

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

Modelo dinámico de sistemas del vertimiento de materia orgánica en el Lago Titicaca del distrito de Puno, durante los años 1981 – 2050

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor:

Heiddy Yesenia Chura Teves
Reydi Ulises Richard Sanchez Vasquez

Asesor:

Ing. Dario Ccaccya Ccaccya

Lima, marzo de 2022

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DE TESIS

Ing. Dario Ccaccya Ccaccya de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“Modelo dinámico de sistemas del vertimiento de materia orgánica en el Lago Titicaca del distrito de Puno, durante los años 1981 – 2050”** constituye la memoria que presenta el (la) / los Bachiller(es) Heiddy Yesenia Chura Teves, Reydi Ulises Richard Sanchez Vasquez para obtener el título de Profesional de Ingeniero Ambiental, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en la ciudad de Lima, a los 2 días del mes de mayo del año 2022.



Ing. Dario Ccaccya Ccaccya

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Lima, Ñaña, Villa Unión, a los **25 días** día(s) del mes de **marzo** del año 2022 siendo **las 08:30 horas**, se reunieron en modalidad virtual u online sincrónica, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: **Mg. Joel Hugo Fernández Rojas**, el secretario: **Mg. Jackson Edgardo Pérez Carpio**, y los demás miembros: **Mg. Milda Amparo Cruz Huaranga y la Ing. Nancy Curasi Rafael**, y el asesor, **Ing. Dario Ccaccya Ccaccaya**, con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: "Modelo dinámico de sistemas del vertimiento de Materia Orgánica en el Lago Titicaca del Distrito de Puno, durante los años 1981 – 2050"

de el(los)/la(las) bachiller/es: a) **REYDI ULISES RICHARD SÁNCHEZ VÁSQUEZ**

.....b) **HEIDY YESENIA CHURA TEVES**

conducente a la obtención del título profesional de **INGENIERO AMBIENTAL**

(Nombre del Título profesional)

con mención en.....

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)(las) candidato(a)/s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/la(las) candidato(a)/s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): **REYDI RICHARD SÁNCHEZ VÁSQUEZ**.....

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
APROBADO	18	A-	Muy Bueno	Sobresaliente


Candidato (b): **HEIDY YESENIA CHURA TEVES**

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
APROBADO	18	A-	Muy Bueno	Sobresaliente

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)(las) candidato(a)/s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidente
Mg. Joel Hugo
Fernández Rojas



Secretario
Mg. Jackson Edgardo
Pérez Carpio

Asesor
Ing. Dario Ccaccya
Ccaccya

Miembro
Mg. Milda Amparo
Cruz Huaranga

Miembro
Ing. Nancy Curasi
Rafael

Candidato/a (a)
Reydi Richard
Sánchez Vasquez

Candidato/a (b)
Heidy Yesenia
Chura Teves

Modelo dinámico de sistemas del vertimiento de Materia Orgánica en el Lago Titicaca del Distrito de Puno, durante los años 1981 – 2050

Dynamic model of systems of the dumping of Organic Matter in Lake Titicaca of the District of Puno, over the years 1981- 2050

Resumen

El presente artículo desarrolla un análisis de la estimación de materia orgánica presente en aguas residuales domésticas descargadas en la Bahía interior del lago Titicaca, generado por la población del distrito de Puno durante los años 1981 al 2022 y 2023 al 2050. Se construyó un modelo dinámico de sistemas con el software VENSIM PLE 9.1.0, se consideraron múltiples variables entre las principales la tasa de crecimiento poblacional anual, generación per cápita de materia orgánica y cobertura del sistema de red de alcantarillado, la materia orgánica presente las aguas residuales fue medida mediante el DBO5. Los resultados del modelo muestran que el incremento poblacional desde 1981 al 2050 es de 104 463 habitantes y del último censo nacional 2017 al 2050 aumentará 41 909 habitantes. El modelo estimó la descarga total de materia orgánica desde el año 1981 al 2022 que será 46 752 Tn, de no emplearse medidas de control en el segundo periodo de 2023 al 2050 se descargará 44 956 Tn. Por el contrario, el incremento de la eficiencia del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas proyectado desde el 2023 al 2050 verterá 4 498 Tn de forma total en ese periodo de tiempo, evitando verter 40 458 Tn de materia orgánica producto de las nuevas tecnologías. El modelo concluye que la generación y descarga de M.O. hasta el 2050 generara un gran impacto ambiental en la bahía interior de no implementarse las mejoras tecnológicas en el 2023.

Palabras clave: Materia orgánica, población, Lago Titicaca, red de alcantarillado, VENSIM PLE.

Abstract

This article develops an analysis of the estimation of organic matter present in domestic wastewater discharged into the inner bay of Lake Titicaca, generated by the population of the district of Puno during the years 1981 to 2022 and 2023 to 2050. A dynamic model was built of systems with the VENSIM PLE 9.1.0 software, multiple variables were considered, among the main ones the annual population growth rate, per capita generation of organic matter and coverage of the sewage network system, the organic matter present in the wastewater was measured by the BOD5. The results of the model show that the population increase from 1981 to 2050 is 104,463 inhabitants and from the last national census from 2017 to 2050 it will increase by 41,909 inhabitants. The model estimated the total discharge of organic matter from 1981 to 2022, which will be 46,752 tons. If no control measures are used in the second period from 2023 to 2050, 44,956 tons will be discharged. On the contrary, the increase in the efficiency of the domestic wastewater treatment system projected from 2023 to 2050 will discharge a total of 4,498 tons in that period of time, avoiding the discharge of 40,458 tons of organic matter as a result of new technologies. The model concludes that the generation and discharge of M.O. until 2050 it will generate a great environmental impact in the inner bay if the technological improvements are not implemented in 2023.

Keywords: Organic matter, population, Lake Titicaca, sewage network, VENSIM PLE.

Introducción

La contaminación de cuerpos de agua a nivel mundial por aguas residuales domésticas es un problema presente en países en vías de desarrollo, menos del 5% de estas aguas son tratadas antes de su liberación al medio ambiente (UNESCO, 2019). El crecimiento de las ciudades permite que cada día se vierta alta carga orgánica en diferentes cuerpos de agua (UNESCO, 2020). Más de 2 000 millones de personas no cuentan con instalaciones sanitarias básicas y 3 400 millones de personas (45% de la población mundial) poseen algún tipo de saneamiento de alcantarillado con tratamiento o letrinas (FAO, 2020). La alta carga orgánica presente en las aguas residuales domésticas, producen exceso de fósforo y nitrógeno generando la eutrofización en cuerpos de agua, degradando biodiversidad presente e inutilizando el uso de esta (García et al., 2019). Enfermedades como la diarrea, malos olores e incidencia de cáncer se generan en el ser humano por el contacto directo o indirecto con los cuerpos de agua contaminados (OMS, 2011). Según la Organización Panamericana de la Salud (OPS), en América del Norte y Central el 86% tiene acceso al servicio de saneamiento básico y el Caribe cuenta con un 71%, países como Perú, Colombia, Ecuador, Bolivia presentan 82% y Argentina, Uruguay, Paraguay, Chile con 89% (OPS, 2019). Las zonas altoandinas de América del Sur, poseen una alta variedad de ambientes acuáticos por encima de los 3 000 metros sobre el nivel del mar, exactamente en las ecorregiones de la Puna y el Páramo, los lagos son numerosos siendo de origen glaciar o tectónico (Ospina, 2019). Las fuentes de agua que existen en estas zonas permiten el desarrollo humano (agua potable, hidroeléctricas, etc.) de habitantes locales y de ciudades que están por debajo de estos ecosistemas, las lagunas altoandinas albergan especies de plantas y animales endémicos, algunos en peligro de extinción como el sapito arlequín (*Atelopus*) y el flamenco andino (*Phoenicoparrus andinus*) (WWF, 2005). La intervención minera en América del Sur es notable, concentrándose en zonas altoandinas perjudicando cuerpos de agua y biodiversidad, así mismo el cambio climático ocasiona la desaparición de glaciares y de lagunas con origen glaciar (Fundación Ambiente y Recursos Naturales, 2021). El Perú cuenta cerca de 12 000 lagos y lagunas altoandinas, alojando biodiversidad amenazada principalmente por el desarrollo de las ciudades, vertiendo aguas residuales en los lagos y lagunas. Asimismo, la industria minera suma a la contaminación de estos cuerpos de agua, según el

