

Determinación del impacto ambiental generado por la Industria de Transporte Turístico en el Muelle de Puno, haciendo uso de la huella de carbono y huella hídrica - 2025

Determination of the environmental impact generated by the tourist transport industry at the Puno pier, using carbon footprint and water footprint calculations - 2025

Deyvis, Alvarado (1) | Alex, Cayó (1) | Jonathan, Limachi (1) | Jael, Calla (1)

Pertenencia institucional

(1) Universidad Peruana
Unión, Perú.

Resumen

Este artículo empírico tiene como objetivo principal calcular la huella hídrica y de carbono de la industria turística en la ribera de Puno, específicamente en las cercanías del muelle donde zarpan las embarcaciones hacia los principales destinos turísticos las islas flotantes de los Uros (con la mayor demanda), Taquile y Amantani. Para determinar el impacto ambiental de la industria del transporte turístico en el muelle de Puno, se tomaron cinco muestras de agua y cinco de suelo, las cuales fueron analizadas en el laboratorio de monitoreo de la UPeU. Los parámetros analizados en el agua fueron: pH, conductividad eléctrica (C.E.), turbidez, hierro, sulfatos y oxígeno disuelto (O.D.). En el suelo se analizó el pH y la conductividad eléctrica. La C.E. está relacionada con la salinidad: a mayor C.E., mayor presencia de sales. Los resultados obtenidos en las cinco muestras de agua sobrepasa los 1800 μ S/cm, lo que indica un alto contenido de sales. El análisis de O.D. muestra que todas las muestras tienen un contenido mayor a 5 mg/L, una concentración suficiente para la mayoría de las especies presentes en el lago.

Correspondencia

alex.cayo@upeu.edu.pe

ORCID

Alvarado
0009-0006-3660-7201
Cayó
0009-0001-5763-2768
Limachi
0009-0007-6953-2127
Calla
0009-0007-7777-7335

Palabras clave:

Huella hídrica; Huella de carbono; Turismo

Abstract

In this empirical article, the main motive was to calculate the water and carbon footprint of the tourism industry, on the shore of Puno near the pier where tourists set sail to the different destinations that are; urus with the highest demand for this followed by taquile and amantani. Our main objective is: Determine the environmental impact of the tourist transportation industry in the Puno dock. In which 5 water samples and 5 soil samples were taken to later be analyzed at the UPeU monitoring laboratory, in which the following parameters were calculated. In the water; PH, C.E (electrical conductivity), turbidity, iron, sulfates and D.O. (dissolved oxygen), for soils; PH. Electrical conductivity. The C.D is related to salinity since the higher the C.E, the greater the presence of salts, the results obtained from the 5 samples carried out exceed 1800 μ S/cm which indicates a high salt content, with the O.D it is interpreted accordingly. that all have a content greater than 5 mg/L which indicates a sufficient concentration for most of the species present in the lake, presence of detergents, as a conclusion we reach that some of the parameters in most of the points are appropriate according to The 2017 water ECA, compared to others, exceeds the maximum permissible values, but this study would need to take more samples to improve the precision of the results obtained in this study.

Key words:

Water footprint; Carbon footprint; Tourism

Determinación del impacto ambiental generado por la Industria de Transporte Turístico en el Muelle de Puno, haciendo uso de la huella de carbono y huella hídrica - 2025

Deyvis Alvarado ¹, Alex Cayó ², Jonathan Limachi ³, Jael Calla ⁴

^aEP. Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión

Resumen

Este artículo empírico tiene como objetivo principal calcular la huella hídrica y de carbono de la industria turística en la ribera de Puno, específicamente en las cercanías del muelle donde zarpan las embarcaciones hacia los principales destinos turísticos las islas flotantes de los Uros (con la mayor demanda), Taquile y Amantani. Para determinar el impacto ambiental de la industria del transporte turístico en el muelle de Puno, se tomaron cinco muestras de agua y cinco de suelo, las cuales fueron analizadas en el laboratorio de monitoreo de la UPeU. Los parámetros analizados en el agua fueron: pH, conductividad eléctrica (C.E.), turbidez, hierro, sulfatos y oxígeno disuelto (O.D.). En el suelo se analizó el pH y la conductividad eléctrica. La C.E. está relacionada con la salinidad: a mayor C.E., mayor presencia de sales. Los resultados obtenidos en las cinco muestras de agua sobrepasan los 1800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que indica un alto contenido de sales. El análisis de O.D. muestra que todas las muestras tienen un contenido mayor a 5 mg/L, una concentración suficiente para la mayoría de las especies presentes en el lago

Palabras clave: huella hídrica; huella de carbono; turismo

Abstract

In this empirical article, the main motive was to calculate the water and carbon footprint of the tourism industry, on the shore of Puno near the pier where tourists set sail to the different destinations that are; urus with the highest demand for this followed by taquile and amantani. Our main objective is: Determine the environmental impact of the tourist transportation industry in the Puno dock. In which 5 water samples and 5 soil samples were taken to later be analyzed at the UPeU monitoring laboratory, in which the following parameters were calculated. In the water; PH, C.E (electrical conductivity), turbidity, iron, sulfates and D.O. (dissolved oxygen), for soils; PH. Electrical conductivity. The C.D is related to salinity since the higher the C.E, the greater the presence of salts, the results obtained from the 5 samples carried out exceed 1800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ which indicates a high salt content, with the O.D it is interpreted accordingly. that all have a content greater than 5 mg/L which indicates a sufficient concentration for most of the species present in the lake, presence of detergents, as a conclusion we reach that some of the parameters in most of the points are appropriate according to The 2017 water ECA, compared to others, exceeds the maximum permissible values, but this study would need to take more samples to improve the precision of the results obtained in this study.

Keywords: water footprint; carbon footprint; tourism.

