Funcionamiento y contaminación generada por plantas desalinizadoras ubicadas en las zonas del mar de Cortés y mar Caribe: un estudio para el desarrollo de normatividad ambiental acuática

R. González E.*, K. N. León V., G. E. Dévora I. y A. G. Mendoza L.

Departamento de Ciencias del Agua y del Medio Ambiente, Centro Regional de Investigación y Desarrollo del Agua y la Energía (CRIDAE), Instituto Tecnológico de Sonora
5 de Febrero 818 Sur, C. P. 85000. Ciudad Obregón, Sonora, México.

Operation and pollution generated by desalination plants located in areas of the Sea of Cortez and the Caribbean Sea: a study for the development of aquatic environmental regulation

Abstract
Globally, since the early 70's, one of the alternatives to address the shortage of water for human use and consumption, industrial and agricultural, is the desalination of seawater and brackish water, which generally involves the separation of salts from water that contains it, using different technologies, however, this process aside of produce water suitable for use, also generates a waste water with high concentrations of salinity, this wastewater is discharged to receiving bodies deliberately different, it represents an environmental risk primarily for the living organisms in aquatic ecosystems, because the modification of natural conditions of a habitat is considered a contamination and in this case hypersaline effluent (brine) can be toxic to the species of the receiving body. Because of this, it is vital to implement controls to regulate such discharges and mitigate the environmental impact that could generate in aquatic ecosystems receptors. To this end, this paper presents the formulation of a draft Mexican Official Standard setting maximum limits on the quality of the effluent concentrations of the desalination process, especially for the main ionic components present in hypersaline effluent (brine), whether these are discharged directly or mixed with treated wastewater.

Key words: Standards, Brine, toxicological bioassays, Reverse Osmosis, Seawater, Desalination Plants.

Resumen
A nivel global, desde la década de los 70’s, una de las alternativas para hacer frente al desabasto de agua para uso y consumo humano, industrial y agrícola, es la desalinización de aguas marina y salobres, que de manera general consiste en la separación de sales del agua que las contiene mediante diversas tecnologías, sin embargo, este proceso además de agua producto apta para su uso, genera un agua de desecho con altas concentraciones de salinidad, esta agua de desecho que es descargada deliberadamente a diversos cuerpos receptores, representa un riesgo ambiental principalmente para los organismos vivientes en ecosistemas acuáticos, ya que la modificación de las condiciones naturales de un hábitat es considerado una contaminación y en este caso el efluente hipersalino (salmuera) puede resultar toxico para las especies de dicho cuerpo receptor. Debido a esto, es de vital importancia implementar un medio de control para regularizar dichos vertidos y mitigar el impacto ambiental que pudiese generar en los ecosistemas acuáticos receptores. Para tal fin, este trabajo presenta la formulación de un anteproyecto de Norma Oficial Mexicana que establezca los límites máximos permisibles en cuanto a la calidad de las concentraciones de los efluentes del proceso de desalinización, sobre todo respecto a los principales componentes iónicos presentes en los efluentes hipersalinos (salmuera), ya sea que estos sean vertidos de forma directa o mezclados con aguas

*Autor de correspondencia
e-mail rglez@itson.mx

residuales tratadas.

Palabras clave: Norma Oficial Mexicana, Salmuera, Bioensayos toxicológicos, Osmosis Inversa, Agua de mar, Plantas desaladoras.

Introducción

El agua es vital para la vida en la forma en que la conocemos. En el planeta existen grandes cantidades de agua, pero sólo un pequeño porcentaje de la misma es apta para consumo humano. El 97 % de los recursos hidráulicos mundiales existentes se encuentran en el mar y en los océanos, el 3 % restante sería el agua que podría utilizar la población de la tierra, sin embargo, la realidad es que de esta pequeña cantidad, sólo un 0.39% está realmente disponible para satisfacer las necesidades mundiales del hombre (Medina, 2000). Entre estas se incluyen el agua utilizada para consumo humano directo, la agricultura y en usos industriales. La distribución de los recursos de agua dulce en el planeta es muy irregular, existiendo regiones donde es abundante y/o accesible, y otras donde es nula, escasa o difícil de obtener, dando lugar a las áreas desérticas o semidesérticas (CONAGUA, 2006). También hay que considerar que en algunas regiones es escasa porque su calidad es inapropiada para el desarrollo.

El abastecimiento de agua para uso y consumo humano, así como para uso agrícola e industrial es importante para el desarrollo de comunidades en cualquier país, sin embargo la escaza disponibilidad del recurso hídrico cada día es más evidente y conforme las necesidades de agua se incrementan, aumentan los conflictos entre los países o comunidades en donde dicho recurso es escaso, y debido al elevado consumo actual de los recursos existentes, tanto superficiales como subterráneos, se reducen y comprometen las reservas disponibles para las generaciones futuras (González y Dévora, 2008).

