

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

ESTUDIO DE ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA PARA LA EVALUACIÓN AMBIENTAL DE PROCESOS FOTOCATALÍTICOS USADOS PARA LA REMOCIÓN DE COLORANTE AZUL BRL DE AGUA

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
QUÍMICO**

DANIEL ALEJANDRO LOAYZA SÁNCHEZ

DIRECTOR: ING. PAUL VARGAS JENTZSCH, PhD

Quito, septiembre 2022

© Escuela Politécnica Nacional (2022)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo Daniel Alejandro Loayza Sánchez, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Daniel Alejandro Loayza Sánchez

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Daniel Alejandro Loayza Sánchez, bajo mi supervisión.

Ing. Paul Vargas Jentsch, PhD
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres, Patricio e Irma y a mis hermanos, Kevin y Amyra, por todo ese apoyo incondicional que me han dado siempre, porque son el motor que impulsa mis sueños, son los que han estado a mi lado en todo momento y frente a toda adversidad, siempre han sido mis guías y me han dado todo para poder llegar hasta donde he llegado; solo tengo palabras de agradecimiento y admiración hacia ustedes, por ello quiero compartir este logro tan importante.

Agradezco a Marcela, mi prometida, por todo ese apoyo incondicional que me brindó durante toda la carrera y que lo sigue haciendo día tras día, porque junto a ella he tenido los momentos más felices de mi vida y fue una de las principales razones para poder conseguir este logro tan importante. Este es uno de tantos triunfos que vamos a conseguir en esta vida juntos mi amor y quiero decirte que eres mi inspiración, mis ganas de salir adelante y mi todo, te amo.

Agradezco a todos mis amigos, de la carrera y de la universidad, por todos esos momentos de sacrificio y sobretodo felicidad que vivimos a lo largo de nuestra formación y por siempre estar en los momentos más difíciles. Gracias por todo y quiero hacer una mención especial a Edu y a Carlos, los cuales son una parte fundamental de mi vida.

Agradezco inmensamente a Paul e Isabel por toda su paciencia y ayuda para desarrollar este trabajo. Gracias por ser unos profesores excelentes y ser parte de mi proceso de formación, porque de ustedes he aprendido mucho y han sido la mejor de las guías. Por todas esas palabras de aliento, cuando más las necesité. Un inmenso GRACIAS por todo.

Agradezco a todos los profesores que fueron parte de mi proceso de formación, porque de cada uno aprendí muchas cosas; me ayudaron en mi crecimiento tanto personal como profesional. Una mención especial a todo el departamento de Ciencias Nucleares, que me brindó todo su apoyo para poder desarrollar diferentes proyectos, entre ellos mi tesis. GRACIAS a todas las personas que fueron parte de esto.

Agradezco a Luis Ramos, José Luis Canga y Lina Vázquez por brindarnos sus conocimientos, apoyo y colaboración para el desarrollo de este proyecto.

Estudio de Análisis del Ciclo de Vida para la Evaluación Ambiental de Procesos Fotocatalíticos Usados para la Remoción de Colorante Azul BRL de Agua

Resumen: Los colorantes son el principal contaminante de la industria textil; debido a su compleja estructura química es difícil su degradación y generan impactos negativos en los ecosistemas y salud humana. Por ello, se realizó un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) comparativo de dos procesos fotocatalíticos realizados a escala de laboratorio para el tratamiento de 1 m³ de agua sintética (unidad funcional). De esta manera, se propuso un reactor de lecho fijo de película delgada (TFFBR) para escalar todos los datos obtenidos de los estudios antes mencionados. Se analizaron los siguientes escenarios: TiO₂ soportado sobre PET inmovilizado por "dip coating" (Escenario A); TiO₂ soportado sobre fibra de vidrio inmovilizada con silicona (Escenario B); No actuación (Escenario C). El ACV de ambos procesos permitió identificar y visualizar impactos en diferentes categorías ambientales que a primera vista no eran evidentes. Si bien el tratamiento con soporte de fibra de vidrio pareció *a priori* ser más amigable con el medio ambiente, los resultados mostraron un mayor impacto ambiental para este escenario en 9 de las 16 categorías y se determinó una diferencia de 5,30 milipuntos [mPt] con respecto al tratamiento con PET. Además, se evidenció que el Escenario C de no actuación, presenta los menores impactos, y esto se atribuye a que no se consideraron todos los contaminantes que vienen en un efluente real. Por lo tanto, el ACV representó una herramienta útil para evaluar objetivamente ambos estudios basados en Procesos Avanzados de Oxidación, y se aplicó para corroborar si los tratamientos eran soluciones factibles a los diferentes problemas ambientales analizados.

Palabras clave: ACV, POAs, industria textil, Reactor fotocatalítico, TFFBR.

Life Cycle Analysis for the Environmental Assessment of Photocatalytic Processes Used for the Removal of Direct Blue 1 Dye from Water

Abstract: Dyes are the main pollutant in the textile industry; due to their complex chemical structure, their degradation is difficult, and they generate negative impacts on ecosystems and human health. For this reason, a comparative Life Cycle Analysis (LCA) of two photocatalytic processes carried out on a laboratory scale was carried out for the treatment of 1 m³ of synthetic water (functional unit). For this a thin-film fixed-bed reactor (TFFBR) was proposed to scale all the data obtained from the aforementioned studies. The following scenarios were analyzed: TiO₂ supported on PET immobilized by "dip coating" (Scenario A); TiO₂ supported on glass fiber immobilized with silicone (Scenario B); and No actions (Scenario C). The LCA of both processes allowed to identify and visualize impacts in different environmental categories that at first sight were not obvious. Even though the fiberglass treatment seemed to be more environmentally friendly, the results showed a greater environmental impact for this scenario in 9 of the 16 categories and a difference of 5.30 milipoints [mPt] was determined with respect to the treatment with fiberglass. PET. In addition, it was evidenced that the scenario C of no action presents the least impacts, and this may be attributed to the fact that not all the pollutants in a real effluent were considered. Therefore, the LCA represented a useful tool to objectively evaluate both studies based on Advanced Oxidation Processes, and it was applied to corroborate if the treatments were feasible solutions to the different environmental problems analyzed.

Keywords: LCA, AOPs, textile industry, photocatalytic reactor, TFFBR

1. INTRODUCCIÓN

La revolución industrial marcó un antes y un después en la historia de la humanidad, y se ha constituido en un hito que destaca la importancia de la innovación tecnológica para dinamizar el comercio internacional y el desarrollo económico (Palomino, 2017). Al mismo tiempo, inició un periodo de gran crecimiento poblacional, pues entre el año 1800 y principios de siglo XX, la población se duplicó; esta sigue en aumento a la par que se ha manifestado un deterioro ambiental significativo (Komlos, 1990). El desarrollo sostenible está directamente relacionado con un equilibrio entre los impactos económicos, ambientales y sociales. En este contexto, la

industria textil es conocida por ser una actividad no sostenible, ya que genera aspectos ambientales, entre ellos vertidos industriales que, muchas veces, son descargados sin ningún tratamiento previo a cuerpos de agua (Sahu y Singh, 2018). El proceso de tinción requiere de la adición de auxiliares que facilitan que los colorantes reaccionen y se fijen a las fibras, además de, recursos naturales y un alto consumo de agua y energía (Ancy et al., 2022). El principal contaminante liberado con el agua por las industrias textiles son los colorantes, muchos de los cuales son de difícil degradación y no se pueden eliminar fácilmente mediante tratamientos convencionales debido a su estructura química y el consiguiente impacto ambiental asociado a su liberación (Kaur et al., 2022). Un claro

ejemplo de la contaminación del agua por colorantes son los procesos de tinturado de prendas de vestir en el cantón de Pelileo, ubicado en la provincia de Tungurahua, Ecuador.

Existen diferentes técnicas para reducir la carga contaminante del efluente, las más utilizadas son los procesos biológicos aerobios y anaerobios. Sin embargo, estas presentan desventajas que se asocian con los largos tiempos de operación requeridos para lograr una tasa óptima de remoción de contaminantes (González & Escamilla, 2008). Se pueden aplicar Procesos de Oxidación Avanzada (POAs) para la eliminación de colorantes (Paździor et al., 2019). En los últimos años se ha determinado que los POAs son eficientes en el tratamiento de colorantes orgánicos no biodegradables, y con estas tecnologías se podría lograr la mineralización completa de la molécula hasta obtener moléculas no contaminantes (Robert et al., 2017). Los POAs permiten la oxidación química de los compuestos orgánicos en virtud de la generación de un agente oxidante muy fuerte como es el radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$); este tiene una elevada capacidad oxidante, no selectiva y que involucra tiempos de reacción cortos (Ohtani, 2016). Si bien el $\bullet\text{OH}$ no es el único radical que facilita la remoción de contaminantes en el agua, es el más importante. Entre los distintos POAs se destaca la fotocatalisis, que es considerada una tecnología eficaz para el tratamiento de colorantes textiles (Robert et al., 2017). Un tipo de fotocatalisis es la fotocatalisis heterogénea; se caracteriza por generar $\bullet\text{OH}$ mediante la formación de un par electrón-hueco debido a la interacción del fotocatalizador con la radiación UV (Foteinis y Chatzisyneon, 2020). Los fotocatalizadores son semiconductores y entre ellos el dióxido de titanio (TiO_2) (nanoparticulado) es el más estudiado en virtud a su bajo costo, alta disponibilidad en el mercado, estabilidad química y alta fotoactividad (Ramasundaram et al., 2016).

La mayor eficacia en los tratamientos fotocatalíticos se logra mediante el uso del fotocatalizador nanoparticulado, sin embargo, se tiene una seria desventaja asociada con la complejidad en la recuperación/separación del fotocatalizador del medio acuoso después de completado el tratamiento (Lazar et al., 2012). Por este motivo, se han realizado varios estudios acerca de la inmovilización del TiO_2 sobre soportes inertes, pues esto facilitaría considerablemente la separación del fotocatalizador al finalizar el proceso (Chen y Dionysiou, 2006; Abdel-Maksoud, Imam, y Ramadan, 2016). Entre los soportes propuestos y estudiados están materiales basados en dióxido de silicio (SiO_2); varios tipos de vidrios como sílice fundida o cuarzo. Su selección depende de su costo y transparencia. (Borrás, 2017). Otros materiales que también se estudiaron como soportes de fotocatalizadores son metales, cerámicos, zeolitas y plásticos (Carvalho et al., 2016; Mozia et al., 2012).