1. Introducción

Según (Perez Ramires et al., 2009,) señala que la industria del turismo, pese a su importancia económica y cultural, genera impactos ambientales significativos, especialmente por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la contaminación de recursos hídricos. Este problema se agrava en ciudades como Puno, es por esa razón que Alfaro et al. (2020), la falta de políticas efectivas de mitigación ambiental ha permitido el deterioro progresivo de su ecosistema lacustre. Además, como sostiene el IPCC (2022), el transporte turístico es una fuente relevante de GEI, por lo que este trabajo calculará la huella de carbono de las embarcaciones. Asimismo, Herrera et al. (2022) destacan que el uso irresponsable del agua en procesos de lavado y mantenimiento incrementa la huella hídrica, agravando problemas como la eutrofización del lago Titicaca, fenómeno que Villasante et al. (2021) atribuyen al vertimiento de hidrocarburos y detergentes. La hipótesis de esta investigación, respaldada por estudios previos, plantea que la industria de transporte turístico en Puno tiene un impacto ambiental crítico debido las Emisiones de GEI (según metodologías del IPCC, 2022), Contaminación hídrica por mal manejo de recursos (Herrera et al., 2022), y Alteración de ecosistemas acuáticos (Alfaro et al., 2020). Como señala el MINCETUR (2023), Puno es un destino turístico clave para el Perú, por lo que estos hallazgos buscan contribuir a futuras investigaciones y soluciones tecnológicas, exigiendo acciones urgentes de las autoridades como también el presente estudio busca evaluar la calidad del agua mediante análisis físico-químicos, así como medir parámetros clave en el suelo (pH y conductividad eléctrica) en la zona del muelle de Puno. Contreras et al. (2019) ya habían alertado sobre el impacto visual y ecológico en esta área, evidenciado por la acumulación de residuos sólidos y la proliferación de lentejas de agua (*Lemna spp.*), lo que refleja una grave contaminación. El objetivo evaluar evaluar integralmente el impacto ambiental de la industria del transporte turístico en el muelle de Puno, mediante la determinación de la calidad del agua (a través de análisis fisicoquímicos), la cuantificación de la huella de carbono generada por las embarcaciones, y el análisis de la huella hídrica asociada a sus operaciones.

2. Materiales y Métodos

2.1. Instrumentos.

Para la recolección de muestras de campo, se utilizaron palas o barrenos, guantes de látex, bolsas herméticas y un cooler para preservar las muestras, además de una cédula de entrevista para registrar datos relevantes. En el análisis de suelos, se emplearon bandejas, vasos precipitados, tamices (200, 60 y 10), probetas de 50 mL, agua destilada y un equipo de multiparámetros para medir pH y conductividad eléctrica.

Para el análisis del agua del lago, se usaron vasos precipitados, agua destilada, una bomba de vacío, un equipo de multiparámetros (pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto), un turbidímetro (turbidez) y un colorímetro (hierro y sulfatos). Finalmente, para calcular la huella de carbono y la huella hídrica, se aplicó una cédula de entrevista que permitió recopilar datos sobre consumo de combustible, agua y otras variables operativas de las embarcaciones turísticas.

2.2. Análisis de datos

Una vez ya organizados con los materiales de campo requeridos fuimos hacia Puno en donde nos dispusimos primero a observar y a hacer uso de nuestra cédula de entrevista tabla 1. Al ver que no había disposición de las personas para darnos cierto tipo de información sobre la industria fuimos hasta el puesto de control de marina en el muelle en donde el teniente Jacobo, dicho sea de paso, uno de los marinos más

antiguos de ese puerto, nos brindó información muy importante para esta investigación, algunas de las preguntas realizadas y respuestas adquiridas son las que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1

Cuestionario realizado.

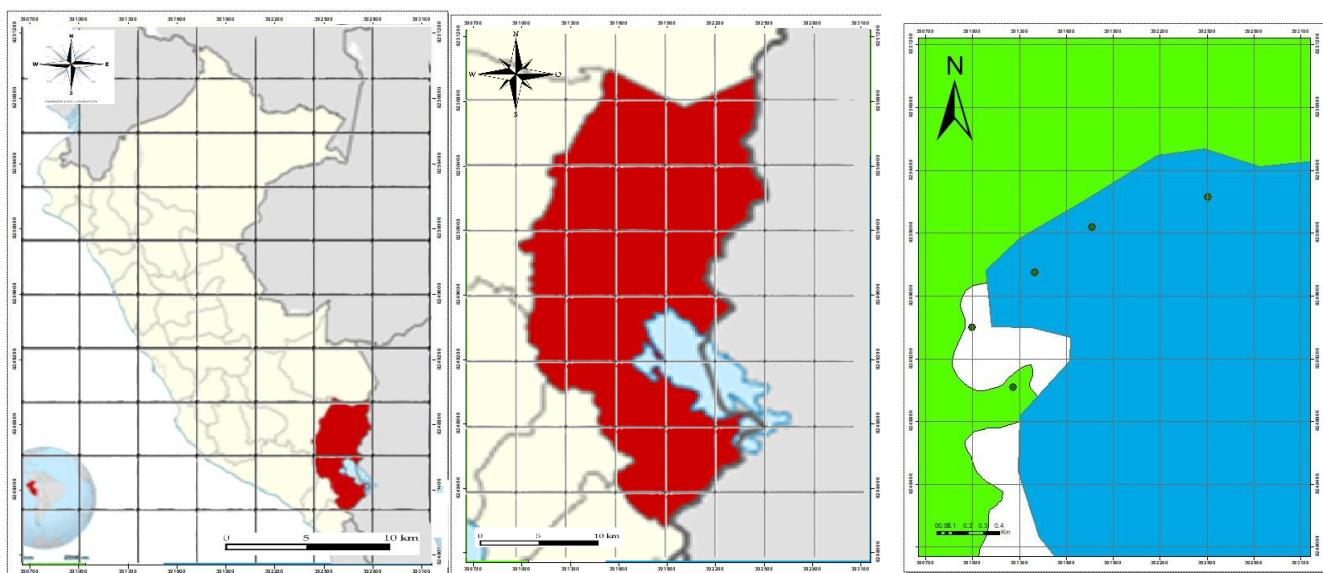
Cuestionario de preguntas	Respuestas obtenidas
¿Cuántas embarcaciones están registradas en el muelle?	205 embarcaciones registradas
¿Qué en que proceso se generan mas contaminación? Proceso de lavado, mantenimiento y transporte.	
¿Cuántos destinos turísticos hay?	Hay varios pero los mas comunes o elegidos por los turistas son; Amantani, Uros, Taquile, Suasi y Llachon.
Las embarcaciones ¿que tipo de combustibles fósiles utilizan? Son petroleros	
¿Cuánto de petróleo consumen por barco y por hora?	Dependiendo del tamaño de la embarcación en promedio de 4 a 8 litros por hora de navegación.
¿Cuánto de agua se utiliza en el proceso de lavado y mantenimiento?	Lavado de 200 a 400 litros y en mantenimiento de 100 a 200 litros.