En el caso de México, esta situación se presenta especialmente en las zonas áridas y semiáridas del noroeste de su territorio y algunas de las alternativas propuestas hasta la primera década del siglo XXI, para tratar de resolver el desabasto de agua para uso y consumo humano, agrícola e industrial, son las siguientes, que se explican posteriormente:

1. Almacenamiento de escurrimientos superficiales en cuencas hidrológicas y extracción sustentable de presas y represos
2. Bombeo de aguas subterráneas de acuíferos mediante pozos profundos en equilibrio con su recarga natural.
3. Desalinización de aguas marinas y salobres
4. Plan Hidráulico Interconectado del Noroeste (PLHINO)
5. Sistema integral combinando dos o más de las cuatro opciones anteriores

El Noroeste mexicano tiene graves problemas de sobreexplotación de acuíferos, esto debido a la alta proliferación de explotaciones acuíferas no regularizadas, ocurridas desde la década de los años 50's del siglo pasado (Arreguín, 1998). Décadas más tarde, el PLHINO, se propone como una opción de solución al problema de desabasto de agua, ya que consiste en la transferencia de agua de los Estado de Nayarit y sur de Sinaloa, hacia el norte de Sinaloa y sur y parte del centro de Sonora, esto mediante un sistema de conexión de intercuencas, formado por 23 presas y 16 derivadoras (IMTA, 2009). Otra opción importante para incrementar la disponibilidad de agua en cuencas con stress hídrico es la desalinización de aguas marinas y salobres, la cual es una alternativa viable en casos donde se cuente con litoral a una distancia apropiada; la desalinización, en el sentido amplio, consiste en el proceso de separación de sales, del agua en que se encuentran disueltas (Valero, 2001). Para ello existen técnicas como osmosis inversa, electrodiálisis, etc.

Todos los proyectos hidráulicos antes mencionados, al ser actividades antropogenicas, generan un impacto ambiental, por lo que es necesario, mediante el soporte de un marco legal apropiado, mitigar estos impactos buscando opciones más sustentables y ecoeficientes (Hernández *et al.*, 2006). Por ejemplo, los desechos hipersalinos de las plantas desaladoras no han sido suficientemente evaluados en cuanto a impacto en flora y fauna (Lattemann y Hoepner, 2003 y 2007). Por lo anterior, los esfuerzos realizados por atender y actuar ante los problemas ambientales deben ser

reconocidos, el manifiesto de la necesidad de atención y acción concreta para cambiar de la situación de normatividad ambiental actualmente existente, ha transcurrido en cambios básicos necesarios, principalmente la reestructuración de leyes y normas, en las cuales la sustentabilidad ambiental se viene tornando el principio organizador (Jiménez, 2006).

En México, los recursos hidráulicos son considerables pero se encuentran distribuidos irregularmente, existiendo en las regiones sur y sureste del país importantes volúmenes de agua que no se aprovechan en su totalidad, perdiéndose grandes cantidades de la misma en el mar. Por el contrario, en las áridas regiones del norte y noroeste del territorio nacional son frecuentes las sequías prolongadas y las graves carencias del vital líquido. Por otra parte, la normatividad y política ambiental en el país es relativamente joven, pobre y escasamente supervisada, aunado a que no se tiene personal capacitado para encargarse de gestionar los procesos ambientales que toda actividad antrópica implica.

La alta demanda de agua que se realiza por el gran desarrollo en algunas regiones del país donde hay escasez del recurso, ha provocado una sobreexplotación de los acuíferos y de los cuerpos de aguas superficiales que abastecen del vital recurso a éstas regiones. En las zonas costeras con acceso a aguas salobres, una alternativa viable a este problema puede ser la desalinización del agua, para ser usada como fuente de abastecimiento, además, gracias a las mejoras y al desarrollo de nuevas tecnologías, el costo de la desalinización se está haciendo cada vez más competitivo respecto al costo de explotar las fuentes convencionales de abastecimiento, esto ha sido demostrado en países desarrollados, donde los costos de inversión y operación de esta infraestructura se han visto reducidos un 27% en la última década (IDA, 2006).

A nivel socioeconómico el tener una fuente disponible de agua, como lo es ya la desalinización, que pueda hacer frente a los problemas de escasez que se tienen, es muy significativo, por lo tanto también es muy importante evaluar la factibilidad del desarrollo de tecnologías para desalinizar el agua (Martínez de la Vallina, 2008). A nivel ambiental, la instalación de una planta desalinizadora se verá reflejada también en el sistema ecológico, ya que cualquier actividad realizada por el hombre, implica afectaciones al medio natural, en el caso de la desalinización, el residuo generado por las plantas desalinizadoras se refiere a un agua constituida por concentraciones de sales aun más altas que las del agua de mar y algunos otros aditivos químicos que según su nivel de concentración pudieran ser contaminantes para el medio marino; sin embargo, con el creciente desarrollo de la ciencia y la tecnología, la sociedad adquiere cada vez más conciencia de la situación ambiental, lo cual despliega mayor capacidad para impulsar el crecimiento de la gestión y normatividad ambiental concerniente a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente y que tienen por objeto propiciar el desarrollo sustentable en el territorio nacional (Lattemann, 2007).

Por otra parte, en México, no existe normatividad referente al proceso de desalinización de aguas marinas y salobres, que regule o controle los impactos ambientales al medio marino que pudiesen generar sus productos y desechos. Por lo que la pregunta de investigación en este trabajo, fue:

¿Cuáles son las concentraciones (LMP) y condicionantes para descargar las aguas hipersalinas residuales provenientes de las plantas desalinizadoras en México, sin afectar el equilibrio natural de los ecosistemas acuáticos?

Para responder ésta cuestión, el objetivo de éste estudio fue desarrollar un anteproyecto de Norma Oficial Mexicana como medio legal y administrativo para lograr que se establezca un eficaz control de los vertidos de salmueras y otros contaminantes residuales provenientes de plantas desalinizadoras, para prevenir y/o mitigar impactos en los ecosistemas acuáticos receptores.

