuíferos, lo que la

Organización de las Naciones Unidas (ONU) en los Objetivos del Desarrollo Sostenible soporta con datos como que aproximadamente 1,800 millones de personas en el mundo utilizan fuentes de agua contaminada con heces fecales y que unos 2,400 millones de personas carecen de acceso a servicios básicos de saneamiento como retretes y letrinas.

No obstante que la cobertura de saneamiento no alcanza los niveles de agua recolectada en el país, el hecho de que haya recolección de aguas residuales representa un beneficio, ya que ello es indicador de que existe un sistema formal de dotación de agua potable y de servicio de drenaje. Sin embargo, hay que señalar también, que la mayor parte de los procesos de tratamiento en el país demandan energía eléctrica, con lo cual el beneficio que podría significar el estar conectado a una red formal de desalojo de aguas residuales municipales, se convierte en una externalidad negativa.

### 1.1 Las externalidades.

Podemos identificar tres tipos de externalidades,(Labandeira *et al*, 2007)<sup>ii</sup>: **entre productores**: cuando los organismos operadores municipales responsables de otorgar los servicios de agua y drenaje no cumplen con la normatividad, se generan externalidades negativas a partir de tres aspectos: a) al no coleccionar la totalidad de las aguas residuales generadas dentro de la extensión territorial bajo su responsabilidad; b) al no tratar la totalidad de las aguas residuales recolectadas de acuerdo a la normatividad y, c) al utilizar procesos de tratamiento que impactan a la atmósfera, tanto por el tipo de proceso como por la demanda de energía, que en la mayoría de los casos proviene de fuentes no renovables, requerida para su realización. La afectación entre los mismos responsables de otorgar los servicios se genera, en los dos primeros casos, al contaminar fuentes que abastecerán agua en otras localidades, lo que supone un costo mayor para hacerla apta para el consumo. En el tercer caso, al utilizar procesos que generan contaminación atmosférica, la afectación es a toda la sociedad, productores y consumidores. Esta externalidad se puede representar con la siguiente fórmula:

$$x_A = f(F_A, X_B)$$

En donde  $A$  representa al organismo operador responsable de otorgar los servicios de agua y alcantarillado el cual depende del nivel de producción generada por los usuarios  $B$ ,  $X_B$ , y de los niveles de factores productivos de capital y trabajo utilizados por  $A$  ( $F_A$ ). Esta externalidad es negativa cuando el aumento de la producción de aguas residuales generadas por los usuarios rebasa la capacidad de recolección y tratamiento del organismo operador de los servicios.

Sin embargo, la externalidad a) se puede considerar una externalidad **entre consumidores**, ya que la utilidad de un consumidor al contar con agua y no con drenaje, un segundo consumidor padece la contaminación a cuerpos de agua o a la intemperie generada por el primero, lo que también afecta a otros organismos operadores de los servicios, lo que se representa de la siguiente manera:

$$U_c = U_c(X_c, X_D)$$

En este caso  $U_c$  representa la función de utilidad del consumidor  $C$  y  $X$  a la cesta de bienes consumidos por cada agente, en este caso el agua. La utilidad del agente  $c$  depende de las decisiones de consumo del agente  $D$ . La externalidad es negativa cuando el consumo de agua de  $D$  reduce la posibilidad de  $C$  de tener agua y medio ambiente menos contaminados.

Se identifica una tercera externalidad: **entre consumidores y productores**, que se manifiesta cuando la utilidad o beneficio de los individuos depende del nivel de producción de las empresas, en este caso de la capacidad de recolección, y tratamiento adecuado para el medio ambiente, por parte de las empresas de agua y saneamiento municipales.

Asimismo, las consecuencias que derivan de las tres externalidades señaladas son un problema de externalidad negativa de oferta, debido a que el mercado no resuelve la carencia del saneamiento y la emisión de los gases de efecto invernadero por el tipo de tratamiento de los servicios referidos, y el Estado, al no considerar en la normatividad aplicable procesos que mitiguen el impacto a la atmósfera, no internaliza la externalidad.

Sin duda las externalidades se relacionan estrechamente, ya que el saneamiento debiera ser condición *sine qua non* de la dotación de los servicios de agua potable y alcantarillado, así como el tipo de procesos que abonen, por lo menos, a mitigar el calentamiento global. Esta consideración, daría cuenta de una visión coherente e integral con la política del medio ambiente en el país.

La Organización Mundial de la Salud (OMS), considera que el cambio climático influye en los determinantes sociales y medioambientales como la salud, calidad del aire, agua potable, alimentos suficientes y una vivienda segura. Asimismo, se estima que entre 2030 y 2050 el cambio climático causará alrededor de 250,000 defunciones adicionales cada año, debido a la malnutrición, el paludismo, la diarrea y el estrés calórico, y que los daños directos para la salud exclusivamente se calculan entre dos mil y cuatro mil millones de dólares de aquí al 2030.<sup>iii</sup>

Sin considerar los costos que el cambio climático tendrá sobre sectores en el bienestar de la sociedad como el económico y de recursos naturales, las consecuencias estimadas son considerables. Por ello el Estado, en cumplimiento a su función de administrar el recurso hídrico, por un lado, y en la atención de las enfermedades señaladas, por el otro, estaría obligado a trascender el ámbito sectorial respecto a este tema y atenderlo con una visión de sostenibilidad. Por ello, el costo marginal social representado por el gasto que el Estado destina para la atención de los requerimientos es mayor al costo marginal privado, debido a la externalidad negativa que provoca el agua residual no colectada, el agua residual colectada y no tratada, así como el agua residual colectada y tratada mediante procesos que contribuyen al calentamiento global.

A continuación, se resumen las tres externalidades identificadas.

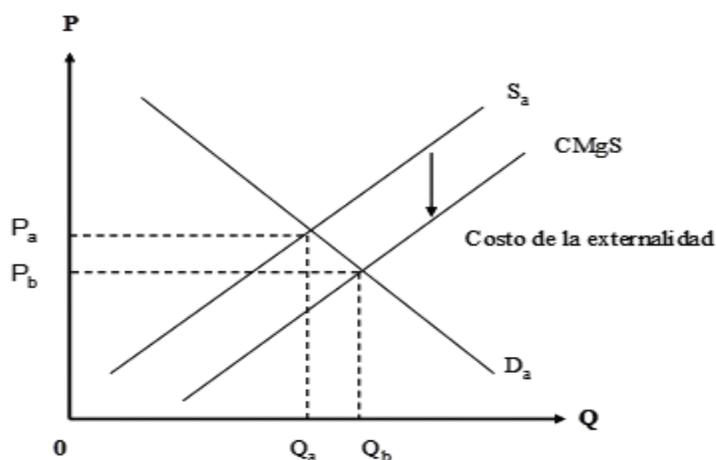
- a) La contaminación generada por las aguas residuales no recolectadas y que son vertidas a la intemperie, lo que genera contaminación a la atmósfera;
- b) las emisiones de CH<sub>4</sub> y de N<sub>2</sub>O a la atmósfera por el tipo de tratamiento, lo que contribuye al calentamiento global; así como
- c) las emisiones de CO<sub>2</sub> debido a la demanda de energía que requieren los procesos de tratamiento y que es abastecida principalmente por fuentes no renovables.

## 1.2 La internalización de las externalidades.

En el caso de la contaminación no existe un sistema de precios, por lo que el que contamina “no se da por enterado del daño que ocasiona”. En el caso del agua residual, esta forma parte de un servicio público que por obligación corresponde a los gobiernos municipales prestar. Por ello el gobierno tiene que intervenir para poner un precio y límites a la contaminación. *...los contaminadores pagan un precio por cada unidad de contaminación que generan, lo que corrige, por lo menos en teoría, el fallo del mercado.* (Kolstad 2001)<sup>iv</sup>, lo que en este caso se da a través de un impuesto *pigoviano* estipulado como multas en la LEGEPA y la LAN, tanto a nivel federal como estatal. Cubrir el costo marginal social del impacto de la externalidad implicaría reducir la cantidad abastecida de los servicios, entonces la fundamentación del problema está en la internalización de la externalidad por parte del Estado.

En la siguiente figura se representa el efecto de contar con el saneamiento de por lo menos la totalidad del agua recolectada con procesos que impacten menos en el ambiente, lo que generaría una externalidad positiva. En este caso la cantidad de agua tratada con procesos adecuados (Q<sub>b</sub>) es mayor que la cantidad de agua tratada con procesos adecuados en condición de mercado privado (Q<sub>a</sub>) debido a la intervención del Estado; ello desplaza la curva del costo marginal social (CM<sub>g</sub>S) por debajo del costo marginal privado debido al impacto de aminorar los efectos y abonar al calentamiento global.

**Figura 1.2.1 Costo social y costo privado.**



Fuente: elaboración propia con base en Mankiw (2002).

La distancia vertical entre la curva de oferta de los servicios y la curva que representa el costo marginal social ocasionado por la externalidad negativa representa el valor de la externalidad por unidad abastecida o el costo social de la misma.

## **Capítulo 2. Las Aguas residuales.**

### **2.1 Los gases de efecto invernadero (GEI).**

Antes de entrar en materia de las aguas residuales, es importante describir de forma general que son los gases de efecto invernadero (denominados así porque absorben la radiación infrarroja en la atmósfera) considerados en el marco del Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático los que se enuncian a continuación:

**Cuadro 2.1**

<b>Potencial de calentamiento global de gases de efecto invernadero (Comparado al CO<sub>2</sub>)</b>	
<b>Gas de efecto invernadero</b>	<b>Potencial de calentamiento global</b>
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	1
Metano (CH <sub>4</sub> )	25
Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O)	298
Hidrofluorocarbonos (HFCs)	124 – 14,800
Perfluorocarbonos (PFCs)	7,390 – 12,200
Hexafluoruro de azufre (SF <sub>6</sub> )	22,800

**Fuente:** Cuarto Informe de Evaluación (ar4) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (ipcc).

El CO<sub>2</sub> equivalente de dióxido de carbono es una medida en toneladas de la huella de carbono, que es el nombre dado a la totalidad de la emisión de Gases de Efecto Invernadero. La masa de los gases emitidos es medida por su equivalencia en CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono).

El metano (CH<sub>4</sub>) ha contribuido con aproximadamente el 20% del forzamiento climático debido a emisiones antropogénicas de GEI directos. La principal fuente de

emisión de metano es la descomposición de materia orgánica en sistemas biológicos tales como:

- a) Las actividades agrícolas relacionadas con fermentación entérica, descomposición en condiciones anaerobias del estiércol, cultivos de arroz bajo riego, quema de superficies para siembra y residuos agrícolas.
- b) Disposición de residuos sólidos.
- c) El tratamiento anaerobio de aguas residuales, domésticas e industriales.

Por su parte el óxido nitroso ( $N_2O$ ) se origina naturalmente y también antropogénicamente; contribuye con cerca del 6% del forzamiento climático de efecto invernadero y sus fuentes incluyen a los océanos, la quema de combustibles fósiles y biomasa y la agricultura. Otra fuente de la emisión de óxido nitroso es la descomposición de proteínas de aguas residuales domésticas.

