

# TRATAMIENTO Y REÚSO DE AGUA RESIDUAL MUNICIPAL: CRITERIOS PARA ESTIMAR EL POTENCIAL DE REÚSO EN UNA REGIÓN

Juan Manuel Morgan-Sagastume<sup>1</sup>, Carolina Morgan Martínez<sup>2</sup>, Benly Liliana Ramírez  
Higareda<sup>3</sup>, Adalberto Noyola Robles<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México

<sup>3</sup>ELNSYST SA de CV (IBTech)

<sup>1</sup>jmms@pumas.ii.unam.mx

## RESUMEN

Se propone una metodología para estimar el potencial de reúso de agua tratada en una región. La propuesta metodológica estima la demanda de agua tratada en la agricultura, riego de áreas verdes, en la industria, en el lavado de automóviles y en las escuelas sustentado ello con información de acceso público, lo que llega a facilitar enormemente la obtención de información. Un aspecto valioso de la metodología propuesta es que prescinde de la necesidad de recopilar información en campo en cuanto al consumo de agua en las industrias; información que muy a menudo las empresas no están dispuestas a proporcionar.

## Palabras clave

*Agua residual, municipal, reúso de agua tratada*

## 1. INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de agua potable para el consumo humano se reduce en forma constante por causa de la dinámica poblacional actual, y se acentúa por una inadecuada gestión de los recursos hídricos y por el Cambio Climático [1]. Como resultado, la presión sobre la demanda del recurso hídrico se incrementa, lo que hace necesario identificar opciones para el abastecimiento de fuentes alternas (reúso de agua tratada) en las actividades económicas y sociales donde esto sea posible y así sustituir, incluso, agua de primer uso por agua tratada

Este trabajo tiene el objetivo de proponer una metodología para el cálculo del potencial de reúso de agua tratada alrededor de una PTAR existente, o en regiones donde se desee instalar sistemas de tratamiento y reúso como resultado de una planeación integral.

En términos generales, el reúso de agua tratada incluye: a) usos agrícolas u hortícolas como riego de cultivos (alimenticios y no alimenticios), recursos forestales, huertos y pastos. b) Usos industriales como agua de enfriamiento, agua de proceso, agua para lavado de pisos y naves industriales, fabricación de concreto, compactación del suelo, control del polvo, agua contra incendio, descarga de sanitarios, etc. c) Usos municipales paisajísticos como riego de parques públicos, recreativos y deportivos; jardines privados, bordes de carreteras, fuentes de ornato, mantenimiento de lagos recreativos, limpiezas viarias, sistemas de protección contra incendios, lavado de vehículos, descarga de inodoros públicos, control de polvo.

Por último, se hace mención de algunos resultados de un ejemplo de aplicación de la metodología propuesta que abarca la Zona Metropolitana de Monterrey, Nuevo León, México en donde se seleccionaron 11 plantas para su evaluación con base en la información pública disponible.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 PROCEDIMIENTO GENERAL PROPUESTO

Se proponen, al menos, tres etapas para dicha evaluación: a) Identificación de la región de estudio, b) Evaluación técnica de las plantas de tratamiento de aguas residuales existentes en la región y, c) Cuantificación del potencial de reúso de agua tratada en la región. En la Figura 1 se presenta el algoritmo propuesto para ejecutar la evaluación del potencial de reúso en una región.

### 2.2 ACTIVIDADES ECONÓMICAS CON POTENCIAL DE DEMANDA DE AGUA TRATADA

Para cada PTAR analizada se establece la oferta actual de agua tratada y la potencial. La información primaria para la elaboración de esta metodología está referenciada por información del: Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), la Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo (ENOE), Sistema de Cuentas Nacionales de México, Censo Nacional de Población y Vivienda; así como, el Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (SCIAN) [2], y el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), el Índice de Rezago Social que estima el Consejo Nacional de Evaluación de Política de Desarrollo Social (CONEVAL) y el Índice de Marginación Social por parte del Consejo Nacional de Población (CONAPO).

