



# **Metodología multicriterio para la selección de sitios para la reconversión tecnológica de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales**

Multi-criteria Methodology for the Selection of Sites for the Technological Reconversion of Municipal Wastewater Treatment Plants

*Víctor Manuel Mijangos Pulido<sup>1</sup> y José de Anda Sánchez<sup>2</sup>*

## **Resumen**

En México son muchos los ejemplos de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (PTARM) abandonadas o que se encuentran trabajando en condiciones precarias, debido principalmente a los elevados consumos de energía y a los altos costos de mantenimiento y operación (MyO). El objetivo de este trabajo de investigación es el de desarrollar una metodología para la evaluación de 26 PTARM dentro del estado de Jalisco en México fuera de operación o en condiciones de abandono, con la finalidad de seleccionar una de éstas para su recuperación y reconversión tecnológica a un sistema pasivo de tratamiento y con costos reducidos de MyO. El método desarrollado consta de 20 reactivos que evalúan diferentes criterios utilizando escalas de Likert. A cada reactivo le son asignados pesos ponderados de acuerdo con un orden de importancia. La evaluación favoreció aquellas PTARM que requieren un menor presupuesto para su intervención y utilizan sistemas pasivos de tratamiento. Se encontró que el método desarrollado es replicable y adaptable a otras regiones con una problemática similar, y abre la posibilidad, en ciertos casos, de recuperar paulatinamente la infraestructura existente. A través de este proceso se identificó y se logró la recuperación de una PTARM con una reducida inversión de recursos públicos.

---

<sup>1</sup> Maestría en Proyectos y Edificación Sustentables por el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, México. Gerente operativo del Consejo de Cuenca del Río Santiago y supervisor de proyectos de BioDAF Water Technology. Líneas de interés: análisis y gestión de infraestructuras y equipamientos sustentables, agua y saneamiento en comunidades rurales, gestión integral de los recursos hídricos. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5833-7245> Correo electrónico: [vmijangosp@gmail.com](mailto:vmijangosp@gmail.com), [gerencia@cocurs.mx](mailto:gerencia@cocurs.mx)

<sup>2</sup> Autor de correspondencia. Doctorado en Ciencias de la Tierra por el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México, México. Investigador en la Unidad de Tecnología Ambiental del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C., México. Líneas de interés: limnología, hidrología superficial, seguridad hídrica, métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales, manejo sustentable de recursos hídricos. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9521-5968> Correo electrónico: [janda@ciatej.mx](mailto:janda@ciatej.mx)



**Palabras clave:** plantas de tratamiento de aguas residuales municipales; métodos pasivos de tratamiento; reconversión tecnológica; recuperación de infraestructura de saneamiento; análisis multicriterio.

## Abstract

In Mexico, many municipal wastewater treatment plants (PTARM) are abandoned or working in precarious conditions, mainly due to high energy consumption and high maintenance and operation costs (MO). This research aims to develop a methodology for evaluating 26 PTARM within the state of Jalisco in Mexico, which are out of operation or in abandoned conditions to select one for its recovery and technological reconversion of a passive treatment system with reduced MO. The developed method consists of 20 items that evaluate different criteria using Likert scales, and we assigned weighted weights to each item according to an order of importance. The evaluation favored those PTARM that require a lower budget for their intervention and use passive treatment systems. We found that the developed method is replicable and adaptable to other regions with similar problems and opens the possibility, in some instances, of gradually recovering the existing infrastructure. Through this process, we identified and achieved the recovery of a PTARM with a reduced investment of public resources.

**Keywords:** multi-criteria analysis; municipal wastewater treatment plants; passive treatment methods; recovery of sanitation infrastructure; technological reconversion.

## Introducción

### Contexto global

El acceso al agua potable y saneamiento son derechos humanos ampliamente reconocidos por las naciones (UN, 2018). Los recursos hídricos son parte integral del bienestar social, del crecimiento económico y de los ecosistemas saludables. Sin embargo, el aumento poblacional, la agricultura intensiva, la urbanización e industrialización y el cambio climático han afectado los ecosistemas y su relación con el agua, disminuyendo sus funciones naturales y los servicios que proveen (UN, 2018). De acuerdo con los últimos datos reportados por la Organización de las Naciones Unidas (UN, 2018), alcanzar el Objetivo 6 de desarrollo sostenible de la Agenda 2030,<sup>3</sup> representa un gran

---

<sup>3</sup> Consistente en asegurar la disponibilidad y gestión sustentable del agua potable y su saneamiento universal.



reto para todos los países, no sólo aquellos de bajos ingresos. Existen aún 844 millones de personas en el mundo que carecen aún de un servicio básico de agua potable y 2 100 millones de personas que no cuentan con agua potable libre de contaminantes cuando la necesitan, es decir, agua potable gestionada de manera segura.

En cuanto a saneamiento se refiere, 2 300 millones de personas carecen de un servicio básico de saneamiento; de esta cifra, el 70 % habita en áreas rurales. Sumado a esto, 4 500 millones de personas en el mundo no cuentan con un servicio de saneamiento gestionado de manera segura (UN, 2018). La mayoría de las aguas residuales de origen municipal, industrial y agrícola son descargadas en cuerpos de agua sin ningún tipo de tratamiento; esta contaminación reduce la disponibilidad del agua para consumo humano y otros usos, además de degradar los ecosistemas (UN, 2018).

### **Contexto nacional**

En el año 2018 estaban registradas en el país 965 plantas potabilizadoras en operación que conformaban una capacidad total instalada de 144 835.01  $ls^{-1}$  y un caudal potabilizado de 110 252.2  $ls^{-1}$  (CONAGUA, 2019). Al cierre de 2019 el registro de plantas en operación aumentó a 979 unidades, con una capacidad instalada conjunta de 151 266.87  $ls^{-1}$  y un caudal potabilizado de 115 636.5  $ls^{-1}$ . Se observa que en el ejercicio se registró un aumento en el caudal total instalado y el caudal potabilizado (CONAGUA, 2019).

Al concluir el año 2018 existían registradas en el país, 2 540 plantas municipales de tratamiento en operación, con una capacidad total instalada de 181 152.22  $ls^{-1}$ , las que daban tratamiento a 137 698.61  $ls^{-1}$ , equivalentes al 64 % del agua residual generada y colectada en los sistemas municipales de alcantarillado del país (CONAGUA, 2019). Al cierre de 2019 el registro de plantas en operación aumentó a 2 642 instalaciones en relación con el año anterior, con una capacidad instalada de 194 715.32  $ls^{-1}$  y un caudal tratado de 141 479.04  $ls^{-1}$ ; incrementos que permitieron alcanzar una cobertura nacional de tratamiento de aguas residuales municipales del 65.7 % en el ejercicio de ese año (CONAGUA, 2019). El Cuadro 1 muestra los principales procesos utilizados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (PTARM) indicando el número de instalaciones y el caudal de operación del agua residual tratada ( $Q_{op}$ ).

**Cuadro 1. Principales procesos de tratamiento por número de instalaciones y caudal tratado**

Proceso	Núm.	%	$Q_{op}$ $ls^{-1}$	%
<b>Aerobio</b>	21	0.79	1 835.50	1.30
<b>Anaerobio</b>	158	5.98	843.00	0.60
<b>Biológico</b>	23	0.87	537.50	0.38
<b>Discos biológicos o biodiscos</b>	23	0.87	846.90	0.60



Dual	23	0.87	32 072.50	22.67
Filtros biológicos, rociadores o percoladores	39	1.48	4 907.10	3.47
Fosa séptica	100	3.79	144.70	0.10
Fosa séptica + filtro biológico	37	1.40	34.60	0.02
Fosa séptica + wetland	117	4.43	210.00	0.15
Humedales (wetland)	77	2.91	978.30	0.69
Lagunas aireadas	30	1.14	6 811.00	4.81
Lagunas de estabilización	792	29.98	14 059.70	9.94
Lodos activados	761	28.80	69 377.30	49.04
Primario avanzado	8	0.30	4 411.00	3.12
Primario o sedimentación	14	0.53	288.50	0.20
RAFA + filtro biológico	63	2.38	544.20	0.38
RAFA o UASB	140	5.30	1 201.40	0.85
RAFA + humedal o UASB + humedal	40	1.51	389.20	0.28
Reactor enzimático	39	1.48	89.5	0.06
Sedimentación + wetland	23	0.87	40.20	0.03
Tanque Imhoff	50	1.89	317.80	0.22
Tanque Imhoff + filtro biológico	17	0.64	152.10	0.11
Tanque Imhoff + wetland	11	0.42	58.20	0.04
Terciario	4	0.15	43.40	0.03
Zanjas de oxidación	14	0.53	1 019.60	0.72
Otro	18	0.68	265.70	0.19
<b>Total</b>	<b>2 642</b>	<b>100.00</b>	<b>141 478.90</b>	<b>100.00</b>

Fuente: elaboración propia con base en CONAGUA (2019).