Este anteproyecto de Norma Oficial Mexicana (NOM) aplica en todo el país, aun y cuando, los estudios para su elaboración fueron realizados solamente en la región del Mar de Cortés en los Estados de Sonora, Baja California Sur y el Mar Caribe en el Estado de Quintana Roo, los cuales cuentan con el mayor número de plantas desalinizadoras instaladas en el territorio Mexicano. Esta NOM protege a la vida acuática, aun y cuando, los bioensayos para determinar toxicidad en fauna marina se realizaron con solamente dos especies, una comercial y otra indicadora: camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*) y erizo morado (*Strongylocentrotus purpuratus*), respectivamente. Los límites permisibles para descargas en ríos y

embalses naturales y/o artificiales para uso en riego agrícola, son establecidos tomando en cuenta la dilución de los parámetros cuando estos son descargados a los cuerpos receptores.

Material y métodos

En la figura 1 se explica esquemáticamente el método utilizado.
La selección de los actores para colaborar en la emisión de esta NOM, brinda información y proporciona la lista de organismos que participan en la elaboración, inspección y observancia de esta NOM de acuerdo a la responsabilidad de cada autoridad competente. Los criterios a considerar para las alternativas de solución al problema y cumplimiento del objetivo, permitieron caracterizar los efluentes provenientes de las plantas desalinizadoras, evaluar el impacto ambiental del vertido de salmuera y el grado de toxicidad en las especies faunísticas, y además pudo establecerse en base a estos criterios, las especificaciones requeridas para el cumplimiento de la normatividad a desarrollar.



Figura 1. Modelo metodológico desarrollado para elaborar la NOM.

El trabajo de campo inició con la realización de un inventario nacional de plantas y su muestreo, identificando cuantas operan, con que tecnología y su calidad de producción y desecho. Además, con el apoyo de buzos se tomaron videos y fotografías para conocer el estado de flora y fauna marina. El trabajo se realizo con base en el inventario registrado en el la IDA (2007-2008) y el reporte de Fuentes y Ramírez (2003). Los muestreos se realizaron en los Estados de Quintana Roo y Baja California Sur por ser las Entidades Federativas con mayor cantidad de plantas desalinizadoras, además se incluyo el Estado de Sonora por ser un sitio donde la desalación se desarrollara en la próxima década de manera sobresaliente (Figura 2), bajo este contexto se aplicó la metodología estadística del diagrama de Pareto del 80-20, es decir, se muestreo el 20% del territorio y se cubrió el 80% del total de plantas desalinizadoras del país (Figura 2).

Se muestreo por mar la calidad del agua para evaluar el efecto de dispersión de la salmuera a diferente distancia del punto de descarga, y a diferentes profundidades, con el fin de observar el grado de dispersión de la salmuera en el lecho marino en tres dimensiones.

Se realizaron bioensayos de toxicidad en huevecillos de camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*), para evaluar el efecto de la salinidad sobre el desarrollo embrionario de huevos del camarón y establecer la relación concentración-respuesta; también se evaluó el porcentaje de fertilización de erizo morado (*Strongylocentrotus purpuratus*) para obtener la estimación de la CL_{50} en gametos de este erizo y así determinar la influencia de la salmuera en la fertilización de gametos de erizo. Se uso el camarón blanco como especie endógena al sitio de descarga y el erizo morado, ya que Voutchkov (2006 y 2009), recomienda que por lo menos una especie de la clasificación equinodermos (es decir, estrellas de mar, erizos de mar sandolars o estrellas serpiente) se uso para pruebas del peor caso posible en cuestión de mezcla de salmuera y efluentes de aguas residuales. Todo esto con el fin de determinar la capacidad potencial que presentan los organismos faunísticos presentes en los cuerpos receptores, para amortiguar las descargas de las salmueras.

Las alternativas propuestas fueron determinadas de acuerdo a las opciones del proceso de normalización determinado por la Dirección General de Normalización, y la selección de una de estas, se realiza basándose directamente en el objetivo de resolución a la problemática detectada. Para la evaluación de cada una de estas alternativas, se realizó una extensa revisión de las fuentes bibliográficas consultadas para el establecimiento



Figura 2. Estados y municipios de la Republica Mexicana muestreados.

de los fundamentos de la normatividad, acerca de estudios de impacto ambiental ocasionado por el vertido de salmuera. De la misma manera se busco establecer alguna concordancia con la norma de una u otras normas internacionales y otros organismos cuyas normas sean de reconocimiento internacional.
Para la elaboración del Anteproyecto de esta Norma Oficial Mexicana se utilizaron las Normas Mexicanas:

1. NMX-Z-013-1-1977- Guía para la redacción, estructuración y presentación de Normas Mexicanas; y
2. NMX-Z-013/2-1981- Guía para la redacción, estructuración y presentación de las Normas Oficiales Mexicanas

Estas normas establecen una serie de reglas que deben cumplirse en la redacción, estructuración y presentación de Anteproyectos y Proyectos de Normas Mexicanas y Normas Oficiales Mexicanas (Figura 3). Por lo que para este trabajo, se eligió la estructuración como una Norma Oficial Mexicana (NOM), ya que se pretende que su contenido sea de observancia nacional.
De forma coordinada y paralela a este trabajo, se realizaron evaluaciones del funcionamiento de las plantas desalinizadoras instaladas en el país, también se midió el nivel de afectación procedente de estas y se determinaron las acciones que pueden provocar alteraciones del cuerpo receptor de las descargas; por lo que, para evitar la contaminación derivada de los desechos de las plantas desalinizadoras ubicadas en la República Mexicana, se desarrollaron las especificaciones incluidas en este anteproyecto de NOM, mismas que también permiten cumplir con la calidad demandada por los usuarios.