Riego agrícola. En el SIAP es posible obtener el tipo de cosecha, volumen de producción, rendimiento y precio de los sembradíos en el país a nivel municipal diferenciado por ciclo de producción. El cálculo de la demanda de agua para riego agrícola se obtiene de la suma de los productos de la huella hídrica azul por cultivo; ( $m^3$ agua/ton de cultivo) \* (ton de cultivo/año), dividido entre el área agrícola total, lo que da como resultado la demanda de agua ( $m^3$ agua/unidad de área/año) y ello multiplicado por la fracción de área cultivada por riego identificada como no de temporal. Esta fracción se puede estimar haciendo una ponderación entre los cultivos para riego dividido entre los cultivos totales de una región que se pueden consultar en el SIAP.

$$D. A. agr = \frac{\sum_1^n (\text{Huella hídrica azul} * \text{Producción de cultivo})}{\text{Área agrícola}} Ar \quad (1)$$

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Dónde:  $n$  es el tipo de cultivo,  $D.A.agr$  es la demanda de agua agrícola, (Volumen/área/tiempo), y  $Ar$  es la fracción del total que corresponde al área cultivada por riego.

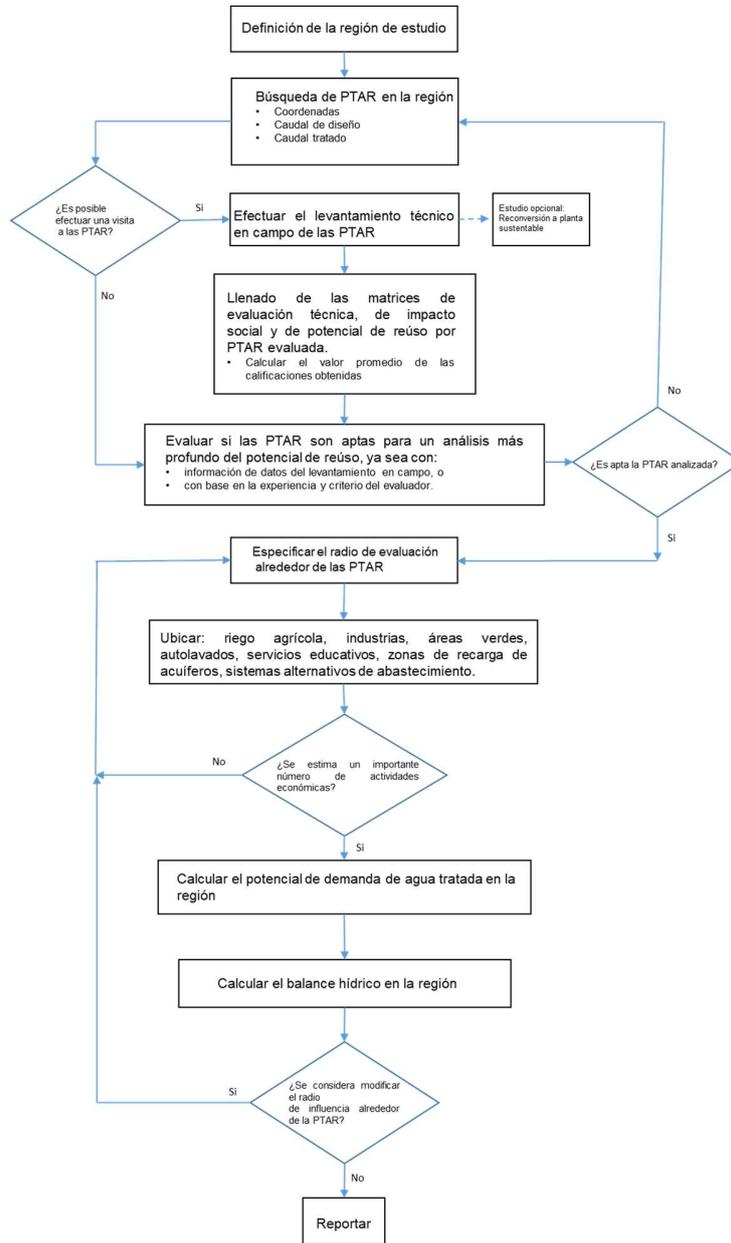


Figura 1 Algoritmo para ejecutar la determinación del potencial de reúso en una región