Ministerio del Ambiente (MINAM), vertiendo un promedio de 28 780 000 m³ y solo 100 000 m³ al año son tratadas (Aquino Espinoza, 2017; MINAM, 2008). La ley peruana N° 29338 de recursos hídricos, regula el uso y gestión integrada del agua, pese a advertir que está prohibido “contaminar el agua transgrediendo los parámetros ambientales vigentes”, muchos gobiernos locales contaminan los cuerpos de agua con sus aguas residuales sin tratar (ANA, 2009). Perú cuenta con una población total de 32 millones de habitantes, de los cuales 23 millones pertenecen a zonas urbanas, incrementándose un 17.3% desde el 2007 (343 454 personas por año), con una tasa de crecimiento anual de 1.6% (INEI, 2018). El 69.65% (16 236 733) de la población urbana cuenta con servicios básicos de saneamiento, el 30.35% (7 075 160) no cuenta con este servicio y vierte sus aguas residuales directamente sin tratar al mar, ríos, lagos o quebradas (OEFA, 2014). Perú cuenta con un total de 50 Empresas Prestadoras de Servicio de Saneamiento (EPS) teniendo como objetivo el manejo del agua potable y el tratamiento de las aguas residuales domésticas, 22 de estas no realizan ningún tratamiento al no contar con Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) (Kosaka, 2020). De las 204 PTAR existentes en el territorio peruano, solo el 28% cumplen los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos por el Ministerio del Ambiente (MINAM), en cuanto a los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) establecido por el MINAM no existe presencia de datos (Eche & Caja, 2021). Debido al deficiente tratamiento de las aguas residuales domésticas en el Perú, los lagos y cuerpos de agua altoandinos principalmente son contaminados causando impactos ambientales negativos en la flora y fauna (Cusiche Pérez & Miranda Zambrano, 2019). En la Región de Puno, Provincia de Puno, Distrito Puno solo el 87.75% (30,203) de las viviendas urbanas cuenta con red de saneamiento y el 12.25% (4,214) posee letrinas, pozos sépticos, pozo ciego, acequia, campo abierto o en todo caso son vertidos directamente al lago Titicaca (INEI, 2018). Sin embargo, la red de saneamiento es precaria porque el distrito no cuenta con un tratamiento adecuado de aguas residuales, esto produce constante contaminación del lago Titicaca (ANA, 2017). La gestión de recursos hídricos está compuesta de un sistema socio económico ambiental, entender su dinámica es importante para emplear acciones estratégicas (Sun & Yang, 2019). El modelado de dinámica de sistemas (MDS) es un método que facilita el reconocimiento de múltiples interacciones, distintos autores lo definen como visión holística por trabajar con procesos de retroalimentación e interdependencias entre variables (Bakhshianlamouki et al., 2020; Gies et al., 2014). El MDS como

herramienta de apoyo nos permite pronosticar en distintos escenarios el resultado de los cambios a corto y largo plazo (Karimlou et al., 2020). Dong et al (2019) en la región de Beijing, China logró demostrar que la escasez de agua y la contaminación continuará deteriorándose con certeza hasta el 2030; Ahmad & Prashar (2010) evaluaron la disponibilidad de agua y demanda en el sur de Florida desde 1975 hasta 2030; Yang & Sun (2019) evaluaron de manera holística la capacidad de carga de los recursos hídricos, es decir, crecimiento poblacional, industrialización y demanda de agua; Feng et al. (citado por Yang & Sun 2019) analizaron cuantitativamente la relación entre la población y la capacidad de carga de los recursos hídricos en Xiong, China; Martínez & Vargas (2016), proyectaron un conjunto de estrategias de intervención para conducir el sistema del ciclo urbano del agua en la ciudad de Puebla, México a un balance hídrico hasta el año 2030. Mediante una revisión sistemática de 169 artículos, el software Vensim fue el más utilizado, apareciendo en el 57% de los estudios revisados, seguido del software Stella (24%), además resalta mayor interés en Asia con 57% de estudios realizados (Ahmadi & Zarghami, 2019; Phan et al., 2021), América del Norte con 28% y América del Sur con solo 2%. Cabe resaltar que la mayoría de los MDS (77%) se desarrollaron con una perspectiva a largo plazo de los problemas relacionados con el agua, exactamente, el 23% de estas aplicaciones a largo plazo investigaron el comportamiento MDS de recursos hídricos durante al menos 50 años en el futuro (Phan et al., 2021). La presente investigación desarrolla una estimación de aguas residuales generadas por la población urbana del distrito de Puno, vertida en la Bahía Interior del Lago Titicaca del territorio peruano mediante un modelo dinámico de sistemas (MDS) al desarrollar escenarios de simulación, evaluar acciones y políticas de gestión a un horizonte temporal de 30 años (2021-2050).

Materiales y métodos

Lugar de Estudio

El Titicaca es el lago navegable de agua dulce más alto en América del Sur, situado a 3 810 m.s.n.m., que mediante D.S. N° 185-78-AA del 31 de octubre de 1978 fue establecido como Reserva nacional del Titicaca con el objetivo de conservar la flora y fauna silvestre del lago. El distrito de Puno siendo capital de la región Puno, cuenta con 135 288 habitantes descrito a detalle en la Tabla 1 (INEI, 2020; Ramos et al., 2019) ubicados

alrededor de las orillas occidentales de la Bahía Interior de Puno. La Bahía está ubicada geográficamente a 15°50'32" Sur y 70°59'.07" Oeste, tiene una extensión de 17.5 km² representando el 0.02 % de la superficie total del Lago Titicaca; la Bahía interior se considera de poco flujo por tener velocidades de corriente entre 0.018 km/h y 0.70 km/h (PELT, citado por Ocola & Laqui, 2017). La figura 1 muestra el área de estudio que corresponde al área urbana de la ciudad de Puno que representa 8 116 km², asimismo se visualiza la laguna de oxidación, denominada El Espinar (Figura 2), construida en 1972 proyectada para una población inicial de 60 000 habitantes. Los datos de calidad de agua son registrados principalmente por 3 entidades publico/privadas; Autoridad Administrativa del Agua Titicaca (AAA), Proyecto Especial Binacional del Lago Titicaca (PEBLT) y Empresa Prestadora del Servicio de Saneamiento de Puno (EMSA Puno). El monitoreo de calidad de agua realizado por la AAA se ejecuta semestralmente desde el 2013 en 11 puntos fijos, con el fin de vigilar la calidad del agua e identificar condiciones que puedan poner en riesgo la vida acuática. Por su parte, el PEBLT realiza monitoreos mensuales divididos en 13 puntos fijos, conforme a su función de contribuir a la recuperación y conservación de la Bahía Interior de Puno. Los parámetros analizados en campo son: pH, temperatura (T), conductividad eléctrica, oxígeno disuelto (OD); los que se analizan en laboratorio son: demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), aceites y grasas, sólidos suspendidos totales (SST), nitrógeno total, nitratos, fosfatos, fósforo total, coliformes termotolerantes y metales pesados.