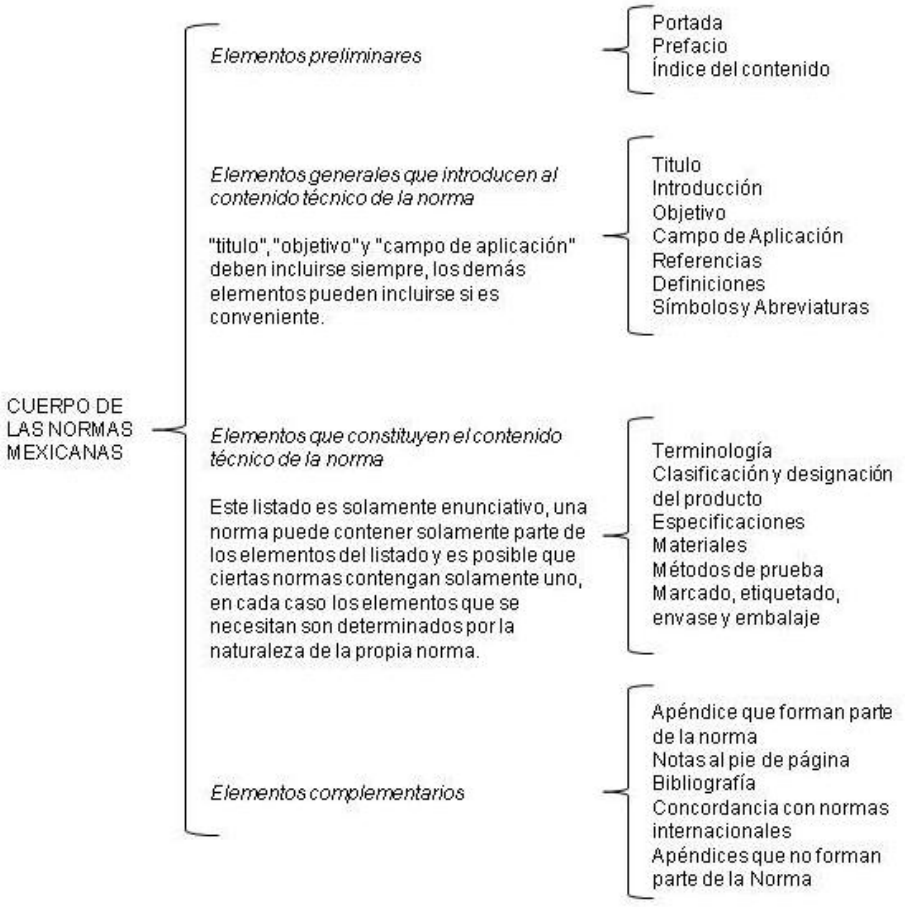


Figura 3. Cuerpo del contenido de una Norma. Fuente: NMX-Z-013-1-1977.

Finalmente, la serie de trámites legales requeridos para hacer la propuesta y emitir esta NOM, son establecidos y regulados por la Dirección General de Normalización y la Comisión Federal de Mejora Regulatoria.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos como parte del texto que constituiría el anteproyecto de Norma Oficial Mexicana y las especificaciones requeridas para su cumplimiento. Así como los trabajos de campo reportados por González (2009), indicaron que en México, se tienen 65 proveedores de plantas desaladoras, las empresa más importantes son Inima y Befesa de España, Veolia de Francia y Doosan de Korea. Se tienen 435 plantas en todo el país, Quintana Roo y Baja California Sur cuentan con más plantas desalinizadoras, 79 y 71 respectivamente. El total de agua desalada es de 193,771.2 m^3d^{-1} y el sistema más utilizado es la ósmosis inversa, con un 76% de las plantas según el inventario y la mayoría de las plantas desalinizadoras se encuentran operando para el sector hotelero y las plantas que utilizan procesos térmicos, se identificaron operando en el sector de generación de energía eléctrica. La planta desaladora de Los Cabos, B.C.S. es la de mayor producción y abastece a 40,000 habitantes con una producción de 17,280 m^3d^{-1}.

Para conocer las condiciones de operación de las plantas desalinizadoras y determinar las especificaciones que deben cumplir las plantas desalinizadoras de aguas marinas y salobres, se realizaron 3 reuniones con expertos nacionales e internacionales. La primera reunión se realizó en mayo del 2007 en Guaymas, Sonora. La segunda reunión se realizó en Almería, España, en octubre de 2007, consistió en visitar tres grandes plantas desalinizadoras de Andalucía, España. Las plantas visitadas fueron Carboneras y Rambla de Morales para irrigación y Almería para producción de agua potable. En estas visitas se obtuvo información valiosa sobre los diagramas de flujo del proceso de desalación, además de información técnica sobre datos de equipos, así como la capacidad de producción, por otra parte las visitas permitieron conocer a fabricantes de plantas desaladoras con gran experiencia y capacidades de producción de agua desalada mayores a los 100,000 m^3 d^{-1}. La tercera reunión con expertos se realizó a finales de octubre de 2007 en Gran Canaria, España, durante el Congreso Mundial de Desalación y Reuso del Agua, mismo que conjuntó a más de 1000 expertos en el tema y la exposición de tecnología de vanguardia por más de 200 empresas de las más importantes del mundo. Se realizaron reuniones privadas con directivos de varias empresas como las de Inima de Espana y Veolia de Francia, IDE de Israel, Doosan de Korea, así como ERI y GE de Estados Unidos de Norteamérica.