Áreas Verdes. La identificación de áreas verdes es factible realizarla a través del DENU y la misma plataforma permite el cálculo del área de evaluación. Sin embargo, en muchas ocasiones habrá que apoyarse también mediante una identificación visual con plataformas como Google Maps, Google Earth o equivalentes. La demanda de agua para riego de áreas verdes depende del tipo de vegetación a regar, como se puede observar en la tabla 1. Para la

## SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

demanda superficial promedio estimado de agua para regar pasto, árboles y plantas mixtas se considera un valor promedio de 2.5 litros por m<sup>2</sup> por día. Las áreas verdes no se riegan en época de lluvia, por lo tanto, se puede asumir que durante esta época la demanda anual superficial de agua se multiplica por un factor de 0.75.

Tabla 1 Demanda de agua diaria según el tipo de vegetación l/m<sup>2</sup> d

Tipo de vegetación	Tamaño chico (l/ m <sup>2</sup> * día)	Tamaño mediano (l/ m <sup>2</sup> * día)	Tamaño grande (l/ m <sup>2</sup> * día)
Árboles	1.6	2.4	3.2
Arbustos	1.1	1.6	2.1
Plantas mixtas	1.8	2.5	3.2
Pasto (m <sup>2</sup> )	2.1	2.5	2.8

Fuente: Conacyt (<https://www.cyd.conacyt.gob.mx/?p=articulo&id=480>, 2019).

Industria Manufacturera. La actividad económica primaria y sobre todo la secundaria demanda gran volumen de agua para la producción de diferentes bienes, y para el mantenimiento propio de las instalaciones. Para su delimitación y comparabilidad en la producción mundial, y sobre todo con Estados Unidos y Canadá, se considera el catálogo SCIAN en las 20 ramas industriales con código del 31-33. Asimismo, se recomienda acotar a las industrias con un tamaño equivalente a 51 o más empleados, según los intervalos preestablecidos en la base del DENUÉ. En consecuencia, debido a que la demanda hídrica de cada industria por región en México no está disponible, se propone una metodología que considera el estudio de Marston, Ao, Konar, Mekonnen y Hoekstra [3], quienes integraron en una base de datos la huella hídrica de industrias en los Estados Unidos de América (EUA). Esta base de datos incorpora en el apartado de huella hídrica de Comercio, Industria e Instituciones a 22,541 referencias agrupadas en 378 ramificaciones de estos tres sectores económicos en los EUA. Cada una de ellas se distingue con la codificación industrial SCIAN; que, como se mencionó con anterioridad, es comparable con la codificación Industrial de México, lo que permite la comparabilidad de los datos.

Dentro de la información procesada, se cuenta con la demanda hídrica en m<sup>3</sup>/año y en m<sup>3</sup>/1000 USD por sector industrial asociada a una región de este país. La cantidad en dólares de los Estados Unidos de América (USD) se refiere al valor del producto de la industria. Ello puede ser referido a un Producto Interno Bruto (PIB) por sector industrial. Para poder incorporar la información procesada para los EUA a la industria instalada en México, se realizó el cruce de información del Valor del Producto por Industria en EUA con el valor del Producto Interno Bruto Industrial (PIB-I) en México por empleado ocupado; con ello es posible estimar el número de empleados para cada una de las industrias, previamente ubicadas alrededor de la PTAR. La información de PIB-I está disponible en las bases de datos de estadísticas oficiales de la Matriz-Insumo-Producto del INEGI (<https://www.inegi.org.mx/temas/mip/>).