### **Contexto estatal**

El estado de Jalisco tiene una superficie continental de 78 599 km<sup>2</sup> que se divide en 125 municipios. Su población al 2020 fue de 8 348 151 habitantes, de los cuales 5 268 642 habitantes viven en la zona metropolitana de Guadalajara (ZMG) lo que representa un 63.11 % de la población total del estado (IIEG, 2020). Las coberturas de acceso al agua potable y alcantarillado en el estado al 2019 fue del 95.7 % y 92.6 % respectivamente (MIDE Jalisco, 2020a, 2020b). Por otra parte, CONAGUA reportó al 2019, 149 PTARM activas en el estado, con una capacidad instalada de 15.813 ls<sup>-1</sup> y un caudal tratado de 10.730 ls<sup>-1</sup> (CONAGUA, 2019) (Cuadro 2).



**Cuadro 2. Principales procesos de PTARM en Jalisco por número de instalaciones y caudal tratado**

Proceso	Núm.	%	Q <sub>op</sub> ls <sup>-1</sup>	%
<b>Aerobio</b>	-		-	-
<b>Anaerobio</b>	-		-	-
<b>Biológico</b>	-		-	-
Discos biológicos o biodiscos	1		5.00	0.05
Dual	-		-	-
Filtros biológicos, rociadores o percoladores	5		444.00	4.14
Fosa séptica	-		-	-
Fosa séptica + filtro biológico	-		-	-
Fosa séptica + wetland	1		10.00	0.09
Humedales (wetland)	5		23.00	0.21
Lagunas aireadas	2		19.00	0.18
Lagunas de estabilización	9		87.00	0.81
Lodos activados	94		9 958.00	92.81
Primario avanzado	-		-	-
Primario o sedimentación	1		2.00	0.02
RAFA + filtro biológico	-		-	-
RAFA o UASB	27		77.00	0.72
RAFA + humedal o UASB + humedal	-		-	-
Reactor enzimático	-		-	-
Sedimentación + wetland	-		-	-
Tanque Imhoff	1		7.00	0.07
Tanque Imhoff + filtro biológico	2		90.00	0.84
Tanque Imhoff + wetland	1		8.00	0.07
Terciario	-		-	-
Zanjas de oxidación	-		-	-
Otro	-		-	-
<b>Total</b>	<b>149</b>		<b>10 730.00</b>	<b>100.00</b>

Fuente: elaboración propia con base en CONAGUA (2019).

### **Sistemas centralizados de tratamiento de aguas residuales**

La mayoría de las tecnologías implementadas en los municipios del país para el tratamiento de las aguas residuales sanitarias se basan en sistemas centralizados convencionales (De Anda-Sánchez, 2017). Los sistemas centralizados para el tratamiento del agua residual se componen por lo general de un sistema de recolección (drenaje) que colecta el agua residual que se produce y un sistema de tratamiento de aguas residuales centralizado en una planta de tratamiento que posteriormente dispone o reutiliza el efluente tratado (CONAGUA, 2016). De acuerdo con los Cuadros 1 y 2, la



principal tecnología en las PTARM en México es la de lodos activados, la cual se basa en la degradación biológica intensiva, con tiempos relativamente cortos y en un espacio confinado, lo que resulta conveniente sobre todo en áreas urbanas densamente pobladas donde el costo de la tierra es alto (De Anda-Sánchez, 2017). Estos sistemas ofrecen una gran eficiencia en la remoción de contaminantes, pero requieren para su operación de un elevado consumo energético y personal altamente calificado, además de una inversión importante en su diseño y construcción. Sus altos costos de mantenimiento y operación (MyO) requieren de condiciones económicas estables en los municipios a fin de solventar los gastos (CONAGUA, 2016).

Así pues, la inversión inicial y los gastos de MyO de un sistema convencional de tratamiento de aguas residuales para dar servicio a pequeñas poblaciones de bajos ingresos, a la larga se convierte en una carga financiera que no pueden sostener (De Anda y Shear, 2021). Proporcionar servicios de bajos costos de MyO para el tratamiento de aguas residuales de forma confiable y asequible en zonas urbanas, periurbanas y rurales es un reto cada vez mayor en muchas partes del mundo, particularmente en los países en desarrollo (Massoud *et al.*, 2009).

En México, la gestión de recursos económicos que requiere la construcción de una PTARM es un proceso complicado. Además de esto, los municipios deben adquirir las capacidades administrativas y de operación (De Anda y Shear, 2021). Una vez que se logra el objetivo de instalación, y después de algún tiempo de mantenerlas en operación, los municipios se dan cuenta de que no tienen los recursos suficientes para su funcionamiento y deciden cancelar los recursos que financian su operación, por lo que las instalaciones terminan siendo abandonadas (De Anda y Shear, 2021).

### **La descentralización de los sistemas de tratamiento**

El enfoque descentralizado de tratamiento de aguas residuales está ganando cada vez más atención, principalmente en los países en vías de desarrollo (Massoud *et al.*, 2009). Estos sistemas emplean una combinación de sistemas *in situ* o en grupos de pequeñas comunidades. A diferencia de los sistemas centralizados, los sistemas descentralizados por lo general son los más indicados para las comunidades en donde hay baja densificación urbana, tales como las zonas rurales o las zonas periurbanas (Massoud *et al.*, 2009).

El uso de este tipo de sistemas requiere menores costos en infraestructura de alcantarillado o drenaje. Su expansión, en caso de requerirse, es modular y por etapas; esto reduce la necesidad de una gran inversión inicial y puede irse financiando a medida que aumenta la demanda de la población (Massoud *et al.*, 2009). Otra ventaja que considerar es la disminución de riesgos ambientales, ya que en estos sistemas se manejan caudales menores, lo que implica menor daño ambiental en caso de alguna falla. En sí mismo, estos sistemas utilizan tecnologías más simples que son menos susceptibles de presentar alguna falla, y al utilizar la estrategia de descentralización, la



probabilidad de una falla simultánea en todas las plantas es significativamente menor a la de una planta central (CONAGUA, 2016).

Los sistemas descentralizados de saneamiento no sólo reducen los riesgos sobre el medio ambiente y la salud pública local, sino que también, cuando se utilizan de forma efectiva, promueven el retorno de las aguas residuales tratadas dentro de la cuenca de origen y aumentan las posibilidades de reutilización final de las aguas residuales (De Anda-Sánchez, 2017; De Anda y Shear, 2021). Actualmente, las comunidades están considerando otras fuentes no tradicionales para satisfacer sus crecientes necesidades de suministro de agua. La recuperación y reutilización de agua tratada es una práctica conocida, sin embargo, los niveles actuales de reutilización constituyen sólo una pequeña fracción del volumen total de los efluentes tratados (Miller, 2006).

### **La reutilización de las aguas residuales tratadas**

La reutilización del agua residual tratada ofrece una amplia gama de beneficios para las comunidades y el medio ambiente, sin embargo, éstos pueden ser difíciles de cuantificar y, a menudo, no se reconocen (Miller, 2006). El valor creado por la inclusión de la reutilización del agua en la planificación integrada de los recursos hídricos, así como en la implementación de proyectos, resulta en la sustentabilidad a largo plazo de los recursos hídricos. Los proyectos actuales de reutilización de agua tratada necesitan de tecnologías innovadoras y nuevas aplicaciones, mayor aceptación pública, mejor documentación de sus beneficios, fondos disponibles para proyectos, una mayor difusión, y fomento legal (Miller, 2006).

La reutilización en agricultura de las aguas residuales tratadas es una opción que se está estudiando y adoptando cada vez más para afrontar la escasez de agua. Muchas regiones del mundo están experimentando crecientes problemas de déficits hídricos debido a un incremento desmedido en la demanda de agua frente a unos recursos hídricos estáticos o en disminución (FAO, 2013). Además de estas presiones, de acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2013), el cambio climático podría llevar a una situación en la que de uno a dos mil millones de personas no cuenten con agua suficiente para satisfacer sus necesidades de consumo, higiene y alimentarias.

En México, CONAGUA estima que al 2017 se reusaban directamente (antes de su descarga)  $39.8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  (47.6 %) de aguas residuales tratadas. En tanto que se reusaban indirectamente (después de su descarga a un cuerpo receptor) para riego agrícola y otros usos,  $78.8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , 94.2 % del caudal tratado total. El intercambio de aguas residuales tratadas, en el que substituyen agua de primer uso, se estimaba en  $8.6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , esto representa solamente el 10.3 % del volumen total de aguas tratadas (CONAGUA, 2018).



## **Alternativas sustentables en el tratamiento de aguas residuales**

Los sistemas basados en procesos naturales para el tratamiento de diversos tipos de aguas residuales tienen un largo historial en su utilización y por mucho tiempo se han considerado una solución muy atractiva debido a los bajos costos de inversión, mantenimiento y operación (Rozkošný *et al.*, 2014). Las tecnologías de tratamiento extensivas, tales como los humedales artificiales, biofiltros plantados o las lagunas de estabilización, están usando procesos que ocurren en hábitats naturales, pero lo hacen de manera más controlada (Rozkošný *et al.*, 2014). Sin embargo, a pesar de la creciente experiencia en la aplicación de estos sistemas, la evidencia sugiere que no superan el 1 % de la inversión total en infraestructura para la gestión de los recursos hídricos utilizando este tipo de sistemas (UN, 2018).