Dos trabajos realizados en la Escuela Politécnica Nacional destacan. Se exploró la posibilidad de utilizar el TiO_2 soportado sobre tereftalato de polietileno (PET) y, también, sobre fibra de vidrio, mediante el empleo de diferentes técnicas para inmovilizar el fotocatalizador. Sandoval et al. (2017), en su trabajo titulado "Photocatalytic degradation of azo dyes over semiconductors supported on polyethylene terephthalate and polystyrene substrates", utilizaron PET y poliestireno

(PS) como materiales de soporte para el TiO_2 y usaron la técnica de "dip coating" para inmovilizar el fotocatalizador. Por otra parte, Mena Valencia (2018), en su estudio titulado "Estudio de la reutilización y regeneración mediante radiación ultravioleta y visible de fotocatalizadores de dióxido de titanio inmovilizado en fibra de vidrio para el tratamiento del colorante Azul BRL", empleó silicona para inmovilizar el TiO_2 sobre la fibra de vidrio. En ambos estudios se utilizó TiO_2 anatasa nanoparticulado, pues este es más eficiente que el microparticulado en este tipo de estudios fotocatalíticos (Borrás, 2017).

En los estudios antes mencionados, no es fácil dilucidar cuál alternativa de tratamiento tiene mayores o menores impactos ambientales. Ante ello, existen herramientas que facilitan el análisis y, de esta manera, se puedan tomar decisiones con la perspectiva de elegir las opciones ambientalmente más amigables. El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una de estas herramientas; ha sido creada para obtener información relacionada con los impactos ambientales causados por un producto, proceso o servicio (Hauschild et al., 2018). Esta metodología logra identificar y cuantificar la energía y materia empleada en el proceso, además de las descargas al ambiente con el fin de determinar oportunidades de mejora para su optimización (Roos, 2016). Al realizarse un análisis integral de todo el proceso permite la toma de decisiones de todas las partes involucradas con una visión global. Así se evita que la evaluación de impactos ambientales se enfoque únicamente en las emisiones o vertidos de una etapa específica, ya que podrían intensificarse en una siguiente fase (Bor et al., 2011). El ACV consta de cuatro etapas: 1) definición de objetivo, alcance y unidad funcional; 2) inventario del ciclo de vida; 3) evaluación del impacto del ciclo de vida; 4) interpretación del ciclo de vida (International Organization for Standardization, 2006; Institute for Environment and Sustainability, 2010). Es importante tener en cuenta que, la mayoría de las veces, el "mejor" tratamiento se elige con base en el análisis técnico y económico. Sin embargo, desde el punto de vista ambiental y, mediante el ACV, se puede identificar el mejor tratamiento.

En el presente estudio se realizó un análisis de ciclo de vida (ACV) para la evaluación ambiental de dos procesos fotocatalíticos diseñados para remover el colorante Azul BRL de aguas residuales, que usan TiO_2 inmovilizado sobre PET y fibra de vidrio, respectivamente. Para esto, se concibió el proceso de tratamiento de las aguas que contienen el colorante a escala semi industrial mediante el empleo de un reactor de lecho fijo de película delgada (TFFBR). Con información sobre este reactor y los procedimientos que implican el tratamiento, se realizó un inventario de ciclo de vida (ICV) y se aplicó una metodología apropiada para el ACV según la Norma ISO 14040:2006. Los resultados obtenidos fueron discutidos con la perspectiva de potenciales aplicaciones del ACV en trabajos de investigación sobre POAs actuales y futuros.

2. METODOLOGÍA

2.1 Características del sistema de tratamiento y criterios de diseño

Se propone un sistema de tratamiento a nivel semi industrial para la remoción del colorante Azul BRL; este sistema consta de un reactor de lecho fijo de película delgada (TFFBR, por sus siglas en inglés) tipo “batch” de acero inoxidable. Además, se cuenta con 2 tanques de almacenamiento. El tanque A almacena el agua receptada del proceso de tinturado para su posterior tratamiento y el tanque B almacena el agua para cuatro tratamientos (1 día de trabajo); este último cuenta con una válvula de bola en la parte inferior del tanque para la descarga del agua hacia el reactor. El agua es transportada de un tanque a otro mediante una bomba (marca TRUPER de ½ HP), la misma que se utiliza una vez al día para evitar un excesivo consumo energético. También se tiene un sistema de lámparas UV-C para el tratamiento del efluente. En la Figura 1 se presenta un esquema del sistema.

El agua para tratamiento se recolectó en el tanque A. En 1 día de trabajo se realizaron 4 “batch” de tratamiento de agua para lo cual, del tanque A, se bombeó el agua sintética al tanque B y, posterior a eso, se llenó el reactor con 74,31 L (1 “batch”). Esto asegura un espesor de película de líquido de 2,8 mm. El tratamiento inició con el encendido de las lámparas UV-C.

Se fijaron las dimensiones del reactor en valores similares al reactor propuesto por Zayani et al. (2009) ya que se consideró un espacio entre lámparas para sus conectores. Se calculó el área del reactor tomando en cuenta una geometría rectangular. Se consideró la cantidad de agua y las dimensiones de la caja Petri usada en los experimentos de laboratorio para determinar el espesor de la película de agua sobre el soporte con fotocatalizador inmovilizado. De esta manera no fue necesario realizar cálculos de la transmisión de la radiación a través del medio líquido.

Se dimensionaron el tanque A, el cual almacenó 1 m³ de agua a tratar (solución de agua y colorante), y el tanque B, el cual almacenó la cantidad de efluente correspondiente a cuatro tratamientos. Las dimensiones de los tanques (diámetro y altura) se basaron en la relación propuesta en la norma API 650 que es $D/H > 1,33$ (American Petroleum Institute, 2021). Ambos tanques fueron sobredimensionados un 20 % con respecto al volumen que van a almacenar. El tanque B presentó una válvula de bola para la descarga del efluente hacia el reactor. Para esta descarga, se calculó el tiempo de llenado del reactor con base a la ecuación de balance de masa y se determinó un tiempo promedio de descarga. Con respecto a la bomba, se seleccionó la bomba tipo centrífuga de menor potencia existente en el mercado y se determinó el consumo energético de la misma. Detalles de los cálculos realizados se presentan en las Fichas Técnicas II-XXIII.

De los estudios que se tomaron como referencia para este trabajo (Mena Valencia, 2018; Sandoval et al., 2017), se sabía que previo a la inmovilización del TiO₂ sobre los soportes, estos fueron tratados empleando un baño de ultrasonido. Este tratamiento acondicionó la lámina de PET o fibra de vidrio. El baño de ultrasonido presentó un volumen útil de 97 L y se lo llenó en su totalidad con agua y/o etanol, según sea el caso, para 50 acondicionamientos. Por lo tanto, se determinó el consumo energético del baño de ultrasonido tomando en cuenta que, para el caso de PET, el tiempo del ultrasonido fue

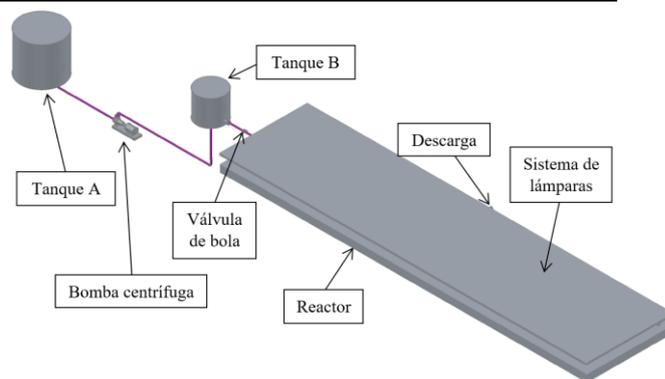


Figura 1. Esquema del sistema de tratamiento propuesto.

de 30 min y, para la fibra de vidrio, de 5 min. Además, se determinó la cantidad de agua (tratamiento con PET) y agua/etanol (tratamiento con fibra de vidrio) son necesarios para el baño de ultrasonido y sus reposiciones por pérdidas.

La lámina de PET se reutilizó múltiples veces. Sobre la lámina de PET se depositó el TiO₂ y este material se utilizó para el tratamiento de agua. Como consecuencia del tratamiento de agua con colorante, parte de la cantidad de este último se depositó por adsorción sobre la superficie del TiO₂, y esto resultó en una disminución considerable de la eficiencia del tratamiento fotoquímico. Es por esta razón que se removió el TiO₂ de la lámina de PET con la ayuda de un cepillo después de haber realizado el tratamiento de 10 m³ de agua residual y este TiO₂ se llevó al relleno sanitario. Es importante destacar que la cantidad de colorante depositado sobre el TiO₂ fue pequeña comparada con la masa de TiO₂, por tanto, se despreció.

Para el escenario de la fibra de vidrio se inmovilizó el TiO₂ mediante silicona líquida. Para facilitar la aplicación del TiO₂ y la silicona sobre la fibra de vidrio, y garantizar una distribución uniforme sobre la superficie, se agregó etanol al 96 % v/v, y este se evapora al poco tiempo (emisión atmosférica). El material resultante fue muy resistente y se pudo reutilizar múltiples veces. Una dificultad operativa fue que el TiO₂ adsorbió colorante y gradualmente, conforme se reutiliza, se perdió la eficacia en el tratamiento. Por esta razón, se usó el material para el tratamiento de 4 lotes de agua residual (74,31 L de agua residual para cada lote). Después, de los 4 lotes tratados, el TiO₂ soportado sobre la fibra de vidrio fue regenerado por exposición a la luz del sol por algunas horas, y fue reutilizado para el tratamiento.

La demanda química de oxígeno (DQO) del agua residual (solución del colorante en agua) se determinó con la fórmula de la molécula del colorante Azul BRL (C₃₄H₂₄N₆Na₄O₁₆S₄) y con la suposición de una reacción con oxígeno (O₂) para producir CO₂, H₂O, NO₃⁻, Na⁺ y SO₄²⁻. Esto quiere decir que la molécula del colorante se transformó químicamente a las especies inorgánicas más oxidadas y se determinó la cantidad de oxígeno (O₂) que se necesitó para ello.