Por otra parte, en la plataforma del DENUÉ, es posible ubicar con toda precisión cualquier instalación industrial y su tipo (según el SCIAN) alrededor de una PTAR además de obtener el número de empleados que trabajan en ella. Por lo tanto, el procedimiento para el análisis y procesamiento de información para estimar la demanda de agua en la industria alrededor de la PTAR se realizó en tres partes: primero se calculó del PIB Industrial por empleado, con

## SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

ello se determina el número de empleados requeridos por cada 1000 USD de PIB anual en México y, de la base de datos de EUA donde se calcula el consumo de agua por sector industrial por cada 1000 USD de valor de producto, es posible estimar el consumo de agua por industria por empleado al año en México. Lo anterior se resume en la Tabla 2 efectuado para el año 2019. Este procedimiento tiene la virtud de prescindir de información con base en encuestas directas en las empresas que casi siempre es información que no están dispuestas a proporcionar. Por otra parte, al considerar que no toda el agua utilizada en la producción de un producto puede ser sustituida por agua tratada, se debe considerar una fracción por sector industrial que para efectos de la metodología se propone que sea de 30 o 50%, según sea el caso.

Servicios de Auto lavados. Se recomienda acotar el análisis a establecimientos con 6 o más empleados y con dimensiones de atención de 1 automóvil o más en una hora por empleado. Se asumió, para efectos de esta metodología, que el tiempo promedio para lavar un auto por persona es de 40 minutos y requiere en promedio 50 litros de agua con cubeta para un carro mediano de cuatro puertas. Así mismo, se parte del supuesto de que la jornada laboral consta de 6 días a la semana, 8 horas cada día. Ello establece que un empleado puede lavar 12 autos en un día, y que en un año un empleado labora 288 días. Se calcula que el uso de agua es de 173 m<sup>3</sup> de agua al año por empleado. Se asumió también que el 90% del agua de primer uso que se consume en autolavados podría ser sustituida con agua residual tratada. Por tanto, la demanda potencial de agua tratada para los autolavados se reduce a multiplicar el número de empleados del establecimiento de autolavado encontrado alrededor de la PTAR por los 173 m<sup>3</sup>/empleado/año por 0.9.

Servicios Educativos. Los servicios educativos incluyen escuelas de nivel secundaria, Medio Superior, Superior, así como escuelas de oficios, artes, deporte e idiomas. Se recomienda analizar aquellas con 11 o más empleados, considerando que el número de personas que hacen uso del servicio sanitario es de aproximadamente de 8 a 15 veces mayor por empleado al considerar los alumnos. Se estima que se consume por cada empleado 70 l/d, y por cada alumno 50 l/d, sin considerar servicios de gimnasio, duchas, jardines ni estacionamientos. Un ciclo escolar consta, en promedio, de 200 días de clases en las escuelas públicas y privadas de educación secundaria. La demanda de agua (D.A.) al año por cada empleado en un centro educativo se estima:

$$D.A_{SE.por\ empleado} = \left[ \left( \frac{0.07m^3}{d} \right) + 10 \left( \frac{0.05m^3}{d} \right) \right] * \frac{200d}{año} = 114 \frac{m^3}{año} \quad (2)$$

### 2.3 BALANCE HÍDRICO FINAL

Se define el balance hídrico a la diferencia aritmética entre la oferta y la demanda, donde el punto de equilibrio es cero. Se hará referencia al resultado empleando los términos superávit o déficit; y en función de los radios de influencia especificados alrededor de la PTAR.