Tabla 1. Distribución de la población del distrito de Puno

Zona	Habitantes
Urbana	129 922
Rural	5 366
Total	135 288

Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2018

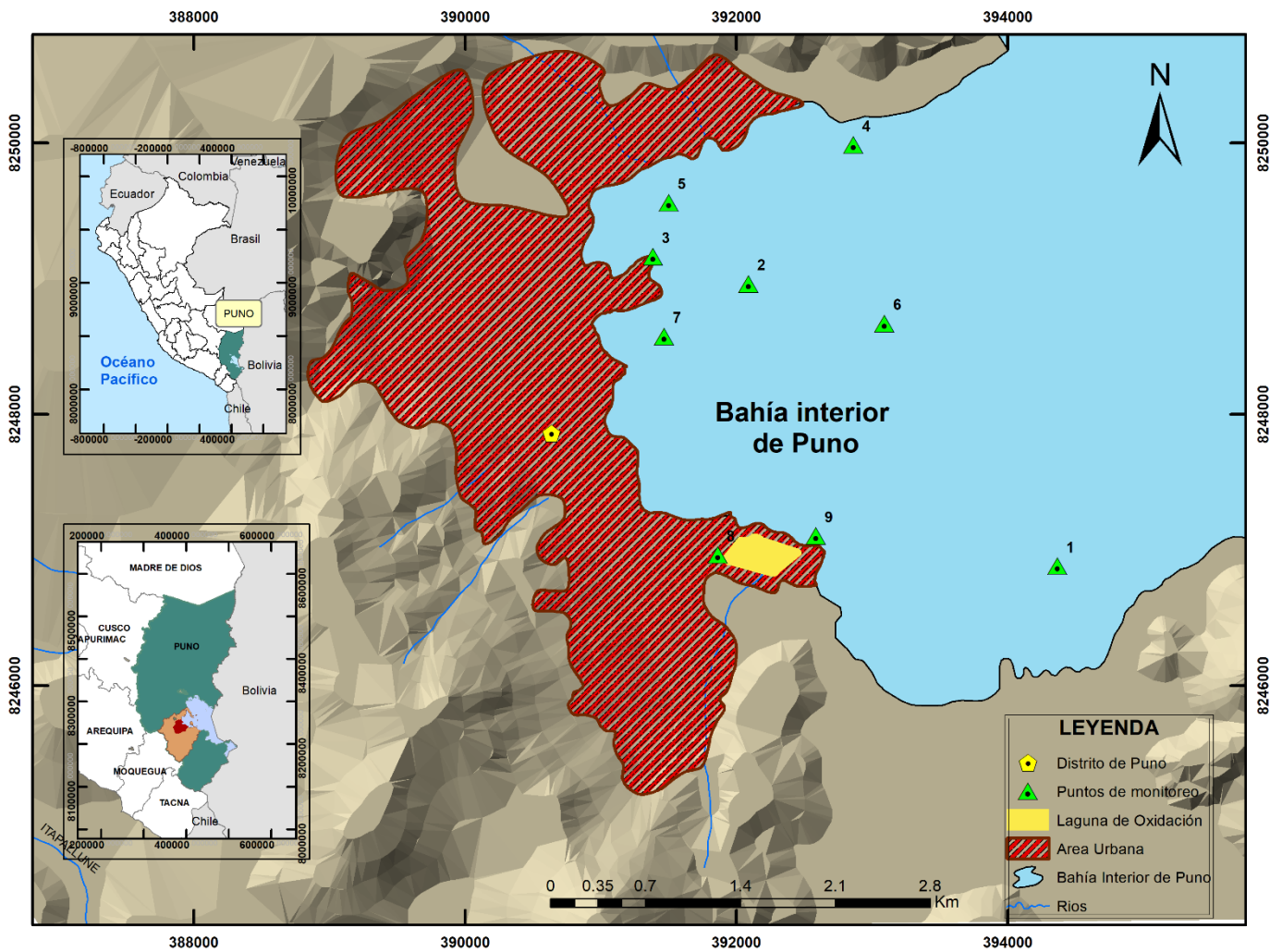


Figura 1. Ubicación del lugar de estudio
 Fuente: Elaborado por los autores de la investigación



Figura 2. Vista de la laguna de oxidación, Isla Espinar
Fuente: Proyecto PTAR Titicaca

Metodología

Con el fin de determinar el crecimiento poblacional se desarrolló un modelo matemático que permite proyectar 30 años a futuro. Asimismo, la determinación de la materia orgánica presente en la Bahía Interior de Puno, se basó en el reporte histórico de monitoreos de calidad de agua, principalmente del parámetro Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5). Finalmente, el modelo dinámico de sistemas desarrollado en el software Vensim PLE, fue planteado de acuerdo a las interconexiones y relaciones causales de las variables: como el crecimiento poblacional y la generación de materia orgánica por habitante, de esta forma se planteó escenarios, causas, consecuencias y soluciones del impacto ambiental.

Proyección de población

Se desarrolló un modelo matemático aritmético para estimar la población futura del distrito de Puno, este método es empleado en cálculos de poblaciones para el diseño de proyectos de saneamiento, en función a la razón de crecimiento de cuatro censos realizados por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) durante los años; 2017, 2007, 1993, 1981, el método es aplicable para ciudades grandes en crecimiento, la tasa de crecimiento es constante permitiendo obtener resultados certeros (Gallardo Piedra, 2018). La estimación se realizó mediante la función:

$$r = \frac{\text{Poblacion } n - \text{Población } 1}{\text{Año } n - \text{Año } 1} \quad (1)$$

$$Pf = Pa + r \times (t_f - t_0) \quad (2)$$

Donde:

Ecuación 1

- r : Razón de crecimiento.
- $\text{poblacion } n$: Población del último censo
- $\text{poblacion } 1$: Población anterior al último censo

Ecuación 2

- Pf : Población futura.
- Pa : Población del censo.
- t_f : Año a proyectar
- t_0 : Año del último censo registrado.

Según Alfredo Espinel, (2014) la ecuación 1 calcula la razón de crecimiento (r) utilizando los registros de población del INEI. Al último censo se le denominó Población n y al censo inicial Población 1 , siendo el año n el 2017 y el año 1 el 2007, al aplicar la formula conseguimos la razón crecimiento (r).

Para finalizar en la ecuación 2 hallaremos la población futura (Pf), para ello sumamos la población del último censo (Pa) es decir, el registro del año 2017 (Tabla 2), con la razón de crecimiento (r), para despues multiplicarlo con la resta del año a proyectar (t_f) y el año del último censo (t_0) siendo $2050-2017 = 33$ años.

Tabla 2. Distribución de la población del distrito de Puno

Año	Población
2020*****	143 867
2019*****	142 691
2018*****	141 077
2017*****	139 096
2015****	141 064
2014****	139 816
2013****	138 548
2012****	137 256
2011****	135 933
2010***	134 578
2007***	125 663
1993**	100 168
1981*	76 542

***** : INEI. (2020). Perú: Estimaciones y Proyecciones de Población por Provincia y Distrito, 2018-2020 (pág. 94).

**** : INEI (2017). Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas

**** : INEI (2015). Perú: Principales Indicadores Departamentales 2009-2015 (pág. 5)

*** : INEI, (2011). Compendio Estadístico - Región Puno (pág. 83)

** : INEI (1993). IX Censo de población y IV de vivienda 1993

* : INEI (1981) VIII Censo de población y III de vivienda 1981

Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2018

Cálculo de materia orgánica

Se determinó el componente orgánico presente en aguas residuales donde se trabajó con datos históricos de la población servida y los valores de materia orgánica, medidos mediante el DBO5. Se uso la concentración de materia orgánica por persona como se observa en la tabla 3, establecida en el Reglamento Nacional de Edificaciones - Norma OS 090. Posteriormente a partir del registro de crecimiento demográfico se

observó el comportamiento de la materia orgánica presente en la bahía interior de Puno. La red de alcantarillado del distrito de Puno está conformada por tres descargas directas de aguas residuales sin tratar, además de la descarga del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Tabla 3. Aporte diario de aguas residuales generados por persona

Concentración	
Materia orgánica (DBO5)	50 g / (hab. d)

Fuente: Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú, 2002

Construcción de Modelo Dinámico de Sistemas

Se construyó un modelo Dinámico de Sistemas con el software VEMSIM PLE 9.0.1, tomando como variables principales al crecimiento poblacional de la ciudad de Puno desde 1981 hasta el 2020, la proyección de esta hacia el 2050, la cantidad de personas con conexiones de sistemas de saneamiento, cantidad de materia orgánica generada por la población en sus aguas residuales, tecnologías de tratamiento de aguas residuales presentes en la zona, proyectos futuros de saneamiento, vertidos de aguas residuales en la bahía interior del Lago Titicaca, entre otros.

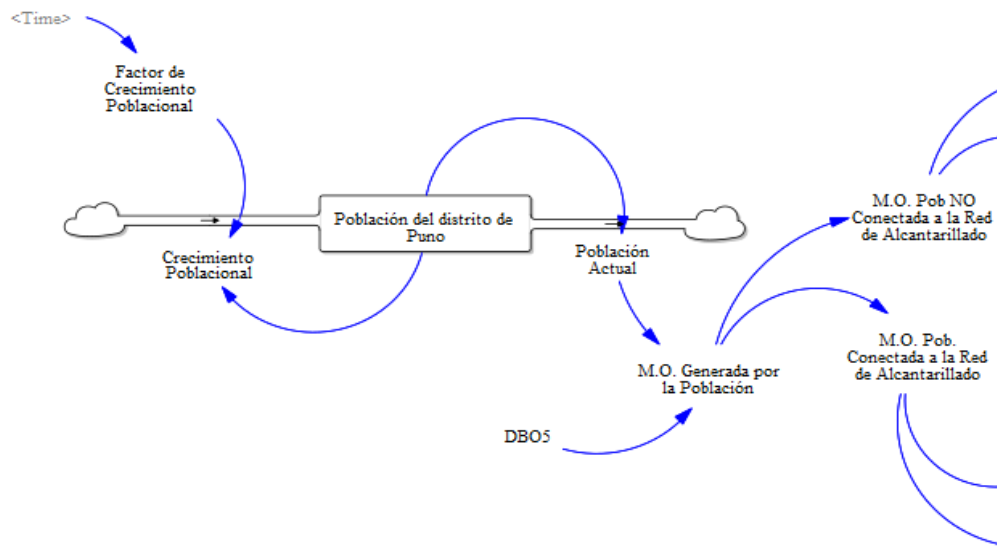


Figura 2. Diagrama dinámico de sistemas para estimar la población del distrito de Puno