La concentración de los componentes iónicos para las descargas de salmuera y otros contaminantes a aguas y bienes nacionales, no deberá exceder el valor indicado como límite máximo permisible en la Tabla 1 contenida en este anteproyecto de NOM. Asimismo, en caso de haber mezcla de los vertidos de salmuera con aguas residuales tratadas para disminuir su concentración, además de la tabla 1 del anteproyecto de NOM, se deberá de cumplir con la NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT, 1996). Lo anterior, sin perjuicio del pago de derechos a que se refiere la Ley Federal de Derechos y a las multas y sanciones que establecen las leyes y reglamentos en la materia.

Los límites permisibles establecidos en las columnas instantáneo (I), son únicamente valores de referencia, en el caso de que el valor de cualquier análisis exceda el instantáneo, el responsable de la descarga queda obligado a presentar a la autoridad competente en el tiempo y forma que establezcan los ordenamientos legales locales, los promedios diario y mensual, así como los resultados de laboratorio de los análisis que los respaldan.

Las características de la obra de toma para el abastecimiento de la planta desalinizadora son las siguientes:

1. De agua de pozo (salobre o con intrusión salina). Antes de la instalación de la planta desalinizadora deberán realizarse estudios de geofísica para determinar la cantidad y calidad del agua existente en la zona, con la finalidad de garantizar que el manto acuífero no sea sobreexplotado y altere la composición florística de la zona, así como el funcionamiento continuo de la planta y evitar abandonos de instalaciones. Además deberán instalarse sistemas de pretratamiento del agua, tales como filtros de arena, de cartucho, multimedia, acorde al tamaño de la planta desalinizadora que garantice su óptimo funcionamiento y se evite la

Tabla 1. Límites máximos permisibles para composición iónica.

Parámetros (mg l^{-1} excepto cuando se especifique)	Ríos			Embalses naturales y artificiales		Aguas costeras			Humedales naturales (B)	Pozos de inyección profunda	Alcantarillado publico
	Uso en riego agrícola (A)	Uso público urbano(B)	Protección de vida acuática (C)	Uso en riego agrícola (B)	Uso público urbano (C)	Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)	Recreación (B)	Estuario (B)			
	(I)	(I)	(I)	(I)	(I)	(I)	(I)	(I)	(I)	(I)	(I)
Bicarbonatos	5	5	4	5	4	200	400	180	180	400	10
Calcio	15	15	12	15	12	500	800	500	500	1000	20
Cloruros (como Cl^-)	750	700	500	720	500	25000	36000	24000	24000	50000	1000
Flúor	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.7	2.5	1.5	1.5	3.5	-
Magnesio	50	45	40	50	40	1700	2400	1600	1600	3500	80
pH	5-8	5-10	-	5-8	5-10	5-10	8	5-10	5-10	4 – 10	5.5-10
Potasio	15	15	12	15	12	500	750	500	500	1000	20
Sodio	415	380	350	400	350	14000	20000	13000	13000	28000	650
Sólidos disueltos totales (SDT)	1350	1250	1100	1300	1100	45000	65000	43000	43000	90000	2000
Sulfatos (como SO_4)	100	90	80	100	80	3500	5000	3500	3500	7000	400

Donde: (I) Instantáneo; (-) Sin dato; y (A), (B) y (C) Tipo de cuerpo receptor según la Ley Federal de Derechos.

generación acelerada de desperdicios de tecnología por desgaste.

2. De toma de agua de mar directa. Las plantas desalinizadoras cuando no cuenten con agua suficiente en el subsuelo en cantidad y calidad, deberán de conectar la obra de toma de alimentación del mar a la planta desalinizadora, mediante tuberías adecuadas que no sean afectadas por la corrosión. La obra de toma deberá estar en la franja de mar abierto más un mínimo de 100 metros de tuberías y deberá tener una profundidad de al menos 3 metros. Además deberá de contar con cedazos acorde al tamaño nominal de la desalinizadora, que garantice su rendimiento en el proceso de pretratamiento o de filtración de materia orgánica y sólidos suspendidos y disueltos.

Las características de la obra de descarga para los vertidos de salmuera son las siguientes:

1. Cuándo se disponga el vertido de salmuera en aguas superficiales marinas, la tubería de descarga deberá de estar en sentido contrario a la obra de toma y en los casos donde no pueda cumplirse, el punto de descarga del vertido deberá estar por lo menos a 500 metros de la boca de la obra de toma.
2. Además, el punto final de la tubería para el vertido de salmuera deberá estar a menos de 5 metros de profundidad y deberá contar con rehiletes de dispersión; esto debido a que el vertido de salmuera a una profundidad relativamente superficial, favorece su dilución en la columna de agua, según el Instituto Español de Oceanografía (IEO).