Los sistemas basados en procesos naturales para la depuración de las aguas residuales municipales propician la reutilización del agua residual tratada. Con esto se fortalece el “Crecimiento verde”, el cual promueve el uso sustentable de los recursos naturales (Show, 2010). Estos sistemas favorecen el progreso hacia una producción sostenible de alimentos, mejoran los asentamientos urbanos, el acceso a suministros de agua potable y saneamiento, además de ser una alternativa que puede contrarrestar los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos (WWAP, 2018).

## **Procesos aerobios y anaerobios de tratamiento**

Durante la última década se han desarrollado nuevos sistemas basados en procesos anaerobios avanzados, tales como el reactor anaerobio de flujo ascendente y el filtro anaerobio de flujo ascendente, con una diferencia significativa entre el tiempo de retención hidráulica y el tiempo de retención de sólidos (Abdel-Halim *et al.*, 2008). Estos sistemas ofrecen buenas oportunidades para el tratamiento de una gran variedad de aguas residuales industriales con contenidos medios y altos de carga orgánica, así como para el tratamiento de las aguas residuales domésticas y municipales de baja carga orgánica (Mara, 2003).

No obstante, los sistemas aerobios mantienen la ventaja de proveer una calidad superior de agua tratada, y por este motivo, son ampliamente utilizados. Para poder aprovechar los beneficios ya mencionados de los sistemas anaerobios, a estos sistemas debe seguir un proceso aerobio que termine de degradar la materia orgánica del efluente anaerobio. Una combinación de sistemas anaerobios con sistemas aerobios disminuye notoriamente los costos de operación y mantenimiento en una planta de tratamiento, ya que reduce el consumo energético y la producción de lodos (Noyola *et al.*, 2013).

De esta forma, los sistemas anaerobios pueden combinarse con sistemas facultativos y aerobios, tales como las lagunas de estabilización, biofiltros y humedales artificiales, los cuales son sistemas de bajo costo de instalación, de





bajo consumo energético y permiten cumplir con los estándares de calidad en la descarga, además de que generan espacios amigables con el entorno (Mara, 2003). En el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ) se desarrolló un método para tratar aguas residuales basado en procesos anaerobios y humedales artificiales plantados con especies ornamentales. Las aguas residuales tratadas mediante este sistema cumplen con los requisitos de la NOM-001-SEMARNAT-1996 que regula las descargas de las aguas residuales tratadas vertidas a cuerpos de agua nacionales (De Anda-Sánchez y López-López, 2016).

### **La problemática de abandono de las PTARM**

En Latinoamérica, son muchos los ejemplos de PTARM abandonadas o que se encuentran trabajando en condiciones precarias. El hecho de que los periodos de la administración municipal sean relativamente cortos, hace que las instituciones de agua y saneamiento enfrenten la pérdida periódica de conocimiento y experiencia, además de repetir la negociación de sus presupuestos anuales. Tal situación se ve agravada por la frecuente ausencia de planeación a mediano y largo plazo en el ámbito de los gobiernos municipales (Noyola *et al.*, 2013). Las entrevistas con funcionarios y operadores de los servicios de agua y alcantarillado en algunos de los municipios del estado de Jalisco indican que la razón principal por la que muchas de las PTARM dejaron de operar, se debe a los elevados consumos de energía y a los altos costos de MyO. Algunos de los municipios del estado que cuentan con una PTARM centralizada, adicionales a los costos de MyO, cuentan con pasivos importantes derivados de la deuda adquirida para la construcción de ésta (De Anda y Shear, 2016).

En Jalisco, la información publicada por la Comisión Estatal del Agua indica que más de la mitad de las PTARM del estado se encuentran fuera de operación o dadas de baja, lo que significa que una inversión muy importante del estado en este rubro no generó los beneficios esperados por la sociedad (CEA Jalisco, 2019a). Esta situación se puede contemplar en la mayoría de los estados del país, en donde los ecosistemas fluviales, lacustres y de aguas subterráneas (acuíferos) han sufrido diversos grados de degradación debido al vertido de aguas sin tratar en cuerpos de agua superficiales o bien a su infiltración al subsuelo (De Anda-Sánchez, 2017; De Anda y Shear, 2021).

Con la finalidad de contribuir a dar solución a la problemática que afrontan los municipios del estado de Jalisco en cuanto a contar con infraestructura para el saneamiento de sus aguas residuales municipales, el Gobierno del Estado de Jalisco a través de la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (SEMADET) consideró un presupuesto de MXN 900 000.00 para recuperar la funcionalidad de una PTARM que estuviera en condiciones de abandono. En caso de requerirse recursos adicionales éstos tendrían que ser sufragados por el municipio.



El objetivo de este trabajo de investigación es el de desarrollar una metodología para la selección de una PTRAM dentro del estado de Jalisco fuera de operación o en condiciones de abandono con la finalidad de lograr su recuperación. El proyecto de recuperación está sustentado en la hipótesis de que para que una PTRAM pueda permanecer funcionando en el mediano y largo plazo el agua tratada deberá tener un valor social. Para ello la gobernanza del agua a nivel local es indispensable para que tanto el agua potable como el agua residual sea vista como un recurso para ser administrado de forma sustentable por las partes involucradas. Esta hipótesis se fundamenta en los principios de la economía circular en donde se busca generar un beneficio económico, social y ambiental a partir de la reutilización del agua residual tratada en agricultura (Anderson, 2003; Geng *et al.*, 2012).

## Metodología

En la literatura no se localizaron fuentes de información que permitieran conocer los criterios bajo los cuales se pueda aplicar una metodología con los propósitos planteados, por lo que se considera que éste será uno de los primeros esfuerzos que se realizan en este sentido. La metodología aplicada se basa en el desarrollo de reactivos evaluados de acuerdo con una escala de Likert. Las llamadas “escalas Likert” son instrumentos psicométricos donde el encuestado debe indicar su acuerdo o desacuerdo sobre una afirmación, ítem o reactivo, lo que se realiza a través de una escala ordenada y unidimensional (Edmonson, 2005; Boone y Boone, 2012). No obstante que la técnica fue desarrollada por Rensis Likert en 1932 para medir actitudes en el campo de la psicología, estos instrumentos ya han sido reconocidos entre los más utilizados para la medición en otros campos de las ciencias sociales y económicas, entre otras (Méndez-Hinojosa y Peña-Moreno, 2006; Matas, 2018). En la literatura se reportan varios trabajos relacionados con la resolución de problemas ambientales que se fundamentan en la aplicación de métodos basados en la escala de Likert (Yigitcanlar y Dur, 2010; Shen *et al.*, 2011; Kaminsky y Javernick-Will, 2013).

Por otra parte, el método de análisis multicriterio es un instrumento que permite trabajar con varios criterios a la vez e identificar la importancia relativa de cada uno para evaluar entre distintas alternativas de proyecto, independiente de la naturaleza de los factores que están implícitos en una situación específica (Pacheco y Contreras, 2008). La metodología descompone un problema complejo en partes más simples permitiendo que el agente “decisor” pueda estructurar un problema con múltiples criterios en forma visual, mediante la construcción de un modelo jerárquico (Romero, 1996).

Para lograr el objetivo que se pretende en este trabajo se diseñó un proceso de toma de decisión basado en una metodología multicriterio y en la evaluación de los criterios definidos por un panel de expertos de acuerdo con una escala de Likert. Para ello se desarrollaron 20 reactivos que evalúan las



características propias de la PTARM y las aguas residuales tratadas, además de considerar las dificultades técnicas al llevar a cabo una reconversión tecnológica en los procesos de tratamiento. Cada uno de los 20 reactivos de Likert fue diseñado considerando las recomendaciones de la *Water Environment Federation* que han publicado criterios de selección y diseño de PTARM (WEF, 2010). Dichos criterios fueron revisados, analizados y ponderados por un panel de expertos procedentes de una universidad y un centro público de investigación locales (ITESO y CIATEJ), los cuales cuentan con capacidades reconocidas en diferentes campos de las ciencias del agua, entre las que destacan: saneamiento de aguas residuales, calidad del agua, economía, sociología y gobernanza. Los criterios se evaluaron por el panel de expertos de acuerdo con una escala de 1 a 5 ( $E_i$ ) (Munshi, 2014). Cada criterio se ponderó en una escala de 0 a 100 de acuerdo con un orden de importancia ( $W_i$ ). De esta forma se obtiene el puntaje total ( $P_i$ ) utilizando el siguiente algoritmo para evaluar cada sitio (Ecuación 1):

$$P_i = \sum_{i=1}^{20} W_i E_i \quad ; \quad \sum_{i=1}^{20} W_i = 100$$

(Ecuación 1)

Las fuentes de información para la evaluación de los reactivos seleccionados fueron las siguientes:

- a. Entrevistas con las autoridades y los responsables de los servicios de agua y saneamiento municipales.
- b. Levantamiento fotográfico de cada PTRAM visitada.
- c. Las fichas técnicas hidrológicas municipales publicadas por la Comisión Estatal del Agua del estado de Jalisco.
- d. Los diagnósticos municipales desarrollados por el Instituto de Información Estadística y Geográfica del Estado de Jalisco (IEEG, 2018).
- e. Artículos indizados y libros con ISBN.
- f. Otras fuentes de información complementarias localizables en Internet.