En la figura 2 se observa el diagrama del modelo dinámico de sistemas construido a partir de relaciones causales observadas en el área de estudio, en esta sección se representa el crecimiento poblacional de la ciudad del distrito de Puno por la variable "Población del distrito de Puno", para lo cual se usó datos estadísticos desde el 1981 hasta el 2020 como se observa en la Tabla 2, para la proyección de la población desde el 2021 hasta el 2050 se usó las ecuaciones 1 y 2 descritas en la metodología, la variable "Factor de Crecimiento Poblacional" representa la variación anual de la población desde el año 1981 hacia 2050, variaciones determinadas por la variable "Time", a partir de estas dos variables se genera el crecimiento poblacional representada por la variable "Crecimiento Poblacional" esta a su vez genera la población actual año con año representada por la variable "Población Actual". A partir de esta última variable se calcula la materia orgánica presente en las aguas residuales generadas por la población representada por la variable "M.O. Generada por la Población" la cual está influenciada por la variable "DBO5" valor de la Demanda Bioquímica de Oxígeno de la materia orgánica generada por cada habitante al día, la cual se presenta en la Tabla 3. Finalmente, a partir de la variable "M.O. Generada por la Población", se genera dos nuevas variables las cuales representan la materia orgánica presente en las aguas residuales por población que cuenta con sistemas de alcantarillado representado por "M.O. Pob. Conectada a la Red de Alcantarillado" y las que no cuentan con este servicio representado por "M.O. Pob. NO Conectada a la Red de Alcantarillado".

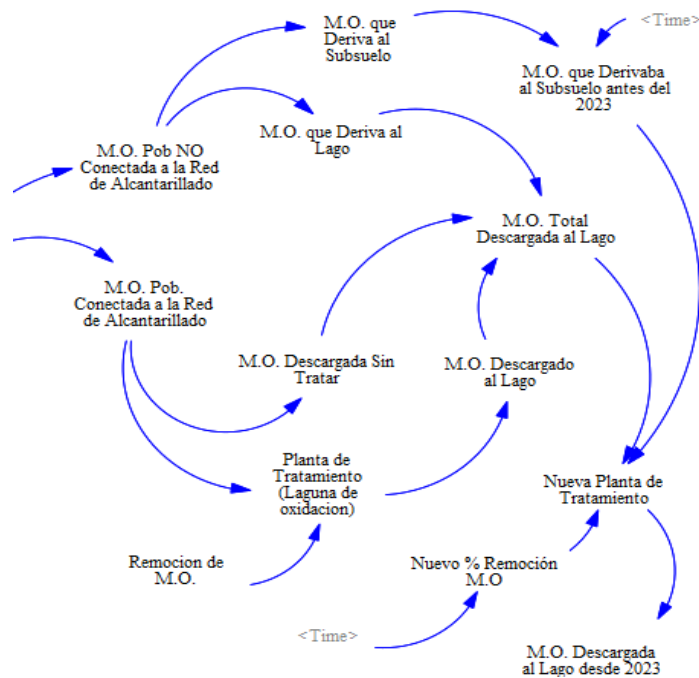


Figura 3. Diagrama dinámico de sistemas para estimar la materia orgánica generada por la población

En la figura 3 se observa la segunda sección del diagrama dinámico de sistemas, el cual representa las vías que sigue la materia orgánica presente en las aguas residuales generada por la población, el porcentaje de esta que cuenta con servicio de agua y desagüe es representada por la variable "M.O. Pob. Conectada a la Red de Alcantarillado" con un valor de 86 % del total de la población, de esta variable se generan dos nuevas variables las cuales son dos rutas por el cual el efluente se desplazara, la primera ruta está representada por la variable "Planta de Tratamiento (Laguna de Oxidación)" en la cual ingresa el 64.17% del efluente total generado, la planta tiene un porcentaje de remoción de materia orgánica del 66% que a su vez está representada por la variable "Remoción de M.O" generando esta vía un efluente de salida tratado denominado mediante la variable "M.O. Descargado al Lago", por otro la segunda ruta es representada por la variable "M.O. Descargada sin Tratar" en la cual ingresa el 35.83% del efluente según Gobierno Regional de Puno (2019) y no recibe ningun tipo de tratamiento.

La figura 4 presenta una vista general del modelo, en la derecha inferior se observa una ruta alterna considerada como el escenario de acción denominado "Eficiente Sistema de Saneamiento". Este escenario fue planteado para cumplir dos objetivos, el primer objetivo es incrementar el porcentaje de eficiencia de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) que busca la reducción de los valores de materia orgánica descargados al Lago, el segundo objetivo es optimizar el sistema de conexiones a la red de alcantarillado para evitar conexiones clandestinas y percolación de aguas residuales en el subsuelo sin tratar. Actualmente el distrito de Puno cuenta con un proyecto adjudicado denominado "PTAR TITICACA", que pretende cumplir con los objetivos antes mencionados a partir del año 2023. El "Eficiente Sistema de Saneamiento" inicia con la variable "Nueva Planta de Tratamiento" que utiliza los datos de la variable "M.O Total Descargada al Lago" sometida a un nuevo porcentaje de remoción de materia orgánica del 90% que a su vez está representado por la variable "Nuevo % Remoción M.O.", con variaciones determinadas por la variable "Time" desde el 2023, por otro lado, para cumplir con el segundo objetivo se realizó la recuperación de datos de la materia orgánica antes descargada al subsuelo, asumiendo que desde el 2023 no existirán conexiones fuera de la red de alcantarillado, por ello se adiciona la variable "M.O. que derivaba al subsuelo antes del 2023" a la variable "Nueva Planta de Tratamiento", para finalmente generar un efluente de salida tratado presentado por la variable "M.O. Descargada al Lago desde 2023". En la Tabla 4 se presenta un resumen de las variables con su respectiva descripción y fuente de información para mejorar la comprensión del modelo dinámico del sistema planteado.

Tabla 4. Datos para el modelo de simulación de la proyección de población y estimación de materia orgánica del distrito de Puno

Variable	Descripción y fuente de información	Valor
Factor de Crecimiento Poblacional	de Valor estimado con el método aritmético,	Inicial 0.0257 Final 0.0073

	aplicado y extraído de base de datos del INEI,	
Crecimiento Poblacional	Valor estimado con el método aritmético, aplicado y extraído de base de datos del INEI	
Población Actual	Valor estimado según crecimiento poblacional	Inicial 76 542
DBO5	Valor per cápita establecido en el RNE Norma OS 060	50 g/Hab/día
M.O Pob Conectada a la Red de Alcantarillado.	Población que cuenta con servicio de desagüe y alcantarillado	0.864
M.O Pob NO Conectada a la Red de Alcantarillado.	Población que no cuenta con servicio de desagüe, zonas urbano marginales	0.14
M.O que Deriva al Subsuelo	Porcentaje de materia orgánica que es vertida en letrinas o pozos sépticos	0.75
M.O. que Deriva al Lago	Representa la M.O que circula al lago mediante conexiones directas y clandestinas	0.25
M.O. Descargada Sin Tratar	Valor que representa el déficit del sistema de alcantarillado	0.3583

Remoción de M.O.	Porcentaje de rendimiento de la planta de tratamiento	de 0.66
M.O. Descargado al Lago	Efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales	-
Nuevo % Remoción M.O.	Porcentaje de remoción en la nueva planta de tratamiento de aguas residuales	0.90

Fuente: Elaborado por los autores de la investigación.

Resultados y discusiones

Luego de haber construido el modelo dinámico de sistemas "Vertimiento de Materia Orgánica en el Lago Titicaca del Distrito de Puno, durante el 2007 – 2050" en el software VENSIM PLE 9.0.1 y haber contemplado las principales variables asociadas a este problema de la investigación como la eutrofización de la Bahía interior de Puno del lago Titicaca, por la excesiva evacuación de aguas residuales con alta carga orgánica hacia el lago con proyecciones de alternativas de solución se obtuvieron los siguientes resultados.

Población y materia orgánica

Luego de ejecutar el modelo en VENSIM PLE se obtuvo como resultado que el distrito de Puno para el año 2050 contará con 181 005 habitantes, representando esto un aumento 26% de 37 138 habitantes a partir del 2020.