Los resultados del muestreo de calidad del agua realizados en Sonora y Baja California Sur permitieron caracterizar el agua de alimentación, producción y desecho. Se encontró la mayor salinidad con una Conductividad Eléctrica de 44,656 µS cm^{-1} en Maquilas Tetakawi y con menor en el CET del Mar con 41,785 µS cm^{-1}. En la zona de La Paz, San Jose del Cabo y Cabo San Lucas, se observó mucha actividad de peces, focas, lobos marinos, algas, erizos muy próximos a las descargas de salmuera de los 10 sitios de plantas desalinizadoras muestreadas por mar y tierra en la región del Mar de Cortés, todas cumplen con los límites máximos permitidos por esta propuesta de NOM en la tabla 1.

El vertido de salmuera deberá de hacerse en la franja de mar abierto más 200 metros de tuberías como mínimo, donde exista gran oleaje que permita

la dispersión y disolución del vertido, además es deseable buscar corrientes marinas para la disposición final que garantice su inmediata disolución. Lo anterior tomando en cuenta las instalaciones de descarga de otras plantas desalinizadoras estudiadas de acuerdo a la bibliografía consultada, cuya extensión va de los 100 a 3,500 metros a partir de la franja de mar abierto (Sadhwani *et al.*, 2005). Cuando el vertido sea inyectado a pozos profundos, debe limitarse la velocidad del fluido inyectado, para evitar daños en el sondeo o en la formación. El límite máximo recomendado por las normas de la Agencia de Protección al Ambiente (EPA, por sus siglas en ingles) es de 2.5 m s^{-1}, a menos que pueda demostrarse que no se dañará el sistema con velocidades superiores (Mickley, 2001).

Para que una operación de disposición de salmuera mediante inyección en sondeos profundos (ISP) sea factible, se han de dar cuatro condiciones que son necesarias y suficientes (IGME, 1990), es decir, una operación de ISP es posible si y sólo si:

1. Existe una formación geológica permeable capaz de admitir el residuo (permeable y transmisiva).
2. Existe una formación geológica impermeable que mantiene el residuo confinado el tiempo suficiente hasta su inocuidad.
3. Las condiciones de ambas formaciones no cambian con el desarrollo de la operación.
4. La operación de ISP no afecta a otros recursos más importantes.

Todos los estudios, evaluaciones, proyectos y obras que se realicen para la consecución del objetivo de la eliminación deberán tener en cuenta estas cuatro condiciones y demostrar inequívocamente su cumplimiento. Además, cuándo se disponga el vertido de salmuera en estanques de evaporación, es recomendable buscar una alternativa de reuso para obtener beneficios de dicho vertido.

Los responsables de las descargas de aguas de vertidos de salmuera, cuya concentración en composición iónica, rebasen los límites máximos permisibles señalados en la tabla 1, multiplicados por cinco, para cuerpos receptores tipo B (ríos, uso público urbano), deberán presentar un programa de las acciones u obras a realizar para el control de la calidad de sus descargas a la Comisión Nacional del Agua, en un plazo no mayor de 180 días naturales, a partir de la publicación en el Diario Oficial de la Federación de la Norma en cuestión. También, deberán comunicarse a la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, las modificaciones en sus procesos, en el sistema de tratamiento de los vertidos, en las instalaciones que soportan el vertido y en general, cualquier actuación que pueda suponer una modificación sustancial de la calidad autorizada del vertido.

Asimismo, anualmente el responsable de la autorización realizará una declaración de vertidos que deberá presentar ante la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, a partir de la entrada en vigor de la norma en cuestión. La declaración expresará los siguientes datos: Número de expediente de la autorización de vertido; Titular; Localidad y Municipio; Características del vertido; Volumen anual de vertido; Caudal medio mensual; Rendimiento efectivo de la planta desalinizadora; Mejoras técnicas introducidas y justificación; Informe de resultados del procedimiento de vigilancia y control del vertido y del medio receptor así como de la conducción de vertido que lo soporta; Evaluación de los efectos del vertido sobre el medio receptor, en su caso, previsiones que se hayan de adoptar para reducir la contaminación; e Incidencias relevantes ocurridas en el año anterior. Los responsables de las autorizaciones de vertido deberán cumplir en general las obligaciones establecidas en la Norma en cuestión y con cualquier otra disposición legal aplicable en la materia.

La desalinización de agua salobre o marina, debe justificarse con estudios de calidad y pruebas de tratabilidad a nivel de laboratorio para asegurar su efectividad. La selección de los métodos de prueba para la determinación de los parámetros definidos en esta Norma; deben establecerse en un Programa de Control de Calidad Analítica del Agua, y estar a disposición de la autoridad competente, cuando ésta lo solicite, para su evaluación correspondiente. Para control y seguimientos de posibles afectaciones a flora y fauna marina se deberán de solicitar a organismos evaluadores, el uso de bioensayos toxicológicos para determinar el grado de afectación en las especies de la zona. Estos bioensayos se deberán de hacer al menos una vez al año y/o cuando un suceso extraordinario se presente. El responsable de la descarga puede solicitar a la autoridad competente, la aprobación de métodos alternos. En caso de aprobarse, dichos métodos quedarán autorizados para otros

responsables de descarga en situaciones similares.