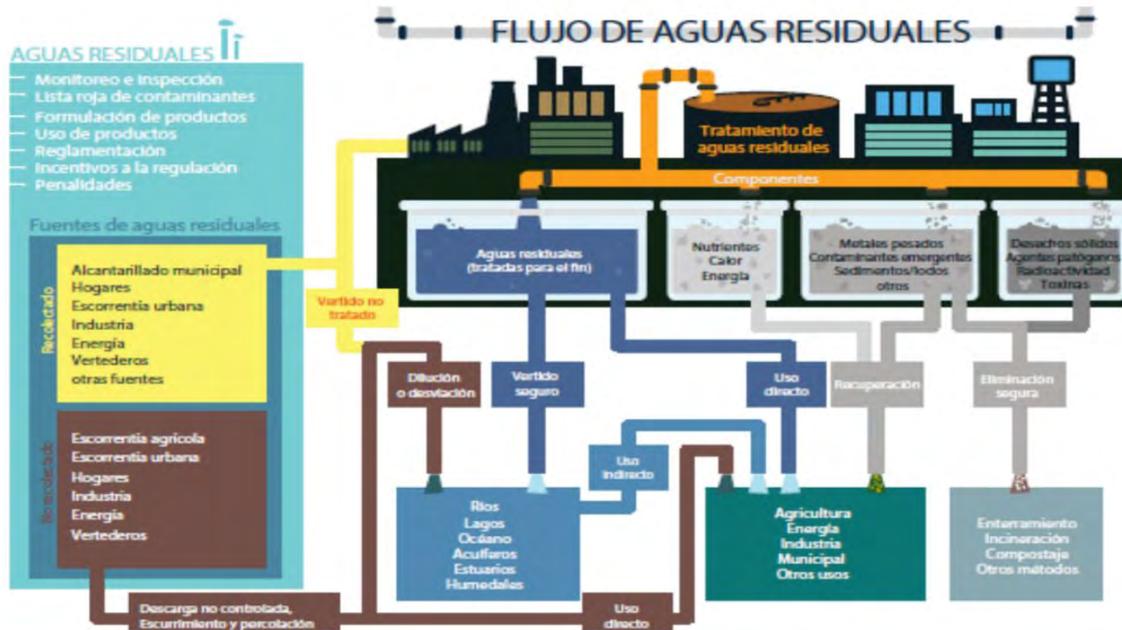
## **2.2 Descripción de las aguas residuales.**

A efecto de facilitar la mejor comprensión del trabajo, se considera necesario aclarar los aspectos principales sobre el origen de las aguas residuales y su tratamiento.

El agua residual proviene de los diferentes usos consuntivos: uso agrícola, abastecimiento público, industrial y generación de energía. De estos se derivan como fuentes: aguas residuales domésticas, aguas residuales municipales, escurrimientos urbano y agrícola, acuicultura terrestre, aguas residuales industriales, actividad minera, generación de energía y lixiviados de vertederos. El principal componente de las aguas residuales es el agua en un 99.85%, y el 0.15 %<sup>v</sup> ( $1.5 \text{ kg/m}^3$ ) de sólidos en suspensión, coloidales (los coloides son partículas de muy bajo diámetro que son responsables de la turbidez o del color del agua superficial) y disueltos, aunque la composición exacta de las mismas varía según los diferentes orígenes. Lo que significa que la mínima proporción de materia orgánica en el agua residual es capaz de generar la contaminación al medio ambiente.

En la siguiente figura se representa el origen de las aguas residuales de acuerdo con los distintos usos antropogénicos del agua.

Figura 2.1. Flujo de aguas residuales.



Fuente: ONU, *Agua Residual el Recurso Desaprovechado*, Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017.

### 2.3 Referencias normativas.

Hay que señalar que, en México, además de las disposiciones generales señaladas en la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LEGEPA), así como en la Ley de Aguas Nacionales (LAN), existen tres normas técnicas relativas a las aguas residuales municipales y una más que deriva de procesos utilizados para el tratamiento de dichas aguas:

- La NOM-001-SEMARNAT-1996, en la cual se establecen los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- NOM-002-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado.
- NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público. SEMARNAT (2003).<sup>vi</sup>
- NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección Ambiental.- Lodos y biosólidos.- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.<sup>vii</sup>

Dichas normas oficiales son disposiciones técnicas de la Administración Pública Federal cuyo objetivo es establecer reglamentaciones, especificaciones, directrices y características aplicables a un producto, proceso o servicio.<sup>viii</sup>

Para efecto del objetivo central de este trabajo, son dos las disposiciones normativas, a mi consideración, las que propician la situación que se aborda: la NOM-001-SEMARNAT-1996 la cual es de observancia obligatoria para los responsables de las descargas, así como el Artículo 37 de la Sección VI de la propia LGPEA, que a la letra dice: *En la formulación de normas oficiales mexicana en materia ambiental deberá considerarse que el cumplimiento de sus previsiones deberá realizarse de conformidad con las características de cada proceso productivo o actividad sujeta a regulación, sin que ello implique el uso de tecnologías específicas.*<sup>ix</sup>

De igual forma y dado que los municipios, de acuerdo al Art. 115 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, Fracción III, inciso a) en donde se establece que los municipios tendrán a su cargo los servicios públicos de: *agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales*<sup>x</sup>, como generadores, son las entidades responsables del cumplimiento de la norma.

### **Capítulo 3. Panorama internacional y nacional respecto al tratamiento de aguas residuales y las emisiones a la atmósfera.**

#### **3.1 Panorama internacional.**

La Organización para las Naciones Unidas (ONU) señala que la escasez de recursos hídricos, junto con la mala calidad del agua y el saneamiento inadecuado repercuten en la seguridad alimentaria, los medios de subsistencia y la oportunidad de educación para las familias pobres en todo el mundo y que, más del 80% de las aguas residuales resultantes de actividades humanas se vierten en los ríos o el mar sin ningún tratamiento, lo que provoca su contaminación.<sup>xi</sup>

De acuerdo con el *Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas 2017*, en promedio, los países de ingresos altos tratan cerca del 70% de las aguas residuales municipales e industriales que generan. Este promedio cae a un 38% en los países de ingresos medios-altos y a un 28% en los países de ingresos medios-bajos. En los países de ingresos bajos solo el 8% recibe algún tratamiento. Estas estimaciones sustentan la aproximación que se cita comúnmente que, en el mundo, más del 80% de las aguas residuales son vertidas sin tratamiento alguno<sup>xii</sup>. Aunque además de la contaminación a los cuerpos de agua y lo que de ello se deriva, la generación de agua residual y su falta de tratamiento o aún de las aguas tratadas, derivado del tipo de proceso de tratamiento, generan contaminación a la atmósfera mediante la emisión de CO<sub>2</sub> equivalente debido al metano, principalmente, además de la demanda de energía necesaria para efectuar los procesos de tratamiento, lo que contribuye al calentamiento global.

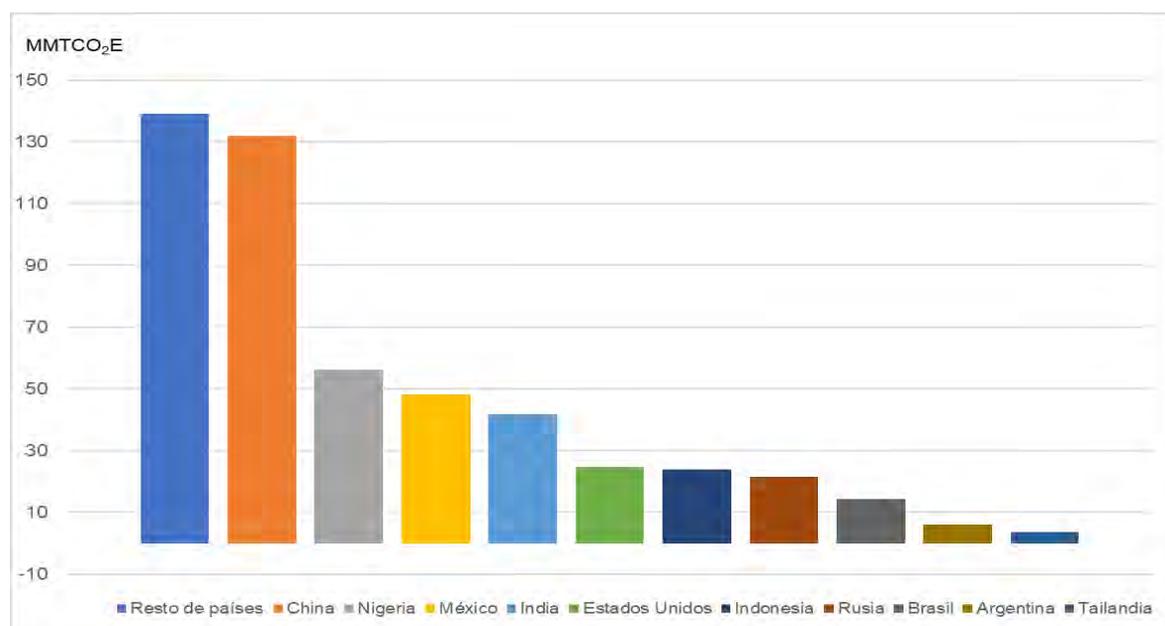
No obstante que la atención principal respecto al tema se ha centrado en los efectos sobre la salud de la población en los países, principalmente de bajos ingresos, poco se ha abordado en lo que este tema abona al calentamiento global.

Por su parte la Global Methane Initiative (GMI)<sup>xiii</sup> refiere que en los países en desarrollo en donde la recolección y el tratamiento de las aguas residuales es bajo o inexistente, los sistemas tienden a ser anaeróbicos, lo que provoca mayores emisiones de metano. Dichos sistemas incluyen lagunas, sistemas sépticos y letrinas. Hace una década, en 2010, la aportación mundial de metano proveniente

de las aguas residuales ascendió a 512 MMTCO<sub>2</sub>E (Millones de toneladas métricas equivalentes de CO<sub>2</sub>).

En la siguiente gráfica, se ilustra la aportación estimada de metano proveniente de aguas residuales en los países que más aportan.

**Gráfica 3.1.1:** Estimación mundial de emisiones de metano provenientes de las aguas residuales municipales en los diez países Global Methane Initiative con cifras más altas en 2010.



Fuente: Global Methane Initiative.<sup>xiv</sup>

Con el crecimiento de la población mundial, y con ello el incremento en el consumo de agua y alimentos, el aumento en la generación de aguas residuales es inevitable. Se estima que las emisiones de metano aumenten en 19 por ciento entre 2010 y 2030, esto es 97.29 MMTCO<sub>2</sub>E adicionales. (GMI).

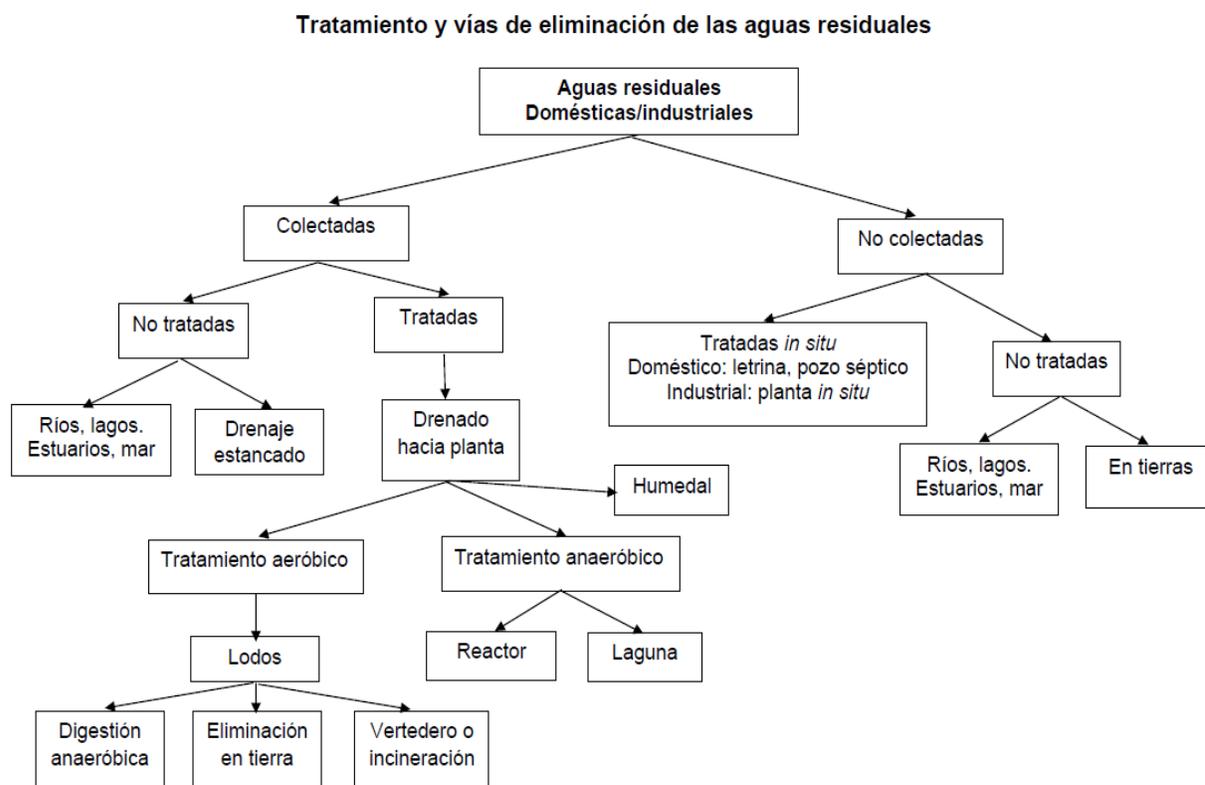
### 3.2 El tratamiento de aguas residuales en México y las emisiones a la atmósfera.