### 3. EJEMPLO: CASO DE LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MONTERREY, NUEVO LEÓN, MÉXICO

Se desarrolló utilizando la metodología expuesta, a manera de ejemplo (no presentado en este documento), el caso de la estimación del potencial de reúso de agua tratada en la Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM), México, con una selección de 11 PTARs pertenecientes a la región. El uso de agua en la agricultura tuvo la mayor demanda (82.6%). Así, mismo, el peso específico en cuanto al consumo de agua por parte del sector industrial en la ZMM es tan sólo del 4%, aproximadamente. Está claro que hay que promover el reúso de agua en el sector industrial, sin embargo, no es ello el factor de cambio para asegurar el suministro de agua en la región; lo que sí es la tecnificación del riego agrícola utilizando técnicas modernas enfocadas al ahorro del agua.

### 4. CONCLUSIÓN

Se propuso una metodología para estimar el potencial de reúso de agua tratada en una región, sustentado ello con información de acceso público en cuanto a la demanda de agua tratada en la agricultura, riego de áreas verdes, en la industria, en el lavado de automóviles y en las escuelas. Un aspecto valioso de la metodología propuesta es que prescinde de la necesidad de recopilar información en campo en cuanto al consumo de agua en las industrias; información que muy a menudo las empresas no están dispuestas a proporcionar.

### REFERENCIAS

[1] J.M. Morgan-Sagastume, M. Castro-Martínez y A. Noyola, A. Tecnologías para el desarrollo de un esquema integral de tratamiento de aguas residuales en la Península de Yucatán. 1ra ed., vol.1, Cancún, México. Editado por Amigos de Sian KAAN, (2022). Recuperado de: <https://www.amigosdesiankaan.org/guias-y-manuales/>

[2] Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte, SCIAN (2018). Instituto Nacional de Geografía e Informática, INEGI. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/app/scian/>

[3] L. Marston, Y. Ao, M. Konar, M. Mekonnen y A. Hoekstra. "High Resolution Water Footprints of production of the United States". Water Resources Research, 10.1002/2017WR021923. American Geophysical Union 2018. Recuperado de: <https://waterfootprint.org/en/resources/waterstat/wf-production-united-states/>

**XVII Congreso Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento, Saneamiento y Riego. (SERA23)**

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

*Tabla 2. Estimación de la demanda potencial de agua residual tratada por empleado en la industria manufacturera para el año 2019.*

<b>Código SCIAN</b>	<b>Nombre de la Industria</b>	<b>PIB Industrial anual (2019) en USD en México</b>	<b>No. Empleados por Industria en México 2019 (ENOE)</b>	<b>Producto Industrial por empleado al año (USD/emp.*año)</b>	<b>Empleados requeridos por cada 1000 USD de PIB al año (emp./1000 USD)</b>	<b>Consumo promedio de agua por industria en EUA (m<sup>3</sup>/1000 USD)</b>	<b>Consumo promedio de agua por industria en México por empleado (m<sup>3</sup>/emp./año)</b>	<b>Potencial de agua de primer uso a sustituir (%)</b>	<b>Demanda de agua residual tratada por industria (m<sup>3</sup>/emp./año)</b>
311	Industria alimentaria	\$32,535,512,023	616,119	\$52,807	0.0189	0.2671	14.10	30%	4.23
312	Industria de las bebidas y del tabaco	\$8,324,637,954	136,566	\$60,957	0.0164	2.4890	151.72	30%	45.51
313	Fabricación de insumos textiles	\$1,186,933,711	61,318	\$19,357	0.0517	0.8663	16.76	50%	8.38
314	Confección de productos textiles, excepto prendas de vestir	\$641,726,167	26,869	\$23,883	0.0419	0.5770	13.78	50%	6.89
315	Fabricación de prendas de vestir	\$2,775,271,711	148,673	\$18,667	0.0536	0.1427	2.66	50%	1.33
316	Fabricación de productos de cuero, piel y materiales sucedáneos, excepto prendas de vestir	\$1,020,831,259	75,427	\$13,534	0.0739	0.2570	3.47	30%	1.04
321	Industria de la madera	\$1,164,226,638	16,691	\$69,752	0.0143	1.4838	103.49	30%	31.04
322	Industria del papel	\$2,542,693,399	87,750	\$28,977	0.0345	6.3084	182.79	50%	91.39
323	Impresión e industrias conexas	\$874,253,371	36,068	\$24,239	0.0413	0.0555	1.34	30%	0.40
324	Fabricación de productos derivados del petróleo y del carbón	\$1,859,464,498	24,173	\$76,922	0.0130	4.1765	321.26	50%	160.63
325	Industria química	\$10,827,968,647	167,958	\$64,468	0.0155	3.4295	221.09	50%	110.54
326	Industria del plástico y del hule	\$3,996,582,178	245,782	\$16,261	0.0615	0.4913	7.98	50%	3.99
327	Fabricación de productos a base de	\$3,537,472,702	106,038	\$33,360	0.0300	3.2155	107.27	50%	53.63