Los límites permisibles para descargas en ríos y embalses naturales y/o artificiales para uso en riego agrícola son establecidos mediante la clasificación de las aguas para riego agrícola según sus características físicas, químicas y biológicas y su escala de daño para cultivos y/o sistemas de riego presurizado, goteo y microaspersión; también se toma en cuenta la dilución de los parámetros cuando estos son descargados a los cuerpos receptores. Los límites permisibles para descargas en aguas costeras de explotación pesquera, navegación y otros usos, así como los límites permisibles en descargas en estuarios y humedales naturales, fueron establecidos en base a la tolerancia de salinidad de las especies faunísticas. Esta tolerancia se determino a partir de los bioensayos realizados en las especies faunísticas antes mencionadas, las cuales fueron usadas como criterios indicadores para la realización de esta NOM. Los bioensayos arrojaron como resultado una tolerancia de 43,000 mg l^{-1} de SDT, ya que este límite no provoca malformaciones en los camarones, ni daños en sus huevecillos, además mantiene la fertilidad de los erizos morados. Los límites permisibles para descargas en aguas costeras de uso recreativo, se establecieron en base a las muestras del vertido de salmuera, tomadas de diferentes plantas desalinizadoras en México. Los límites permisibles para inyección de salmuera a pozos profundos, se establecieron en base a las concentraciones máximas en descargas de plantas desalinizadoras actualmente instaladas.

El personal designado para la realización de las inspecciones y comprobaciones previstas en esta Norma Oficial Mexicana tiene la consideración y la autoridad, de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, no siendo necesaria la notificación previa para acceder a las instalaciones a inspeccionar cuando se trate de contingencias ambientales mayores, sin embargo deberán de notificar con 30 días naturales para avisar a la planta desalinizadora de una inspección tanto de instalaciones como de muestreos simples y compuestos a vertidos de químicos y salmueras en litorales marinos. Las autoridades locales, la Comisión Nacional del Agua, los responsables del abastecimiento y los particulares, instituciones públicas o empresas privadas, involucrados en la contingencia, deben coordinarse con la autoridad sanitaria competente, para determinar las acciones que se deben realizar con relación a la descarga segura de vertidos de salmuera, así como todos los efluentes del proceso de desalinización.

Finalmente, después de realizar una extensa búsqueda y comparación de otras políticas en materia de agua, costas y medio ambiente a nivel internacional, se determino que el presente anteproyecto de Norma Oficial Mexicana no tiene concordancia con ninguna otra norma nacional o internacional.

La vigilancia del cumplimiento de la presente Norma Oficial Mexicana corresponde a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, y a los gobiernos de las entidades federativas por conducto de la Comisión Nacional del Agua, y a la Secretaría de Salud en el ámbito de sus respectivas atribuciones, cuyo personal realizará los trabajos de inspección y vigilancia que sean necesarios. Las violaciones a la misma se sancionarán en los términos de la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento, Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y sus reglamentos, la Ley Federal sobre Metrología y Normalización y demás ordenamientos jurídicos aplicables en sus respectivos ámbitos de competencia de conformidad con las disposiciones aplicables.

En cuanto a la Evaluación de Impacto Ambiental aplicable a los proyectos de desalinización; de acuerdo al artículo 5 del reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Evaluación del Impacto Ambiental, la obra y actividad de una planta desalinizadora, requerirán previamente la autorización de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en materia de impacto ambiental; por lo que, deberán de realizarse evaluaciones de impacto ambiental, para establecer las condiciones a las que se sujetará la realización de obras y actividades que puedan causar desequilibrio ecológico o rebasar los límites y condiciones establecidos en las disposiciones aplicables para proteger el ambiente y preservar y restaurar los ecosistemas, a fin de evitar o reducir al mínimo sus efectos negativos sobre el ambiente. Además, cuando exista riesgo inminente de desequilibrio ecológico, o de daño o deterioro grave a los recursos naturales, casos de contaminación con repercusiones peligrosas para los ecosistemas, sus componentes o para la salud pública, la Secretaría, fundada y motivadamente podrá ordenar

alguna o algunas de las medidas de seguridad mencionadas en el artículo 170 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA). Sin embargo, para esta parte de los proyectos de desalinización, que aplica en forma general al rubro de desalinización en cuanto a instalación, operación y abandono de la planta desalinizadora, aplica una normativa ya existente, por lo que se optó no incluirlo dentro del cuerpo de esta NOM.

Recomendaciones

Este anteproyecto de Norma Oficial Mexicana, debe someterse a una consulta pública mayor para que todo aquel interesado en el tema, pueda hacer sus observaciones y de esta manea enriquecer la NOM.
Se exhorta a hacer bioensayos de toxicidad en especies florísticas de los cuerpos acuáticos receptores del vertido, ya que estos organismos al carecer de capacidad de locomoción, reciben la descarga directamente, al contrario de los animales que voluntariamente pueden alejarse de ambientes riesgosos.
De la misma manera es necesario efectuar bioensayos con especies faunísticas propias de los ecosistemas de agua dulce, ya que estos indiscutiblemente presentarán mayor sensibilidad al aumento de la salinidad en su hábitat. De manera conjunta, se requiere realizar pruebas de sedimento y batimetría para conocer el nivel y tiempo de acumulación que cada sito presenta, de acuerdo a sus condiciones especificas. Tomando en cuenta que una de las repercusiones más significativas que provocan los efluentes hipersalinos, es la corrosividad, especialmente cuando estos son vertidos al alcantarillado público que finalmente ingresa a una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), es de suma importancia realizar pruebas de corrosividad para los materiales con los que comúnmente se trabaja en una PTAR, para implementar límites máximos permisibles más adecuados y estrictos, ya que esta forma de disposición del vertido es muy común en México.