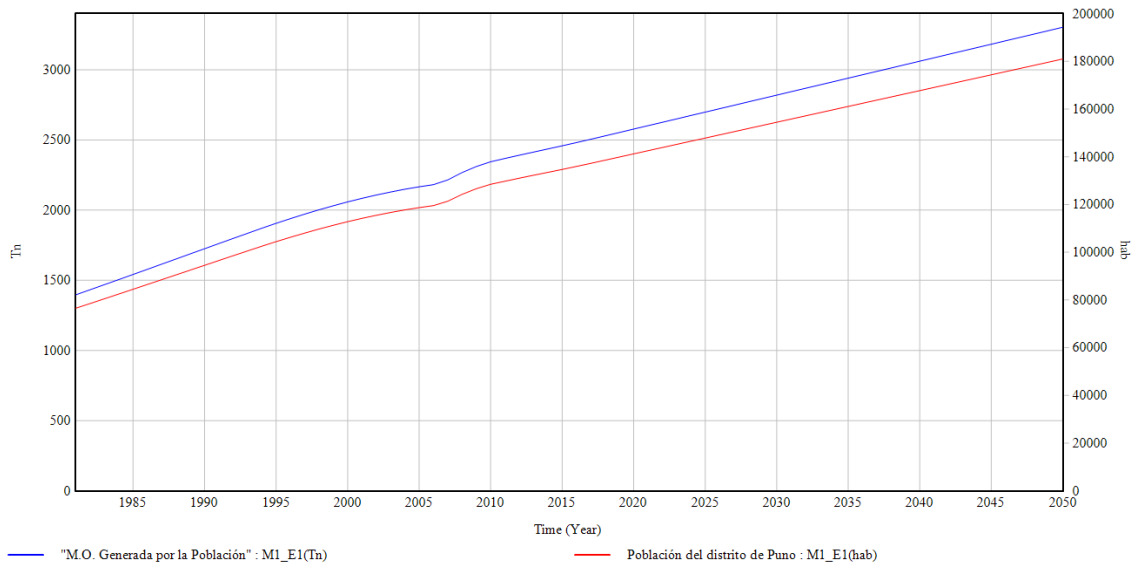


Figura 5. Relación de la población con la M.O. generada.

La figura 5 muestra de forma gráfica en función del tiempo la variación de materia orgánica total en toneladas generada a partir de los efluentes de la población del distrito de Puno y el crecimiento poblacional. Siendo la actividad antropogénica la causa del deterioro de la biodiversidad en los cuerpos de agua del Perú (Cusiche Pérez & Miranda Zambrano, 2019). La línea azul representa desde el año 1981 la materia orgánica en toneladas que se genera anualmente a partir de la población, esta gran cantidad de M.O debe de ser sometido a un tratamiento dependiendo de la gravedad de la contaminación en este caso a un tratamiento riguroso (Grethen, 2016) y la línea roja la variación anual de la población. Se observa el crecimiento poblacional desde el año 1981 de 76 542 habitantes hacia al año 2050 con 181 005 habitantes. Se observa una relación directa positiva entre el crecimiento poblacional y la generación de materia orgánica presente en las aguas residuales, relación que se incrementa anualmente por la migración de la población rural hacia la ciudad por búsqueda de mejores oportunidades (Aranda, 2004). Se distingue una ligera reducción en cuanto al crecimiento poblacional en el 2007 lo cual influye directamente en la generación de materia orgánica presentes en los efluentes. El modelo proyecta que en el año 1981 se generaba 1 396.8 Tn de materia orgánica, que se evacuaban directo al lago, hacia el 2020 esta generación incrementa su valor a 2 577.6 Tn lo que representa un 85% más en relación al año 1981, el modelo indica

que en el año 2050 el valor de la materia orgánica generada será de 3 303.3 Tn representando un 28% más en relación al año 2020.

Red de Saneamiento

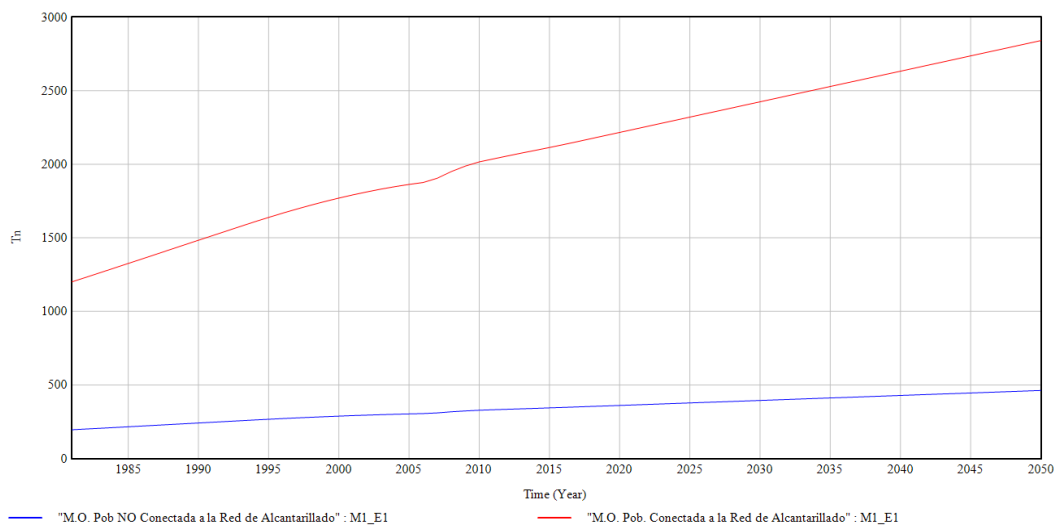


Figura 6. Distribución de M.O. del distrito de Puno.

La figura 6 muestra de forma gráfica en función del tiempo la variación de materia orgánica en toneladas generada a partir de los efluentes de la población del distrito de Puno en función del crecimiento poblacional. La línea roja representa desde el año 1981 la materia orgánica en toneladas que se genera anualmente a partir de la población que está conectada a la red de alcantarillado, y la línea azul la materia orgánica generada por la población que no está conectada a la red. Estas aguas residuales clasificadas municipales tanto urbanos como rurales en su mayoría no pasan por un sistema de tratamiento llegando a contaminar cuerpos de agua (UNAM, 2018) como en este caso lagos. Se observa en el año 1981 la cantidad de materia orgánica que deriva a la red de alcantarillado es de 1 201.33 Tn anuales y 195.57 Tn que no derivan a esta red. En el 2020 se generó 2 216.7 Tn de materia orgánica que derivan a la red representando un 85% más en relación al 1981 y 360.8 Tn de materia orgánica que no derivan a la red representando un 85% más en relación al mismo año, esto ha producido un estado de alarma en la población de la provincia de Puno y el estado peruano, el 2019 se registró contaminación en los cuerpos de agua de alta carga orgánica, declarando el 2020 estado de emergencia por peligro inminente de contaminación de

agua de consumo humano y las respectivas remediaciones en el 2021 que aún están en proceso (INDECI, 2021) . El modelo indica que hacia el 2050 la cantidad de materia orgánica que derivará a la red será de 2 840.9 Tn y la que no deriva a la red será de 462.5 Tn, ambos valores representan 28% y 28% más respectivamente en comparación del 2020. Estos valores son sin duda alarmantes, de no hacer algo al respecto se podría llegar a la misma situación del lago Onondaga en el estado de Nueva York de Estados Unidos, que después de un siglo de ser contaminado recién se está llevando a cabo su descontaminación y rehabilitación (Molina-Prieto & Rubio Fernández, 2016).

Materia Orgánica descargada al Lago Titicaca

Mediante los diferentes datos obtenidos en la investigación y cargados correctamente en el software VEMSIM PLE 8.2.1 se obtuvieron cuatro variables importantes que nos ayudan a determinar la cantidad de materia orgánica que llega al lago Titicaca exactamente a la Bahía Interior de Puno.