El porcentaje de remoción de DQO es un valor que, de acuerdo con la literatura, sería 50 % (valor aproximado de remoción de DQO cuando se degradan azo colorantes similares al Azul BRL mediante fotocatalisis heterogénea con TiO₂) (Hoang et

al., 2021). Esta es una medida de la mineralización que se alcanza y no quiere decir que el colorante no se degrade. De hecho, si bien la remoción de DQO puede ser del 50 %, la degradación del colorante puede alcanzar 99 %.

Se consideró PET reciclado, posiblemente de botellas usadas, el cual es extruido para producir una lámina de espesor 0,43 mm. Esta lámina es el soporte para el TiO_2 . Se calculó la cantidad de energía necesaria para calentar y fundir el PET. Se consideraron las propiedades de este material en el punto de fusión de equilibrio ya que en este punto presenta los mayores valores para sus propiedades. El calor empleado fue calculado a partir del calor sensible y calor latente del PET. Para el cálculo de la masa del PET requerida, se determinó la densidad del PET. Se hizo una estimación de la densidad mediante el procedimiento indicado a continuación. Se recortaron pedazos de PET de 1 cm de lado, se unieron y se midió el espesor en conjunto y se los pesó con una balanza modelo I-2000 (marca Kanji). La densidad se obtuvo por división de la masa de PET por su volumen.

La cantidad de TiO_2 inmovilizada sobre la lámina de PET y la fibra de vidrio fue obtenida a partir de las cantidades reportadas para los ensayos de laboratorio. Se determinó la masa de TiO_2 para cada caso con la consideración del área de soporte a nivel de laboratorio y el área a nivel semi industrial.

Se utilizó ácido clorhídrico (HCl) e hidróxido de sodio (NaOH) para modificar el pH del agua residual. Primero se bajó el pH hasta 2,5 y luego se llevó a pH 7 justo antes de la descarga a un cuerpo de agua receptor. Se despreció el consumo de iones H^+ debido al proceso fotocatalítico, por tanto, el HCl y el NaOH ingresan al agua en proporciones estequiométricas. El agua a la salida ya no tendrá HCl y NaOH, sino el cloruro de sodio (NaCl) resultante de la neutralización, y este se calcula por estequiometría. Como consecuencia de la neutralización también se produce H_2O misma que es descargada.

La masa de etanol para la dilución de la silicona se determinó con la relación planteada por Mena Valencia (2018); por cada 0,75 g de silicona líquida se emplearon 15 mL de etanol al 96% en v/v.

El tiempo de reacción para cada caso, se determinó con base a las constantes cinéticas de pseudo primer orden determinadas por cada estudio para alcanzar un porcentaje de remoción del 99,06%. El tiempo de tratamiento para el caso con soporte de PET fue de 56 min, mientras que para el caso con soporte de fibra de vidrio fue 33 min. Con respecto a las lámparas UV, se llegó a un equilibrio entre el tiempo de tratamiento con el número de lámparas y se propuso que sean 70 lámparas de 13 W de potencia de salida UV-C y el tiempo de operación para las lámparas del caso de soporte en PET es de 3,23 h, mientras que para el caso de la fibra de vidrio 2,16 h.

Se determinó la cantidad de agua requerida para la inmovilización por “dip coating” mediante la relación propuesta por Sandoval et al. (2017); por cada 2 g de TiO_2 se requiere 1 L de agua, posterior a eso, se determinaron las pérdidas por evaporación.

2.2. Alcance del análisis de ciclo de vida

La función del sistema de tratamiento fue evaluar el proceso de tratamiento de las aguas de teñido. La unidad funcional se definió como 1 m^3 de agua sintética que sale del proceso de tinturado. Los datos fueron recolectados lo más cercano posibles a los experimentos mencionados anteriormente y fueron escalados a nivel semi industrial. Las fronteras del sistema se presentan en la Figuras 1.

Este estudio abarcó los impactos potenciales en 3 áreas generales: salud humana, medioambiente y recursos naturales, debido a esto las categorías de impacto seleccionadas fueron: Cambio climático; Reducción de capa de ozono; Toxicidad humana; Sustancias inorgánicas respiratorias; Radiación ionizante; Formación fotoquímica de ozono; Acidificación; Eutrofización; Ecotoxicidad; Uso del suelo; Agotamiento de recursos.

La cuantificación de los flujos de entradas y salidas del sistema en estudio se basó en los artículos de Mena Valencia, 2018 y Sandoval et al., 2017, los mismos que se escalaron a nivel semi industrial. Con estos datos se realizó la evaluación del ciclo de vida donde se empleó el método EF 3.0 en el programa SimaPro versión 9.3 con base en la metodología ILCD (International Reference Life Cycle Data System). El software SimaPro permite obtener información sobre el desempeño ambiental de los productos y servicios. Este programa viene provisto con varios “datasets” de Inventario de Ciclo de Vida (ICV), entre los cuales se encuentran la base de datos ecoinvent v3, Agrifootprint y ELCD (PRé Sustainability B.V., 2022). Esas bases de datos proporcionan información cuantitativa para las diferentes categorías de impacto ambiental. Con base a los flujos de entrada y salida del inventario de ciclo de vida, el software hace el cálculo de los (mili)puntos para el impacto global.

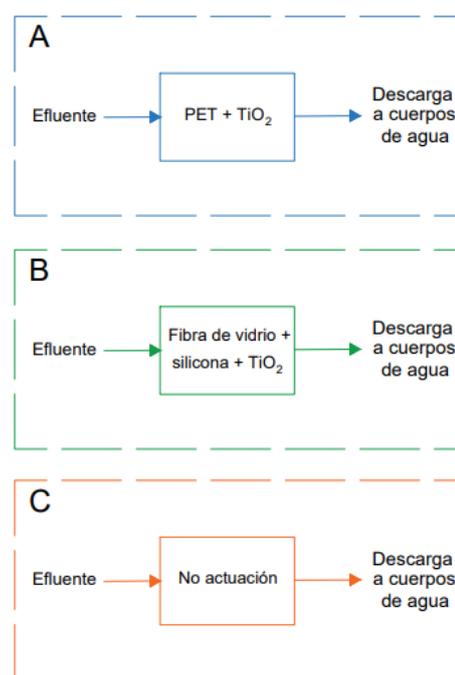


Figura 2. Fronteras del sistema para cada escenario propuesto. (A) Tratamiento con PET y TiO_2 . (B) Tratamiento con fibra de vidrio, silicona y TiO_2 . (C) No actuación.

Se realizó la interpretación de los resultados del análisis de ciclo de vida; los valores obtenidos en cada categoría ambiental se analizaron, compararon y discutieron para cada escenario y, también, se evaluaron los impactos finales asociados a la disponibilidad de recursos, ecosistemas y salud humana (que son contribuyentes para el impacto global).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Diseño de un reactor semi industrial

El sistema propuesto en este estudio constó de un reactor de lecho fijo de película delgada (TFFBR, por sus siglas en inglés) tipo “batch” de acero inoxidable. Además, se contó con 2 tanques de almacenamiento y un conjunto de lámparas UV-C. Las principales características del sistema propuesto se presentan en la Tabla 1.

En la Tabla 1 se observa que el volumen del reactor es 74,31 L, lo que corresponde a 1 “batch” de tratamiento; esto se determinó mediante las dimensiones del reactor y el espesor de película de fluido que corresponde a 2,8 mm, correspondiente a los ensayos de laboratorio. Por otra parte, se consideró que las dimensiones de los tanques (diámetro y altura) sigan la relación antes mencionada con base en la norma API 650. La cual es una norma que proporciona los parámetros para el diseño de tanques que almacena petróleo, productos de petróleo y otros productos líquidos.

Con respecto al conjunto de lámparas UV-C, se seleccionó las lámparas de marca Atlantic Ultraviolet modelo GPH436T5L4PSE con una potencia de salida UV-C de 13 W a 254 nm mencionadas en el estudio de Fredes et al. (2021). El tiempo de operación de las lámparas UV-C para cada escenario de estudio se determinó mediante un equilibrio entre la cantidad de lámparas y el tiempo necesario requerido para cada tratamiento; se propuso que la cantidad de lámparas sea la

Tabla 1. Características del sistema

Parámetro	Valor
Reactor fotocatalítico	
Ángulo de inclinación	0°
Longitud	10,50 m
Ancho	2,51 m
Área	26,33 m ²
Volumen	74,31 L
Tanque A	
Altura	0,96 m
Diámetro	1,27 m
Volumen	1250,00 L
Tanque B	
Altura	0,64 m
Diámetro	0,86 m
Volumen	371,57 L
Lámparas UV-C	
Número de lámparas	70
Potencia de salida UV-C de la lámpara (P_{lam})	13 W
Tiempo operación de lámparas para PET (t_{OLPET})	3,23 h
Tiempo operación de lámparas para fibra de vidrio (t_{OLFV})	2,16 h

misma para ambos escenarios. Se observa que para el escenario del PET el tiempo es aproximadamente 1,5 veces superior al de la fibra de vidrio y esto se debe principalmente a que la constante de reacción para el escenario de la fibra de vidrio ($k = 0,1453 \text{ min}^{-1}$) es superior a la del escenario del PET ($k = 0,0838 \text{ min}^{-1}$), por lo tanto, necesita una mayor dosis de radiación UV lo que conlleva a un mayor tiempo de exposición.