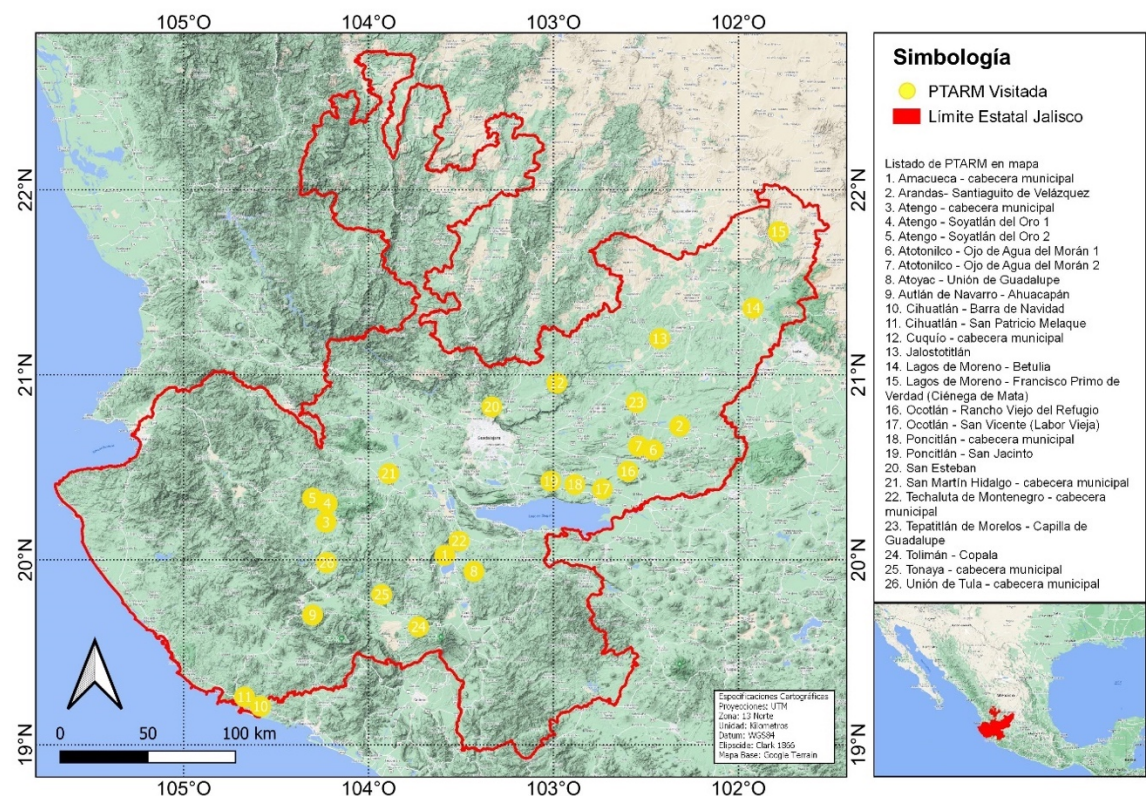
### **Selección de los municipios a visitar**

El listado de PTARM a visitar se estableció de acuerdo con un inventario de PTARM fuera de operación o abandonadas que proporcionó la CEA y la atención a solicitudes expresas de los municipios. Una vez definidos los reactivos, cada una de las PTARM fue evaluada de acuerdo con la



información obtenida en visitas de campo y la información obtenida de las fuentes previamente mencionadas. De las visitas de campo se generó un archivo fotográfico de los sitios y un informe técnico de las condiciones físicas en las que se encontró cada PTARM visitada, así como sus características tecnológicas de operación. La selección de los 26 sitios a visitar, localizados en diferentes puntos de la geografía del estado de Jalisco, se enlista a continuación (municipio – localidad) y se pueden ubicar en la Figura 1.

**Figura 1. Mapa indicando los sitios visitados en el estado de Jalisco**



Fuente: elaboración propia con imagen tomada de Google Earth.

### **Definición de los reactivos de evaluación**

La evaluación de los 26 sitios seleccionados está basada en el diseño de 20 reactivos, con una escala de Likert ( $E_i$ ) que valora cada uno de acuerdo con el criterio a calificar. Los reactivos fueron clasificados de acuerdo con criterios que evalúan de la siguiente forma:

- a. Condiciones generales de la infraestructura de saneamiento
- b. Tecnología de tratamiento y condiciones físicas de la PTARM
- c. Calidad del agua



- d. Factibilidad técnica para implementar el proyecto
- e. Riesgos
- f. Presupuesto

Los reactivos que se clasifican en la Categoría “a” (Condiciones generales de la infraestructura de saneamiento) evalúan el alcance que podría tener una intervención al sitio, como es el número de personas que se verán beneficiadas con la obra, lo cual se ve reflejado en el aforo de agua a tratar. Para evaluar este reactivo también se considera el número de habitantes que están conectados al sistema de tratamiento, así como las coberturas de agua potable y alcantarillado del municipio. Este criterio nos da una idea del alcance que tendrá el proyecto una vez implementado, en el cual se busca que los sitios seleccionados ofrezcan el mayor beneficio social y ambiental dentro de las posibilidades establecidas en el proyecto.

Los reactivos que se clasifican en la Categoría “b” (Tecnología de tratamiento y condiciones físicas de la PTARM) están orientados a favorecer los sitios cuyas instalaciones y tecnología utilizada para su operación tienen mejores posibilidades de ser rehabilitadas y reconvertidas a un sistema de tratamiento de bajo consumo energético y reducidos gastos de MyO, en comparación con los sistemas que trabajan con procesos convencionales. En este aspecto es preferible elegir sistemas pasivos de tratamiento, es decir, aquellas PTARM que utilizan procesos anaerobios seguidos de un proceso aerobio, en lugar de los sistemas aerobios intensivos, aunque existen ciertas infraestructuras de estos últimos con posibilidades de ser reconvertidas.

La evaluación también contempla un reactivo en la Categoría “c” (Calidad del agua) para considerar en el proyecto el tipo de contaminantes de acuerdo con una clasificación de las aguas residuales generadas en la población, las cuales deberán ser aptas para el sistema biológico de depuración que se propone. Por otra parte, los reactivos de la Categoría “d” (Factibilidad técnica para implementar el proyecto) valoran la factibilidad técnica de implementar la reconversión o rehabilitación de una PTARM de acuerdo con la situación actual de su funcionamiento y el estado de su infraestructura, además de aspectos propios del sitio como es el espacio disponible, la accesibilidad y las características del terreno, con la finalidad de anticipar cualquier impedimento en la ejecución del proyecto. Los riesgos asociados al sitio, como inundaciones o deslaves, también son un criterio que se califica en los reactivos de la Categoría “e”, pues existen circunstancias externas que podrían complicar la ejecución del proyecto.

Uno de los aspectos más importantes en la evaluación de sitios, acorde con las limitantes económicas propias del proyecto, son los costos estimados que conlleva la rehabilitación de la infraestructura y reconversión tecnológica del sistema de tratamiento. Para esto se definió un reactivo en la categoría “f” (Presupuesto) que considera un rango de costo en millones de



pesos (MXN), el cual favorece aquellos sitios que requieren una menor inversión. A continuación, se muestran los 20 reactivos planteados en la evaluación de manera individual, con la descripción de cada escala de Likert, y siguiendo el orden de las categorías antes mencionadas.

### **Condiciones generales de la infraestructura de saneamiento**

- 1) La situación actual de la PTARM permite implementar el proyecto. De acuerdo con el inventario reportado por la CEA Jalisco (2019b) y lo revisado en visitas de campo.

1	2	3	4	5
En operación	En operación a baja capacidad	En operación intermitente	Fuera de operación	En estado de abandono

- 2) Se cuenta con cobertura de agua potable. Diagnóstico municipal (MIDE Jalisco, 2020a).

1	2	3	4	5
> 0 a ≤ 30 %	> 30 % a ≤ 50 %	> 50 % a ≤ 75 %	> 75 % a ≤ 95 %	> 95 % a ≤ 100 %

- 3) Se cuenta con cobertura de alcantarillado. Diagnóstico municipal (MIDE Jalisco, 2020b).

1	2	3	4	5
> 0 a ≤ 30 %	> 30 % a ≤ 50 %	> 50 % a ≤ 75 %	> 75 % a ≤ 95 %	> 95 % a ≤ 100 %

- 4) El número de habitantes conectados a la PTARM existente es representativo para el proyecto (cifras reportadas en número de habitantes). De acuerdo con el último censo de población disponible (IIEG, 2020). Se considera "0" si la población atendida es mayor a 10 000 habitantes.