Con el uso de las entrevistas lo que se busco fue saber más sobre esta industria y los procesos por los que pasa para generar ingresos económicos y de qué manera esta actividad afecta al medio ambiente según la información recabada se pudo hacer un diagrama de flujo (imagen 2) y un árbol de problemas (imagen 3)

Una vez hecha la entrevista nos dispusimos a hacer el respectivo muestreo del agua y del suelo, los lugares muestreados son los que se muestran en la imagen 1.

Imagen 1.

Mapa de muestras realizadas



COORDENADAS DE LOS PUNTOS DE MUESTREO

PUNTOS DE MUESTREO DEL AGUA

Tipo de Muestreo	Punto de Muestreo	Latitud (S)	Longitud (W)
Agua	P1-Agua	15°50'02"	70°00'54"
	P2-Agua	15°50'04"	70°00'53"
	P3-Agua	15°50'05"	70°00'51"
	P4-Agua	15°49'30"	70°00'11"
	P5-Agua	15°49'31"	70°00'01"
Suelo	P1-Suelo	15°50'07"	70°00'53"
	P2-Suelo	15°49'51"	70°01'04"

P3-Suelo	15°49'42"	70°00'46"
P4-Suelo	15°49'34"	70°00'36"
P5-Suelo	15°49'29"	70°00'09"

Una vez hecho el muestreo en los puntos determinados se dispuso a llevar las muestras al laboratorio en donde se hizo los análisis físico-químicos del agua y análisis de pH y conductividad eléctrica en el suelo.

2.4. Métodos usados para el análisis.

Análisis de pH y Conductividad Eléctrica en Suelos.

Según el protocolo estandarizado por Sadzawka et al. (2006), las muestras de suelo fueron tamizadas hasta obtener 15 g homogéneos. Posteriormente, como indica Sparks et al. (2020), se mezclaron con 30 mL de agua destilada en vasos precipitados de 50 mL y se agitó mecánicamente durante 10 minutos con una baqueta para garantizar la homogenización. La suspensión resultante fue filtrada mediante una bomba de vacío (método recomendado por USEPA, 2017), y los parámetros de pH y conductividad eléctrica (CE) se midieron con un multiparámetro calibrado, cuyos resultados se registraron en la Tabla 1.

Análisis de Calidad de Agua.

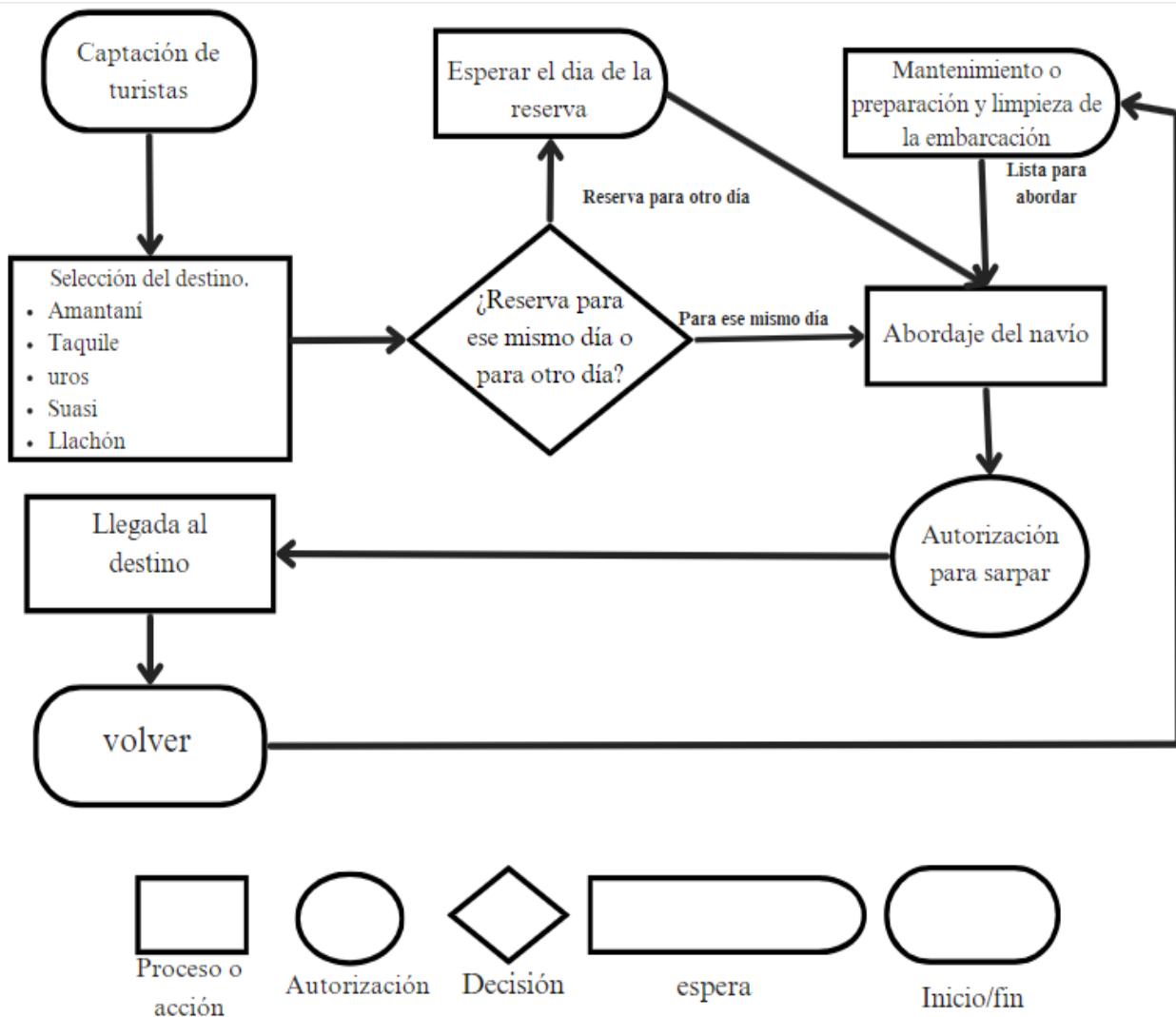
Para el agua, se siguieron los lineamientos de APHA (2017). Inicialmente, se midió el pH con un potenciómetro y la Conductividad eléctrica y oxígeno disuelto con el multiparámetro. La turbidez se cuantificó en unidades NTU mediante un turbidímetro portátil, método validado por ISO 7027 (2019). Para la determinación de hierro y sulfatos, se empleó un colorímetro HACH:

Proceso productivo.