3.2 Inventario de ciclo de vida

Se obtuvieron los datos de entradas para el inventario de ciclo de vida de los estudios de laboratorio previamente mencionados y estos se escalaron a nivel semi industrial para cada escenario. Además, se consideró el escenario de no actuación, en el cual no se lleva a cabo tratamiento alguno. Estos datos obtenidos de reactivos, DQO y energía de las entradas para cada escenario se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Datos de inventario de ciclo de vida para los escenarios A, B y C definidos con base en la unidad funcional (1 m³)

	PET	Fibra de vidrio (2, 5, 10)	No actuación
Entradas iniciales, reactivos (kg)			
PET (tereftalato de polietileno)	15,06	-	-
Dióxido de titanio (TiO ₂); anatasa nanoparticulado	1,41	0,68	-
Fibra de vidrio	-	11,94	-
Silicona	-	2,03	-
Direct blue one (Azul BRL)	0,05	0,05	0,05
Ácido clorhídrico (HCl)	0,32	0,32	-
Hidróxido de sodio (NaOH)	0,13	0,13	-
Agua (H ₂ O) para inmovilización por “dip coating”	704,86	-	-
Agua (H ₂ O) para reponer agua evaporada (dip coating)	18,38	-	-
Agua (H ₂ O) para baño de ultrasonido	96,71	48,36	-
Agua (H ₂ O) para reponer pérdidas (baño ultrasonido)	5,25	5,25	-
Agua (H ₂ O) para suspensión con colorante	997,05	997,05	997,05
Etanol (C ₂ H ₅ OH) para baño de ultrasonido	-	38,66	-
Etanol (C ₂ H ₅ OH) para reponer pérdidas (baño ultrasonido)	-	4,20	-
Etanol (C ₂ H ₅ OH) para la dilución con silicona	-	32,43	-
Parámetros (mgO₂/L)			
DQO	79,03	79,03	79,03
Entradas iniciales, energía (W-h)			
Bomba	0,07	0,07	-
Baño de ultrasonido	0,90	0,15	-
Fundición de PET	2,03	-	-
Lámparas UV-C	2,94	1,97	-

Para el escenario de la fibra de vidrio las entradas de materiales al proceso son las mismas para los casos 2, 5 y 10; que corresponden a 2, 5 y 10 m³ de agua sintética, respectivamente, pero las salidas de los mismos son distintas. En un principio solo se consideró para la fibra de vidrio el caso 2 (2 m³ de agua de tratamiento), Sin embargo, en virtud a los resultados obtenidos, se vio la necesidad de evaluar los casos en los que la fibra de vidrio puede usarse para 5 y 10 m³ antes de desecharse (5 y 10, respectivamente) (ver sección 3.3).

Como se puede observar en la Tabla 2, se vio la necesidad para el caso de la fibra de vidrio de realizar el ACV para diferentes escenarios (2, 5 y 10), lo que significa que, en la fibra de vidrio, el TiO₂ y la silicona se pueden usar para tratar 2 m³, 5 m³ y 10 m³, respectivamente, antes de su disposición en el relleno sanitario, sin embargo, para cada caso las entradas de reactivos, DQO y energía son las mismas.

3.3 Evaluación e interpretación de ciclo de vida

En la Figura 3 se presentan los resultados obtenidos en porcentaje de las categorías de impacto ambiental normalizados al mayor valor, esto corresponde a que el valor más alto obtenido en cada categoría (en cualquier escenario) representa el cien por ciento para dicha categoría; esto proporciona una perspectiva más clara del comportamiento de cada indicador para los distintos escenarios.

En esta Figura se observa que el escenario de no actuación presenta los menores valores en cada categoría de impacto. Esto puede ser debido a que el efluente que se consideró en este estudio es un efluente sintético (suspensión de agua y colorante) y no se toman en cuenta todos los contaminantes que se generan en el proceso de teñido y vienen inmersos en el efluente como tensoactivos, ciertas grasas, entre otros.

Por otra parte, se observa que en 7 (cambio climático, agotamiento de ozono, radiación ionizante, material particulado, acidificación y agotamiento de recursos fósiles, minerales y metales) de las 16 categorías de impacto evaluadas el escenario del PET presenta los valores más altos, sobre todo

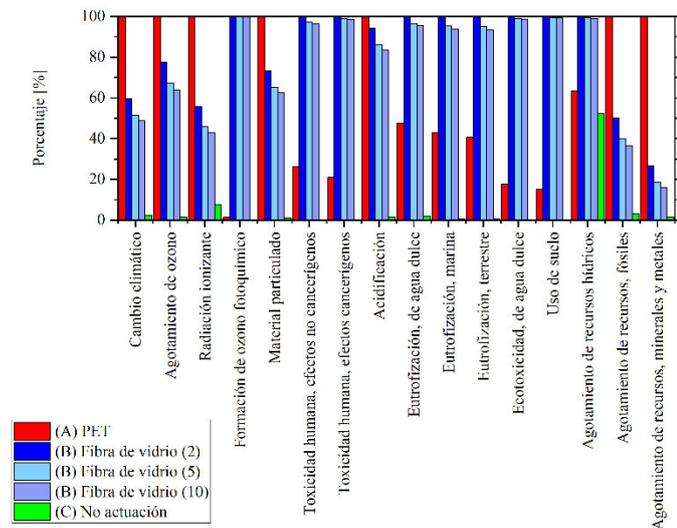


Figura 3. Resultados obtenidos en porcentaje para las categorías de impacto ambiental normalizados al mayor valor

en las categorías de cambio climático, agotamiento de recursos fósiles y agotamiento de recursos minerales y metales. A continuación, en la Figura 4 se presentan los resultados obtenidos para todos los escenarios propuestos en la categoría de cambio climático.

El cambio climático está vinculado a la emisión de gases de efecto invernadero los cuales tienen efectos negativos sobre los ecosistemas y la salud humana. Como se puede observar en la Figura 4, el escenario que presenta los mayores valores es el PET; esto es debido a que, al descomponerse, el PET, libera sustancias químicas, principalmente metano y etileno, dos potentes gases de efecto invernadero. Sin embargo, para llegar a obtener el PET es necesario el etileno, el cual es un compuesto orgánico gaseoso obtenido por “cracking” del petróleo a partir del gas natural.

Por otra parte, el PET que se plantea usar en este estudio es PET reciclado, lo cual puede significar una alternativa “amigable” con el medio ambiente, pero esto también conlleva a gastos energéticos vinculados con la fundición del PET. En el Ecuador, la principal fuente de energía son los combustibles fósiles, lo que implica una generación de gases de efecto invernadero, principalmente generación de CO₂, y representa un problema de sostenibilidad. Es por esto que el PET presenta los valores más elevados en las categorías de cambio climático, agotamiento de recursos fósiles y agotamiento de recursos minerales y metales.

Por su parte, el escenario de la fibra de vidrio para 2 m³ presenta una diferencia de 5,76 kg CO₂ eq con respecto al PET en la categoría de impacto ambiental del cambio climático. Esto se debe principalmente a que se utiliza silicona líquida para fijar el TiO₂ sobre la fibra de vidrio. La silicona, es fabricada, en sus fases iniciales, con metanol, el cual es obtenido a partir del gas natural. Esto significa que también tiene un impacto en la categoría de agotamiento de recursos fósiles y en la categoría de cambio climático.

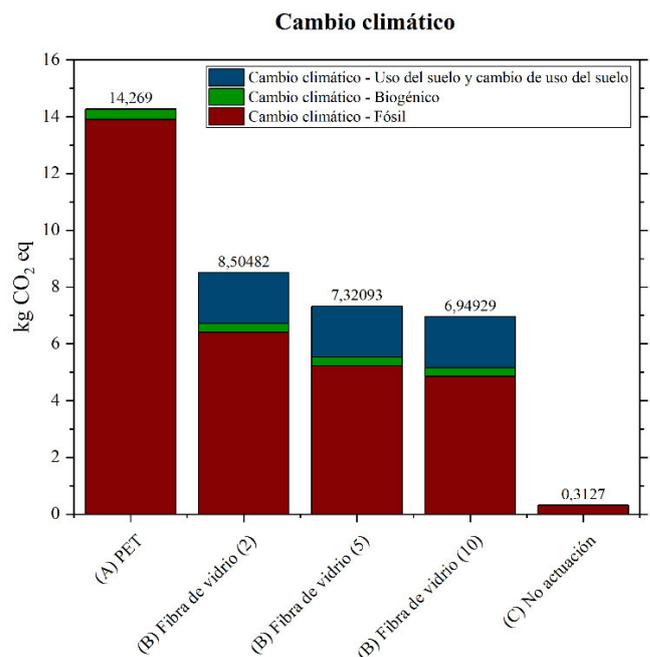
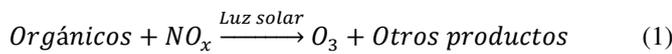


Figura 4. Impactos asociados a la categoría de cambio climático

En la Figura 3 se observa que en 9 de las 16 categorías de impacto evaluadas el escenario de la fibra de vidrio es el que presenta los mayores valores, en categorías como toxicidad humana efectos no cancerígenos y cancerígenos, eutrofización de agua dulce, marina y terrestre, ecotoxicidad de agua dulce, uso de suelo, agotamiento de recursos hídricos y, principalmente, formación de ozono fotoquímico. A continuación, en la Figura 5 se presentan los resultados obtenidos para los distintos escenarios en la categoría de impacto ambiental de formación de ozono fotoquímico.

La formación de ozono fotoquímico principalmente se asocia a los impactos generados por ozono y otros compuestos reactivos de oxígeno formados como contaminantes secundarios en la troposfera por la oxidación de contaminantes primarios como los compuestos orgánicos volátiles (VOC) o monóxido de carbono (CO) en presencia de óxidos de nitrógeno (NO_x) bajo la influencia de la luz en la troposfera. En la Figura 5 se observa que el mayor impacto a esta categoría es generado por el escenario de la fibra de vidrio y esto se debe principalmente a la presencia de silicona para la fijación del TiO₂. Para la obtención de la silicona, el silicio en polvo se combina con cloruro de metilo y se calienta, formando metilsilano, fenilsilano, vinilsilano y fluoroalquilsilano, que después de ciertas reacciones y refinamiento, producen las siliconas (Shin-Etsu Chemical Co., Ltd., 2022). Estos compuestos, también usados para la obtención de cauchos y resinas, son importantes en la formación del smog fotoquímico. Son parte de los llamados compuestos orgánicos volátiles (COV), que junto con los óxidos de nitrógeno (NO_x) y luz solar, generan ozono (O₃) troposférico (Finlayson-Pitts y Pitts, 1999). En la Ecuación 1 se presenta la reacción general entre los COV y los óxidos de nitrógeno:



A continuación, en la Figura 6 se presentan los resultados obtenidos para los distintos escenarios propuestos en todas las categorías de impacto evaluadas.