1	2	3	4	5
> 0 a ≤ 1 000	> 1 000 a ≤ 2 000	> 2 000 a ≤ 3 000	> 3 000 a ≤ 5 000	> 5 000 a ≤ 10 000

- 5) El aforo del agua residual de la PTARM existente es el adecuado para el proyecto (cifras en litros por segundo). Tomando el número de habitantes conectados a la red y un promedio de consumo de agua diario de acuerdo con el tipo de población.

1	2	3	4	5
> 1 a ≤ 3	> 3 a ≤ 5	> 5 a ≤ 7	> 7 a ≤ 10	> 10



### **Tecnología y estado de la PTARM**

- 1) La tecnología de tratamiento existente en la PTARM es apropiada para el proyecto de rehabilitación o reconversión. Las lagunas de estabilización comprenden lagunas aerobias, facultativas o de aireación extendida.

1	2	3	4	5
Biodiscos, lodos activados convencional	Sistemas aerobios con capacidad de reconversión	Combinación de sistemas aerobios y anaerobios	Sistemas anaerobios y/o lagunas de estabilización	Sistemas anaerobios y humedales artificiales

- 2) El estado de las instalaciones de la planta de tratamiento permite considerarla para su rehabilitación y/o reconversión (cifras reportadas en años de abandono o fuera de operación). Se considera "0" si se encuentra en operación, o si el abandono ha sido mayor a 15 años.

1	2	3	4	5
> 10 a ≤ 15	> 5 a ≤ 10	> 3 a ≤ 5	> 1 a ≤ 3	> 0 a ≤ 1

### **Calidad del agua**

- 1) Las actividades desarrolladas por la comunidad permiten tratar las aguas con un sistema biológico natural (Tchobanoglous *et al.*, 2002).

1	2	3	4	5
Agua con residuos industriales	Agua residual municipal fuerte	Agua residual municipal débil	Agua con alta carga orgánica	Agua residual municipal media

### **Factibilidad técnica para la implementación**

- 1) El espacio disponible en la PTARM existente es apropiado para instalar un proceso de fitodepuración (cifras reportadas en metros cuadrados). Se considera "0" si no hay espacio disponible.

1	2	3	4	5
> 0 a ≤ 1 000	> 1 000 a ≤ 2 000	> 2 000 a ≤ 5 000	> 5 000 a ≤ 10 000	> 10 000

- 2) El predio cuenta con vías de acceso para el traslado de maquinaria y equipo de construcción, y para el acarreo de materiales.

1	2	3	4	5
Brecha	Terracería	Balastos	Revestido con material base	Revestido con asfalto



- 3) Cercano al predio existen bancos de materiales con explotación de los materiales requeridos por el proyecto (cifras reportadas en kilómetros de distancia del predio donde se localiza la PTARM).

1	2	3	4	5
> 100	> 75 a ≤ 100	> 50 a ≤ 75	> 25 a ≤ 50	> 0 a ≤ 25

- 4) La topografía del terreno es adecuada para las obras de conducción. De acuerdo con el nivel de pendiente (expresado en %).

1	2	3	4	5
Fuertemente socavado (>30 %)	Colinado (> 16 a ≤ 30 %)	Fuertemente ondulado (> 8 a ≤ 16 %)	Ondulado (> 2 a ≤ 8 %)	Llano (≤ 2 %)

- 5) El tipo de material del suelo en el predio permite realizar las obras requeridas por el proyecto. De acuerdo con la clasificación de materiales de excavación (OSHA, 2014).

1	2	3	4	5
Material rocoso (C)	Material de consistencia sólida (B II)	Material de difícil extracción (B)	Material blando (A I)	Material muy suelto (A)

- 6) El tipo de suelo es adecuado para la construcción de las celdas de fitorremediación. De acuerdo con la clasificación de tipos de suelo (OSHA, 2014).

1	2	3	4	5
Suelo granular inestable (C)	Suelo intermedio "B-C"	Suelo cohesivo con fisura (B)	Suelo intermedio "A-B"	Suelo cohesivo (A)

- 7) Las obras de descarga del agua residual tratada se encuentran cercanas al predio (cifras reportadas en metros).

1	2	3	4	5
> 1 000	> 500 a ≤ 1 000	>250 a ≤ 500	>100 a ≤ 250	> 0 a ≤ 250

- 8) Las obras de conducción al área de reutilización del agua tratada se encuentran cercanas al predio (cifras reportadas en metros).

1	2	3	4	5
> 1,000	> 500 a ≤ 1 000	>250 a ≤ 500	>100 a ≤ 250	> 0 a ≤ 250





## **Riesgos**

- 1) La profundidad del acuífero local en el predio es suficiente para asegurar que no habrá problemas de construcción (cifras reportadas en metros).

1	2	3	4	5
> 0 a ≤ 5	> 5 a ≤ 10	> 10 a ≤ 15	> 15 a ≤ 25	> 25

- 2) La topografía del terreno permite asegurar que no habrá deslizamientos de tierras.

1	2	3	4	5
Muy alto	Alto	Medio	Bajo	Muy bajo

- 3) Es bajo el riesgo de inundaciones en el predio. Se refiere a la existencia de ríos, lagos o humedales cercanos al predio que puedan desbordar durante las lluvias.

1	2	3	4	5
Muy alto	Alto	Medio	Bajo	Muy bajo

## **Presupuesto**

El presupuesto estimado para la rehabilitación y/o reconversión es suficiente para llevar a cabo las obras de rehabilitación y/o reconversión de la planta de tratamiento (cifras en millones de pesos).

1	2	3	4	5
≥ 8	≥ 6 a < 8	≥ 4 a < 6	≥ 2 a < 4	< 2

Nota: En caso de que no se cuente con la información suficiente para valorar alguno de los reactivos presentados, la calificación en las escalas de Likert será 0.

## **Ponderación de reactivos de Likert**

Una vez definidos los 20 reactivos y sus escalas de Likert correspondientes, fue necesario ponderar cada reactivo, asignando un peso específico a cada uno, lo cual permitió establecer un orden de importancia de acuerdo con la relevancia de cada criterio a evaluar. Este orden de importancia considera nueve valores para la ponderación ( $W_i$ ) de los reactivos, los cuales se asignaron utilizando una fórmula específica para el proceso de ponderación (Romero, 1996: 28) (Ecuación 2):

$$W_i = \frac{1/r_i}{\sum_{i=1}^n 1/r_i}$$

(Ecuación 2)



En el orden de importancia planteado, se asignó el mayor peso al reactivo 20, que evalúa el presupuesto estimado del proyecto. El reactivo 5, que evalúa el aforo del agua residual es el segundo en orden de importancia, seguido del reactivo 3, referente a la tecnología de tratamiento de la PTARM. Los reactivos 7 y 9 son los siguientes en el orden de importancia, los cuales evalúan las condiciones de la infraestructura y el sitio. De forma consecutiva, se asignó un peso al resto de los reactivos utilizando la fórmula y siguiendo el orden de importancia. La ponderación completa de este ejercicio se muestra en el Cuadro 3.

**Cuadro 3. Pesos ponderados ( $W_i$ ) seleccionados para los reactivos de Likert**

Núm.	I*	Descripción del reactivo de Likert	$W_i \cdot 100$
20	1	El presupuesto estimado para la rehabilitación y/o reconversión es suficiente para llevar a cabo las obras de rehabilitación y/o reconversión de la planta de tratamiento.	35.4
5	2	El aforo del agua residual de la PTAR existente es el adecuado para el proyecto.	17.7
6	3	La tecnología de tratamiento existente en la PTAR es apropiada para el proyecto de rehabilitación o reconversión.	11.8
7	4	El estado de las instalaciones de la planta de tratamiento permite considerarla para su rehabilitación y/o reconversión.	8.8
9	4	El espacio disponible en la PTAR existente es apropiado para instalar un proceso de fitodepuración.	8.8
4	5	El número de habitantes conectados a la PTARM existente es representativo para el proyecto.	7.1
1	6	La situación actual de la PTAR permite implementar el proyecto.	5.9
8	7	Las actividades desarrolladas por la comunidad permiten tratar las aguas con un sistema biológico natural.	5.0
10	7	El predio cuenta con vías de acceso para el traslado de maquinaria y equipo de construcción, y para el acarreo de materiales.	5.0
12	7	La topografía del terreno es adecuada para las obras de conducción.	5.0
17	7	La profundidad del acuífero local en el predio es suficiente para asegurar que no habrá problemas de construcción.	5.0
18	7	La topografía del terreno permite asegurar que no habrá deslizamientos de tierras.	5.0
19	7	Es bajo el riesgo de inundaciones en el predio.	5.0
2	8	Se cuenta con cobertura de agua potable.	4.4
3	8	Se cuenta con cobertura de alcantarillado.	4.4
11	8	Cercano al predio existen bancos de los que se puede extraer los materiales que requiere el proyecto.	4.4
13	8	El tipo de material del suelo en el predio permite realizar las obras requeridas por el proyecto.	4.4
14	8	El tipo de suelo es adecuado para la construcción de las celdas de fitorremediación.	4.4



<b>15</b>	9	Las obras de descarga del agua residual tratada se encuentran cercanas al predio.	3.9
<b>16</b>	9	Las obras de conducción al área de reutilización del agua tratada se encuentran cercanas al predio.	3.9

\*I = Importancia

Fuente: elaboración propia.