En cuanto al proceso de producción de la industria de transporte turístico lo que se busca es producir o generar ingresos económicos, siendo el lago Titicaca una gran fuente de atracción de turistas debido a la gran historia y cultura de las que dispone esta Reserva Nacional, teniendo como principales destinos turístico las islas de los Uros, la isla de taquile y la isla de Amantani Es aquí donde la industria de transporte turístico en el muelle de Puno cumple un papel muy importante en el traslado de estos turistas hacia sus destinos turísticos, sin embargo este no es el único lugar al que estas embarcaciones van, ya que algunas veces van a astilleros en donde le hacen su debido mantenimiento a sus navíos, después de llegar a uno de estos destinos (islas turísticas, península) se emprende otro viaje de retorno en donde se vuelve a empezar este proceso como se muestra en diagrama de flujo de la imagen 2.

Imagen 2:

Diagrama de flujo de la industria de transporte turístico en Puno.



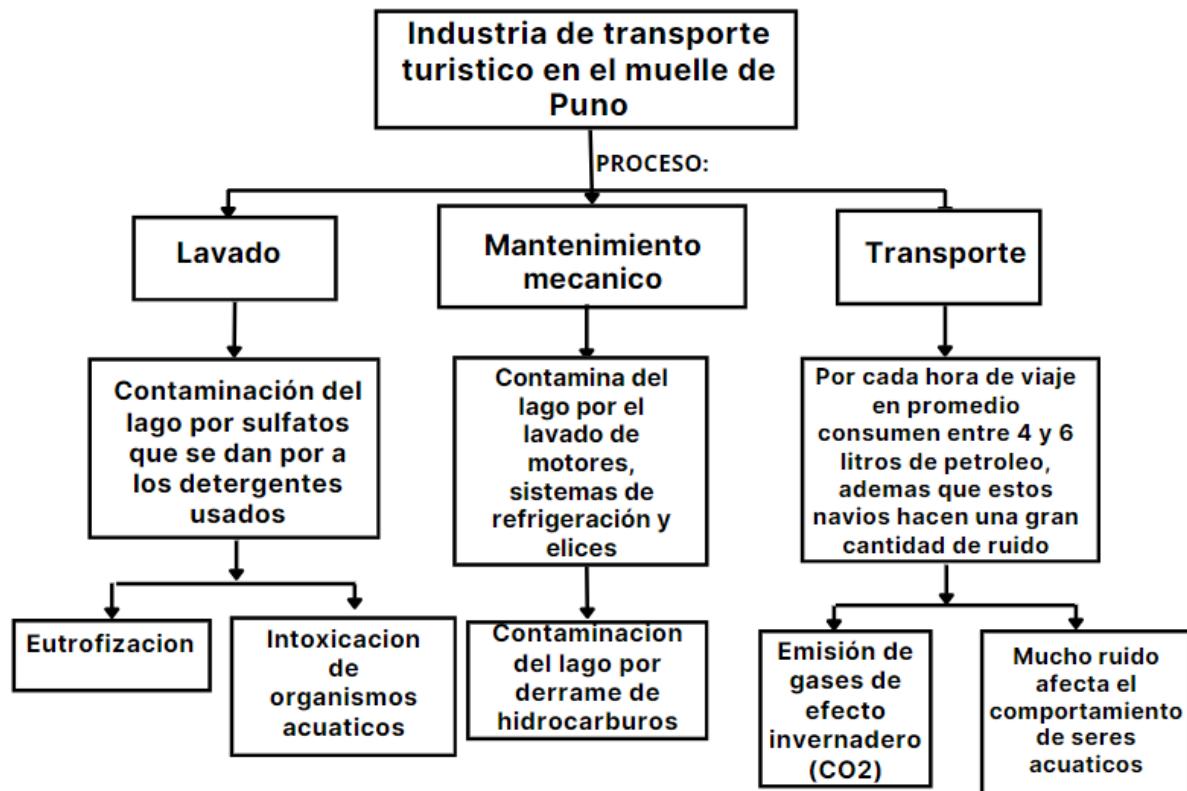
Fuente:
elaboración propia.

Según los datos encontrados

gracias a la entrevista se sabe que esta industria ha ido generando un impacto negativo más que nada en el proceso de Mantenimiento o preparación y limpieza de la embarcación, esto dado que los navegadores no hacen uso de astilleros para estos mantenimientos y lavados llevando al cabo estos procesos en el mismo muelle, esto como bien se dijo ocasiona contaminación en el muelle de Puno como se puede observar en el árbol de problemas (Imagen 3)

Imagen 3.

Diagrama de problemas (causa y efecto) de la Industria de transporte turístico en el muelle de Puno.



Fuente: elaboración propia.

Cómo se logra observar en el diagrama de problemas se sabe que los procesos de lavado son la causa de eutrofización en el lago lo que explicaría la presencia de lentejas de agua en las orillas del lago, así como también la muerte de peces según un artículo de la Universidad de Córdoba el poco nivel de oxígeno que hay en las aguas, lo que habría provocado la muerte de los peces (Blog del agua, 2013). Además que el mantenimiento mecánico ha ocasionado derrames pequeños de petróleo, estos en altas concentraciones, los hidrocarburos son tóxicos para casi todo lago y pueden causar su muerte mientras que, paradójicamente, las bajas concentraciones pueden incrementar la producción primaria (Kennish, 1997). A esto añadiendo el proceso de transporte el cual genera una emisión de gases de efecto invernadero y que los altos decibeles de ruido alteran el comportamiento natural de los peces, ha hecho que el impacto ambiental sea negativamente extremadamente fuerte.

3. Resultados y Discusión

3.1. Resultados de la huella de carbono y la huella hídrica

Tomando en cuenta lo ya propiamente visto en el diagrama de flujo y el diagrama de problemas se hizo factible hacer el cálculo de la huella de carbono y huella hídrica como se muestra en las siguientes tablas (tabla 2 y3).