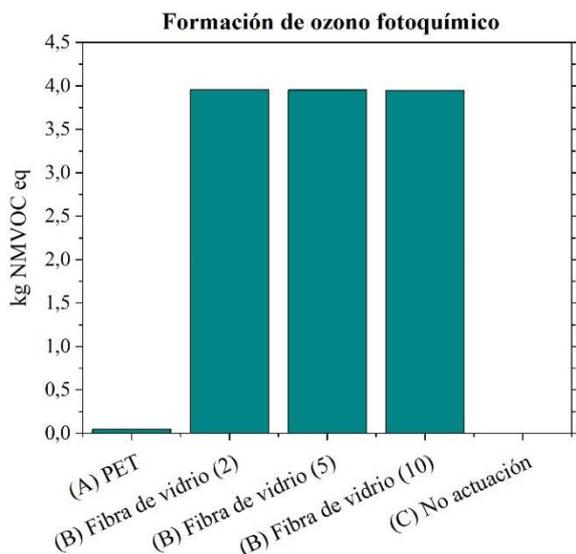


Figura 5. Impactos asociados a la categoría de formación de ozono fotoquímico

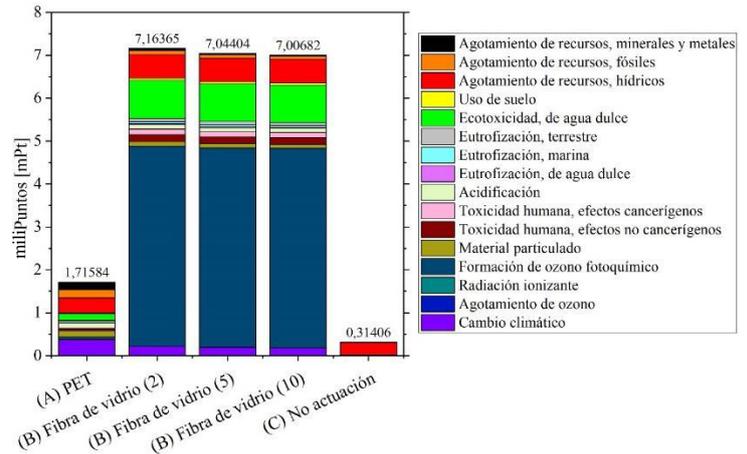


Figura 6. Impactos asociados a todas las categorías de impacto evaluadas

En la Figura 6, se puede observar que los mayores valores obtenidos corresponden al escenario de la fibra de vidrio (7,16; 7,04 y 7,01) y no presenta una variación significativa (0,15 mPt) entre la fibra de vidrio 2 y la fibra de vidrio 10 al tratar de utilizar la silicona, la fibra de vidrio y el TiO₂ durante mayor cantidad de tratamientos (2, 5 y 10 m³). Además, se puede verificar que es el escenario que presenta el mayor impacto corresponde a la formación de ozono fotoquímico y como se explicó anteriormente es debido a los COV generados por la silicona.

Por otra parte, el escenario del PET obtuvo 1,72 mPt y la diferencia entre el escenario de fibra de vidrio (10) y el PET corresponde a 5,30 mPt. Esta diferencia es significativa entre ambos escenarios y aún más entre el escenario de no actuación; sin embargo, por lo mencionado anteriormente para este último escenario no se consideraron los demás contaminantes que puede tener un efluente real de una industria textil y tampoco contempla una alternativa de tratamiento.

En la Figura 7 se presentan los resultados obtenidos, mediante el indicador de puntuación única, de los impactos a la disponibilidad de recursos, salud humana y ecosistemas.

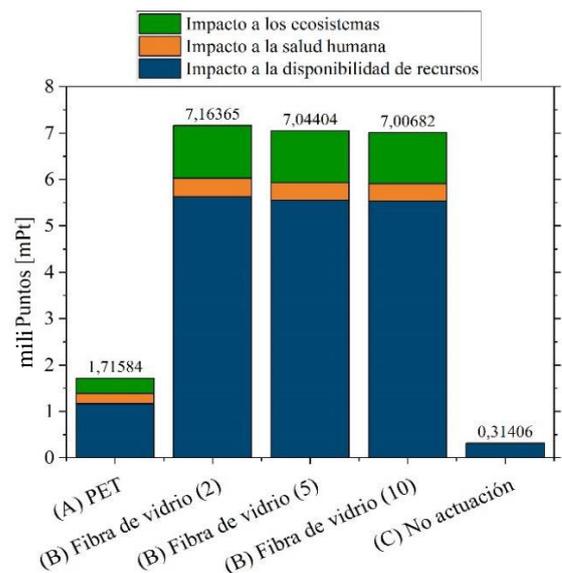


Figura 7. Impactos asociados a la disponibilidad de recursos, salud humana y ecosistemas, mediante el indicador de puntuación única.

En la Figura 7 se puede observar que el escenario que presenta la mayor cantidad de impactos es el de la fibra de vidrio. Además, la mayor cantidad de milipuntos obtenidos corresponden a la disponibilidad de recursos; lo cual estaría asociado principalmente a la formación de ozono fotoquímico. Para los impactos asociados a los ecosistemas, el escenario de fibra de vidrio se asocia, esencialmente, a la ecotoxicidad de agua dulce. Finalmente, los impactos asociados a la salud humana corresponden principalmente a las categorías de toxicidad humana efectos cancerígenos y no cancerígenos y material particulado.

4. CONCLUSIONES

El ACV realizado en el presente estudio fue una herramienta muy útil para evaluar y comparar objetivamente dos procesos fotocatalíticos para el tratamiento de 1 m³ de agua sintética (agua que simula un efluente líquido de la industria textil). Los escenarios propuestos fueron: Tratamiento de agua con el uso de TiO₂ inmovilizado sobre PET (escenario A); tratamiento de agua con el uso de TiO₂ inmovilizado sobre fibra de vidrio (escenario B); y no actuación (escenario C). Para obtener datos que permitan realizar la comparación, se propuso un reactor de lecho fijo de película delgada (TFFBR), de acero inoxidable tipo “batch” (74,31 L por tratamiento) de dimensiones 10,50 m × 2,51 m. Fue previsto en el reactor la utilización de 70 lámparas de 13 W. El tiempo de operación para el PET (escenario A) fue 3,23 h, mientras que para la fibra de vidrio (escenario B) fue de 2,16 h.

El ACV se realizó con base en la norma ISO 14040:2006. Para esto, se desarrollaron las cuatro etapas de un ACV para evaluar ambos procesos. Por lo tanto, se generó el ICV mediante la recopilación de datos de entradas y salidas de materiales, parámetros y energía. Para el escenario B, se consideraron los casos 2, 5 y 10; que corresponden a 2, 5 y 10 m³ de agua a ser tratada, respectivamente. Las entradas de materiales para cada caso (2, 5 y 10) fueron las mismas, sin embargo, las salidas fueron asociadas a cada volumen de tratamiento.

Al evaluar las 16 categorías de impacto ambiental para el escenario A, se determinó que en 7 de las categorías se presentan los mayores valores de impacto, principalmente en la de cambio climático y agotamiento de recursos fósiles, minerales y metales, esto debido a la emisión de gases de efecto invernadero y gastos energéticos vinculados con la fundición del PET reciclado. Por otra parte, para el escenario B, en 9 de las 16 categorías se presentaron los mayores valores de impacto, sobre todo en la categoría de formación de ozono fotoquímico, lo cual se debe a la emisión de COV por parte de la silicona en su proceso de fabricación. Mientras que el escenario C, que implica no actuación, presenta los menores valores de impacto. Este resultado no es concluyente, pues sin mayor análisis llevaría a sugerir que el no tratar el agua residual es el mejor escenario. Esto no es correcto por varias razones, quizás la más importante es que el análisis se realizó con un agua sintética, es decir, una simple solución acuosa de colorante (Azul BRL). Otros parámetros de calidad de agua que pueden ser mejorados por el tratamiento, entre ellos el contenido de tensoactivos, ciertas grasas y compuestos tóxicos, no fueron considerados.

Si bien el tratamiento con fibra de vidrio pareció, en principio, ser más amigable con el medio ambiente en virtud de la posibilidad de reutilización sucesiva del fotocatalizador para varios ciclos, los resultados del ACV señalan que particularmente la silicona (y su proceso de producción) generan un fuerte impacto ambiental. Este caso demuestra el valor del ACV para la toma de decisiones y lo importante que sería su aplicación en distintos escenarios en los que tecnologías de tratamiento de aguas deben ser comparadas y alguna elegida como la ambientalmente más amigable.

A manera de recomendación, con base a este estudio, en futuros trabajos, se pueden realizar simulaciones y/o mediciones adicionales referidas a la transmisión de radiación UV a través del medio líquido con la finalidad de obtener datos que permitan el diseño de fotoreactores más eficientes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel-Maksoud, Y., Imam, E., y Ramadan, A. (2016). TiO₂ Solar photocatalytic reactor systems: Selection of reactor design for scale-up and commercialization-Analytical Review. *Catalyst* 6 (9), 138-164. doi: 10.3390/catal6090138
- Ancy, K., Bindhu, M., Sunitha Bai, J., Gatasheh, M., Atef Hatamleh, A. y Ilavenil, S. (2022). Photocatalytic degradation of organic synthetic dyes and textile dyeing waste water by Al and F co-doped TiO₂ nanoparticles. *Environmental Research* 206 (112492), 0013-9351. doi.org/10.1016/j.envres.2021.112492.
- American Petroleum Institute. (2021). Welded Tanks for Oil Storage (Standard 650). <https://shorturl.at/myGH5> (junio, 2022).
- Bor, A., Hansen, K., Goedkoop, M., Riviére, A., Alvarado, C. y Van den Wittenboer, W. (2011). Usability of Life Cycle Assessment for Cradle to Cradle purposes. NL Agency, Dutch Ministry of Economic Affairs, Utrecht, Netherlands.
- Borrás, G. (2017). Desarrollo de soportes funcionales para fotocatalizadores basados en TiO₂ para el tratamiento de aguas. Universidad de los Andes. Obtenido de: <http://hdl.handle.net/1992/40151>. (junio, 2022).
- Carvalho Cardoso, J., Garcia Bessegato, G., & Boldrini Zanoni, M. (2016). Efficiency comparison of ozonation, photolysis, photocatalysis and photoelectrocatalysis methods in real textile wastewater decolorization. *Water Research*, 1(98), 39- 46. doi: 10.1016/j.watres.2016.04.004.
- Chen, Y. y Dionysiou, D. (2006). TiO₂ photocatalytic films on stainless steel: The role of Degussa P-25 in modified sol-gel methods. *Applied Catalysis B: Environmental*, 62(3), 255-264. doi:10.1016/j.apcatb.2005.07.017
- Finlayson-Pitts, B. y Pitts, J. (1999). Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere. Theory, Experiments, and Applications. (1^o Ed.). USA: ACADEMIC PRESS.
- Foteinis, S., y Chatzisyneon, E. (2020). Heterogeneous photocatalysis for water purification. In *Nanostructured Photocatalysts*. doi: 10.1016/b978-0-12-817836-2.00004-1.
- Fredes, P., Raff, U., Gramsch, E. y Tarkowski, M. (2021). Estimation of the Ultraviolet-C Doses from Mercury