## Resultados

El Cuadro 4 muestra los resultados de la evaluación en las escalas de Likert de los 20 reactivos (columnas), de acuerdo con los pesos ponderados, para cada uno de los 26 sitios visitados (filas de acuerdo con el listado presentado en orden alfabético).

**Cuadro 4. Resultados por reactivo (columnas)  
de cada sitio (filas) evaluado**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Σ
1	23.6	22.0	17.6	35.5	53.1	11.8	35.2	15	26.4	20	13.2	25	22.0	17.6	19.5	11.7	20	25	25	106	<b>545.4</b>
2	29.5	17.6	22.0	14.2	35.4	59.0	26.4	15	26.4	10	13.2	25	22.0	22.0	19.5	19.5	25	25	25	177	<b>628.7</b>
3	29.5	17.6	17.6	28.4	17.7	59.0	26.4	15	26.4	10	13.2	25	22.0	22.0	19.5	19.5	15	25	25	177	<b>610.8</b>
4	5.9	17.6	17.6	21.3	17.7	11.8	17.6	25	8.8	10	13.2	15	13.2	13.2	11.7	11.7	15	15	15	106	<b>382.5</b>
5	5.9	17.6	17.6	21.3	0	0	26.4	15	8.8	10	13.2	15	13.2	13.2	11.7	11.7	15	15	15	106	<b>351.8</b>
6	29.5	17.6	22.0	21.3	35.4	59.0	35.2	25	35.2	10	22.0	25	22.0	22.0	19.5	19.5	20	25	25	142	<b>631.8</b>
7	29.5	17.6	22.0	21.3	17.7	59.0	26.4	25	26.4	5	13.2	5	22.0	22.0	11.7	11.7	25	10	10	177	<b>557.5</b>
8	23.6	17.6	22.0	7.1	17.7	59.0	26.4	25	26.4	10	13.2	15	17.6	17.6	11.7	11.7	20	20	15	177	<b>553.6</b>
9	29.5	17.6	22.0	7.1	35.4	23.6	44.0	25	44.0	10	17.6	20	22.0	22.0	19.5	19.5	15	25	25	177	<b>620.8</b>
10	29.5	17.6	22.0	28.4	53.1	47.2	8.8	25	44.0	25	22.0	25	22.0	22.0	19.5	19.5	25	25	25	35.4	<b>541.0</b>
11	29.5	17.6	22.0	35.5	88.5	23.6	17.6	25	0	10	22.0	20	22.0	22.0	19.5	19.5	25	25	5	35.4	<b>484.7</b>
12	23.6	22.0	17.6	28.4	88.5	23.6	44.0	25	44.0	10	22.0	25	22.0	22.0	19.5	19.5	25	25	25	106	<b>637.9</b>
13	5.9	22.0	22.0	35.5	88.5	59.0	0	20	26.4	25	17.6	20	17.6	17.6	15.6	15.6	25	25	25	177	<b>660.3</b>
14	29.5	17.6	17.6	14.2	35.4	59.0	17.6	25	26.4	10	13.2	20	17.6	17.6	11.7	11.7	25	20	25	106	<b>520.3</b>
15	29.5	17.6	17.6	14.2	35.4	47.2	44.0	25	35.2	20	13.2	20	17.6	17.6	11.7	15.6	25	20	25	106	<b>557.6</b>
16	29.5	17.6	17.6	7.1	17.7	59.0	17.6	15	26.4	10	13.2	25	17.6	17.6	15.6	15.6	15	25	25	177	<b>564.1</b>
17	29.5	17.6	22.0	7.1	17.7	59.0	17.6	15	26.4	10	13.2	25	17.6	17.6	15.6	15.6	15	25	25	177	<b>568.5</b>
18	29.5	17.6	22.0	35.5	88.5	47.2	26.4	25	44	25	17.6	25	22.0	22.0	19.5	19.5	25	25	25	35.4	<b>596.7</b>
19	29.5	22.0	22.0	14.2	17.7	59	35.2	25	35.2	20	22.0	25	22.0	22.0	19.5	19.5	25	25	25	177	<b>661.8</b>
20	5.9	17.6	22.0	35.5	88.5	11.8	0	25	44.0	10	22.0	25	22.0	22.0	19.5	19.5	25	25	25	35.4	<b>500.7</b>
21	5.9	22.0	22.0	21.3	17.7	59	35.2	25	35.2	5	17.6	25	22.0	22.0	19.5	19.5	15	25	5	142	<b>560.5</b>
22	5.9	22.0	22.0	35.5	88.5	11.8	0	20	35.2	25	17.6	25	22.0	22.0	19.5	15.6	25	25	25	70.8	<b>533.4</b>
23	29.5	17.6	17.6	21.3	35.4	59	44.0	25	44.0	10	22.0	25	22.0	22.0	19.5	19.5	25	25	25	177	<b>685.4</b>
24	29.5	22.0	22.0	28.4	70.8	11.8	35.2	20	17.6	5	13.2	20	22.0	22.0	19.5	11.7	25	25	25	106	<b>551.9</b>
25	5.9	22.0	22.0	35.5	88.5	23.6	0	20	8.8	5	13.2	15	13.2	22.0	19.5	11.7	25	15	25	35.4	<b>426.3</b>
26	29.5	17.6	22.0	28.4	53.1	11.8	8.8	25	0	25	13.2	5	4.4	4.4	3.9	3.9	25	5	5	106	<b>397.2</b>

Fuente: elaboración propia.

El listado completo de sitios evaluados, ordenados de mayor a menor puntaje, se muestra en el Cuadro 5.



**Cuadro 5. Resultados de la evaluación, de acuerdo con el Puntaje ( $P_i$ ) obtenido a partir de los criterios basados en la escala de Likert ( $E_i$ ) y los pesos ponderados ( $W_i$ )**

No.	Sitios visitados	Puntaje ( $P_i$ )	Evaluación normalizada a 100 %
1	23. Tolimán - Copala	685.4	88 %
2	19. Poncitlán- San Jacinto	661.8	85 %
3	13. Jalostotitlán	660.3	85 %
4	12. Cuquío - cabecera municipal	637.9	82 %
5	6. Atotonilco - Ojo de Agua del Morán 1	631.8	81 %
6	2. Arandas- Santiaguito de Velázquez	628.7	81 %
7	9. Autlán de Navarro - Ahuacapán	620.8	80 %
8	3. Atengo - cabecera municipal	610.8	79 %
9	18. Poncitlán - cabecera municipal	596.7	77 %
10	17. Ocotlán - Rancho Viejo del Refugio	568.5	73 %
11	16. Ocotlán - San Vicente (Labor Vieja)	564.1	73 %
12	21. Techaluta de Montenegro - cabecera municipal	560.5	72 %
13	15. Lagos de Moreno - Francisco Primo de Verdad (Ciénega de Mata)	557.6	72 %
14	7. Atotonilco - Ojo de Agua del Morán 2	557.5	72 %
15	8. Atoyac - Unión de Guadalupe	553.6	71 %
16	24. Tonaya - cabecera municipal	551.9	71 %
17	1. Amacueca - cabecera municipal	545.4	70 %
18	10. Cihuatlán - Barra de Navidad	541.0	70 %
19	22. Tepatitlán de Morelos - Capilla de Guadalupe	533.4	69 %
20	14. Lagos de Moreno - Betulia	520.3	67 %
21	20. San Martín Hidalgo - cabecera municipal	500.7	64 %
22	11. Cihuatlán - San Patricio Melaque	484.7	62 %
23	22. Unión de Tula - cabecera municipal	426.3	55 %
24	26. Zapopan - San Esteban	397.2	51 %
25	4. Atengo - Soyatlán del Oro 1	382.5	49 %
26	5. Atengo - Soyatlán del Oro 2	351.8	45 %

Fuente: elaboración propia.

## Discusión

Tal como se estableció inicialmente en la ponderación de reactivos, el resultado de la evaluación favoreció aquellas PTARM que requieren un menor presupuesto para su intervención. La calificación de este reactivo resultó ser determinante para los sitios mejor evaluados, ya que siete de los diez primeros lugares del listado obtuvieron el mayor puntaje en este reactivo. En el criterio del presupuesto se consideran diversos factores como son la capacidad de la planta de tratamiento, la tecnología utilizada, el estado de la infraestructura y las dificultades para su construcción, los cuales son evaluados en otros reactivos.

Otro reactivo que elevó la puntuación de los sitios evaluados fue el aforo de aguas residuales, el cual favorecía aquellas plantas que tuvieran un aforo cercano a los 10  $ls^{-1}$ . Sin embargo, los sitios que obtuvieron el mayor puntaje en este reactivo no coinciden con los sitios mejor evaluados en el reactivo



referente al presupuesto. Esto se debe a que, a mayor caudal de aguas residuales, las instalaciones tienen una mayor capacidad y tamaño, lo que requiere de más recursos para su intervención. Tal es el caso de la PTARM núm. 18 Poncitlán – cabecera municipal.