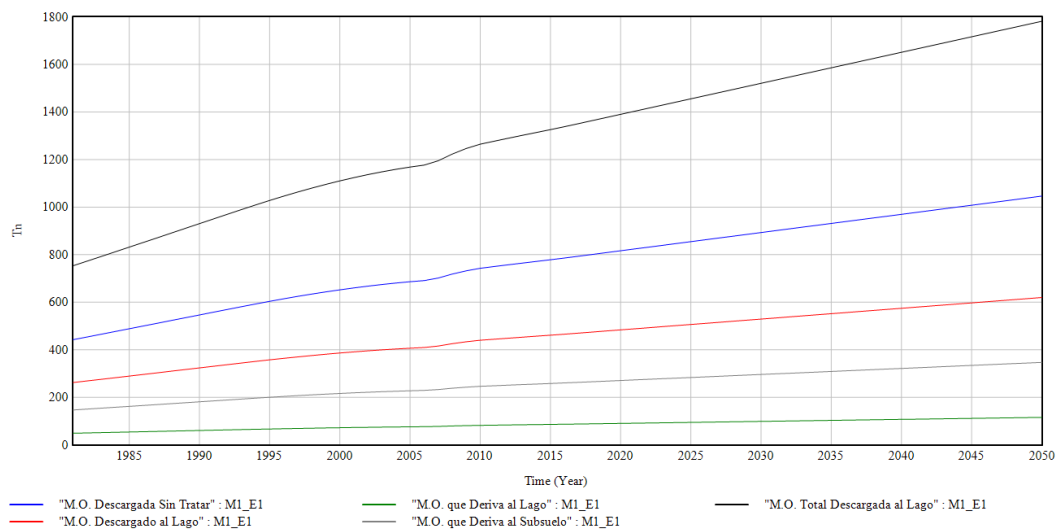


Figura 7. Cantidad de M.O. descargada a la Bahía Interior de Puno.

La figura 7 muestra las cuatro variables que contribuyen a la descarga total de Materia Orgánica siendo:

La "M.O. descargada Sin Tratar" (línea azul) que corresponde a la red de alcantarillado clandestino que descargan directamente al lago.

Descargo en el año 1981 el valor de 443 Tn y 816 Tn en el año 2020 incrementándose un 84%, el modelo estima que para el año 2050 la descarga será de 1 046.3 Tn directas al lago Titicaca, lo que representa un 28% más en relación al año 2020.

La "M.O. descargada al lago" (línea roja) que proviene de la laguna de estabilización teniendo una remoción de 66% generando muchas veces que el sistema de tratamiento colapse puesto que el caudal de diseño ha sobrepasado el límite, existiendo rebalses, ocasionando contaminación ambiental en los alrededores (EMSA PUNO, 2021). El modelo estimo que para el año 1981 se descargó 262 Tn y estima que el año 2050 se descargara 619 Tn incrementándose en un 136 %, más del doble. En el año 2020 se descargó 483.6 Tn, con respecto al 2050 se incrementará un 28%. El autor (Nassar et al., 2010) realizó un estudio sobre los factores que contribuyen al desempeño inadecuado del sistema de tratamiento de aguas residuales de Gaza, Palestina, en la cual atribuye disminución en la eficiencia al aumento de carga orgánica que excedió la capacidad de diseño de la planta de tratamiento, además de la acumulación de lodos y velocidades de flujo (Gopolang & Letshwenyo, 2018).

La "M.O. que deriva al lago" (línea gris claro) que corresponde a viviendas que descargan directamente al lago por tuberías clandestinas. Descargó en el año 1981 unas 49 Tn y el año 2020 unas 90.2 Tn de M.O aumentando 85% más. El modelo estima que para el año 2050 se descargara 115.6 Tn incrementándose un 28% más con respecto al año 2020.

La "M.O. que deriva al Subsuelo" (línea verde) que corresponden a las aguas residuales sin red de alcantarillado que usan silo, pozos sépticos. Descargo en el año 1981 unas 147 Tn y el 2020 unas 270 Tn incrementándose un 85% más, el modelo estima que para el año 2050 se descargara 346 Tn de M.O. y con respecto al año 2020 se incrementara 28%. Cabe recalcar que el tiempo de descarga por esta ruta al lago Titicaca es más lenta que a diferencia de las demás variables, por el hecho de la infiltración del agua que dependerá del tipo de suelo (granulometría) o estructura de la roca, por lo general el agua residual se moverá por la zona menos saturada hacia la saturada para luego llegar al lago (Morales Behar, 2011) siendo un proceso que demanda tiempo y muchas veces no llega al cuerpo de agua.

La "M.O. Total descargada al lago" (línea gris oscuro) representa la suma de la materia orgánica de la línea azul, roja y verde. Sin considerar la línea gris claro ya que es materia orgánica que se pierde o demora mucho tiempo en llegar al lago. Los resultados muestran que el año 1981 se vertieron 753 Tn y el 2021 se descargó 1403 Tn existiendo un incremento anual de materia orgánica de un 86% más. El modelo indica que al año 2050 de no implementarse medidas de control, políticas de gestión, los volúmenes de descarga serán 1 781 Tn de M.O. incrementándose 136% más del doble desde el año 1981. Según Pizarro et al. (2016), las fuentes hídricas ubicadas en zonas densamente pobladas se someten a un proceso acelerado de eutrofización en comparación a lagos rodeados de paisajes que sustentan más bosque nativo y actividades humanas menos intensivas, estudios previos en los lagos del centro-sur de Chile. indican que el aumento de la entrada de aguas residuales de las actividades urbanas, forestales y agrícolas han reducido la calidad del agua.

Escenario "Eficiente Sistema de Saneamiento"

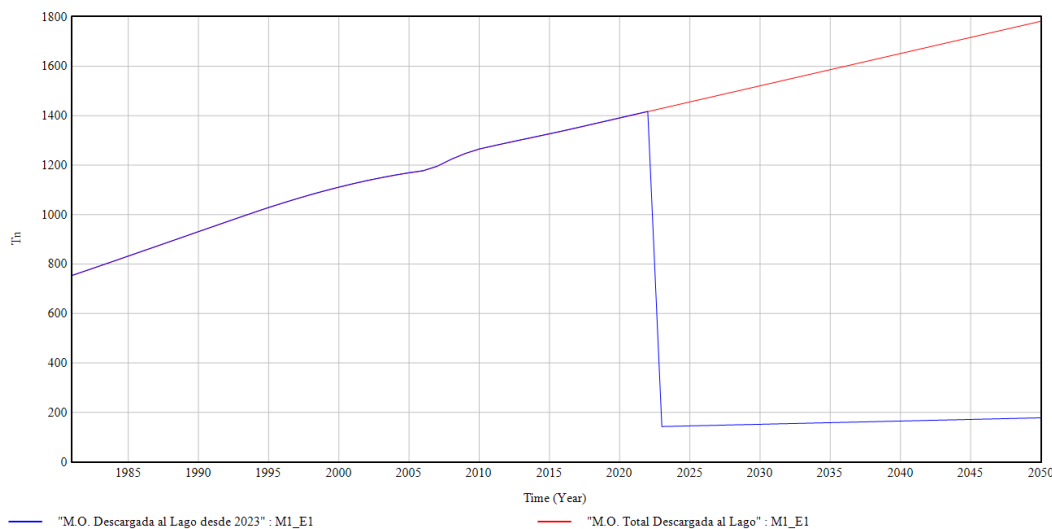


Figura 8. Descarga de materia orgánica a la Bahía Interior con la nueva planta de tratamiento

La figura 8 muestra gráficamente la descarga modelada a partir de los datos intervinientes, generados por la población del distrito de Puno desde el año 1981 hacia el 2050. La línea roja representa la descarga final de materia orgánica luego de contemplar todas las variables mencionadas

del modelo en caso de no implementarse tecnologías, ni políticas de control en la descarga, es decir de mantenerse las condiciones actuales. Siendo así, la descarga en el año 2020 alcanzo las 1 390 Tn, además la descarga acumulada desde 1981 hasta el 2050 es de 91 708 Tn de materia orgánica. Cabe mencionar que desde 1981 al 2022 se habrá vertido 46 752 Tn de materia orgánica que resulta ser el 50% de lo calculado acumulado para el 2050.