**XVII Congreso Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento, Saneamiento y Riego. (SERA23)**

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Código SCIAN	Nombre de la Industria	PIB Industrial anual (2019) en USD en México	No. Empleados por Industria en México 2019 (ENOE)	Producto Industrial por empleado al año (USD/emp.*año)	Empleados requeridos por cada 1000 USD de PIB al año (emp./1000 USD)	Consumo promedio de agua por industria en EUA (m <sup>3</sup> /1000 USD)	Consumo promedio de agua por industria en México por empleado (m <sup>3</sup> /emp./año)	Potencial de agua de primer uso a sustituir (%)	Demanda de agua residual tratada por industria (m <sup>3</sup> /emp./año)
	minerales no metálicos								
331	Industrias metálicas básicas	\$8,197,690,146	98,509	\$83,218	0.0120	13.7275	1142.37	30%	342.71
332	Fabricación de productos metálicos	\$4,500,738,755	222,770	\$20,204	0.0495	0.0708	1.43	30%	0.42
333	Fabricación de maquinaria y equipo	\$5,561,033,428	121,014	\$45,954	0.0218	0.0880	4.04	30%	1.21
334	Fabricación de equipo de computación, comunicación, medición y de otros equipos, componentes y accesorios electrónicos	\$11,527,004,243	344,726	\$33,438	0.0299	0.0971	3.24	30%	0.97
335	Fabricación de equipo de generación eléctrica y aparatos y accesorios eléctricos	\$4,168,254,550	202,912	\$20,542	0.0487	0.0527	1.08	50%	0.54
336	Fabricación de equipo de transporte	\$28,790,933,616	1,051,155	\$27,390	0.0365	0.3410	9.33	50%	4.67
337	Fabricación de muebles, colchones y persianas	\$1,446,750,825	60,159	\$24,049	0.0416	0.1580	3.79	50%	1.89
339	Otras industrias manufactureras	\$3,179,446,157	194,477	\$16,349	0.0612	0.2539	4.15	30%	1.24

Fuente: Elaboración propia con datos de la Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo (ENOE): ([http://www.stps.gob.mx/bp/secciones/conoce/areas\\_atencion/areas\\_atencion/web/eim\\_scian.htm](http://www.stps.gob.mx/bp/secciones/conoce/areas_atencion/areas_atencion/web/eim_scian.htm), <https://www.inegi.org.mx/temas/pib/#Tabulados>) así como la huella hídrica para las industrias en EEUU [3], El tipo de cambio empleado para el PIB anual en USD en México fue el promedio anual 2019-2021 (BANXICO)



# SEREA23

XVII CONGRESO IBEROAMERICANO DE SISTEMAS  
DE ABASTECIMIENTO, SANEAMIENTO Y RIEGO

CÓRDOBA 11, 12 Y 15 DE JULIO DE 2023

**SMART WATER:**  
Transición hacia sistemas  
inteligentes, sostenibles y resilientes