- Lamps and Light-Emitting Diodes Required to Disinfect Surfaces. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 126 (126025). 1-24. doi: 10.6028/jres.126.025.
- González, L. & Escamilla, E. (2008). Biodegradación Anaerobia de Colorantes Azoicos Textiles usando Carbón Activado. *Biotecnología*, 12, 34-47.
- Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., y Olsen, S. I. (2018). *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. (1° Ed.). Suiza:Springer. doi: 10.1007/978-3-319-56475-3.
- Hoang, H., Tran, A., Hoang, M., Nguyen, T. y Bui, X. (2021). Synergistic effect of TiO₂ /chitosan/glycerol photocatalyst on color and COD removal from a dyeing and textile secondary effluent. *Environmental Technology & Innovation*. 21 (101255). doi: 10.1016/j.eti.2020.101255.
- Institute for Environment and Sustainability. (2010). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook : Specific guide for Life Cycle Inventory data sets*. (1° Ed.). Luxemburgo: European Commission. doi: 10.2788/39726.
- International Organization for Standardization. (2006). *Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia*. (Standard 14040). <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>. (junio, 2022).
- Kaur, M., Sandhu, S., Pal Toor, A. y Singh, V. (2022). Time-dependent mechanistic insight into photo-degradation of mixed hydrophobic disperse dyes by magnetically separable nitrogen iron codoped titania under visible light using process variable optimization. *Journal of Cleaner Production*. 342(130940). doi: 10.1016/j.jclepro.2022.130940.
- Komlos, J. (1990). Nutrition, Population Growth, and the Industrial Revolution in England. *Social Science History*, 14(1), 69-91. doi: 10.1017/S0145553200020654.
- Lazar, M., Varghese, S. y Nair, S. (2012). Photocatalytic Water Treatment by Titanium Dioxide: Recent Updates. *Catalysts*. 2(4), 572-601. doi: 10.3390/catal2040572.
- Mena Valencia, D. (2018). Estudio de la reutilización y regeneración mediante radiación ultravioleta y visible de fotocatalizadores de dióxido de titanio inmovilizado en fibra de vidrio para el tratamiento del colorante Azul BRL [Trabajo de titulación previo a la obtención del título de ingeniero químico, Escuela Politécnica Nacional].
- Moza, S., Brozek, P., Przepiórski, J., Tryba, B., y Morawski, A. W. (2012). Immobilized TiO₂ for phenol degradation in a pilot-scale photocatalytic reactor. *Journal of Nanomaterials*, 2012, 949764. doi: 10.1155/2012/949764.
- Ohtani, B. (2016). Hidden but Possibly Fatal Misconceptions in Photocatalysis Studies: A Short Critical Review. *Catalysts* 6(12). 192. doi: 10.3390/catal6120192.
- Palomino, M. (2017). Importancia del sector industrial en el desarrollo económico: Una revisión al estado del arte. *Revista Estudios De Políticas Públicas*, 3(1), 139–156. doi: 10.5354/repp.v5i0.46356.
- Paździor, K., Bilińska, L., y Ledakowicz, S. (2019). A review of the existing and emerging technologies in the combination of AOPs and biological processes in industrial textile wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 376, 120597. doi: 10.1016/j.cej.2018.12.057.
- Ramasundaram, S., Seid, M., Choe, J. y Kim, E. (2016). Highly reusable TiO₂ nanoparticle photocatalyst by direct immobilization on steel mesh via PVDF coating, electrospraying. *Chemical Engineering Journal*. 306. 344-351. doi: 10.1016/j.cej.2016.07.077.
- Robert, D., Keller, N. y Sell, E.. (2017). Environmental photocatalysis and photochemistry for a sustainable world: a big challenge. *Environmental Science and Pollution Research International*. 24(14), 12503-12505. doi: 10.1007/s11356-017-8935-3.
- Roos, S. (2016). Advancing life cycle assessment of textile products to include textile chemicals. Inventory data and toxicity impact assessment [Trabajo de titulación previo a la obtención del título de doctor en filosofía, Universidad de Tecnología de Chalmers]. ISBN 978-91-7597-521-4.
- Sahu, O., y Singh, N. (2018). Significance of bioadsorption process on textile industry wastewater. *The Impact and Prospects of Green Chemistry for Textile Technology*, 13, 367-416. doi: 10.1016/B978-0-08-102491-1.00013-7.
- Sandoval, C., Molina, G., Vargas Jentsch, P., Pérez, J., y Muñoz, F. (2017). Photocatalytic Degradation of Azo Dyes Over Semiconductors Supported on Polyethylene Terephthalate and Polystyrene Substrates. *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, 20(2), 20170006. doi: 10.1515/jaots.2017.0006.
- Shin-Etsu Chemical Co., Ltd. (2022). How is silicone made. Shin-Etsu Chemical Homepage. Obtenido de: <https://shorturl.at/fjvD5> (Mayo, 2022).
- PRÉ Sustainability B.V. (2022). SimaPro. PRÉ Sustainability B.V. Obtenido de: shorturl.at/oRX08 (julio, 2022).
- Zayani, G., Bousselmi, L., Mhenni, F. y Ghrabi, A. (2009). Solar photocatalytic degradation of commercial textile azo dyes: Performance of pilot plant scale thin film fixed-bed reactor. *Desalination*, 246, 344-352. doi: 10.1016/j.desal.2008.03.059.

FICHAS TÉCNICAS

ÍNDICE DE FICHAS TÉCNICAS

	PÁGINA
FICHA TÉCNICA I	18
Esquema del sistema de tratamiento	18
FICHA TÉCNICA II	19
Cálculo del espesor de fluido en el reactor	19
FICHA TÉCNICA III	20
Cálculo de las dimensiones del tanque de almacenamiento A	20
FICHA TÉCNICA IV	22
Cálculo de las dimensiones del tanque de almacenamiento B	22
FICHA TÉCNICA V	24
Cálculo del tiempo de llenado del reactor	24
FICHA TÉCNICA VI	28
Cálculos de la bomba	28
FICHA TÉCNICA VII	31
Cálculo del consumo de energía del baño de ultrasonido	31
FICHA TÉCNICA VIII	33
Cálculo de la masa de agua para el baño de ultrasonido	33
FICHA TÉCNICA IX	34
Cálculo de la masa de etanol para el baño de ultrasonido	34
FICHA TÉCNICA X	35
Cálculo de la masa de agua para reposición de pérdidas en el baño de ultrasonido	35
FICHA TÉCNICA XI	36
Cálculo de la masa de etanol para reposición de las pérdidas en el baño de ultrasonido	36
FICHA TÉCNICA XII	37
Cálculo de la demanda química de oxígeno (DQO) inicial y final	37
FICHA TÉCNICA XIII	38
Cálculo del calor requerido para fundir el PET	38
FICHA TÉCNICA XIV	40
Cálculo de la masa de PET (Tereftalato de polietileno)	40
FICHA TÉCNICA XV	44
Cálculo de la masa de dióxido de titanio (TiO ₂)	44
FICHA TÉCNICA XVI	45
Cálculo de la masa de silicona líquida	45
FICHA TÉCNICA XVII	46
Cálculo de la masa de fibra de vidrio	46
FICHA TÉCNICA XVIII	47
Cálculo del volumen de ácido y base	47
FICHA TÉCNICA XIX	50
Cálculo de la masa de etanol para dilución con silicona	50
FICHA TÉCNICA XX	51
Cálculo del tiempo de reacción	51
FICHA TÉCNICA XXI	53
Cálculo del consumo energético de las lámparas UV	53
FICHA TÉCNICA XXII	56
Cálculo del consumo de agua para la inmovilización por “dip coating”	56

FICHA TÉCNICA XXIII	57
Cálculo de la masa de agua para reposición por pérdidas en la inmovilización por “dip coating”	57
FICHA TÉCNICA XXIV	58
Inventario de ciclo de vida con sus entradas, salidas y disposiciones finales	58
FICHA TÉCNICA XXV	67
Resultados obtenidos mediante el software SimaPro	67
FICHA TÉCNICA XXVI	73
Resultados obtenidos para las distintas categorías de impactos ambientales	73
FICHA TÉCNICA XXVII	90
Resultados obtenidos para grupos de impacto	90
FICHA TÉCNICA XXVIII	92
Suposiciones del presente estudio	92
FICHA TÉCNICA XXIX	97
Reactor fotocatalítico propuesto	97
FICHA TÉCNICA XXX	98
Nomenclatura	98

FICHA TÉCNICA I

ESQUEMA DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

Objetivo: Presentar el esquema del sistema de tratamiento propuesto en el presente estudio.

Ejemplo de cálculo:

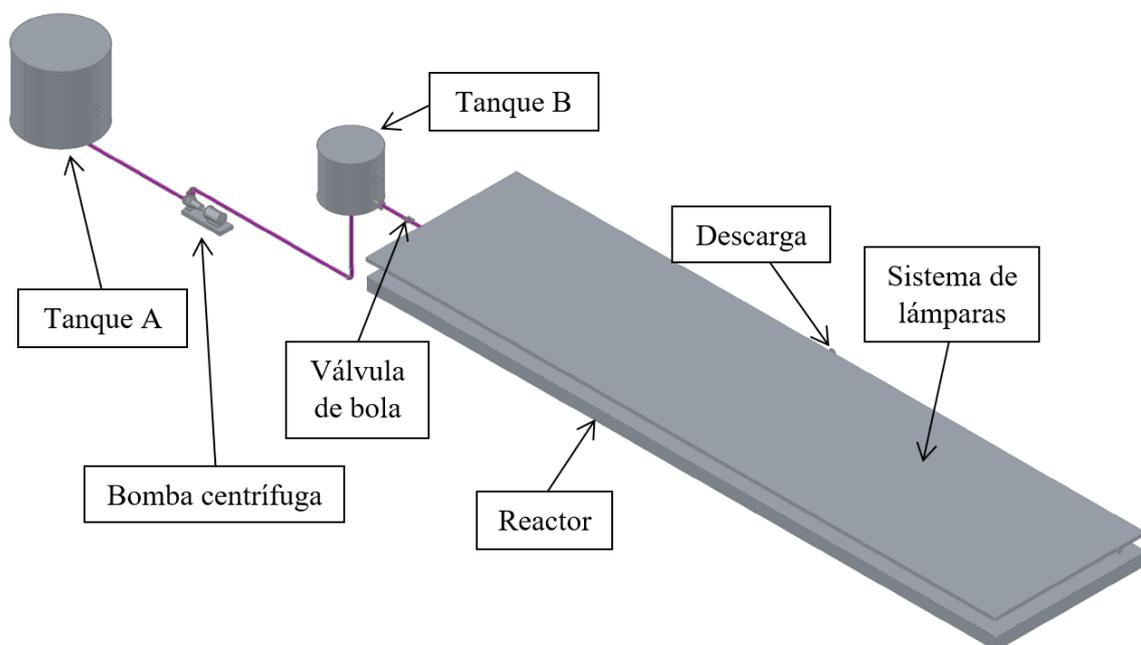


Figura FTL.1 Esquema del sistema de tratamiento propuesto

FICHA TÉCNICA II

CÁLCULO DEL ESPESOR DE FLUIDO EN EL REACTOR

Objetivo: Determinar el espesor de la película de fluido requerida en el reactor.