También se vieron favorecidas en la evaluación las PTARM que cuentan con un diseño basado en procesos pasivos de tratamiento, como son los sistemas anaerobios, humedales artificiales y/o lagunas de estabilización. El criterio de la tecnología de tratamiento se relaciona directamente con el criterio del presupuesto, ya que, de doce de los sitios con el mayor puntaje en este reactivo, nueve también cuentan con la máxima calificación en el reactivo del presupuesto.

La tecnología de tratamiento puede ser un criterio flexible hasta cierto punto, ya que muchas de las plantas analizadas utilizan procesos aerobios intensivos. Aquellas con la posibilidad de una reconversión tecnológica deben ser consideradas. En el caso del sitio núm. 12 Cuquío – cabecera municipal en particular, se trata de una PTARM basada en tecnología de lodos activados y aireación extendida; sin embargo, su infraestructura permitiría llevar a cabo la reconversión tecnológica a un sistema pasivo de tratamiento.

### **Ventajas y desventajas del método**

La propuesta metodológica presentada en este trabajo permite hacer la evaluación de otras PTARM en regiones que tengan una problemática similar de abandono. La principal ventaja del método utilizado es la posibilidad de ser replicado y contribuir en la recuperación de la infraestructura de saneamiento en otras partes del mundo. La ejecución de este ejercicio de decisión multicriterio propicia la asignación de recursos de una manera más acertada.

La mayoría de los reactivos que se incluyen en la evaluación se pueden evaluar de forma objetiva, realizando una investigación sobre los sitios y su contexto para conocer los datos que se califican, como son las coberturas de agua potable y alcantarillado, y el número de habitantes. Las visitas de campo son indispensables para conocer las condiciones actuales de la PTARM. El cálculo de superficie para determinar el espacio disponible en el sitio se puede realizar utilizando herramientas SIG. Otros reactivos requieren de estudios previos para su evaluación, como podría ser la mecánica de suelos, levantamientos topográficos, aforos y estudios de calidad del agua. En particular, el criterio del presupuesto es el más complejo en su evaluación, por lo que se recomienda la asesoría de especialistas para poder hacer una estimación adecuada.

El método propuesto también tiene la posibilidad de ser adaptable, ya que bajo circunstancias distintas, los criterios bajo los cuales se evalúa podrían ser diferentes. Por ejemplo, una mayor disponibilidad de recursos podría cambiar el rango establecido en las escalas de Likert del reactivo



referente al presupuesto, o el orden de importancia en la asignación de pesos ponderados. De esta forma, se podrían intervenir PTARM de mayor capacidad y con esto tener un mayor alcance en los beneficios obtenidos en el desarrollo del proyecto.

Sin embargo, la realización de este ejercicio no está exento de errores. Existen criterios determinantes que pudieran representar un impedimento para lograr la implementación del proyecto. Por ejemplo, el sitio podría no contar con el espacio mínimo para la construcción del sistema de tratamiento propuesto, haciendo inviable el proyecto, y aun así lograr un puntaje elevado en el resto de los reactivos. Por esta razón, el método propuesto debe ser abordado como un ejercicio inicial de evaluación y comparación, que sirva de apoyo en la toma de decisiones sobre la recuperación de la infraestructura de saneamiento.

### **Intervención y recuperación de la PTARM seleccionada**

De acuerdo con los resultados de la evaluación, la PTARM de Copala, Toluimán (Jalisco) fue la que obtuvo el mayor puntaje, y, en consecuencia, fue seleccionada para la intervención y recuperación de su sistema de tratamiento. La responsabilidad de los trabajos de recuperación y reconversión tecnológica se asignaron a una empresa con experiencia comprobada en el diseño y construcción de sistemas de tratamiento de aguas residuales que utilizan procesos anaerobios y humedales artificiales. Esta planta fue inaugurada en el año 2009 con una inversión de MXN 6 436 997.00, que a precios actuales (año 2020) representa MXN 9 848 605.00. Para la elaboración del proyecto ejecutivo fue necesario realizar un análisis más detallado al realizado en la etapa de evaluación, en el cual se incluyó la obtención de los planos constructivos originales, acompañado de visitas de campo y trabajos de exploración, así como la revisión de manuales de diseño y literatura para los distintos componentes de su sistema de tratamiento. Esta etapa de revisión evidenció los principales errores, tanto de diseño y construcción, así como malas prácticas en el MyO, que llevaron al colapso del sistema de tratamiento y el posterior abandono de la PTARM.

En el proceso de recuperación fue importante realizar una detallada evaluación de las condiciones de la infraestructura a fin de priorizar la intervención de aquellos componentes esenciales para recuperar las funciones básicas del sistema de tratamiento. Finalmente se presentó una propuesta considerando la reconversión tecnológica basada en procesos naturales para mejorar la eficiencia de operación de la PTARM y respetando las limitantes presupuestales para el desarrollo del proyecto previamente mencionadas. El proyecto de intervención incluyó las obras de recuperación, reconversión tecnológica y la elaboración de un manual para la operación y mantenimiento de la PTARM. A partir de la entrega de las obras, la responsabilidad de dar un seguimiento al mantenimiento y operación pasó a manos del municipio. Los primeros meses de operación del sistema



mostraron una importante reducción en los parámetros de descarga estipulados en las regulaciones mexicanas para la reutilización del agua residual en servicios públicos.

## Conclusiones

El análisis y evaluación de una variedad de PTARM con diferentes características en el diseño y estado de su infraestructura construida, sus procesos y tecnologías de tratamiento, la calidad y cantidad del agua residual a tratar, y el contexto territorial en donde se encuentra ubicada, es un trabajo complejo que requiere de una metodología bien fundamentada para establecer criterios de comparación. El desarrollo del proyecto de diagnóstico en el estado de Jalisco presentó un escenario ideal para establecer una metodología novedosa de evaluación aplicada a un conjunto de PTARM con posibilidades de ser intervenidas para volver a operar bajo un nuevo sistema de tratamiento de bajo consumo energético y reducidos gastos de MyO.

Una vez aplicada la metodología de selección, los sitios con la mayor posibilidad de rehabilitación o reconversión deben ser examinados a detalle para determinar un presupuesto más preciso. Para esto es necesario la elaboración de un proyecto ejecutivo que ilustre los procesos constructivos y detalles técnicos que implica su implementación. La integración de un equipo multidisciplinario de trabajo, conformado por expertos en procesos de tratamiento de aguas residuales convencionales y naturales, e ingeniería civil hidráulica, es recomendable para contemplar las particularidades de cada PTARM en el proceso de selección y en el desarrollo del proyecto ejecutivo.

El abandono de las PTARM es un problema que se puede observar en distintas partes del país y otras regiones del mundo. La mala planificación y ejecución de la infraestructura de saneamiento han acentuado esta problemática. El desarrollo de este trabajo, con la aplicación del método de evaluación para la selección de una PTARM y su posterior intervención abre la posibilidad de revertir esta situación y recuperar la infraestructura existente bajo un nuevo esquema que asegure su funcionalidad y operación a largo plazo.

Recuperar la infraestructura existente cobra relevancia cuando se compara como alternativa a la construcción de una PTARM nueva. Los costos de una rehabilitación se reducen drásticamente; en este caso, el presupuesto ejercido en las obras de intervención y recuperación fue una décima parte de la inversión total que se necesitó para su construcción a precios actuales. Sin embargo, como ya se ha visto en el desarrollo de la metodología de este trabajo, esto depende en gran medida de diferentes criterios técnicos que deben ser analizados previamente.



En el proceso de selección del proyecto resultó beneficiada la PTARM de Copala, localizada en el municipio de Tolimán, Jalisco. El proyecto destaca por su atractivo costo-beneficio, en el que se logró recuperar la funcionalidad del sistema para el tratamiento de  $3.5 \text{ ls}^{-1}$  de aguas residuales y su reutilización en los campos agrícolas de la comunidad.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a los recursos proporcionados por la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Estado de Jalisco al proyecto. Asimismo, se agradece la información proporcionada por la Comisión Estatal del Agua del estado de Jalisco sobre las plantas de tratamiento municipales que fueron analizadas.