Conclusiones

Los límites máximos permisibles propuestos en este anteproyecto de Norma Oficial Mexicana, establecen los estándares de calidad de los principales constituyentes iónicos presentes en los efluentes hipersalinos (salmuera), ya sea que estos sean vertidos de forma directa o mezclados con aguas residuales tratadas.
La afectación a fauna acuática debido al vertido de salmuera y otros contaminantes, no tiene gran repercusión más allá del punto de descarga, ya que la dilución de esta es casi inmediata y ocurre en su totalidad aproximadamente en un rango de 300-500 metros del punto de descarga, dependiendo de la hidrodinámica del sitio. Cuando los efluentes vertidos son una mezcla de salmuera y aguas residuales urbanas o industriales, presentan un mayor riesgo para el ecosistema receptor.
Este anteproyecto de Norma Oficial Mexicana, servirá como un medio legal administrativo regulador de las concentraciones y constituyentes de los efluentes de las plantas desalinizadoras, así como también de la adecuada disposición de estos.
Este anteproyecto de Norma Oficial Mexicana, podrá ser aprovechado como una base estándar normativa, para la calidad de los efluentes hipersalinos provenientes de plantas desalinizadoras alrededor del mundo.
Las plantas desalinizadoras existentes y por construir en México, deberán someterse a estudios rigurosos de impacto ambiental que incluyan bioensayos para evitar afectaciones por la alta concentración de las salmueras que se vierten al mar.

Reconocimientos

Se reconocen los apoyos recibidos por parte del Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo sobre el Agua, integrado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, y la Comisión Nacional de Agua, a través del proyecto “Funcionamiento, análisis de la problemática y contaminación generada en plantas desalinizadoras ubicadas en la República Mexicana, con el fin de determinar la normatividad aplicable a este rubro”, aprobado por la convocatoria S0013-2006-1 y solicitud No. 48804; a cargo del Mtro. Rodrigo González Enríquez adscrito al Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente de la Dirección de Recursos Naturales del Instituto Tecnológico de Sonora.

Bibliografía

Arreguín J. 1998. Aportes a la Historia de la Geohidrología en México 1890-1995. Asociación Geohidrológica Mexicana

A.C. CIESAS. México.
CONAGUA. 2006. Estadísticas del agua en México. Comisión Nacional del Agua.
Fuentes M. y Ramírez A. 2003. Una Alternativa para Resolver la Demanda de Agua Potable en el Sur de la República Mexicana. Revista Agua Lationoamericana. EUA. 67
González R. y Dévora E. 2008. La desalinización del agua y su utilidad en el regadío de cultivos, un mar de oportunidades. Revista Agropecuaria Mas Medios Mas Insumos. México.
González R. 2009. Funcionamiento, análisis de la problemática y contaminación generada en plantas desalinizadoras ubicadas en la república mexicana, con el fin de determinar la normatividad aplicable a este rubro. Reporte para el Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua. CONACYT-CONAGUA.
Hernandez A., Hernández P. y Gordillo A. J. 2006. Manual para la Evaluación de Impacto Ambiental. INNCIVE. Madrid, España.
IDA. 2007-2008. Desalination Yearbook. Water desalination report.
IDA. 2006. IDA Worldwide Desalting Plant Inventory, No. 19 in MS Excel format, Media Analytics Ltd., Oxford, UK.
IGME. 1990. La Inyección de residuos líquidos. Una alternativa. Colección Lucha Contra la Contaminación.
IMTA. 2009. Plan Hidráulico del Noroeste. Instituto Mexicano de Tecnológico del Agua. En: http://www.imta.gob.mx/plhino/
Jiménez S. 2006. Desalación y Medio Ambiente, una Perspectiva Jurídica. III Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente. México.
Lattemann S. y Hoepner T. 2007. Environmental impact and impact assessment of seawater desalination, Science Direct Publications, vol. 220
Lattemann S. y Hoepner T. 2003. Seawater Desalination, Impacts of Brine and Chemical Discharges on the Marine Environment. Desalinatión Publications, L'Aquila, Italy, 142pp.
Lattemann S. 2007. Desalinización para el suministro de agua potable segura, Guía de los Aspectos Ambientales y de Salud Aplicables a la Desalinización. World Health Organization. Ginebra.
Martínez de la Vallina. 2008. Evaluación del Impacto Ambiental de las Desaladoras. AcuaMed. 8vo. Congreso Nacional del Medio Ambiente. España.
Medina J.A. 2000. Desalación de Aguas Salobres y de Mar. Ósmosis Inversa. Ed. Mundi-Prensa. 68
Mickley M.C. 2001. Membrane Concentrate Disposal: Practices and Regulation. Desalination and Water Purification Research Program Report, US Bureau of Reclamation.
Sadhwani J., Veza M. y Santan C. 2005. Case studies on enviromental impact of seawater desalination. Desalination. Vol. 185, No. 1-8.
SECOFI. 1977. Norma Mexicana NMX-Z-013-1-1977. Guía para la redacción, estructuración y presentación de las normas mexicanas.
SEMARNAT. 1996. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas y bienes nacionales. Publicada en el DOF el 6 de enero de 1997.
Valero A. 2001. La Desalación como alternativa al plan hidrológico nacional, Universidad de Zaragoza y el Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE), España.
Voutchkov N. 2009. Salinity tolerance evaluation methodology for desalination plant discharge. Desalination and & Water Reuse.
Voutchkov N. 2006. Innovative Method to Evaluate Tolerance of Marine Organisms. Desalination and & Water Reuse, Vol. 16, No. 2, 28-34.