Observamos una línea azul denominada "M.O. Descargada al Lago desde 2023" que corresponde a la materia descargada de igual forma que la línea roja con un origen en 1981 manteniendo los mismos valores, pero que a partir del año 2023 se observa un decaimiento importante reduciendo los valores de descarga anuales en un 90%. Según la modelización desde el 2023 al 2050 se verterá 4 498 Tn de forma total en ese periodo de tiempo, que en contraste con la línea roja se evitaría verter 40 458 Tn de materia orgánica producto de la mejora en el sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas. De acuerdo con (Autoridad Nacional del Agua, 2019) mediante un análisis cuantitativo multitemporal de 9 monitoreos realizados en el periodo 2013-2018 a cargo de la Autoridad Nacional de Agua, los parámetros más frecuentes que sobrepasan los límites establecidos en el ECA- Categoría 4, son pH, fosforo, DBO5, y nitrógeno total, evidenciando una afectación a la calidad del agua superficial de la Bahía Interior de Puno en más de la mitad del total de monitoreos realizados. De acuerdo con (Bhagowati & Ahamad, 2019; Gurkan et al., 2006) el aporte excesivo de nutrientes principalmente de nitrógeno y fosforo causan el exceso de sustancias biogénicas que aceleran el proceso de eutrofización, en el humedal Deepor Beel en India que posee las mismas condiciones que el Lago Titicaca, optaron reducir los niveles de descarga de DBO5 y controlar el ingreso de fosforo para mejorar el estado trófico del cuerpo de agua (Center for Science and Environment, 2012). Considerando que estas 40 458 Tn terminen descargadas en la bahía interior, el resultado de los monitoreos futuros representaría el doble de lo hallado a la fecha, sumado a eso las condiciones futuras efectos del cambio climático global, lo cual otorga un mayor sentido de urgencia para atender un problema de recuperación y remediación de nuestro recurso hídrico. La mayoría de los modelos existentes que predicen el uso de agua se establecieron en Europa, normalmente mediante la recopilación de planes de desarrollo, rendimiento de las plantas de tratamiento y datos de consumo de agua que permitieron tomar acciones correctivas. (Liao et al., 2021)

La tabla 5 presenta los valores de descarga, según el modelo dinámico en el periodo de 1981 al 2022 a la actualidad se descargó 46 752 Tn de M.O. representando un 100%. Sin embargo, de no emplearse medidas de control en el segundo periodo de 2023 - 2050 se descargará 44 956 Tn que representan el 96% de lo vertido hasta el 2022. En otro escenario, con una planta de tratamiento de aguas residuales, el modelo dinámico nos muestra que para el segundo periodo solo se descargará el 9.6% de toneladas con respecto al primer periodo. Resaltando que la descarga de materia orgánica con el tratamiento adecuado llegaría a ser mínima, se debe buscar mediante la innovación de nuevos métodos como la tecnología de nanofiltración por nano membrana desarrollados en EE.UU. y Sudáfrica, obtener descargas optimizadas. (Chávez-Lizárraga, 2018). En opinión de Fengle et al., (2021) el tratamiento de aguas residuales de tratadas ubicadas alrededor del lago Erhai, China, permitieron que el agua recuperada represente el 58,3% del agua residual total, además de haber disminuido notablemente las cargas de contaminación y alrededor del 83,3 % de la demanda química de oxígeno (DQO) asumiendo un beneficio ambiental y socioeconómico.

Tabla 5. M.O. vertida en la Bahía Interior de Puno desde 1981 al 2050.

Periodos	Descarga en toneladas			
	Sin tratamiento adecuado	%	Con tratamiento adecuado	%
1981-2022	46 752	100	-	-
2023-2050	44 956	96	4 498	9.6
Descarga Total	91 708		4 498	

Fuente: Elaborado por los autores de la investigación.

Conclusiones y recomendaciones

Luego del diseño, construcción y ejecución del modelo en VESIM PLE se concluye con respecto al crecimiento poblacional, desde el año 1981 al año 2050 fue de 104 463 habitantes, presentando para el año 2050 181 005 habitantes. Así mismo, la generación de materia orgánica dependerá del crecimiento poblacional, en el año 1981 se generó 1 396.8 Tn de M.O.

en el 2020 es 2 577.6 Tn y para el 2050 se alcanzará los 3 303.3 Tn. de generación de M.O. Sin embargo, no toda la materia orgánica generada por el distrito de Puno deriva a una red de alcantarillado. En el año 1981 se enviaron 1 201.3 Tn por la red de alcantarillado y 195.5 Tn no se derivaron, llegando a parar a la bahía interior de Puno de manera clandestina un 25% y 75% al subsuelo por medio de posos septicos y letrinas. Para el año 2020 pasaron a la red de alcantarillado 2 216.7 Tn y 360 Tn pasaron de manera clandestina al lago y al subsuelo. El modelo indica que para el año 2050 se derivara 2 840.9 Tn a la red de alcantarillado y 462.5 Tn seguira llegando al subsuelo y habra mas descargas clandestinas. Finalmente el modelo indica que al año 2050 de no implementarse medidas de control, políticas de gestión, el volúmen anual de descarga para ese año será de 1 781 Tn de M.O. incrementándose 136%, más del doble desde el año 1981, además la descarga acumulada desde 1981 hasta el 2050 será de 91 708 Tn de materia orgánica y al 2022 se habrá vertido 46 752 Tn. La modelización indica de implementarse la PTAR con sus componentes (cámara de rejillas, desarenador, desengrasado, decantador, reactor biológico, tratamiento biológico-físico y el control de lodos activados) desde el 2023 al 2050 el volumen acumulado vertido total se reducirá y verterá solamente 4 498 Tn de forma total en ese periodo de tiempo, lo cual evitará verter 40 458 Tn de M.O en la Bahía interior de Puno.

Luego del desarrollo del modelo dinámico, obtener los resultados y conclusiones, los autores recomiendan realizar más estudios sobre la acumulación de nitrógeno y fosforo en la Bahía interior de Puno, dinámica de eutrofización propio de lagos altoandinos, variación estacional de la carga de contaminantes, con el fin de mejorar la capacidad predictiva y comprensión de los mecanismos ecosistémicos. Así mismo, se debe generar un modelo dinámico de sistemas de las 8 provincias con sus 66 distritos que están alrededor del lago Titicaca para obtener un mejor entendimiento de la contaminación del lago Titicaca y así poder usar estos modelos como una herramienta de gestión ambiental para los gobiernos locales, regionales y nacional.

Agradecimientos

Los autores agradecen a las instituciones publico/privadas EMSA Puno y Autoridad Nacional del Agua – Titicaca por brindar información para el desarrollo de esta investigación, así como al Ingeniero Ambiental Dario

Ccaccya por su orientación durante el desarrollo del modelo y profesores de la casa de estudios mencionada.

Referencias

ANA. (2017). *Fuentes Contaminantes en la Cuenca del Lago Titicaca* (Vol. 2). <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/ANA/636>

ANA. (2009). Ley de los Recursos Hídricos: Ley No 29338. Ley de Los Recursos Hídricos: Ley No 29338, 40. [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/BE196E28BE7D295D05257CE80052C303/\\$FILE/DECRETO_SUPREMO_001_2010_A_G_REGLAMENTO_29338_LEY_REC_HIDR](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/BE196E28BE7D295D05257CE80052C303/$FILE/DECRETO_SUPREMO_001_2010_A_G_REGLAMENTO_29338_LEY_REC_HIDR)

Ahmad, S., & Prashar, D. (2010). *Evaluating Municipal Water Conservation Policies Using a Dynamic Simulation Model*. *Water Resources Management*, 24(13), 3371–3395. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9611-2>

Ahmadi, M. H., & Zarghami, M. (2019). *Should water supply for megacities depend on outside resources? A Monte-Carlo system dynamics simulation for Shiraz, Iran*. *Sustainable Cities and Society*, 44(July 2018), 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.007>

Aquino Espinoza, P. (2017). *Calidad del agua en el Perú. Retos y Aportes Para Una Gestión Sostenible En Aguas Residuales*, 1, 135.

Aranda, N. (2004). *Eutrofización y calidad del agua de una zona costera tropical*. Universidad de Barcelona, 246. <http://www.tdx.cat/handle/10803/1427>

Bakhshianlamouki, E., Masia, S., Karimi, P., van der Zaag, P., Susnik, J. (2020). *Un sistema modelo de dinámica para cuantificar los impactos de las medidas de restauración en el nexo agua energía-alimentos en la cuenca del lago Urmia, Irán*. *Ciencia del medio ambiente total*, p. 708. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134874>

Bhagowati, B., & Ahamad, K. U. (2019). *A review on lake eutrophication dynamics and recent developments in lake modeling*. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 19(1), 155–166. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2018.03.002>

Center for Science and Environment. (2012). *Churning Still Water a Briefing Paper on the State of Urban Waterbodies, Conservation and Management in India*. January, 24.

Cusiche Pérez, L. F., & Miranda Zambrano, G. A. (2019). *Contaminación por aguas residuales e indicadores de calidad en la reserva nacional 'Lago Junín', Perú*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(6), 1433–1447. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i6.1870>

Dong Q, Zhang X, Chen Y, Fang D. (2019) *Dynamic management of a water resources-socioeconomic-environmental system based on feedbacks using system dynamics*. *Water Resour Manag* 33:2093–2108. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02233-8>

Eche, J. J. E., & Caja, C. C. (2021). *El sector agua y saneamiento en épocas de COVID-19*. Capítulo de Ingeniería Sanitaria y Ambiental - Colegio de Ingenieros del Perú.