## Referencias

- Abdel-Halim, Walid; Weichgrebe, Dirk; Rosenwinkel, K. H., y Verink, Johan (2008). "Sustainable Sewage Treatment and Re-Use in Developing Countries". *Twelfth International Water Technology Conference, IWTC12 2008*. Alejandría, Egipto, pp. 1397-1409.
- Anderson, John (2003). "The Environmental Benefits of Water Recycling and Reuse". *Water Supply*, 3(4), pp. 1-10. DOI: [10.2166/ws.2003.0041](https://doi.org/10.2166/ws.2003.0041)
- Boone, Harry N. y Boone, Deborah A. (2012). "Analyzing Likert Data". *Journal of Extension*, 50(2): 2TOT2. <https://archives.joe.org/joe/2012april/tt2.php>
- CEA (Comisión Estatal del Agua) Jalisco (2019a). "Acuíferos". *Comisión Estatal del Agua Jalisco*. <https://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/acuiferos/>
- CEA Jalisco (2019b). "Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales". *Comisión Estatal del Agua Jalisco*. [http://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/plantas\\_tratamiento/](http://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/plantas_tratamiento/)
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2015). "Programa Hídrico Estatal 2014–2018 del Estado de Jalisco". <http://files.conagua.gob.mx/transparencia/REUTILIZACION-C3%93N-AR-SON.pdf>
- CONAGUA (2016). "Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: zonas rurales, periurbanas y desarrollos ecoturísticos". <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro31.pdf>





- CONAGUA (2018). “Estadísticas Agua en México, edición 2018”.  
[http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM\\_2018.pdf](http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf)
- CONAGUA (2019). “Inventario de plantas de tratamiento de aguas residuales PTAR 2019”.  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/611037/Inventario\\_2019.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/611037/Inventario_2019.pdf)
- De Anda Sánchez, José (2017). “Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México”. *Sociedad y Ambiente*, 5(14), pp. 119-143. <https://doi.org/10.31840/sya.v0i14.1770>
- De Anda, José, y López-López, Alberto (2016). “México, MX/2016/037236”. *Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial*.
- De Anda, José, y Shear, Harvey (2016). “Searching a Sustainable Model to Manage and Treat Wastewater in Jalisco, Mexico”. *International Journal of Development and Sustainability*, 5(6), pp. 278-294.
- De Anda, José y Shear, Harvey (2021). “Sustainable Wastewater Management to Reduce Freshwater Contamination and Water Depletion in Mexico”. *Water*, 13(16), 2307. <https://doi.org/10.3390/w13162307>
- Edmonson, Diane R. (2005). “Likert Scale: A History”. En *The Future of Marketing's Past*. 12, 127-133. PCHARM.  
<https://ojs.library.carleton.ca/index.php/pcharm/issue/view/103>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) (2013). “Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos?”.  
<http://www.fao.org/docrep/017/i1629s/i1629s.pdf>
- Geng, Yong; Fu, Jia; Sarkis, Joseph, y Xue, Bing (2012). “Towards a National Circular Economy Indicator System in China: An Evaluation and Critical Analysis”. *Journal of Cleaner Production*, 23(1), pp. 216-224.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.005>
- Gobierno de Jalisco (2019). “¿Qué es MIDE? Monitoreo de Indicadores del Desarrollo de Jalisco”. *Gobierno del Estado de Jalisco*.  
<https://seplan.app.jalisco.gob.mx/mide/panelCiudadano/inicio>
- Hanjra, Munir A.; Blackwell, John; Carr Gemma; Zhang, Fenghua, y Jackson, Tamara M. (2012). “Wastewater Irrigation and Environmental Health: Implications for Water Governance and Public Policy”. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 215(3), pp. 255-269. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2011.10.003>



- IIEG (Instituto de Información Estadística y Geográfica del Estado de Jalisco) (2020). “Censo de Población y Vivienda, Jalisco 2020”. *Instituto de Información Estadística y Geográfica del Estado de Jalisco*. [https://ieeg.gob.mx/ns/?page\\_id=20325](https://ieeg.gob.mx/ns/?page_id=20325)
- Kaminsky, Jessica y Javernick-Will, Amy (2013). “Contested Factors for Sustainability: Construction and Management of Household On-Site Wastewater Treatment Systems”. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000757](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000757)
- Mara, Duncan (2003). Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries. [http://www.pseau.org/outils/ouvrages/earthscan\\_ltd\\_domestic\\_wastewater\\_treatment\\_in\\_developing\\_countries\\_2003.pdf](http://www.pseau.org/outils/ouvrages/earthscan_ltd_domestic_wastewater_treatment_in_developing_countries_2003.pdf)
- Massoud, May A.; Tarhini, Akram, y Nasr, Joumana A. (2009). “Decentralized Approaches to Wastewater Treatment and Management: Applicability in Developing Countries”. *Journal of Environmental Management*, 90, pp. 652-659. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.001>
- Matas, Antonio (2018). “Diseño del formato de escalas tipo Likert: un estado de la cuestión”. *Revista Electrónica de Investigación Educativa*, 20(1), pp. 38-47. <https://doi.org/10.24320/redie.2018.20.1.1347>
- Méndez-Hinojosa, Luz Marina y Peña-Moreno, José Armando (2006). *Manual práctico para el diseño de la escala Likert*. México: Trillas, 96 pp.
- MIDE Jalisco (2020a). “Porcentaje de cobertura del servicio de agua potable”. Planeación y Participación Ciudadana-Gobierno del Estado de Jalisco, México. <https://mide.jalisco.gob.mx/mide/panelCiudadano/mapaMunicipal/1148?format=&indicadorTablaDatos=1148&accionRegreso=detalleIndicador>
- MIDE Jalisco (2020b). “Porcentaje de cobertura del servicio de alcantarillado en todo el estado”. Planeación y Participación Ciudadana-Gobierno del Estado de Jalisco, México. <https://mide.jalisco.gob.mx/mide/panelCiudadano/detalleIndicador/332?dimension=&tema=&dependencia=&nivel=&periodo=&sentido=&sortBusqueda=1&vista=1&palabraClave=alcantarillado&format=&max=10&offset=0&subsistema=1&accionRegreso=busqueda>
- Miller, G. Wade (2006). “Integrated Concepts in Water Reuse: Managing Global Water Needs”. *Desalination*, 187, pp. 65-75. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.04.068>



- Munshi, Jamal (2014). "A Method for Constructing Likert Scales". SSRN. <https://ssrn.com/abstract=2419366> o DOI: [10.2139/ssrn.2419366](https://doi.org/10.2139/ssrn.2419366)
- Noyola, Adalberto; Morgan-Sagastume, Juan Manuel, y Güereca, Leonor Patricia (2013). "Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas". [http://www.pronatura-sur.org/web/docs/Tecnologia\\_Aguas\\_Residuales.pdf](http://www.pronatura-sur.org/web/docs/Tecnologia_Aguas_Residuales.pdf)
- OSHA (Occupational Safety and Health Administration) (2014). "Classification of Soils for Excavations". <https://www.osha.gov/dts/sltc/methods/validated/id194/id194.pdf>
- OMS (Organización Mundial de la Salud) (2017). "Progresos en materia de agua potable, saneamiento e higiene: informe de actualización de 2017 y línea de base de los ODS". [https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/jmp-2017/es/](https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/jmp-2017/es/)
- Pacheco, J. F. y Contreras, E. (2008). *Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos*. Santiago de Chile: Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES)
- Romero, Carlos (1996). *Análisis de las decisiones multicriterio*. Madrid, España: ISDEFE, 115 pp. [https://www.academia.utp.ac.pa/sites/default/files/docente/51/decisiones\\_multicriterio.pdf](https://www.academia.utp.ac.pa/sites/default/files/docente/51/decisiones_multicriterio.pdf)
- Rozkošný, Miloš; Kriška, Michal; Šálek, Jan; Bodík, Igor, e Istenič, Darja (2014). *GWP CEE Regional Study. Natural Processes of Wastewater Treatment – Actual Status in CEE Countries (Questionnaire study)*. [https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cee\\_files/regional/q-study-report-cee.pdf](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cee_files/regional/q-study-report-cee.pdf)
- Shen, Liyin; Wu, Yuzhe, y Zhang, Xiaoling. (2011). "Key Assessment Indicators for the Sustainability of Infrastructure Projects". *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000315](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000315)
- Show, Kuan-Yeow (2010). *Green Technology*. <http://www.eolss.net/sample-chapters/c05/e6-35-55-00.pdf>
- Tchobanoglous, George; Burton, Franklin L., y Stensel H. David (2002). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. Nueva York: McGraw-Hill, 1771 pp.



UN (United Nations) (2018). *Sustainable Development Goal 6: Synthesis Report 2018 on Water and Sanitation*. [http://www.unwater.org/publication\\_categories/sdg-6-synthesis-report-2018-on-water-and-sanitation/](http://www.unwater.org/publication_categories/sdg-6-synthesis-report-2018-on-water-and-sanitation/)

United Nations Environment Programme (2016). “Protected Planet Report 2016”. [https://wdpa.s3.amazonaws.com/Protected\\_Planet\\_Reports/2445%20Global%20Protected%20Planet%202016\\_WEB.pdf](https://wdpa.s3.amazonaws.com/Protected_Planet_Reports/2445%20Global%20Protected%20Planet%202016_WEB.pdf)

WEF (Water Environment Federation) (2010). *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants. WEF Manual of Practice No. 8. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 76*. Alexandria, Virginia, EUA: Water Environment Federation, 2600 pp.

WWAP (Programa Mundial de las Naciones Unidas de Evaluación de los Recursos Hídricos)/ONU-Agua (2018). “Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2018: Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua”. París: UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261494>

Yigitcanlar, Tan y Dur, Fatih (2010). “Developing a Sustainability Assessment Model: The Sustainable Infrastructure, Land-Use, Environment and Transport Model”. *Sustainability*, 2(1), pp. 321-340. <https://doi.org/10.3390/su2010321>

Editora asociada: Esperanza Tuñón Pablos  
Recibido: 14 junio 2021  
Aceptado: 15 septiembre 2021