En México el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, elabora y actualiza el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero. En dicho documento se refiere que en 2015 en México se emitieron 683 millones de



Asimismo, en el siguiente diagrama se ilustra el proceso de recolección y eliminación de las aguas residuales generadas en el país.

**Diagrama 3.1.**



Fuente: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*.

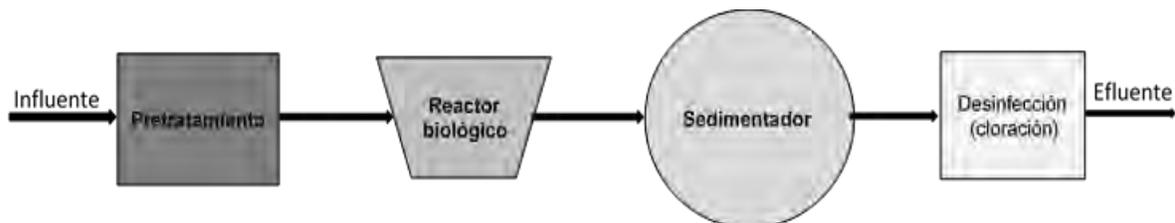
## Capítulo 4. Descripción de los procesos de tratamiento de aguas residuales municipales.

¿Por qué es importante definir los procesos de tratamiento? Justamente porque de ellos deriva parte de las emisiones contaminantes a la atmósfera. Por lo mismo es conveniente describir en qué consisten.

- El **tratamiento primario o físico**, consiste en realizar la eliminación de partículas gruesas y los sólidos sedimentables, con rejillas o cribas y desarenadores. Esto se da en un primer momento después de la llegada a una planta depuradora o de tratamiento.
- El **tratamiento secundario o biológico**, mediante el cual es eliminada la materia orgánica, además de los sólidos coloidales<sup>xvi</sup> no sedimentables, mediante un proceso de oxidación de dicha materia. En presencia de aire los procesos son aeróbicos; en ausencia de aire, son procesos anaeróbicos.
- Finalmente, un **tratamiento terciario** con el que se realiza la eliminación de contaminantes específicos, el pulimento o remoción de nutrientes (nitrógeno y fósforo), así como la desinfección. (Mantilla, 2018).

A continuación, se presenta de manera gráfica el proceso de tratamiento de aguas residuales municipales, en el cual se representan los tres pasos descritos.

**Figura 4.1: Diagrama de proceso de tratamiento de aguas residuales municipales.**



<p><b><u>Pretratamiento:</u></b>  Rejillas para basura  Cribas para arena  Homogenización  Bombeo</p>	<p><b><u>Reactor biológico:</u></b>  Proceso aeróbico  Proceso Anaeróbico</p>	<p><b><u>Sedimentador:</u></b>  Clarifica el agua  Separa lodos biológicos</p>	<p><b><u>Desinfección:</u></b>  Cloración  Ozonización  Luz ultravioleta</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------

**Fuente:** Elaboración propia con base en: César Valdez, Enrique, Vázquez González, Alba B., *Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales*, 2002, Fundación ICA, A.C. México, D.F.

Dentro del **tratamiento biológico**, existen distintos tipos de sistemas que son los más usados: lodos activados, filtros biológicos, lagunas de estabilización y tratamiento anaerobio.

**Lodos activados:** es un proceso biológico, conocido también como bioproceso, que consiste en una depuración de origen natural en la que los microorganismos son capaces de devolver -limpiar- agua contaminada a su estado normal, lo que se consigue a través de un tratamiento o proceso aerobio, esto es, mediante la aireación prolongada y la recirculación de lodos activos que eliminan las sustancias biodegradables disueltas en el agua residual.

**Filtros biológicos:** es un sistema mixto anaerobio y aerobio no forzado para la depuración de las aguas residuales municipales, se compone de una sedimentación primaria con digestión anaerobia de lodos, seguido de un tratamiento mediante un filtro biológico.

**Lagunas de estabilización:** De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) éste se considera un “método de tratamiento extensivo del agua residual, que consiste en el almacenamiento del agua por medio de la actividad bacteriana con acciones simbióticas de las algas y otros organismos”. (SEMARNAT, CONAGUA, 2015)<sup>xvii</sup>.

**Tratamiento anaerobio:** proceso fermentativo que ocurre en el tratamiento anaerobio de las aguas residuales y se caracteriza por la conversión de la materia orgánica a metano y de CO<sub>2</sub>, en ausencia de oxígeno, y con la interacción de diferentes poblaciones bacterianas. (Rodríguez, 2012).

En el Cuadro 2, se presenta el Tren de Tratamiento Convencional que da una idea de los procesos referidos.

## **Capítulo 5. La generación de agua residual municipal en México y su disposición.**

A efecto de desarrollar el postulado del presente trabajo, se procedió a analizar la información sobre población existente en 2015, publicada por el Consejo Nacional de Población (CONAPO)<sup>xviii</sup>; asimismo, se analizaron los datos del documento publicado por la CONAGUA en 2016 sobre la Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento <sup>xix</sup>, así como del Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS) edición 2015. Con base en dicha información se elaboró el **Anexo 1: Estimación de carga orgánica expresada como la concentración de DBO<sub>5</sub> en la generación de aguas residuales municipales en México**, en el que los datos derivados de las fuentes oficiales se presentan sombreados. Con dicha información, se calcularon la emisión de gases de efecto invernadero que las aguas residuales de origen municipal emiten: el Metano (CH<sub>4</sub>) y el Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), aplicándose la metodología del IPCC: Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Capítulo 6: Tratamiento y eliminación de aguas residuales, con lo que se realizaron los cálculos desglosados en los anexos **2: Estimación de emisiones de Metano (CH<sub>4</sub>) en la generación de aguas residuales en México; 3: Estimación de Nitrógeno por entidad federativa; 4: Estimación de emisiones de N<sub>2</sub>O por entidad federativa y 5: Cálculo del consumo de proteína por grupos quinquenales de edad, por sexo y por estado.**

Considerando que el IPCC en el capítulo 6 relativo a desechos, no contabiliza la emisión de GEI por la generación de agua residual por ser de origen antrópico, para los fines del presente ensayo y utilizando la metodología desarrollada por el organismo, se calculó la emisión de GEI por los procesos de tratamiento del agua residual, así como de descargas sin tratamiento a nivel nacional, con el propósito de comparar los resultados obtenidos con lo reportado en el Inventario Nacional de gases de efecto Invernadero.

Con la información publicada por la CONAGUA en 2016, correspondiente a datos del año 2015, se estimó la carga orgánica total presente en el agua residual generada, tratada o no, por estado y a nivel nacional.

Se tomó de la proyección de la población a nivel estatal a mitad del año publicada por el Consejo Nacional de Población (CONAPO) para el periodo 1950 a 2050. De la cual se obtuvo la población por entidad federativa para el año 2015 con un total de 121'005,815 habitantes.

El agua abastecida para uso público urbano, de acuerdo con la publicación *Situación del Subsector 2015* de la CONAGUA, los organismos responsables de prestar el servicio en promedio abastecieron en forma directa al 92.5 % de la población total, equivalente a 348,093 l/s y a un volumen anual de 10,977.5 Hm<sup>3</sup>/año. De lo anterior se desprende que 9,131,075 personas a nivel nacional se abastecieron de agua para consumo en forma indirecta.

Por otro lado, con base en el MAPAS 2015, se determinó que el 75% del agua suministrada se descargaba como agua residual, lo que equivale a que se descargaron 8,211.5 Hm<sup>3</sup>/año de agua residual.

Con base en la *Situación del Subsector 2015* en ese año el 91.5% de la población contaba con sistemas formales de recolección de agua residual, a partir de lo cual se determinó un volumen recolectado de 7,525.8 Hm<sup>3</sup>/año, lo que significó que se descargaron a sitios diferentes de redes formales de alcantarillado un total de 685.7 Hm<sup>3</sup>/año a nivel nacional y además 10,331,353 personas desecharon agua residual de forma directa tanto a cuerpos receptores como al suelo mismo, pero que no es

factible determinar su volumen debido a que no contaban con un sistema de desalojo formal.

De acuerdo con el *Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR)*, durante 2015 se trató un volumen a nivel nacional de 3,516.5 Hm<sup>3</sup>/año equivalente al 42.8% del volumen de agua residual generada, en consecuencia, existía un volumen que se descargó a cuerpos de agua de propiedad nacional sin ningún tratamiento de 4,695.0 Hm<sup>3</sup>/año.

Asimismo, con base en Metcalf & Eddy, Inc. (1972), se determinó que a nivel nacional en México el agua residual es de calidad media equivalente a una carga orgánica de 220 mg/l de DBO<sub>5</sub>, esto significa que el volumen total de agua residual generada de 8,211.5 Hm<sup>3</sup>/año produjo un volumen total de 2,258'169,279 kilogramos de DBO<sub>5</sub>, (Anexo 1: Estimación de carga orgánica expresada como la concentración de DBO<sub>5</sub> en la generación de aguas residuales municipales en México), cuyo cálculo base se ilustra en la siguiente fórmula:

$$DBO_5 = \sum_{Ags.}^{Zac.} (Qr * 220 \text{ mg/l}) * Fa * \left( \frac{\frac{seg}{día} * \frac{días}{año}}{1'000,000 \left( \frac{mg}{kg} \right)} \right) = 2,258,169,279 \text{ kg}$$

Donde:

DBO<sub>5</sub> = Materia orgánica presente en el agua residual, expresada en mg/l

Qr = Descarga de agua residual por estado en litros por segundo

Fa = Factor de ajuste por descargas de agua residual distinta a la doméstica, para este caso, Fa = 1.25.

## 5.2 Emisión neta de metano (CH<sub>4</sub>)

A partir del Inventario de las PTAR en 2015, se determinó que existía un total de 2,536 plantas en operación y de acuerdo con el proceso biológico de tratamiento, para fines del presente ensayo, se agruparon en cuatro categorías, incluyendo las descargas sin tratamiento, lo que se resume en el siguiente cuadro:

### Cuadro 5.2.1 Categorías de tratamiento.

Tipo de tratamiento o descarga	Agua residual Qr	Carga orgánica presente en el AR
	l/s	kg DBO <sub>5</sub>
Aeróbico	80,715	699,988,930
Anaeróbico	16,162	140,160,781
Tratamiento mixto	14,631	126,884,269
Descarga sin tratamiento	148,879	1,291,135,300
<b>Total:</b>	<b>260,386</b>	<b>2,258,169,279</b>

De igual forma, con referencia en la metodología del IPCC referida, la producción de metano ( $B_0$ , que es la máxima producción de metano a partir de la carga orgánica expresada en kg de  $DBO_5$ ) es del 60%; de igual forma, de acuerdo con el proceso de tratamiento el factor de corrección de la producción de metano ( $MCF_j$ ) es de 0.30 para el proceso aerobio, 0.80 para el proceso anaerobio, 0.55 para el proceso mixto y 0.10 para descargas sin tratamiento. Con estos factores se calculó la emisión de metano por tipo de proceso de tratamiento o descarga con la siguiente ecuación:

$$CH_4 = B_0 * MCF_j * DBO_5$$

Para procesos aerobios la emisión de  $CH_4$  es:

$$CH_4 = 0.60 * 0.30 * 699,988,930 = 125,998,007 \text{ kg}$$

Para procesos anaerobios:

$$CH_4 = 0.60 * 0.80 * 140,160,781 = 67,277,175 \text{ kg}$$

Para procesos mixtos:

$$CH_4 = 0.60 * 0.55 * 126,884,269 = 41,871,809 \text{ kg}$$

Para descargas sin tratamiento:

$$CH_4 = 0.60 * 0.10 * 1,291,135,300 = 77,468,118 \text{ kg}$$

La emisión total de metano por tratamiento del AR y por descargas sin tratamiento en el año 2015 fueron de 312,615,109 kg de CH<sub>4</sub> y debido a que el potencial de calentamiento del metano es equivalente a 25 veces el potencial del CO<sub>2</sub>, el efecto invernadero provocado es de 7,815'377,722 kg de CO<sub>2</sub>e. (Anexo 2: Estimación de emisiones de Metano (CH<sub>4</sub>) en la generación de aguas residuales en México).