Espinel Ortiz, A. A., Castiblanco Solorzano, G. A., Guerrero Rojas, Á. D., & Prada Yara, G. A. (2014). *Estudio de prefactibilidad para el sistema de acueducto complementario de la cabecera municipal de la Vega, Cundinamarca* Universidad Militar Nueva Granada. <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/10837>

EMSA PUNO. (2021). *Informe N°177-2021-EMSAPUNO Resultados análisis efectuados en aguas residuales Puno*. Lima.

FAO. (2020). *Reseña técnica sobre el agua, el saneamiento, la higiene y la gestión de aguas residuales para prevenir las infecciones y reducir la propagación de la resistencia a los antimicrobianos*. In *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952. <http://www.fao.org/3/ca9120es/ca9120es.pdf>

Feng, ZM; Yang, YZ; You, Z. (2017) *The Population and Water and Land Resource Carrying Capacity of Xiongan New Area*. *Sci. Technol. Support. Xiongan New Area's Plann. Constr.* 2017, 32, 1216–1223. (Citado por Sun, B., & Yang, X. (2019). *Simulation of water resources carrying capacity in Xiongan New Area based on system dynamics model*. *Water* (Switzerland), 11(5). <https://doi.org/10.3390/w11051085>

Fengle, Y., Xianzhi, Z., Jinhua, L., Hongfeng, Z., Fangming, J., & Zhou, B. (2021). Analysis and evaluation of the treatment and reuse of tailwater: A case study in Erhai Lake. *Journal of Cleaner Production*, 327, 129435. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.129435>

Fundación Ambiente y Recursos Naturales (FARN). (2021). *Conservación de humedales altoandinos y una minería de litio ajustada a estándares sociales y ambientales*. *Wetlands International*, 1–24.

García, M. E., Pérez, J. A., & Generalidades, L. (2019). *Aguas Residuales. Composición. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico Del Agua (CIDTA)*, 22.

Gallardo Piedra, Y. J. (2018). *Modelos de crecimiento poblacional de habitantes y proyecciones para el Distrito de Tambogrande-Piura*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional de Piura, 1–110. CIE-GAL-PIE-2018.pdf (unp.edu.pe)

Grethen, H. (2016). Lucha contra la eutrofización en el mar Báltico: se requieren medidas adicionales y más eficaces. (O. de P. de la U. Europea (ed.); primera ed). Tribunal de Cuentas Europeo. <https://doi.org/10.2865/3694>

Gurkan, Z., Zhang, J., Jørgensen, S.E., (2006). *Development of a structurally Dynamic model for forecasting the effects of restoration of lakes*. *Ecol. Modell.* 197, 89–103.

Gies, L., Agusdinata, DB, Merwade, V. (2014). *Desarrollo de políticas de adaptación a la sequía y evaluación en África Oriental utilizando modelos hidrológicos y de dinámica de sistemas*. *Nat. Peligros* 74 (2), 789 - 813. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1216-2>

Gobierno Regional de Puno. (2019). *PLAN REGIONAL DE SANEAMIENTO PUNO 2021-2025*. Dirección Regional de Vivienda y saneamiento.

Gopolang, O. P., & Letshwenyo, M. W. (2018). Performance Evaluation of Waste Stabilisation Ponds. *Journal of Water Resource and Protection*, 10(11), 1129–1147. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2018.1011067>

INDECI. (2021). Reporte de peligro inminente N° 066-07/03/2021/COEN-INDECI/ 18:00 horas (Reporte N° 33).

<https://www.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2021/02/REPORTE-DE-PELIGRO-INMINENTE-No-066-7MAR2021-ANTE-CONTAMINACION-DE-AGUA-EN-EL-DEPARTAMENTO-DE-PUNO-33>.

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2020). *Perú: Estimaciones y Proyecciones de Población por Provincia y Distrito, 2018-2020*. Obtenido de: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1715/libro.pdf

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2018). *Resultados definitivos censos 2017-Puno. Censos 2017, tomo 14, 1-41*. http://www.inr.pt/uploads/docs/recursos/2013/20Censos2011_res_definitivos.pdf INEI 2018

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2017). *Censos Nacionales: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas*. Obtenido de: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1539/libro.pdf

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2015). *Perú: Principales Indicadores Departamentales 2009-2015*. Obtenido de: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1340/

Karimlou, K., Hassani, N., Rashidi Mehrabadi, A., & Nazari, M. R. (2020). *Developing a Model for Decision-Makers in Dynamic Modeling of Urban Water System Management*. *Water Resources Management*, 34(2), 481–499. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02428->

Kosaka, J. (2020). *Asociaciones Públicas Privadas*. *Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento*, 12. <https://www.proinversion.gob.pe/ptar-puerto-maldonado/docs/ppt/Viceministro-Julio-Kosaka-MVCS-ESP.pdf>

Martínez-Austria, P. F., & Vargas-Hidalgo, A. (2016). *Modelo dinámico adaptativo para la gestión del agua en el medio urbano*. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 7(4), 139–154.

MINAM. (2008). *Diagnóstico ambiental del Perú*. Ministerio Del Ambiente, 025, 31. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/diagnostico-ambiental-peru>

Molina-Prieto, L. F., & Rubio Fernández, D. (2016). Elementos de urbanismo azul: lagos naturales y artificiales. *Revista de Investigación*, 9(2), 22–44. <https://doi.org/10.29097/2011-639x.52>

Morales Behar, A. M. (2011). *Propuesta de identificación de sitios para la infiltración de agua al acuífero de Querétaro* Universidad Nacional Autónoma de México. http://132.248.9.195/ptb2011/agosto/0672248/0672248_A1.pdf

Ocola S., J. J., & Laqui V., W. F. (2017). *Fuentes contaminantes en la cuenca del Lago Titicaca*. In Autoridad Nacional del Agua (Vol. 2).

OEFA. (2014). *Fiscalización ambiental en aguas residuales*. Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental, 36. https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827

ONU. (15 de Marzo de 2019). Organización de las Naciones Unidas. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas: <https://www.unenvironment.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/china-sera-anfitrión-global-del-día-mundial-del-medio>

UNAM. (2018). Estudio sobre la protección de ríos, lagos y acuíferos desde la perspectiva de los derechos humanos. Comisión Nacional de Los Derechos Humanos (CNDH), 313. http://www.cndh.org.mx/sites/all/doc/Informes/Especiales/ESTUDIO_RIOS_LAGOS_ACUIFEROS.pdf

UNESCO. (2020). *Agua y cambio climático*. In *Revista de Obras Públicas* (Vol. 167, Issue 3618).

UNESCO. (2019). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019. No dejar a nadie atrás*. La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. <http://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2019/>

OMS. (2011). *Guías para la calidad del agua de consumo humano*. Organización Mundial de La Salud, 4, 608. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/272403/9789243549958-spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Organización Panamericana de la Salud-OPS. (2019). *La agenda 2030 para el abastecimiento de agua, el saneamiento y la higiene en América latina y el caribe Una mirada a partir de los derechos humanos*. 71. <http://iris.paho.org>

Ospina, G. A. (2019). *Inventario de lagos y avances en el conocimiento de los humedales altoandinos en la región de páramos Las Hermosas, cordillera Central colombiana*. Entorno Geográfico, June, 88–111. <https://doi.org/10.25100/eg.v0i17.8260>

Phan, T. D., Bertone, E., & Stewart, R. A. (2021). *Critical review of system dynamics modelling applications for water resources planning and management*. *Cleaner Environmental Systems*, 2(March), 100031. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100031>

Pizarro, J., Vergara, P. M., Cerda, S., & Briones, D. (2016). Cooling and eutrophication of southern Chilean lakes. *Science of the Total Environment*, 541, 683–691. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.105>

Ramos, V. E., Quispe Coila, J. A., & Elias Piperis, R. K. (2019). *Evaluación de la abundancia relativa de *Telmatobius culeus* en la zona litoral del lago Titicaca, Perú*. *Revista Peruana de Biología*, 26(4), 475–480. <https://doi.org/10.15381/RPB.V26I4.17216>

Sun, B., Yang, X. (2019). *Simulación de la capacidad de carga de los recursos hídricos en Xiong'an New Área basada en modelo de dinámica de sistemas*. *Agua (Suiza)* 11 (5). <https://doi.org/10.3390/w11051085>

WWF, W. W. F. G. D. (2005). *Los humedales altoandinos. Humedales Altoandinos Estrategia Regional*, 19. http://awsassets.panda.org/downloads/los_humedales_altoandinos.