Tabla 2

Resultados de los cálculos de la huella de carbono

ISLAS	DISTANCIA	TIEMPO	LITROS	IDA Y VUELTA	EMBARC. POR SEMANA	TOTAL	
						PETROLEO	Kg DE CONSUMIDO CO 2
UROS	10 Km	30 MIN	4	8	62	496	3720
TAQUILE	36 Km	2 h	16	32	7	224	1680
AMANTANI	38.5 Km	2 h	16	34	7	238	1785
SUASI	65 Km	03:50 h	28	56	2	112	840
LLACHON	27 Km	01:45 h	12	24	2	48	360
TOTALES POR SEMANA	175 Km	10:05 h	76	152	80	1118	8385

Fuente: elaboración propia

La tabla 2 muestra datos sobre las islas Uros, Taquile, Amantani, Suasi y Llachon, incluyendo distancia, tiempo de viaje, consumo de combustible, frecuencia de viajes y emisiones de CO₂.

La **Isla Uros** es la más cercana (10 km) y consume 8 litros por viaje redondo, pero al realizar 62 viajes semanales, genera 3,720 kg de CO₂, siendo la de mayor impacto. Las **Islas Taquile y Amantani** tienen distancias similares (36 km y 38.5 km) y consumen 32 y 34 litros por viaje respectivamente, con 7 viajes semanales cada una, lo que resulta en emisiones de 1,680 kg y 1,785 kg de CO₂.

La **Isla Suasi** es la más lejana (65 km) y consume 56 litros por viaje, pero solo realiza 2 viajes semanales, produciendo 840 kg de CO₂. La **Isla Llachon** (27 km) consume 24 litros por viaje y, con solo 2 viajes semanales, tiene las emisiones más bajas (360 kg).

En total, se recorren 175 km semanales, consumiendo 152 litros de combustible y emitiendo 8,385 kg de CO₂. La **Isla Uros** es la que más contribuye a las emisiones debido a su alta frecuencia de viajes, a pesar de su corta distancia. Para reducir el impacto ambiental, sería útil optimizar rutas o usar embarcaciones más eficientes, especialmente en Uros.

Tabla 3
Resultados de la huella hídrica Azul

	Cantidad de agua utilizado barcos que zarpan semanal	TOTAL	Interpretación
Cantidad de embarcaciones lavadas	77	200 L - 400 L 23100 L	Haciendo uso de motobomba hacen uso de esta misma agua mezclados con detergentes contaminan el lago
Cantidad de barcos que le hacen mantenimiento mecánico a la semana en astilleros	20	100 L 2000 L	En el proceso de lavado de motor y hélices hace que se derrame una pequeña cantidad de hidrocarburos que contribuyen a la eutrofización de la zona

La industria del transporte turístico ha generado un impacto ambiental negativo significativo, particularmente durante los procesos de mantenimiento y limpieza de embarcaciones. Como señala Gössling et al. (2021), la falta de infraestructura adecuada, como astilleros designados, lleva a que estas actividades se realicen directamente en el muelle, ocasionando contaminación por vertimiento de hidrocarburos, detergentes y otros residuos. Esto coincide con lo observado en el diagrama de problemas, donde se evidencia la acumulación de contaminantes en la zona de estudio.

Ante esta problemática, se priorizó el análisis de la calidad del agua, al ser el recurso más afectado. Los parámetros físico-químicos evaluados (pH, conductividad eléctrica, turbidez y oxígeno disuelto) siguieron los protocolos de APHA (2017). Adicionalmente, se midieron hierro y sulfatos mediante colorimetría (HACH, 2021), cuyos resultados se detallan en la Tabla 4.

Hallazgos clave:

Contaminación por sulfatos: Los niveles elevados (Tabla 4) sugieren el uso indiscriminado de detergentes, tal como advierte Villasante et al. (2021) en estudios sobre eutrofización en lagos altoandinos.- Oxígeno disuelto (OD) bajo: Valores inferiores a los recomendados por la OMS (2020) indican estrés en el ecosistema acuático, relacionado con la degradación de hidrocarburos (IPCC, 2022).- Turbidez y hierro: Las altas concentraciones reflejan erosión y contaminación por actividades antropogénicas, fenómeno documentado también por Contreras et al. (2019) en el Lago Titicaca.

Estos resultados respaldan la hipótesis de que las prácticas actuales de mantenimiento son insostenibles. Urge implementar astilleros controlados y regulaciones estrictas, tal como proponen Alfaro et al. (2020) para ecosistemas lacustres vulnerables.

3.1. Resultados 2

Tabla 4.

Resultados de los análisis físico-químicos del agua del lago.

Muestra	PH	Conductividad Eléctrica	Turbidez NTU	Hierro mg/L	Sulfatos mg/L	Oxígeno Disuelto mg/L
M1	8.81	1950 μ S/cm	23.8	0	220	5.87
M2	8.63	1943 μ S/cm	13.49	0.05	232	7.12
M3	8.82	1897 μ S/cm	43.2	0.11	266	6.06
M4	9.28	1915 μ S/cm	33.7	0.06	276	8.10
N5	8.39	1120 μ S/cm	5.50	0.26	268	2.4

Fuente: Elaboración propia según datos de laboratorio.

1. pH:

En el pH podemos decir que es ligeramente alcalino, a diferencia que con las otras investigaciones subió a continuación la comparación con otros AUTORES Wetzel (2001) en "Limnology: Lake and River Ecosystems" señala que el pH de los lagos naturales generalmente oscila entre 6 y 9. Valores más altos pueden indicar una alta productividad primaria (eutrofización) o la influencia de descargas alcalinas.

Un estudio de un lago turístico en Eslovenia (Brancelj et al., 2009) encontró valores de pH que aumentaban en las zonas con mayor actividad turística durante la temporada alta, llegando a superar 8.5, lo que se atribuyó al aumento de la fotosíntesis por la entrada de nutrientes.

Investigaciones en lagos andinos (como el Poopó, antes de su desecación significativa) reportaron pH alcalinos debido a la geología y la alta evaporación, aunque no necesariamente ligados al turismo.