### 5.3 Emisión neta de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O)

El óxido nitroso se forma a partir de la presencia del nitrógeno en el agua residual, el cual proviene principalmente del consumo de proteína de la población lo que está calculado en el **Anexo 5: Cálculo del consumo de proteína por grupos quinquenales de edad, por sexo y por estado**; de igual forma se consideró la publicación *Perfiles Nutricionales por países: México*, de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 2003 para obtener los factores de consumo de proteína y la información generada por el INEGI en el censo de 2010, toda vez que en conteo de 2015 no incluye los desagregados requeridos. En el siguiente cuadro se muestra el consumo diario de proteína resultado de procedimiento descrito:

**Cuadro 5.3.1 Consumo de proteína por grupo de edad y sexo de la población.**

Grupo poblacional	Grupo de edad	Consumo de proteína gr/día	
		Hombres Ch	Mujeres Cm
P <sub>1</sub>	0 a 4	16.6	16.6

P <sub>2</sub>	5 a 9	28.75	28.75
P <sub>3</sub>	11 a 14	51.8	52.9
P <sub>4</sub>	15 a 19	68.3	67.3
P <sub>5</sub>	20 a 24	66.2	72.6
P <sub>6</sub>	25 - 50	72.7	77.1
P <sub>7</sub>	51 +	70.9	59.8

Con la siguiente ecuación se obtuvieron los consumos de proteína por estado:

$$CPp_j = \frac{\sum_1^7 Ph_i * Ch_1 + \sum_1^7 Pm_i * Cm_i}{Pe_j} * \left(\frac{365}{1000}\right)$$

Donde:

CPp<sub>j</sub> = Consumo per cápita de proteína en el estado j, en kg por persona por año

Phi = Población masculina por grupo poblacional

Chi = Consumo per cápita de proteína por grupo poblacional en hombres

Pmi = Población femenina por grupo poblacional

Cmi = Consumo per cápita de proteína por grupo poblacional en mujeres

Pe<sub>j</sub> = Población total del estado j en el año 2015

A nivel nacional en 2015 el consumo total de proteína se determinó con la siguiente ecuación:

$$Nef = \sum_{Ags}^{Zac} CPp_j * Pe_j * Fnpr * Fnon * F ind - Nlod$$

$N_{ef}$  = Nitrógeno en el efluente de AR en kg por año

$CP_{pj}$  = Consumo per cápita de proteína en el estado j, en kg por persona por año

$Pe_j$  = Población total del estado j en el año 2015

$F_{npr}$  = Fracción de nitrógeno en proteína, es igual a 0.16

$F_{non}$  = Fracción de no consumo de proteína, es igual a 1.1

$F_{ind}$  = Fracción industrial y comercial de descarga de proteína, es igual a 1.25

$N_{lod}$  = Nitrógeno removido con lodos (por defecto es cero)

Con lo que se obtuvo un resultado de 580,844,849 kg de nitrógeno descargados en el efluente de agua residual a nivel nacional. (Anexo 3: Estimación de Nitrógeno por entidad federativa).

Por otro lado, de acuerdo con el tipo de proceso de tratamiento o de descarga sin tratamiento, se determinó el factor de emisiones de óxido nitroso ( $N_2O$ ) con la siguiente ecuación:

$$FeN_2O_j = \frac{Q_{ae_j}}{Q_{rc_j}} * 1.00 + \frac{Q_{an_j}}{Q_{rc_j}} * 0.20 + \frac{Q_{mx_j}}{Q_{rc_j}} * 0.60 + \frac{Q_{nt_j}}{Q_{r_j}} * 0.10$$

En donde:

$FeN_2O_j$  = Factor de emisiones para el estado j, adimensional

$Q_{rc}$  = Agua residual recolectada en l/s

$Q_{ae}$  = Tratamiento aeróbico de AR en l/s

$Q_{an}$  = Tratamiento anaeróbico de AR en l/s

$Q_{mx}$  = Tratamiento mixto de AR en l/s

$Q_{nt}$  = AR no tratada en l/s

$Q_r$  = Agua residual generada en l/s

Finalmente, la emisión de óxido nitroso ( $N_2O$ ) a la atmósfera se determinó con la siguiente ecuación:

$$EN_2O = \sum_{Ags}^{Zac} Nef_j * FeN_2O_j * FcN_2O$$

Donde:

EN<sub>2</sub>O = Emisiones de óxido nitroso en kg/año

Nef<sub>j</sub> = Nitrógeno en el efluente de AR en kg por año en el estado j

FcN<sub>2</sub>O = Factor de conversión de nitrógeno a óxido nitroso, constante igual a 1.57.

Al considerar los datos por estado con la aplicación de la formula anterior, para 2015 resultó una emisión total de óxido nitroso de 417,021,522 kg de N<sub>2</sub>O (Anexo 4: Estimación de emisiones de N<sub>2</sub>O por entidad federativa) y debido a que el potencial de calentamiento del óxido nitroso es equivalente a 298 veces al producido por el CO<sub>2</sub>, el efecto invernadero provocado fue de 124,272'413,546 kg de CO<sub>2</sub>e en ese año.

## Capítulo 6. Resultados.

Del suministro de agua potable reportado en el año de referencia, se generaron 260 386 l/s de agua residual, lo que corresponde a 8,211.5 millones de m<sup>3</sup>. Por su parte la cobertura nacional promedio de alcantarillado se ubicó en 91.8%. Cabe aclarar en este concepto, que las cifras oficiales tomadas de la CONAGUA en once entidades federativas muestran coberturas de alcantarillado superiores a la cobertura del suministro de agua potable, dichas entidades son: Baja California, Baja California Sur, Colima, Chiapas, Distrito Federal, Jalisco, México, Morelos, Nuevo León, Tabasco y Veracruz, esta situación no es explicada por la fuente de información y se considera que uno de los motivos pudiera ser que en las entidades mencionadas existen hogares cuya fuente de abastecimiento de agua no es la red formal; sin embargo, si descargan el consumo a la red de alcantarillado municipal. A efecto de nivelar esta situación, en una columna adicional se igualaron los valores a su nivel de dotación de agua potable, con lo que la cobertura promedio nacional de alcantarillado disminuyó a 91.5%; a partir de este porcentaje se obtuvo un volumen anual recolectado de 7,525.8 millones de m<sup>3</sup> de agua residual. De igual

forma, los datos oficiales señalan que existe un caudal de agua tratada del orden de 111,507 l/s que elevado al año resulta un volumen tratado de 3,516.5 millones de m<sup>3</sup> equivalente al 46.7% del agua residual recolectada. (Anexo 1).

Asimismo, se determinó que 148,879 l/s y su equivalente anual de 4,695 millones de m<sup>3</sup> corresponden a agua residual generada no tratada que se descarga a los cuerpos receptores sin ningún tratamiento.

La carga orgánica medida como Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)<sup>xxi</sup> presente en el agua residual generada, se obtuvo de considerar una calidad media a nivel nacional de 220 mg/l (Metcalf & Eddy, 1979)<sup>xxii</sup> y resulta de 2.3 millones de toneladas métricas.

De acuerdo con el Inventario de Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) publicado por la CONAGUA en 2016, durante 2015 a nivel nacional existían 2,536 PTAR activas. De ese número el 37.9 % trataron un caudal medio de 80,714.6 l/s y su equivalente anual de 3,545.4 millones de m<sup>3</sup> en procesos aeróbicos; el 48.9% de las PTAR trataron un caudal medio de 16,161.7 l/s y su equivalente anual de 509.7 millones de m<sup>3</sup> en procesos anaeróbicos y 11.8% trataron un caudal medio de 14,630.8 l/s y su equivalente anual de 451.4 millones de m<sup>3</sup> en procesos mixtos, es decir, el tren de tratamiento se basó en parte en procesos aeróbicos y otra parte en procesos anaeróbicos.

Siguiendo la metodología de cálculo de gases de efecto invernadero GEI desarrollada por el IPCC, se determinó que del total de la carga orgánica generada 700 mil toneladas de DBO<sub>5</sub> se removieron por procesos aeróbicos y se generaron 126 mil toneladas de metano CH<sub>4</sub>; 140 mil toneladas de DBO<sub>5</sub> se removieron por procesos anaeróbicos y se generaron 67 mil toneladas de metano CH<sub>4</sub> y 127 mil toneladas de DBO<sub>5</sub> se removieron por procesos de tratamiento mixtos y se generaron 42 mil toneladas de metano CH<sub>4</sub>.

El agua residual recolectada y no tratada produjo una carga total de 1 millón 291 mil toneladas de DBO<sub>5</sub> que se removieron en procesos naturales y generaron 77,500 toneladas de metano CH<sub>4</sub>.

En global la remoción de la materia orgánica presente en el agua residual colectada, resultó en la generación de 312,600 toneladas de metano CH<sub>4</sub> que equivalen a 7,815 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>e en 2015. Lo anterior sin considerar que los procesos de tratamiento aeróbicos y mixtos generan una cantidad considerable de biosólidos, del orden del 80 al 90% de la carga orgánica, que en su proceso de estabilización generan metano que no es contabilizado en el inventario de GEI; asimismo, en todos los procesos de tratamiento no está contabilizada la emisión de CO<sub>2</sub> por MWh de energía eléctrica utilizada en los procesos.

La Comisión para la Cooperación Ambiental para América del Norte con sede en Montreal Canadá, emitió la publicación Emisiones Atmosféricas de las Centrales Eléctricas en América del Norte. En la sección dedicada a México, se estableció que la tasa nacional promedio de emisión de GEI se calculó en 653.8 kg de CO<sub>2</sub>e por MWh; por otro lado, la remoción de materia orgánica presente en el agua residual expresada en DBO<sub>5</sub> por procesos aeróbicos y mixtos, lo que equivale a una demanda energética de 8.8 kWh por kg de DBO<sub>5</sub> removido, determinada con cálculos propios a partir de la publicación de Gabriela Mantilla, *et. al.*<sup>xxiii</sup>

De lo anterior se desprende que en 2015 dichos procesos requirieron una demanda total de 8'248,556 MWh de energía eléctrica en el año, lo que se traduce en una emisión de GEI de 5'392,906 toneladas métricas de CO<sub>2</sub>e, adicionales a las emisiones del propio proceso, lo que da un total de 13'208,283 toneladas métricas de CO<sub>2</sub>e.

En el siguiente cuadro, se resumen los resultados obtenidos en el presente ensayo:

**Cuadro 6.1 Emisión de GEI por el tratamiento y/o descarga sin tratamiento del agua residual y por la energía eléctrica utilizada en los procesos expresado en CO<sub>2</sub>e.**

Tipo de tratamiento o descarga	Carga orgánica presente en el AR kg/DBO	kg CH <sub>4</sub>	%	Consumo energía eléctrica anual MWh
Aeróbico	699,988,930	125,998,007	100.0%	6,186,771

Anaeróbico	140,160,781	67,277,175	20.0%	247,759
Tratamiento mixto	126,884,269	41,871,809	60.0%	672,871
Descarga sin tratamiento	1,291,135,300	77,468,118	10.0%	1,141,155
<b>Total:</b>	<b>2,258,169,279</b>	<b>312,615,109</b>		<b>8,248,556</b>

kg CO <sub>2</sub> E	<b>7,815,377,722</b>	69%	<b>5,392,905,823</b>
kg CO <sub>2</sub> E			<b>13,208,283,545</b>
CO <sub>2</sub> E por MWh			653.8

En resumen, por la generación de metano se emitieron 13 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>e y por la generación de óxido nitroso N<sub>2</sub>O se emitieron 124 millones de toneladas métricas de CO<sub>2</sub>e en ese año, resultando una emisión total de 137 millones de toneladas métricas de CO<sub>2</sub>e, es decir, 6 veces respecto a los resultados publicados del INECC.