Ejemplo de cálculo:

- El cálculo del espesor de la película de fluido (agua) se realizó con base en la Ecuación FTII.1. Se asumió que la caja Petri tiene como diámetro interno 5 mm más que el diámetro externo del soporte del fotocatalizador que esta ocupa el lugar del fondo de la caja Petri. Esto se sustenta en el diámetro de una caja Petri disponible comercialmente. El volumen de la solución de colorante en la caja Petri es de 20 mL.

$$e_p = \frac{V_{CP}}{A_{CP}} \quad \text{[FTII.1]}$$

Donde:

e_p : espesor de película de fluido en cm

V_{CP} : volumen de la caja Petri en cm^3

A_{CP} : área de la caja Petri en cm^2

Ejemplo de cálculo

$$e_p = \frac{20 \text{ cm}^3}{(\pi \times 4,75^2) \text{ cm}^2} = 0,2822 \text{ cm}$$

FICHA TÉCNICA III

CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO A

Objetivo: Determinar las dimensiones y el volumen del tanque de almacenamiento ubicado en la parte inferior del reactor (tanque de almacenamiento A).

Ejemplo de cálculo:

- El volumen total de agua sintética que se receptorá es 1000 L (1 m³), lo que corresponde a la unidad funcional. Además, se consideró que el fluido ocupa el 80 % del tanque, por lo tanto, el volumen total para el tanque de almacenamiento A es:

$$V_{TTA} = 1250 \text{ L}$$

Según la norma API 650, que trata sobre el diseño de tanques para almacenar petróleo, productos de petróleo y otros productos líquidos, la relación $\frac{D}{H} > 1,33$ es propuesta. Por tanto, para calcular la altura del tanque se utilizó la relación propuesta y se aplicó la Ecuación FTIII.1:

$$V_{TTA} = A_{TA} \times h_A \quad \text{[FTIII.1]}$$

Donde

V_{TTA} : volumen total del tanque de almacenamiento A en m³

A_{TA} : área del tanque de almacenamiento A en m²

h_A : altura del tanque de almacenamiento A en m

Ejemplo de cálculo

$$1,250 \text{ m}^3 = \pi \times \left(\frac{1,34 \text{ m} \times h_A}{2} \right)^2 \times h_A$$

$$h_A = 0,96 \text{ m}$$

Mediante la relación $\frac{D}{H} > 1,33$:

$$D_A = 1,34 \times h_A = 1,34 \times 0,96 \text{ m} = 1,27 \text{ m}$$

Donde:

D_A : diámetro del tanque de almacenamiento A en m

En la Figura FTIII.1 se muestra un esquema del tanque inferior (tanque A).

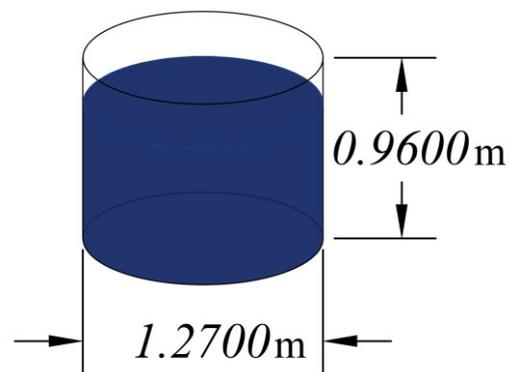


Figura FTIII.1 Dimensiones del tanque inferior (tanque A)

FICHA TÉCNICA IV

CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO B

Objetivo: Determinar las dimensiones y el volumen del tanque de almacenamiento ubicado en la parte superior del reactor (tanque de almacenamiento B).

Ejemplo de cálculo:

- En primer lugar, se calculó el volumen total de agua sintética que se encuentra en el reactor mediante la Ecuación FTIV.1:

$$V_{AR} = L_R \times An_R \times e_R \quad \text{[FTIV.1]}$$

Donde:

V_{AR} : volumen de agua en el reactor en cm^3

L_R : largo del reactor en cm

An_R : ancho del reactor en cm

e_R : espesor la lámina de agua dentro del reactor en cm

Ejemplo de cálculo

$$V_{AR} = 1050 \text{ cm} \times 250,8 \text{ cm} \times 0,2822 \text{ cm}$$

$$V_{AR} = 74314,548 \text{ cm}^3 = 74,3145 \text{ L}$$

Se propuso que en un día se realice 4 veces el tratamiento; por lo tanto, en un día se alcanzan a tratar 297,258 L de agua sintética.

Se consideró que el fluido ocupa el 80 % del tanque, por lo tanto, el volumen total para el tanque de almacenamiento B es:

$$V_{TTB} = 371,5725 \text{ L}$$

Según la norma API 650, que es para el diseño de tanques para almacenar petróleo, productos de petróleo y otros productos líquidos, propone la relación $\frac{D}{H} > 1,33$. Por lo tanto, para calcular la altura del tanque se utiliza la relación propuesta y se aplica la Ecuación FTIV.2:

$$V_{TTB} = A_{TB} \times h_B \quad \text{[FTIV.2]}$$

Donde

V_{TTB} : volumen total del tanque de almacenamiento B en m^3

A_{TB} : área del tanque de almacenamiento B en m^2

h_B : altura del tanque de almacenamiento B en m

Ejemplo de cálculo

$$0,3716 \text{ m}^3 = \pi \times \left(\frac{1,34 \text{ m} \times h_B}{2} \right)^2 \times h_B$$

$$h_B = 0,64 \text{ m}$$

Mediante la relación $\frac{D}{H} > 1,33$:

$$D_B = 1,34 \times h_B = 1,34 \times 0,64 \text{ m} = 0,86 \text{ m}$$

Donde:

D_B : diámetro del tanque de almacenamiento B en m

En la Figura FTIV.1 se muestra un esquema del tanque superior (tanque B).

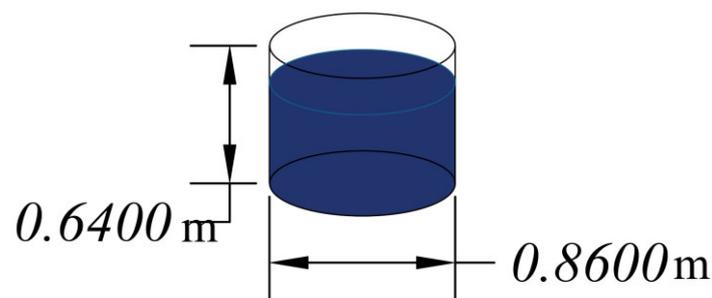


Figura FTIV.1 Dimensiones del tanque superior (tanque B)

FICHA TÉCNICA V

CÁLCULO DEL TIEMPO DE LLENADO DEL REACTOR

Objetivo: Determinar el tiempo requerido para que el reactor esté lleno y se pueda iniciar el tratamiento.

Ejemplo de cálculo:

- Para el tiempo de llenado del reactor se consideró que el agua a tratar del tanque superior (tanque B) se descarga por un orificio de 2,54 cm de diámetro, ubicado en el fondo del tanque. Para esto se tomó como base la ecuación del balance de masa y se obtuvo la Ecuación FTV.1 con la cual se determinó el tiempo de descarga:

Balance de masa:

$$\text{Acumulación} = \text{Entra} - \text{Sale} + \text{Genera} - \text{Consume}$$

$$\text{Acumulación} = -\text{Sale}$$

$$\frac{d\dot{m}}{dt} = -\dot{m}_0$$

$$\frac{\rho dV}{dt} = -\dot{m}_0$$

$$\rho \left(\frac{\pi}{4} \times \phi^2 \right) \frac{dh}{dt} = -\rho \left(\frac{\pi}{4} \times \phi_0^2 \right) \times v_2$$

$$\frac{dh}{dt} = -v_2 \times \frac{\phi_0^2}{\phi^2}$$

$$\frac{dh}{dt} = -\sqrt{2 \times g \times h_0} \times \left(\frac{\phi_0}{\phi} \right)^2$$

$$\int_{h_0}^h \frac{dh}{\sqrt{2 \times g \times h}} = -\left(\frac{\phi_0}{\phi} \right)^2 \int_0^t dt$$

$$\frac{\sqrt{2 \times g \times h}}{g} - \frac{\sqrt{2 \times g \times h_0}}{g} = -\left(\frac{\phi_0}{\phi} \right)^2 \times t$$

$$t = \frac{\frac{\sqrt{2 \times g \times h} - \sqrt{2 \times g \times h_0}}{g}}{-\left(\frac{\phi_0}{\phi}\right)^2} \quad [\text{FTV.1}]$$