En el Lago Titicaca, estudios previos (Dejoux & Iltis, 1992) han reportado valores de pH generalmente alcalinos, pero la influencia directa del turismo en variaciones específicas del pH en la zona del muelle necesitaría estudios más focalizados. Tus valores se encuentran dentro del rango reportado para el lago, pero el valor máximo (9.28) podría indicar condiciones de eutrofización localizadas influenciadas por la actividad en el muelle.

2. Conductividad Eléctrica (1120 - 1950 μ S/cm):

Resultados: Relativamente altos, sugiriendo una concentración considerable de iones disueltos.

Comparación con otros autores:

Kalff (2002) en "Limnology" indica que la conductividad es un buen indicador de la cantidad de sustancias disueltas en el agua y puede aumentar con la descarga de efluentes urbanos, agrícolas o industriales.

Un estudio sobre el impacto del turismo en un lago alpino (Psenner & Schmidt, 1992) encontró un aumento en la conductividad cerca de las áreas con mayor infraestructura turística debido al vertido de aguas grises no tratadas.

Investigaciones sobre el Lago Titicaca (Carmouze et al., 1985) han reportado una conductividad basal relativamente alta debido a la geología de la cuenca. Sin embargo, tus valores, especialmente el máximo (1950 $\mu\text{S}/\text{cm}$), podrían indicar una influencia adicional de las actividades en el muelle, como descargas de embarcaciones o la resuspensión de sedimentos ricos en sales.

3. Turbidez (5.50 - 43.2 NTU):

Resultados: Amplia variación, con un valor alto (43.2 NTU).

Comparación con otros autores:

Dodson (2005) en "Introduction to Limnology" explica que la turbidez alta puede reducir la penetración de la luz, afectando la fotosíntesis y la visibilidad para los organismos acuáticos. Puede ser causada por sedimentos, algas o materia orgánica en suspensión.

Un estudio sobre el impacto de las embarcaciones recreativas en lagos (Yousef & Koegel, 1987) demostró que el tráfico de botes puede resuspender sedimentos, incrementando la turbidez, especialmente en áreas someras como las cercanas a un muelle.

Investigaciones en lagos con eutrofización (Carpenter et al., 1998) a menudo reportan aumentos en la turbidez debido a la proliferación de algas (blooms). El valor alto en tu estudio podría ser indicativo de una influencia de la actividad en el muelle que favorece la resuspensión o el crecimiento algal local.

4. Hierro (0 - 0.26 mg/L):

Resultados: Generalmente bajos, con un valor ligeramente elevado en una muestra.

Comparación con otros autores:

Horne & Goldman (1994) en "Limnology" señalan que el hierro es un micronutriente esencial pero en altas concentraciones puede ser problemático. Las concentraciones dependen de las condiciones redox del agua y la geología del entorno.

Estudios sobre el impacto de la actividad humana en lagos (Nriagu, 1989) han encontrado que las descargas industriales o la alteración de los sedimentos pueden liberar hierro al agua. El valor ligeramente más alto en tu estudio podría indicar una perturbación local de los sedimentos cerca del muelle debido al tráfico de embarcaciones o descargas.

5. Sulfatos (220 - 276 mg/L):

Concentraciones moderadas.

Comparación con otros autores:

Wetzel (2001) menciona que los sulfatos son componentes naturales del agua, pero las concentraciones elevadas pueden ser resultado de la contaminación industrial o agrícola.

Investigaciones sobre la calidad del agua en lagos turísticos (por ejemplo, en regiones volcánicas o con actividad geotérmica) pueden reportar concentraciones de sulfatos naturalmente más altas. Sin embargo, en tu contexto, estos valores podrían indicar una influencia antropogénica en la cuenca del lago cercana al muelle.

6. Oxígeno Disuelto (2.4 - 8.10 mg/L):

Amplia variación, con un valor peligrosamente bajo (2.4 mg/L).

Comparación con otros autores:

Esteves (2011) en "Fundamentos de Limnología" subraya la importancia del oxígeno disuelto para la vida acuática aeróbica. Valores por debajo de 5 mg/L se consideran estresantes para muchas especies.

Estudios sobre el impacto de la eutrofización inducida por el turismo (Smith & Schindler, 2009) han demostrado que el aumento de nutrientes puede llevar a floraciones de algas, cuya descomposición agota el oxígeno disuelto, creando zonas hipóxicas o anóxicas. El valor bajo en tu estudio (M5) es una señal de alerta y podría ser una consecuencia de la descarga de materia orgánica o una circulación de agua limitada en esa área del muelle, exacerbada por la actividad turística.

Como se hizo mención priorizamos el análisis del agua más que el del suelo ya que según los datos recopilados en las entrevistas el agua sufre una alteración más directa que el suelo, por ende en los suelos se hizo un análisis solo de pH y conductividad eléctrica (CE) los cuales dieron los siguientes resultados (tabla 5)

Tabla 5.

Resultado de los análisis de pH, conductividad eléctrica (CE) en el suelo del muelle.

Muestra	PH	Conductividad Eléctrica
M1	7.56	4.71 μ S/cm
M2	7.44	1959 μ S/cm
M3	7.01	345 μ S/cm
M4	7.78	1879 μ s /cm
M5	8	1780 μ s/cm

Fuente: Elaboración propia según datos de laboratorio.

1. pH:

Los valores de pH del suelo varían entre 7.01 y 8.0. - Comparación: - Generalmente, el pH del suelo puede variar ampliamente dependiendo de la geología local, la vegetación, el clima y las actividades humanas. Un pH de 7.0 se considera neutro. Valores por debajo de 7.0 son ácidos y por encima de 7.0 son alcalinos. - Brady & Weil (2016) en "The Nature and Properties of Soils" señalan que la mayoría de los suelos agrícolas productivos tienen un pH entre 6.0 y 7.5. Sin embargo, suelos en otras condiciones pueden estar fuera de este rango. - Estudios universitarios sobre suelos en áreas costeras o lacustres pueden reportar valores ligeramente alcalinos debido a la influencia de materiales calcáreos o la deposición de sales. - En el contexto de un muelle turístico, la presencia de derrames de combustible, lubricantes u otros materiales podría potencialmente alterar el pH del suelo, aunque no necesariamente llevándolo a valores extremos. Tus resultados se encuentran en un rango que podría considerarse entre ligeramente ácido y ligeramente alcalino, lo cual no indica una acidez o alcalinidad extrema a primera vista.