En 2015, el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero, publicado por el INECC en 2018, informó que ese año se emitieron en el país 683 millones de toneladas de bióxido de carbono equivalente (MtCO<sub>2</sub>e) de gases efecto invernadero (GEI)<sup>xxiv</sup> De este total se refiere que el 3.3% corresponde al tratamiento y eliminación de agua residual, es decir a 22.5 millones de toneladas métricas de CO<sub>2</sub>e.

Cabe señalar, que parte de la diferencia registrada puede deberse a: 1) la no contabilización de emisiones por el consumo de energía eléctrica en los procesos de tratamiento; 2) el potencial de calentamiento del óxido nitroso; y 3) la no contabilización del agua eliminada sin tratamiento, colectada o no colectada. No obstante, para el presente trabajo se utilizó de manera puntual la metodología recomendada por el IPCC y la información oficial publicada por la CONAGUA.

## **Conclusiones.**

De continuar con la tendencia respecto a este tema, y dado que cada vez es más escasa la disponibilidad del recurso en cantidad y calidad, debido a la sobreexplotación de los acuíferos, la contaminación de las cuencas hidrológicas,

así como de la eficiencia física reportada por algunos estudios que la ubican en el 60% a nivel nacional, y de no diseñarse una política pública al respecto con una visión integral y centrada, como parte fundamental de la política ambiental en el país y no únicamente enfocada principalmente a incrementar la cobertura de agua potable, la crisis del subsector será cada vez más profunda y difícil de atender debido a los costos sociales, ambientales y económicos que ello implica.

A mi consideración este tema tiene implicaciones originadas en contradicciones de los ordenamientos jurídico-administrativos tales como:

- La propia ley en materia ambiental no considera, como se señaló en el capítulo correspondiente, el aspecto tecnológico en los procesos de tratamiento de aguas residuales municipales.
- No obstante, aún si normativamente estuvieran definidos procesos que contribuyeran a disminuir la emisión de gases efecto invernadero, el propio Art. 115 Constitucional responsabiliza a los municipios de los servicios de agua potable y alcantarillado, lo que deja a consideración de éstos la elección del cumplimiento de las normas emitidas.
- La Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), no mide la calidad del agua en cumplimiento de las NOM's, recayendo la responsabilidad en la propia CONAGUA, lo que a mi juicio puede resultar en que el organismo juega un papel de juez y parte.

Otro aspecto que es importante señalar es el del cobro explícito del saneamiento por parte de los organismos responsables de otorgar los servicios de agua potable y alcantarillado. Los recibos de cobro expedidos solo explicitan generalmente el consumo de agua, atribuyéndose el cobro del desalojo del agua residual en el mismo cobro por consumo de agua. Sin embargo, no se hace patente una cuota por concepto de tratar el agua que desaloja la sociedad.

Si en la Ciudad de México se cobrara un peso por metro cúbico consumido de agua por concepto de tratamiento, considerando un desalojo promedio de 38.3 m<sup>3</sup>/s<sup>xxv</sup>, lo que implica un desalojo diario de 3,309,120 m<sup>3</sup>/día, 99,273,600 m<sup>3</sup>/mes y 1,192 millones de m<sup>3</sup>/año, se estaría hablando de recursos suficientes

para la operación de las plantas, además del ahorro que significa la cogeneración en la demanda de energía eléctrica y con ello la reducción de gases de efecto invernadero por la disminución en el consumo de energía eléctrica proveniente de fuentes fósiles.

Asimismo, en la operación, mantenimiento y conservación de la infraestructura hidráulica de tratamiento de agua residual hay que considerar la depreciación y reposición al final de la vida útil de los equipos electromecánicos, generalmente más corta que la vida útil de la obra civil; esta circunstancia da lugar a que algunas plantas cuya vida útil es de 25 a 30 años de la obra civil, si no se realiza la reposición de los equipos electromecánicos cuya vida útil oscila entre tres y doce años, la infraestructura se vuelve inoperante y obsoleta y deja de cumplir con su función.

Estos aspectos dependen de la capacidad económica, tecnológica y en algunos casos hasta de la voluntad política de los ayuntamientos para mantener en óptimas condiciones la infraestructura. Hay centros de población que, contando con las plantas, estas no están en operación y se siguen reportando como en funcionamiento. Esto es manifiesto en la propia información de la CONAGUA que reporta en su Inventario de Plantas de Tratamiento 2015<sup>xxvi</sup>, que de las 3,517 plantas inventariadas sólo el 72.1%, que equivale a 2,536 plantas, se reportan como activas; el resto se encuentran obsoletas o fuera de operación.

Pero más allá de la relevancia de la capacidad económica para la operación y el mantenimiento adecuado de los sistemas de tratamiento, para cualquier entidad, la sociedad tiene que asumir el compromiso de pagar por lo que contamina. Y en el caso del agua es una cuestión de vital importancia y de inmediato plazo.

En 2016 el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), presentó un Informe final denominado *“Revisión y actualización del potencial de biomasa para generación de energía eléctrica a partir de plantas de tratamiento de aguas residuales presentado en el Inventario Nacional de Energías Renovables (INERE)”*, en dicho documento se refiere: “En la mayor parte de los procesos utilizados en México se requiere de energía eléctrica, con excepción del proceso

anaerobio, en cuyo caso éste se presenta como un proceso generador de biogás que puede ser aprovechado en el tratamiento de las aguas y de los lodos residuales y así no solamente disminuir los costos de operación, sino también coadyuvar en la disminución de las emisiones a la atmósfera al no utilizar las fuentes convencionales de energía eléctrica<sup>xxxvii</sup>.

Al respecto, con cálculos propios se estimó que, a partir de los procesos de tratamiento y la generación de metano, y considerando que el 50% del metano generado fuera utilizado para cogenerar energía eléctrica, se tendría una reducción de 5.7 millones de toneladas métricas anuales de CO<sub>2</sub>e. Lo que se ilustra en el siguiente cuadro.

### Capacidad de cogeneración de energía eléctrica con la recuperación de metano (CH<sub>4</sub>) en el tratamiento de aguas residuales en México.

Tipo de tratamiento o descarga	Carga orgánica presente en el AR kg/DBO	kg CH <sub>4</sub>	%	Consumo energía eléctrica anual MWh
Tratamiento aeróbico de AR	699,988,930	125,998,007	100.0%	6,186,771
Tratamiento anaeróbico de AR	140,160,781	67,277,175	20.0%	247,759
Tratamiento mixto de AR	126,884,269	41,871,809	60.0%	672,871
Descarga sin tratamiento	1,291,135,300	77,468,118	10.0%	1,141,155
<b>Total:</b>	<b>2,258,169,279</b>	<b>312,615,109</b>		<b>8,248,556</b>

kg CO <sub>2</sub> E	<b>7,815,377,722</b>	69%	<b>5,392,905,823</b>
kg CO <sub>2</sub> E			<b>13,208,283,545</b>
CO <sub>2</sub> E por MWh			653.8

Potencial de Cogeneración = 50%	<b>156,307,554</b>		<b>5,567,775</b>
kg CO <sub>2</sub> E	<b>3,907,688,861</b>		<b>3,640,211,431</b>
kg CO <sub>2</sub> E			<b>7,547,900,291</b>
Disminución neta de emisión de GEI por el proceso de recuperación del metano del tratamiento de las AR			<b>43%</b>

## **Bibliografía.**

Agenda Ecológica Federal 2017, *Ley de Aguas Nacionales*, Editorial ISEF. Décima primera edición. Ed. ISEF. México.

Agenda Ecológica Federal 2017, *Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. Décimo Primera Edición. Ed. ISEF. México.

Azqueta, Alviar, Domínguez y O´Ryan (2007), *Introducción a la economía ambiental*. (Segunda Edición). Madrid, Esp. McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U

Centenario. *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*. 2017, Primera Edición. Gallardo Ediciones. México.

César Valdez, Enrique, Vázquez González, Alba B., *Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales*, 2002, Fundación ICA, A.C. México, D.F.

Global Methane Initiative, *El metano de las aguas residuales municipales, avanzar en la recuperación y aprovechar oportunidades*, 2013. [www.globalmethane.org](http://www.globalmethane.org)

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, (IPCC), *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, Volumen 5, Desechos*. Editado por Simon Eggleston, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara y Kiyoto Tanabe. Japón.

Labandeira Xavier, León Carmelo J, Vázquez Ma. Xosé, *Economía Ambiental*, (2007), Pearson Educación. Madrid, Esp.

Mankiw, N. Gregory, *Principios de Economía*, 2002, Segunda Edición, Ed. Mc. Graw Hill.

Metcalf and Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment Disposal Reuse*, 1979, Second Edition. McGraw-Hill Book Company. Boston, Mass., USA.

Organización Mundial de la Salud, *Cambio climático y salud. Datos y Cifras*, 2017.

Organización de las Naciones Unidas, (ONU), *Objetivos de Desarrollo Sostenible, Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos*.

Organización de las Naciones Unidas, (ONU)-Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Ciencia y Cultura, (UNESCO), *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017, Aguas Residuales el Recurso Desaprovechado*, Francia.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), *Perfiles Nutricionales por países: México, 2003*. Roma, Italia. <http://www.fao.org/3/aq028s/aq028s.pdf>

Orozco y Villa, Luz Elena. (2010) *¿Qué son las Normas Oficiales Mexicanas (NOMs)?*, Revista NEXOS.

Panel Intergubernamental para el Cambio Climático, (IPCC), Michiel R. J. Doorn (Países Bajos), Sirintornthep Towprayoon (Tailandia), Sonia Maria Manso Vieira (Brasil), William Irving (Estados Unidos), Craig Palmer (Canadá), Riitta Pipatti (Finlandia), y Can Wang (China), *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Capítulo 6: Tratamiento y eliminación de aguas residuales*.

Rodríguez V., Jenny Alexandra, *Tratamiento anaerobio de aguas residuales*, 2012, Universidad El Valle, Cali, Colombia.

Secretaría de Gobernación, Consejo Nacional de Población, Estimaciones y Proyecciones de la Población por Entidad Federativa 2010-2030. México.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, (SEMARNAT), Comisión Nacional del Agua, (CONAGUA), Beneficios de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco, 2010, México

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, (SEMARNAT), Comisión Nacional del Agua, (CONAGUA), *Manual de Agua Potable y Saneamiento (MAPAS), Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Lagunas de Estabilización*, 2015, México, D.F.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, (SEMARNAT), Comisión Nacional del Agua, (CONAGUA), *Inventario de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR)*, 2016. México.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2016, *Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, Edición 2016*. México

SEMARNAT, Dirección General de Fomento Ambiental, Urbano y Turístico, *Normas oficiales en materia de lodos y biosólidos*. 2003, México.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, (SEMARNAT), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, (IMTA), Mantilla Morales, Gabriela, 2016, *Alternativas en el manejo integral de lodos en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales*, Tijuana, B.C.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA, *Revisión y actualización del potencial de*

*biomasa para generación de energía eléctrica a partir de plantas de tratamiento de aguas residuales presentado en el Inventario Nacional de Energías Renovables (INERE), 2016. México*

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, (SEMARNAT), Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, (INECC), 2018, Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015. México.

Universidad Nacional Autónoma de México, (UNAM), Instituto de Ingeniería, (IIUNAM) en Prensa, Capella Vizcaino, Antonio, *En México se pierde 40 por ciento del agua potable por fugas en redes: experto de UNAM*, 2015, México.

## **Glosario de siglas.**

CO<sub>2</sub>e: dióxido de carbono equivalente.

CH<sub>4</sub>: metano.

kg: kilogramo.

kWh: kilo watt hora.

l/s: litros por segundo.

MMTCO<sub>2</sub>E: millones de toneladas métricas equivalentes de CO<sub>2</sub>.

m<sup>3</sup>: metros cúbicos.

m<sup>3</sup>/s: metros cúbicos por segundo.

mg/l: miligramos por litro.

MWh: mega watt hora

N<sub>2</sub>O: óxido nitroso.

DBO<sub>5</sub>: demanda bioquímica de oxígeno.

## **Relación de figuras, cuadros y gráficas.**

Figura 1.2.1 Costo social y costo privado.

Cuadro 2.1 Potencial de calentamiento global de gases de efecto invernadero.

Figura 2.1 Flujo de aguas residuales.

Gráfica 3.1.1 Estimación mundial de emisiones de metano provenientes de las aguas residuales municipales en los diez países Global Methane Initiative con cifras más altas en 2010.

Gráfica 3.2.1 Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 2015.

Diagrama 3.1 Tratamiento y vías de eliminación de las aguas residuales.

Figura 4.1 Diagrama de proceso de tratamiento de aguas residuales municipales.

Cuadro 5.2.1 Categorías de tratamiento.

Cuadro 5.3.1 Consumo de proteína por grupo de edad y sexo de la población.

Cuadro 6.1 Emisión de GEI por el tratamiento y/o descarga sin tratamiento del agua residual y por la energía eléctrica utilizada en los procesos expresado en CO<sub>2</sub>e.

**Anexos:**

1. Estimación de carga orgánica expresada como la concentración de  $\text{DBO}_5$  en la generación de aguas residuales municipales en México.
2. Estimación de emisiones de Metano ( $\text{CH}_4$ ) en la generación de aguas residuales en México.
3. Estimación de Nitrógeno por entidad federativa.
4. Estimación de emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  por entidad federativa.
5. Cálculo del consumo de proteína por grupos quinquenales de edad, por sexo y por estado.

Capacidad de cogeneración de energía eléctrica con la recuperación de metano ( $\text{CH}_4$ ) en el tratamiento de aguas residuales en México.

## Referencias:

- 
- <sup>i</sup> Azqueta, Alviar, Domínguez y O’Ryan (2007), *Introducción a la economía ambiental*. (Segunda Edición). Madrid, Esp. McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U. P.44.
- <sup>ii</sup> Labandeira Xavier, León Carmelo J, Vázquez Ma. Xosé (2007), *Economía Ambiental*, (2007), Madrid, Esp. Pearson Educación, S.A. Pp. 70-71.
- <sup>iii</sup> Organización Mundial de la Salud, *Cambio Climático y Salud. Datos y Cifras*. Recuperado el 20 de febrero de 2020 en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/cambio-clim%c3%a1tico-y-salud>
- <sup>iv</sup> Kolstad, Charles D., *Economía Ambiental*, 2001. Primera edición en español, Oxford University Press, S.A. de C. V. México. Pág. 135.
- <sup>v</sup> Metcalf and Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment Disposal Reuse*, 1979, Second Edition. McGraw-Hill Book Company. Boston, Mass., USA. P 64.
- <sup>vi</sup> SEMARNAT, Dirección General de Fomento Ambiental, Urbano y Turístico, Normas oficiales en materia de lodos y biosólidos. 2003, México. Recuperado el 10 de enero de 2020 en: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium-bin/detalle.pl?Id=20200129172348#>
- <sup>vii</sup> SEMARNAT, CONAGUA, Normas Oficiales Mexicanas. México. Recuperado el 10 de enero de 2020 en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAA-15-13.pdf>
- <sup>viii</sup> Orozco y Villa, Luz Elena. (2010) ¿Qué son las Normas Oficiales Mexicanas (NOMs)?, Revista NEXOS. Recuperado el 4 de febrero de 2020 en: <https://eljuegodelacorte.nexos.com.mx/?p=324>
- <sup>ix</sup> Agenda Ecológica Federal 2017, Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Décimo Primera Edición 2017, Mexico, Ed. ISEF.
- <sup>x</sup> Centenario. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Primera Edición 2017, México. Gallardo Ediciones. Pp. 286,289.
- <sup>xi</sup> ONU, *Objetivos de desarrollo sostenible, Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos*. Recuperado el 20 de enero de 2020 en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- <sup>xii</sup> ONU-UNESCO, Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017, Aguas Residuales el Recurso Desaprovechado, Francia. Pág. 2. Recuperado el 4 de diciembre de 2019 en: <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/2017-wastewater-the-untapped-resource/>
- <sup>xiii</sup> Asociación internacional voluntaria que reúne a gobiernos nacionales, entidades del sector privado, bancos de desarrollo, ONG e interesados en un esfuerzo de colaboración para reducir las emisiones de gas metano y promover la recuperación y su uso para la generación de energía limpia. La iniciativa de asociación nació en noviembre de 2004 lanzada durante la administración del presidente George W. Bush; originalmente 14 gobiernos nacionales se comprometieron formalmente a reducir el metano. A febrero de 2015, 41 países y la Comisión Europea se habían unido a la iniciativa. Los países socios de la GMI contribuyen en conjunto con aproximadamente el 75 por ciento de las emisiones de metano antropogénicas del mundo.
- <sup>xiv</sup> Global Methane Initiative, El metano de las aguas residuales municipales, avanzar en la recuperación y aprovechar oportunidades. P.2. Recuperado el 15 de agosto de 2018 en: [https://www.globalmethane.org/documents/ww\\_fs\\_spa.pdf](https://www.globalmethane.org/documents/ww_fs_spa.pdf)
- <sup>xv</sup> Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero*. Recuperado el 10 de febrero de 2020, de <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>.
- <sup>xvi</sup> El estado coloidal de la materia es la condición que tiene una mezcla cuando uno de sus elementos, en estado sólido, se encuentra disperso en otro que se halla en estado líquido o gaseoso.
- <sup>xvii</sup> Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua, 2015, *Manual de Agua Potable y Saneamiento (MAPAS), Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Lagunas de Estabilización*, México, D.F. P.1. Recuperado el 20 de enero de 2020 en: [www.conagua.gob.mx](http://www.conagua.gob.mx)
- <sup>xviii</sup> Secretaría de Gobernación, Consejo Nacional de Población, Estimaciones y Proyecciones de la Población por Entidad Federativa 2010-2030. Recuperado el 26 de abril de 2018 en: [www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones\\_Datos](http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones_Datos)
- <sup>xix</sup> Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2016, *Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento*, Edición 2016. México. Recuperado en mayo de 2018 en: [www.conagua.gob.mx](http://www.conagua.gob.mx)
- <sup>xx</sup> La metodología utilizada para calcular los gases de efecto invernadero se tomó del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático, (IPCC), Michiel R. J. Doorn (Países Bajos),

---

Sirintornthep Towprayoon (Tailandia), Sonia Maria Manso Vieira (Brasil), William Irving (Estados Unidos), Craig Palmer (Canadá), Riitta Pipatti (Finlandia), y Can Wang (China), Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Capítulo 6: Tratamiento y eliminación de aguas residuales.

- <sup>xxi</sup> DBO5 es un parámetro que mide la cantidad de dióxigeno consumido al degradar la materia orgánica de una muestra líquida, disuelta o en suspensión susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos. Se utiliza para medir propiamente el grado de contaminación; normalmente se mide transcurridos cinco días de reacción (DBO5) a 20 °C y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mg O<sub>2</sub>/l). Definición genérica en la especialidad de Ingeniería Sanitaria a partir del método de ensaye para determinarla.
- <sup>xxii</sup> Metcalf and Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment Disposal Reuse*, 1979, Second Edition. McGraw-Hill Book Company. Boston, Mass., USA. P 64.
- <sup>xxiii</sup> Mantilla Morales, Gabriela, Servín Jungdorf, Carl Anthony, Sánchez Castañeda, Luis Fernando, Montesillo Cedillo, José Luis, Ruiz López, Alejandro Jesús, Hansen Rodríguez, Ivette Rennée, *Costos Índice de sistemas de tratamiento de agua en México*. Recuperado el 20 de octubre de 2015 en: <https://docplayer.es/9644075-Costos-indice-de-sistemas-de-tratamiento-de-aguas-residuales-en-mexico.html>
- <sup>xxiv</sup> Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero*. 2018. Recuperado el 28 de noviembre de 2019 en: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>
- <sup>xxv</sup> SEMARNAT, CONAGUA, *Beneficios de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco*, 2010, México.
- <sup>xxvi</sup> CONAGUA, *Inventario de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) (2016)*. Recuperado de [Agua.org.mx](https://agua.org.mx) el 24 de mayo de 2018 en: <https://agua.org.mx/biblioteca/catalogo-plantas-tratamiento-aguas-residuales-ptar-2016/>
- <sup>xxvii</sup> SEMARNAT-IMTA, *Revisión y actualización del potencial de biomasa para generación de energía eléctrica a partir de plantas de tratamiento de aguas residuales presentado en el Inventario Nacional de Energías Renovables (INERE)*, 2016. México. Pág. 3.

Anexo 1: Estimación de carga orgánica expresada como la concentración de DBO<sub>5</sub> en la generación de aguas residuales municipales en México.