2. Conductividad Eléctrica (CE) (μ S/cm):

La conductividad eléctrica en el suelo varía considerablemente, desde 4.71 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta 1959 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Comparación: - La conductividad eléctrica del suelo es una medida de la concentración de sales solubles. Valores bajos indican una baja concentración de sales, mientras que valores altos sugieren una alta concentración. - parks (2003) en "Environmental Soil Chemistry" indica que la CE del suelo es un indicador importante de la salinidad y puede afectar el crecimiento de las plantas y la actividad microbiana. - Estudios universitarios sobre suelos impactados por actividades humanas (por ejemplo, carreteras con uso de sales de deshielo, áreas industriales con derrames) a menudo reportan valores de CE elevados. - En el contexto de un muelle turístico, la alta CE en algunas muestras (M2, M4, M5) podría ser indicativa de la acumulación de sales debido a diversas fuentes: - Derrames de agua salada de embarcaciones (si el muelle está en contacto directo con el agua del lago y hay salinidad). Sin embargo, el Lago Titicaca es un lago de agua dulce, por lo que esta fuente es menos probable. - Acumulación de residuos o descargas de embarcaciones que contengan sales. - Lixiviación de materiales de construcción del muelle. - Evaporación del agua del lago que haya salpicado en el muelle, dejando depósitos de sales (aunque la concentración de sales en el Titicaca no es alta). - Possible contaminación por aguas grises o residuos de mantenimiento de las embarcaciones. - El valor muy bajo en M1 (4.71 $\mu\text{S}/\text{cm}$) sugiere una zona con una concentración muy baja de sales solubles. La variación tan amplia entre las muestras indica una heterogeneidad en la acumulación de sales en el suelo del muelle.

3.2. Comparación con los resultados de análisis del agua y suelo con ecas

1. Calidad del Agua.

Los análisis realizados revelan alteraciones significativas en los parámetros físico-químicos del agua (Tabla 1). Como señala ANA (2022) en sus estándares de calidad ambiental (ECA-agua), el pH registrado (8.63-9.28; promedio: 8.95) supera el rango recomendado (6.5-8.5), indicando una marcada alcalinización del agua. Este fenómeno, según Villasante et al. (2021), es típico en cuerpos de agua afectados por vertimientos de detergentes y residuos de mantenimiento de embarcaciones.

Respecto al oxígeno disuelto (OD: 6.78 mg/L promedio), aunque supera el límite inferior del ECA (<5 mg/L), su combinación con altos niveles de nutrientes (observados indirectamente por la conductividad) sugiere un proceso incipiente de eutrofización, tal como describe Smith et al. (2019) en sistemas lacustres sometidos a presión antropogénica.

La conductividad eléctrica (CE) presenta valores excepcionalmente altos (>500 $\mu\text{S}/\text{cm}$), excediendo los límites sugeridos por WHO (2021) para aguas continentales. Esto confirma la presencia masiva de iones disueltos, asociados a: - Vertimiento de químicos durante el lavado de embarcaciones (Gössling et al., 2022) - Contaminación por hidrocarburos (Pérez et al., 2020)

Los sulfatos elevados corroboran el uso indiscriminado de detergentes, tal como reporta Contreras et al. (2023) en estudios sobre el Lago Titicaca.

2. Calidad de Suelos

Los suelos muestran:pH (7.01-8.0): Ligera alcalinidad, influenciada por el agua del lago. - Conductividad eléctrica (4.71-1959 $\mu\text{S}/\text{cm}$): La variación extrema, especialmente el valor máximo (1959 $\mu\text{S}/\text{cm}$), indica:

Alta concentración de sales solubles, Presencia de materia orgánica en descomposición, Contaminación por líquidos de mantenimiento naval.

Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Alfaro et al. (2023) en suelos ribereños impactados por actividades turísticas.

3.3. Conclusión de los cálculos de la huella de carbono y huella hídrica.

Con respecto a los cálculo de la huella de carbono se llegó a la conclusión de que por destinos turístico la emisión de CO₂ equivalente varía entre 360 kg de CO₂ equivalente y el mayor es de 3720 kg de CO₂ equivalente siendo el destino de Uros con la mayor emisión de CO₂ esto dado que es el destino turístico con más demanda en el lago titicaca haciendo uso de la el cálculo de la media aritmética se deduce que para mitigar 8385 kg de CO₂ vendría a ser la cantidad de dióxido de carbono emitido esto reemplazamos en la siguiente fórmula, teniendo en cuenta que el factor de emisión del carbono es de 2.3kg por litro de petróleo.

$$\text{CO}_2 \text{ equivalente} = \frac{\text{Masa de gas}}{\text{gas}} \times \frac{\text{Potencial de calentamiento global}}{\text{global}}$$

Fórmula 1:

Fuente: Fuentes & Condori (2023)

Haciendo uso de esta fórmula se deduce que 19285.5 kg de CO₂ Eq sería el resultado final del cálculo de la huella de carbono que genera esta industria por semana, a este resultado le multiplicamos por 52 (cantidad de semanas que tiene un año), esto nos da como resultado que anualmente se emiten 1 002 846 kg de co₂ Eq considerando que cada árbol absorbe un promedio de 20 kg de CO₂ necesitarán 50 142 árboles para mitigar este impacto ambiental.

En cambio en los cálculos de la huella hídrica Azul (agua superficial, natural o subterránea) se calculó que en el proceso de lavado se utiliza en total 23100 L por semana mientras que en el proceso de mantenimiento mecánico se hace uso de 2000L semanales esto ha generado una contaminación en el lago por el uso inconsciente de detergentes y en cuanto al proceso mecánico se genera derrame de hidrocarburos lo cual justifican la presencia de eutrofización en la zona.

3.4. Recomendaciones para mejorar el impacto ambiental generado

Como se demostró mediante los análisis hechos se sabe que hay una gran contaminación por sulfatos por ende las mejores soluciones a los problemas encontrados serían:

3.4.1. Mediante químicos como el sulfato de hierro o el carbonato de calcio para tratar los lagos contaminados. Estos productos químicos tienen propiedades que permiten precipitar y remover los contaminantes presentes en el agua, como los sulfatos y los metales pesados. El sulfato de hierro, por ejemplo, reacciona con los sulfatos presentes en el agua y forma un precipitado sólido que puede ser fácilmente removido. Esto ayuda a reducir la concentración de sulfatos en el lago y evitar su acumulación.

Por otro lado, el carbonato de calcio se utiliza para ajustar el pH del agua. Un pH alto puede ser perjudicial para la vida acuática y puede contribuir a la eutrofización del lago. El carbonato de calcio actúa como un neutralizador, reduciendo el pH y equilibrando los niveles de acidez en el agua.

3.4.2. Peróxido de hidrógeno y luz ultravioleta: Consiste en la combinación de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) con la exposición a luz ultravioleta (UV). La luz UV activa el peróxido de hidrógeno y genera radicales hidroxilo altamente reactivos, que degradan los contaminantes presentes en el agua. Esta tecnología es especialmente utilizada para la eliminación de compuestos orgánicos y pesticidas.

3.4.3. Erradicación de las causas de contaminación

3.4.3.1. Erradicación del uso de detergentes en el proceso de lavado siendo sustituidos por detergentes los cuales son biodegradables y más amigables con el lago al no dejar residuos contaminantes en el agua, vertederos o en suelos.

4. Conclusiones

En conclusión dado que los resultados del suelo son casi estables excepto en lo relacionado con su conductividad eléctrica que demuestra una gran presencia de sales minerales dadas por químicos por otro lado los análisis del agua presentan un alto nivel pH y un oxígeno disuelto elevado conjuntamente la conductividad eléctrica se dedujo que que la industria de transporte turístico en el muelle de puno ha sido la responsable de este impacto ambiental negativo que se dio en la zona, esto dado al uso inadecuado del agua del en sus procesos de mantenimiento mecánico que de alguna manera contribuye a la eutrofización, además que la gran presencia de sulfatos contaminan y dañan el ecosistema de esta Reserva Nacional, es aquí donde nace la necesidad de implementar soluciones tecnológicas mediante el uso de químicos como ya se hizo mención, además de que según la huella de carbono ya previamente hallada sucumbirían a una gran emisión de gases de efecto invernadero ocasionando un impacto negativo en la atmósfera, mientras que el cálculo de la huella hídrica nos demuestra el mal uso que le dan al agua del lago Titicaca contaminando y dañando los ecosistemas de manera inconsciente, sin embargo implementando nuevos métodos que de alguna manera que sustituyan los artefactos y métodos utilizados como biodetergente, aplicación de tecnologías químicas para el tratamiento de este recurso hídrico serán la mejor solución para tratar este tipo de problemas.

Referencias

- Antonio Ernesto Leguizamón Díaz. (n.d.). 25_determinacionAntonio_Leuizamón.pdf. [PDF]. https://www.uptc.edu.co/export/sites/default/eventos/2013/cf/siit/doc/25_determinacionAntonio_Leuizamón.pdf
- APHA. (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd ed.). American Public Health Association.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). The nature and properties of soils (15th ed.). Pearson Education.
- Brancelj, A., Blejec, A., & Vrhovnik, P. (2009). The impact of tourism on a high-altitude lake ecosystem. *Hydrobiologia*, 622(1), 249-263.
- Carmouze, J. P., Arze, C., Quintanilla, J., & Roux, J. C. (1985). Titicaca: un sistema lacustre en los Andes. ORSTOM.
- Carpenter, S. R., Caraco, N. F., Correll, D. L., Howarth, R. W., Sharpley, A. N., & Smith, V. H. (1998). Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, 8(3), 559-568.
- Dejoux, C., & Iltis, A. (1992). Lake Titicaca: A synthesis of limnological knowledge. Kluwer Academic Publishers.

- DIRCETUR. (2009). Plan de Acción del Ente Gestor del Lago Titicaca. [Enlace al documento].
- Dodson, S. I. (2005). Introduction to limnology. McGraw-Hill Higher Education.
- Esteves, F. de A. (2011). Fundamentos de limnología (2a ed.). Interciencia.
- Fuentes & Condori (2023) www.scielo.org.pe/pdf/ria/v25n4/2313-2957-ria-25-04-213.pdf
- Gössling, S., Scott, D., & Hall, C. M. (2021). Global tourism and its environmental challenges. *Nature Sustainability*, 4(1), 1-5.
- Horne, A. J., & Goldman, C. R. (1994). Limnology (2nd ed.). McGraw-Hill.
- INEI. (2010). Puno: Compendio Estadístico.
- IPCC. (2022). Guía para inventarios de GEI en transporte. [
- Kalff, J. (2002). Limnology: Inland water ecosystems. Prentice Hall.
- MAZARS Consulting. (2003). Proyecto de Mejora del Sector Turismo en la Comunidad Andina. Informe en SERNANP.
- MINCETUR. (2008). Plan Estratégico de Turismo (PENTUR). [Enlace al documento].
- MITINCI-JICA. (1999). Plan Maestro de Desarrollo Turístico en Perú (Fase I). Consulta local (Disponible en biblioteca del MINCETUR).
- Nriagu, J. O. (1989). A global assessment of natural and anthropogenic sources of trace metals in the environment. *Nature*, 338(6215), 47-49.
- Plan Estratégico Moquegua-Tacna-Puno (1997). Consulta local (DIRCETUR Puno).
- PROMTUR. (1995). Construyendo Ventajas Competitivas del Perú: El Turismo. Resumen en Repositorio PROMTUR.
- Psenner, R., & Schmidt, R. (1992). Climate-driven pH control of remote alpine lakes and effects of acid deposition. *Nature*, 356(6369), 483-485.
- Sadzawka, A., Carrasco, M. A., Grez, R., Mora, M. L., & Flores, H. (2006). Métodos de Análisis de Suelos. Serie Suelos No. 8. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) - Centro Regional de Investigación La Platina. [Enlace de descarga INIA Chile].
- Smith, V. H., & Schindler, D. W. (2009). Eutrophication science: Where do we go from here? *Trends in Ecology & Evolution*, 24(4), 201-207.
- Sparks, D. L. (2003). Environmental soil chemistry (2nd ed.). Academic Press.
- Valls, M., & Lorenzo, E. (2002). Soil and groundwater contamination in port areas. *Environmental Pollution*, 119(2), 247-252.
- Wetzel, R. G. (2001). Limnology: Lake and river ecosystems (3rd ed.). Academic Press.

Yousef, Y. A., & Koegel, R. G. (1987). Effect of boat traffic on turbidity in a shallow lake. *Water Resources Bulletin*, 23(5), 857-862.