AÑO BASE 2015

Sector	Desechos															
Categoría	Descarga y tratamiento de agua residual doméstica															
Código de categoría	4D1															
Hoja	1 de 3 Estimación de material degradable orgánicamente en agua residual doméstica															
	Población	Cuadro 3.5. Agua suministrada y desinfectada para consumo humano por entidad federativa, 2015.														
Estado	(P)	Qa	Ca	D	Ap	Qr	Cd	Cd	Qrc	Qae	Qan	Qmx	Qt	Ct	Qnt	(DBO <sub>5</sub> )
Región o Ciudad	Población 2015 de acuerdo con CONAPO	AP suministrada en l/s	Cobertura de agua potable	Dotación AP en l/h/d	Aportación AR en l/h/d MAPAS	Agua residual generada en l/s	Cobertura de alcantarillado	Cobertura de alcantarillado	Agua residual recolectada en l/s	Tratamiento aeróbico de AR en l/s	Tratamiento anaeróbico de AR en l/s	Tratamiento mixto de AR en l/s	AR tratada en l/s	Porcentaje de tratamiento	AR no tratada en l/s	DBO <sub>5</sub> generado en kg/año
	habitante	cuadro 2.1.	Q*Ca*Ap/86400	75%D	P*Ca*Ap/86400	Cuadro 2.1	Cuadro 2.1 mod	Qr*Cd	Inventario PTAR 2016	Inventario PTAR 2016	Inventario PTAR 2016	Qae+Qan+Qmx	Qt/Qt	Qt/Qt	Qr-Qt	(Qt+Qnt)*220*k
Aguascalientes	1,287,660	3,920	98.6%	267	200	2,939.0	98.5%	98.5%	2,894.9	980.5	170.0	513.6	1,664.1	56.6%	1,274.9	25,487,885
Baja California	3,484,150	8,745	95.3%	228	170	6,533.2	96.1%	95.3%	6,226.1	5,639.0	0.0	0.0	5,639.0	86.3%	894.2	56,658,392
Baja California Sur	763,929	3,444	91.2%	427	320	2,580.4	96.5%	91.2%	2,353.3	1,153.4	159.0	0.0	1,312.4	50.9%	1,268.0	22,378,095
Campeche	907,878	3,387	92.7%	348	260	2,532.6	91.7%	91.7%	2,322.4	124.3	0.0	0.0	124.3	4.9%	2,408.3	21,963,735
Coahuila de Zaragoza	2,960,681	10,784	97.1%	324	243	8,085.4	97.0%	97.0%	7,842.9	992.8	192.6	100.0	1,285.4	15.9%	6,800.0	70,120,129
Colima	723,455	3,740	98.0%	456	341	2,798.2	98.9%	98.0%	2,742.2	2,189.2	458.3	10.7	2,658.3	95.0%	139.9	24,267,072
Chiapas	5,252,808	8,396	82.7%	167	125	6,284.8	84.4%	82.7%	5,197.6	3,186.0	1,462.0	0.0	4,648.0	74.0%	1,636.8	54,504,536
Chihuahua	3,710,129	13,248	94.4%	327	245	9,931.5	92.9%	92.9%	9,226.3	1,480.8	80.4	100.7	1,661.9	16.7%	8,269.6	86,129,644
Distrito Federal	8,854,600	30,904	96.7%	312	233	23,090.7	98.5%	96.7%	22,328.7	2,262.9	0.0	5,400.0	7,662.9	33.2%	15,427.8	200,252,007
Durango	1,764,726	8,018	95.5%	411	308	6,007.8	91.2%	91.2%	5,479.1	2,450.0	1,057.1	0.0	3,507.1	58.4%	2,500.7	52,102,310
Guanajuato	5,817,614	13,480	94.5%	212	158	10,053.6	92.7%	92.7%	9,319.7	2,833.2	900.4	252.1	3,985.7	39.6%	6,067.9	87,188,533
Guerrero	3,568,139	8,672	80.7%	260	195	6,498.8	77.1%	77.1%	5,010.6	3,611.3	100.2	10.0	3,721.5	57.3%	2,777.4	56,360,577
Hidalgo	2,878,369	4,315	92.0%	141	105	3,218.2	89.4%	89.4%	2,877.0	531.3	77.7	48.2	657.1	20.4%	2,561.1	27,909,316
Jalisco	7,931,267	21,113	96.6%	238	178	15,784.3	97.4%	96.6%	15,247.7	12,366.2	163.0	170.0	12,699.2	80.5%	3,085.2	136,887,955
México	16,870,388	48,412	93.6%	265	198	36,187.0	93.7%	93.6%	33,871.0	4,609.4	673.7	4,780.1	10,063.2	27.8%	26,123.8	313,827,989
Michoacán de Ocampo	4,596,499	15,070	93.6%	303	226	11,253.8	89.3%	89.3%	10,049.6	2,338.1	778.0	11.5	3,127.6	27.8%	8,126.2	97,597,118
Morelos	1,920,350	10,326	90.5%	513	385	7,744.2	95.7%	90.5%	7,008.5	1,877.5	95.0	6.0	1,978.5	25.5%	5,765.7	67,160,718
Nayarit	1,223,797	3,118	94.4%	233	174	2,326.6	93.4%	93.4%	2,173.0	1,769.3	372.5	68.4	2,210.2	95.0%	116.3	20,176,981
Nuevo León	5,085,848	14,635	97.3%	256	191	10,939.5	97.6%	97.3%	10,644.1	10,267.9	124.6	0.0	10,392.5	95.0%	547.0	94,871,367
Oaxaca	4,012,295	5,110	82.5%	133	100	3,831.2	71.8%	71.8%	2,750.8	992.1	79.1	0.0	1,071.2	28.0%	2,760.0	33,225,566
Puebla	6,193,836	10,115	89.4%	158	118	7,562.5	88.8%	88.8%	6,715.5	643.5	244.2	3.9	891.5	11.8%	6,671.0	65,585,042
Querétaro de Arteaga	2,004,472	5,109	95.1%	232	173	3,816.9	94.6%	94.6%	3,610.8	1,199.3	9.1	684.0	1,892.4	49.6%	1,924.5	33,101,835
Quintana Roo	1,574,824	5,316	96.1%	303	227	3,976.2	95.9%	95.9%	3,813.2	1,375.3	6.6	392.2	1,774.2	44.6%	2,202.0	34,483,133
San Luis Potosí	2,753,478	5,983	87.5%	215	160	4,461.7	85.2%	85.2%	3,801.3	718.6	382.8	1,042.0	2,143.3	48.0%	2,318.3	38,693,248
Sinaloa	2,984,571	10,244	95.7%	310	232	7,669.5	92.8%	92.8%	7,117.3	999.7	2,184.1	899.4	4,083.2	53.2%	3,586.3	66,513,142
Sonora	2,932,821	15,726	95.5%	485	363	11,767.4	91.7%	91.7%	10,790.7	3,336.9	1,388.2	0.0	4,725.1	40.2%	7,042.4	102,051,912
Tabasco	2,383,900	11,432	88.9%	466	349	8,560.5	95.5%	88.9%	7,610.3	1,529.6	981.9	34.0	2,545.4	29.7%	6,015.1	74,240,471
Tamaulipas	3,543,366	9,316	96.2%	236	177	6,983.1	91.1%	91.1%	6,361.6	3,701.5	1,669.0	0.0	5,370.5	76.9%	1,612.7	60,560,558
Tlaxcala	1,278,308	2,590	97.9%	179	134	1,940.9	95.5%	95.5%	1,853.6	699.8	231.9	25.9	957.6	49.3%	983.4	16,832,498
Veracruz de Ignacio de la Llave	8,046,828	22,550	84.0%	288	216	16,898.3	84.3%	84.0%	14,194.6	3,523.6	1,666.0	14.5	5,204.1	30.8%	11,694.3	146,549,150
Yucatán	2,118,762	6,887	97.6%	288	215	5,145.8	86.5%	86.5%	4,451.2	119.2	72.3	7.3	198.7	3.9%	4,947.1	44,626,819
Zacatecas	1,576,068	3,988	95.6%	229	171	2,982.1	92.4%	92.4%	2,755.4	1,212.6	382.3	56.4	1,651.3	55.4%	1,330.8	25,861,546
<b>Total</b>	<b>121,005,815</b>	<b>348,093</b>	<b>92.5%</b>	<b>249</b>	<b>186</b>	<b>260,386</b>	<b>91.5%</b>	<b>91.5%</b>	<b>238,641.1</b>	<b>80,714.6</b>	<b>16,161.7</b>	<b>14,630.8</b>	<b>111,507.1</b>	<b>42.8%</b>	<b>148,878.7</b>	<b>2,258,169,279</b>

s/h = 3,600  
s/día = 86,400  
s/año = 31,536,000  
kg/l/s/año = 31,536  
k = 39.42

Fuente: Consejo Nacional de Población; Comisión Nacional del Agua: Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, Gerencia de Potabilización y Tratamiento. Cálculos propios.

## Anexo 2: Estimación de emisiones de Metano (CH<sub>4</sub>) en la generación de aguas residuales en México.

<b>Sector</b>	<b>Desechos</b>					
<b>Categoría</b>	<b>Descarga y tratamiento de agua residual doméstica</b>					
<b>Código de categoría</b>	<b>4D1</b>					
<b>Hoja</b>	<b>2 de 3 Factor de estimación de CH<sub>4</sub> para el agua residual</b>					
	A	B	C			
<b>Tipo de tratamiento o descarga</b>	Máxima capacidad de producción de metano	Factor de corrección de metano por tipo de tratamiento	Factor de emisión	Agua residual Qr	Carga oorgánica presente en el AR	kg CH <sub>4</sub>
	(B <sub>0</sub> )	(MCF <sub>j</sub> )	(EF <sub>j</sub> )			
	(kg CH <sub>4</sub> /KgDBO)		(kg CH <sub>4</sub> /kg DBO)	l/s	kg/DBO	
Tratamiento aeróbico de AR	0.60	0.30	0.18	80,715	699,988,930	125,998,007
Tratamiento anaeróbico de AR	0.60	0.80	0.48	16,162	140,160,781	67,277,175
Tratamiento mixto de AR	0.60	0.55	0.33	14,631	126,884,269	41,871,809
Descarga sin tratamiento	0.60	0.10	0.06	148,879	1,291,135,300	77,468,118
<b>Total:</b>				<b>260,386</b>	<b>2,258,169,279</b>	<b>312,615,109</b>

Fuente: Comisión Nacional del Agua; Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, (IPCC), Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Cálculos propios.

Anexo 3: Estimación de Nitrógeno por entidad federativa.

Sector		Desechos					
Categoría		Tratamiento y descarga de agua residual doméstica					
Código de categoría		4D1					
Hoja		1 de 2 Estimación de nitrógeno en efluente					
	A	B	C	D	E	F	H
	Población (P)	Consumo per cápita de proteína Fracción de nitrógeno en proteína (proteína)	Fracción de nitrógeno en proteína (Fnpr)	Fracción de no consumo de proteína (Fnon-con)	Fracción industrial y comercial de descarga de proteína (F ind-com)	Nitrógeno removido con lodos (por defecto es cero) (Nlodos)	Total de nitrógeno en efluente (Nefluente)
Unidades	(población)	kg/person/año	kg N/kg proteína)	(-)	(-)	(kg)	(kg N/año)
							$H=(A*B*C*D*E) - F$
Aguascalientes	1,287,660	21.4	0.16	1.1	1.25	0	6,062,305
Baja California	3,484,150	23.0	0.16	1.1	1.25	0	17,629,800
Baja California Sur	763,929	22.0	0.16	1.1	1.25	0	3,697,414
Campeche	907,878	21.4	0.16	1.1	1.25	0	4,274,290
Coahuila de Zaragoza	2,960,681	21.4	0.16	1.1	1.25	0	13,938,887
Colima	723,455	21.8	0.16	1.1	1.25	0	3,469,689
Chiapas	5,252,808	20.2	0.16	1.1	1.25	0	23,343,481
Chihuahua	3,710,129	21.8	0.16	1.1	1.25	0	17,793,779
Distrito Federal	8,854,600	22.7	0.16	1.1	1.25	0	44,219,870
Durango	1,764,726	23.7	0.16	1.1	1.25	0	9,201,282
Guanajuato	5,817,614	21.6	0.16	1.1	1.25	0	27,645,303
Guerrero	3,568,139	21.1	0.16	1.1	1.25	0	16,563,300
Hidalgo	2,878,369	21.4	0.16	1.1	1.25	0	13,551,362
Jalisco	7,931,267	21.7	0.16	1.1	1.25	0	37,863,867
México	16,870,388	21.9	0.16	1.1	1.25	0	81,281,531
Michoacán de Ocampo	4,596,499	22.7	0.16	1.1	1.25	0	22,954,915
Morelos	1,920,350	22.0	0.16	1.1	1.25	0	9,294,496
Nayarit	1,223,797	21.3	0.16	1.1	1.25	0	5,734,713
Nuevo León	5,085,848	23.5	0.16	1.1	1.25	0	26,293,835
Oaxaca	4,012,295	21.5	0.16	1.1	1.25	0	18,978,156
Puebla	6,193,836	21.4	0.16	1.1	1.25	0	29,160,581
Querétaro de Arteaga	2,004,472	20.7	0.16	1.1	1.25	0	9,128,363
Quintana Roo	1,574,824	21.4	0.16	1.1	1.25	0	7,414,270
San Luis Potosí	2,753,478	20.8	0.16	1.1	1.25	0	12,599,915
Sinaloa	2,984,571	21.2	0.16	1.1	1.25	0	13,920,041
Sonora	2,932,821	22.3	0.16	1.1	1.25	0	14,388,421
Tabasco	2,383,900	21.3	0.16	1.1	1.25	0	11,170,954
Tamaulipas	3,543,366	22.0	0.16	1.1	1.25	0	17,149,890
Tlaxcala	1,278,308	21.5	0.16	1.1	1.25	0	6,046,397
Veracruz de Ignacio de la Llave	8,046,828	21.6	0.16	1.1	1.25	0	38,238,526
Yucatán	2,118,762	21.6	0.16	1.1	1.25	0	10,068,355
Zacatecas	1,576,068	22.4	0.16	1.1	1.25	0	7,766,863
<b>Total</b>							<b>580,844,849</b>

Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Cálculos propios.

**Anexo 4: Estimación de emisiones de N<sub>2</sub>O por entidad federativa.**

Sector		Desechos			
Categoría		Tratamiento y descarga de agua residual doméstica			
Código de categoría		4D1			
Hoja		2 de 2 Estimación del factor de emisión y las emisiones de N <sub>2</sub> O indirecto del agua residual			
	A	B	C	D	E
	Nitrogeno en efluente (Nefluente)	Factor de emisiones (kg N <sub>2</sub> O-N/kg N)	Factor de conversión de kg N <sub>2</sub> O-N en kg N <sub>2</sub> O 44/28	Emisiones de las plantas de agua residual (defecto=cero) (kg N <sub>2</sub> O-N/año)	Total de emisiones de N <sub>2</sub> O (kg N <sub>2</sub> O-N/año)
		44/28	1.571428571		E=A*B*C-D
Aguascalientes	6,062,305	0.50	1.57		4,765,743
Baja California	17,629,800	0.92	1.57		25,470,659
Baja California Sur	3,697,414	0.55	1.57		3,211,655
Campeche	4,274,290	0.15	1.57		998,204
Chiapas	13,938,887	0.22	1.57		4,889,999
Chihuahua	3,469,689	0.84	1.57		4,575,142
Coahuila de Zaragoza	23,343,481	0.70	1.57		25,504,769
Colima	17,793,779	0.25	1.57		7,047,873
Distrito Federal	44,219,870	0.31	1.57		21,768,151
Durango	9,201,282	0.53	1.57		7,625,238
Guanajuato	27,645,303	0.40	1.57		17,373,245
Guerrero	16,563,300	0.77	1.57		20,006,620
Hidalgo	13,551,362	0.28	1.57		5,955,836
Jalisco	37,863,867	0.84	1.57		49,944,198
México	81,281,531	0.30	1.57		37,926,522
Michoacán de Ocampo	22,954,915	0.32	1.57		11,580,342
Morelos	9,294,496	0.35	1.57		5,047,208
Nayarit	5,734,713	0.87	1.57		7,861,721
Nuevo León	26,293,835	0.97	1.57		40,161,847
Oaxaca	18,978,156	0.44	1.57		13,075,844
Puebla	29,160,581	0.19	1.57		8,782,259
Querétaro de Arteaga	9,128,363	0.50	1.57		7,125,442
Quintana Roo	7,414,270	0.48	1.57		5,570,567
San Luis Potosí	12,599,915	0.43	1.57		8,426,762
Sinaloa	13,920,041	0.32	1.57		7,096,389
Sonora	14,388,421	0.39	1.57		8,926,790
Tabasco	11,170,954	0.30	1.57		5,261,630
Tamaulipas	17,149,890	0.66	1.57		17,717,092
Tlaxcala	6,046,397	0.46	1.57		4,385,948
Veracruz de Ignacio de la Llave	38,238,526	0.34	1.57		20,521,858
Yucatán	10,068,355	0.13	1.57		2,011,598
Zacatecas	7,766,863	0.52	1.57		6,404,375
	<b>580,844,849</b>				<b>417,021,522</b>

Fuente: Cálculos propios a partir de la publicación de la FAO :Perfiles Nutricionales por países: México 2003.

Anexo 5: Cálculo del consumo de proteína por grupos quinquenales de edad, por sexo y por estado.

	Total de hombres						Total de mujeres						Total						Total año	Promedio kg/año	Promedio g/plata									
	0 a 4	5 a 9	11 a 14	15 a 19	20 a 24	25 - 50	51 +	0 a 4	5 a 9	11 a 14	15 - 18	19 - 24	25 - 50	51 +	0 a 4	5 a 9	11 a 14	15 - 18				19 - 24	25 - 50	51 +						
Consumo promedio de proteína	g/d	16.6	28.75	51.8	68.3	66.2	72.7	70.9		16.6	28.75	52.9	67.3	72.6	77.1	59.8		0 a 4	5 a 9	11 a 14	15 - 18	19 - 24	25 - 50	51 +						
Total nacional	55,228,479	5,382,643	5,272,281	5,443,363	5,499,717	4,962,961	19,279,671	9,387,843	57,108,059	5,562,478	5,451,383	5,608,630	5,773,723	5,114,234	19,885,390	9,712,222	66,316	112,531	211,212	278,934	255,442	1,071,200	454,932	2,450,568	21.8	59.7				
1 Aguascalientes	176,638	61,486	65,187	62,623	61,420	53,771	203,270	68,881	608,358	64,868	68,772	66,068	64,799	56,729	214,452	72,670	7,766	1,406	2,460	3,123	2,803	11,429	3,369	25,354	21.4	58.6				
2 Baja California	1,591,610	172,100	177,794	179,282	175,598	168,135	692,349	186,352	1,563,460	169,056	174,729	176,111	172,492	165,161	680,104	183,056	2,067	370	6,790	8,615	8,439	37,511	8,818	72,610	23.0	63.0				
3 Baja California Sur	325,433	37,127	36,868	3,506	35,267	3,586	148,117	60,961	311,593	35,548	35,300	3,357	33,767	3,434	141,818	58,368	440	757	131	1,709	178	7,921	2,852	13,988	22.0	60.3				
4 Campeche	780,969	82,440	83,913	87,144	8,886	81,865	309,026	127,696	41,472	4,378	4,456	4,628	472	4,347	16,410	6,781	526	927	1,737	233	2,093	8,662	3,453	17,631	21.4	58.6				
5 Coahuila de Zaragoza	1,364,197	140,988	147,807	146,418	143,006	125,639	423,414	236,925	1,384,194	143,055	149,973	148,565	145,102	127,481	429,621	240,398	1,721	3,125	5,637	7,129	6,414	23,326	11,378	58,730	21.4	58.6				
6 Colima	322,790	31,529	32,398	32,184	33,726	3,251	124,336	65,367	327,765	32,015	32,897	32,680	34,246	3,301	126,252	66,374	385	685	1,239	1,682	166	6,852	3,140	14,150	21.8	59.7				
7 Chiapas	2,352,807	309,138	317,279	314,536	303,289	250,543	540,899	317,124	2,443,773	321,090	329,546	326,696	315,015	260,230	561,812	329,385	3,819	6,788	12,255	15,299	12,950	30,163	15,396	96,669	20.2	55.3				
8 Chihuahua	1,692,545	164,835	171,163	165,849	164,507	146,034	598,812	281,346	1,713,920	166,916	173,325	167,943	166,584	147,878	606,374	284,899	2,010	3,615	6,378	8,193	7,447	32,554	13,499	74,097	21.8	59.7				
9 Distrito Federal	4,233,783	311,780	332,306	333,011	364,795	379,940	1,682,638	829,313	4,617,297	340,022	362,408	363,176	397,840	414,357	1,835,059	804,436	3,949	7,290	13,308	18,867	20,161	96,291	41,203	201,069	22.7	62.2				
10 Durango	803,890	989	102,058	10,226	101,760	87,698	321,257	179,902	829,044	1,020	105,251	10,546	104,944	90,442	331,310	185,531	12	2,175	397	5,115	4,516	17,848	8,705	38,768	23.7	64.9				
11 Guanajuato	2,639,425	326,601	345,485	3,464	340,620	294,208	1,080,868	248,179	2,846,947	352,280	372,649	3,736	367,401	317,940	1,165,850	267,692	4,113	7,536	138	17,516	15,518	61,490	12,265	118,577	21.6	59.2				
12 Guerrero	1,645,561	177,904	190,598	198,248	187,571	146,494	509,062	235,684	1,743,207	188,461	201,908	210,012	198,701	155,187	539,269	249,669	2,220	4,119	7,803	9,557	7,652	28,684	11,549	71,584	21.1	57.8				
13 Hidalgo	1,285,222	133,250	141,594	137,336	140,769	11,809	465,952	254,512	1,379,796	143,056	152,013	147,442	151,128	12,678	500,239	273,240	1,674	3,081	5,443	7,222	6,21	26,442	12,550	57,034	21.4	58.6				
14 Jalisco	3,600,641	351,355	367,598	361,186	361,494	338,280	1,260,688	560,039	3,750,041	365,934	382,850	376,173	376,494	352,317	1,312,997	583,277	4,346	7,875	14,092	18,260	17,510	70,403	27,224	159,710	21.7	59.5				
15 México	7,396,986	695,356	730,285	696,534	715,114	665,023	2,661,795	1,232,878	7,778,876	791,256	767,989	732,494	752,034	699,357	2,799,218	1,296,529	8,644	15,723	27,313	36,301	34,601	149,406	60,204	332,192	21.9	60.0				
16 Michoacán de Ocampo	2,102,109	230,393	235,535	240,147	245,617	212,338	744,682	405,396	2,248,928	246,485	25,179	256,920	262,772	227,169	796,693	433,710	2,889	511	9,501	12,578	11,150	42,181	19,958	98,769	22.7	62.2				
17 Morelos	858,588	75,692	81,157	81,439	85,396	75,693	291,702	167,508	918,639	80,987	86,834	87,135	91,369	80,988	312,104	179,223	949	1,763	3,222	4,373	3,975	16,524	8,247	39,053	22.0	60.3				
18 Nayarit	541,007	57,477	56,880	56,536	58,099	52,409	156,499	103,107	543,972	57,792	57,192	56,846	58,417	52,696	157,357	103,672	698	1,197	2,167	2,883	2,663	8,581	4,931	23,120	21.3	58.4				
19 Nuevo León	2,230,185	23,191	241,542	233,038	228,022	225,383	972,166	396,843	2,333,273	23,322	242,904	234,353	229,309	226,654	977,650	399,082	282	5,084	8,931	11,317	11,452	53,309	18,980	109,356	23.5	64.4				
20 Oaxaca	1,819,008	178,635	191,200	198,261	194,664	150,002	558,715	347,531	1,983,954	194,736	208,432	216,131	212,209	163,521	609,072	378,853	2,262	4,194	7,922	10,066	7,958	31,966	17,263	81,630	21.5	58.9				
21 Puebla	2,769,855	293,455	316,887	308,949	308,565	261,363	952,619	328,017	3,009,974	318,895	344,358	335,731	335,315	284,021	1,035,201	356,453	3,710	6,939	12,324	15,929	13,842	54,410	16,269	123,423	21.4	58.6				
22 Querétaro	887,188	109,801	112,639	112,067	114,910	10,342	302,471	124,958	940,749	116,430	119,440	118,832	121,847	10,966	320,732	132,501	1,371	2,435	4,413	5,858	540	17,052	6,126	37,796	20.7	56.7				
23 Quintana Roo	673,220	78,833	75,146	71,780	7,612	80,207	269,730	89,911	652,358	90,749	72,817	69,556	7,377	77,721	261,372	87,125	941	1,553	2,700	3,711	3,998	14,513	4,228	28,303	21.4	58.6				
24 San Luis Potosí	1,260,366	144,166	156,921	157,644	157,364	12,821	388,847	242,602	1,325,152	151,577	164,987	165,748	165,453	13,480	408,835	255,073	1,792	3,378	6,181	7,987	667	21,823	11,846	53,674	20.8	57.0				
25 Sinaloa	1,376,201	148,930	156,066	159,615	16,296	143,304	449,414	302,615	1,391,560	150,592	157,807	161,397	164,437	144,904	454,430	305,993	1,815	3,294	6,134	809	7,302	24,714	14,510	58,578	21.2	58.1				
26 Sonora	1,339,612	174,386	18,063	178,496	17,476	158,528	521,603	271,059	1,322,868	172,207	178,377	176,265	17,258	156,547	515,084	267,671	2,100	3,777	6,778	860	7,979	28,336	12,857	59,287	22.3	61.1				
27 Tabasco	1,100,758	120,842	121,582	119,267	121,147	111,739	346,682	159,498	1,137,845	124,914	125,678	123,285	125,229	115,504	358,363	164,872	1,489	2,595	4,635	6,096	5,761	19,284	7,726	47,587	21.3	58.4				
28 Tamaulipas	1,616,201	149,793	150,874	145,606	144,228	136,203	571,079	318,418	1,652,353	153,144	154,248	148,863	147,454	139,250	583,854	325,540	1,835	3,202	5,627	7,218	6,981	31,584	15,346	71,794	22.0	60.3				
29 Tlaxcala	565,775	81,682	8,679	83,484	83,863	73,736	122,703	111,629	604,161	87,224	9,268	89,148	89,553	78,738	131,028	119,203	1,023	1,88	3,300	4,290	3,868	6,943	5,491	25,104	21.5	58.9				
30 Veracruz de Ignacio de la Llave	3,695,679	339,706	373,805	380,349	389,511	329,347	1,084,190	798,770	3,947,515	362,855	399,277	406,268	416,054	351,790	1,158,070	853,201	4,257	8,113	15,036	19,930	17,280	61,359	39,294	165,269	21.6	59.2				
31 Yucatán	963,333	90,402	96,153	96,691	101,681	97,071	285,198	196,136	992,244	93,115	99,038	99,593	104,732	99,985	293,758	202,023	1,112	2,048	3,751	5,108	4,995	15,835	9,485	42,334	21.6	59.2				
32 Zacatecas	726,897	88,379	8,823	88,447	87,485	76,196	238,884	138,684	763,771	92,862	9,270	92,933	91,922	80,061	251,002	145,720	1,098	190	3,467	4,439	3,963	13,402	6,770	33,328	22.4	61.4				

FUENTE: INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010 y cálculos propios.