Donde:

t : tiempo de descarga en s

h : altura final del agua sintética en el tanque B en m

h_0 : altura inicial del agua sintética en el tanque B en m

g : aceleración de gravedad en m/s^2

ϕ : diámetro del tanque B en m

ϕ_0 : diámetro del orificio en m

- Se calculó la altura inicial del tanque a tiempo cero mediante la Ecuación

FTV.2:

$$h_0 = \frac{V_{TB}}{A_{TB}} \quad [\text{FTV.2}]$$

Donde:

h_0 : altura inicial del agua sintética en el tanque B en m

V_{TB} : volumen total de agua en el tanque B en m^3

A_{TB} : área del tanque de almacenamiento B en m^2

Ejemplo de cálculo

$$h_0 = \frac{0,2973 \text{ m}^3}{\pi \times (0,43^2 \text{ m}^2)}$$

$$h_0 = 0,5118 \text{ m}$$

- Se calculó la altura final a la que llega el líquido al cabo de 1 tratamiento

(74,3145 L) mediante la Ecuación FTV.3:

$$h = \frac{V_{UB}}{A_{TB}} \quad [\text{FTV.3}]$$

Donde:

h : altura final del agua sintética en el tanque B al cabo de 1 tratamiento en m

V_{U_B} : volumen de agua en el tanque B al cabo de 1 tratamiento en m^3

A_{T_B} : área del tanque de almacenamiento B en m^2

Ejemplo de cálculo

$$h = \frac{0,2229 m^3}{\pi \times (0,43^2 m^2)}$$

$$h = 0,3837 m$$

- Se consideró que el orificio de descarga tiene 2,54 cm y se despreciaron las pérdidas. Por lo tanto, mediante la Ecuación FTV.1 se determinó el tiempo de llenado con un promedio de las 4 alturas que alcanza el nivel del líquido en el tanque:

Ejemplo de cálculo

1. Con el nivel del líquido en el tanque B para 4 tratamientos

$$t_1 = \frac{\frac{\sqrt{2 \times 9,8 \frac{m}{s^2} \times 0,3837 m}}{9,8 \frac{m}{s^2}} - \frac{\sqrt{2 \times 9,8 \frac{m}{s^2} \times 0,5118 m}}{9,8 \frac{m}{s^2}}}{-\left(\frac{0,0254 m}{0,43 m}\right)^2} = 12,4054 s$$

2. Con el nivel del líquido en el tanque B para 3 tratamientos

$$t_2 = \frac{\frac{\sqrt{2 \times 9,8 \frac{m}{s^2} \times 0,2559 m}}{9,8 \frac{m}{s^2}} - \frac{\sqrt{2 \times 9,8 \frac{m}{s^2} \times 0,3837 m}}{9,8 \frac{m}{s^2}}}{-\left(\frac{0,0254 m}{0,43 m}\right)^2} = 14,7144 s$$

3. Con el nivel del líquido en el tanque B para 2 tratamientos

$$t_3 = \frac{\frac{\sqrt{2 \times 9,8 \frac{m}{s^2} \times 0,1279 m}}{9,8 \frac{m}{s^2}} - \frac{\sqrt{2 \times 9,8 \frac{m}{s^2} \times 0,2559 m}}{9,8 \frac{m}{s^2}}}{-\left(\frac{0,0254 m}{0,43 m}\right)^2} = \mathbf{19,1920 s}$$

4. Con el nivel del líquido en el tanque B para 1 tratamiento

$$t_4 = \frac{\frac{\sqrt{2 \times 9,8 \frac{m}{s^2} \times 0,1279 m}}{9,8 \frac{m}{s^2}}}{-\left(\frac{0,0254 m}{0,43 m}\right)^2} = \mathbf{46,3027 s}$$

- Se realizó un promedio de los tiempos obtenidos mediante la Ecuación FTV.4:

$$t_{pd} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}{4} \quad \text{[FTV.4]}$$

Donde:

t_{pd} : tiempo promedio de descarga en s

t_1 : tiempo con el nivel del líquido en el tanque B para 4 tratamientos en s

t_2 : tiempo con el nivel del líquido en el tanque B para 3 tratamientos en s

t_3 : tiempo con el nivel del líquido en el tanque B para 2 tratamientos en s

t_4 : tiempo con el nivel del líquido en el tanque B para 1 tratamientos en s

Ejemplo de cálculo

$$t_{pd} = \frac{12,4054 s + 14,7144 s + 19,1920 s + 46,3127}{4} = 23,1561 s$$

FICHA TÉCNICA VI

CÁLCULOS DE LA BOMBA

Objetivo: Determinar la potencia de la bomba a emplear y el consumo energético de la misma para ambos tratamientos.

Ejemplo de cálculo:

- Se toma como referencia la bomba centrífuga con menor potencia en el mercado. A continuación, en la Figura FTVI.1 se presenta la bomba elegida y en la Figura FTVI.2 se presentan las características de esta bomba:



CÓDIGO: 10072 CLAVE: BOAC-1/2

Bomba centrífuga para agua modelo europeo, 1/2 HP, Expert

- Se utiliza cuando se quiere bombear un mayor volumen de agua
- Ofrece caudal y altura
- Altura máxima: **23 m**
- Flujo máximo: **90 L/min**
- Profundidad máxima de succión: **8 m**
- Ideal para llevar el agua de la cisterna al tinaco
- Motor cerrado, con aletas exteriores que ayudan a una mejor ventilación
- Compacta y silenciosa



Capacitor para mayor potencia al arranque



Impulsor de latón



Balero metálico



Motor con bobinas de cobre
2x Mayor durabilidad que las de aluminio

Figura FTVI.1 Bomba centrífuga disponible en el mercado

Potencia	1/2 HP
Altura máxima	23 m
Flujo máximo	90 L/min
Máxima profundidad de succión	8 m
Diámetro de Entrada / Salida	1" NPT
Velocidad	3,450 r/min
Ciclo de trabajo	50 minutos de trabajo por 20 minutos de descanso. Máximo diario 6 horas
Tensión / Frecuencia	127 V / 60 Hz
Consumo	5 A
Dimensiones (Base x Altura x Fondo)	17 x 22 x 28 cm
Peso	7.4 kg
Empaque individual	Caja

Figura FTVI.2 Características de la bomba centrífuga disponible en el mercado

- A continuación, se toma como referencia el flujo máximo especificado por la bomba ($90 \frac{L}{min}$) y mediante la Ecuación FTVI.1 se determinó el tiempo de uso de la bomba:

$$t_{UB} = \frac{V_{TB}}{Q_{max}} \quad [FTVI.1]$$

Donde:

t_{UB} : tiempo de uso de la bomba en min

V_{TB} : volumen total de agua en el tanque B en L

Q_{max} : flujo máximo de la bomba en L/min

Ejemplo de cálculo

$$t_{UB} = \frac{297,258 L}{90 \frac{L}{min}} = 3,31 min$$

- Para calcular el consumo de energía de la bomba se utiliza la Ecuación FTVI.2:

$$E_B = P \times t_{UB} \quad \text{[FTVI.2]}$$

Donde:

E_B : consumo energético de la bomba en J

P : potencia de la bomba en W

t_{UB} : tiempo de uso de la bomba en s

Ejemplo de cálculo

$$E_B = \left(0,5 \text{ hp} \times \frac{1000 \text{ W}}{1,341 \text{ hp}}\right) \times \left(3,31 \text{ min} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}\right) = 74049,217 \text{ J}$$

$$E_B = 74049,217 \text{ J} \times \frac{1 \text{ W} - \text{h}}{3600 \text{ J}} = 20,5692 \text{ W} - \text{h}$$

- Finalmente, se calcula el consumo energético para 14 tratamientos, lo que corresponde a la unidad funcional (1 m³):

Ejemplo de cálculo:

$$E_B = 20,5692 \text{ W} - \text{h} \times \frac{14 \text{ tratamientos}}{4 \text{ tratamientos}} = 71,9923 \text{ W} - \text{h} = 0,0720 \text{ kW} - \text{h}$$

FICHA TÉCNICA VII

CÁLCULO DEL CONSUMO DE ENERGÍA DEL BAÑO DE ULTRASONIDO

Objetivo: Determinar el consumo energético del baño de ultrasonido para ambos tratamientos.

Ejemplo de cálculo:

- Con base en el estudio de Sandoval et al. (2017), el tiempo de uso del baño de ultrasonido es 30 min. En la Figura FTVII.1 se presentan las características del baño de ultrasonido seleccionado:

	extra ST 1400H
Frecuencia de ultrasonidos (kHz)	25/45
Volumen útil de la cuba (l)	97,0
Volumen máx. de la cuba (l)	126,0
Potencia de ultrasonidos efectivo - Normal, Pulse (W)	1440
Potencia de ultrasonidos efectivo - Dynamic (W)	1800
Potencia de calentamiento (W)	5000
Dimensiones exteriores del aparato An/P/Al (mm)	885 / 850 / 936
Dimensiones interiores de la cuba An/P/Al (mm)	600 / 600 / 350
Carga máx. de la cesta (kg)	50,0
Dimensiones interiores de la cesta An/P/Al (mm)	490 / 525 / 210
Peso (kg)	87,0

Figura FTVII.1 Características del baño de ultrasonido seleccionado

- Para el cálculo del consumo energético del baño de ultrasonido seleccionado, se empleó la Ecuación FTVII.1:

$$E_{US} = P_U \times t_{UU_S} \quad \text{[FTVII.1]}$$

Donde:

E_{US} : consumo energético del baño de ultrasonido para el estudio de Sandoval et al. en J

P_U : potencia del baño de ultrasonido en W

t_{US} : tiempo de uso del baño de ultrasonido para el estudio de Sandoval et al. en s

Ejemplo de cálculo

$$E_{US} = (1800 \text{ W}) \times \left(30 \text{ min} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right) = 3240000 \text{ J}$$

$$E_{US} = 3240000 \text{ J} \times \frac{1 \text{ W} \cdot \text{h}}{3600 \text{ J}} = 900 \text{ W} \cdot \text{h} = 0,9 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

- Con base al estudio de Mena (2018), se utilizó la misma ecuación anterior (Ecuación FTVII.1) pero el tiempo para este caso es de 5 min (300 s).

FICHA TÉCNICA VIII

CÁLCULO DE LA MASA DE AGUA PARA EL BAÑO DE ULTRASONIDO

Objetivo: Determinar la cantidad de agua necesaria para el baño de ultrasonido para ambos tratamientos.

Ejemplo de cálculo:

- Con base en las características del baño de ultrasonido presentadas en la Figura FTVII.1 se determinó que la capacidad del ultrasonido son 97 L. A partir de ese dato, con base en el artículo de Sandoval et al. (2017) y con la densidad del agua se determinó la cantidad de agua para lavado necesaria en el ultrasonido, mediante la Ecuación FTVIII.1:

$$m_{AU} = C_U \times \rho_A \quad \text{[FTVIII.1]}$$

Donde:

m_{AU} : masa del agua necesaria en el ultrasonido en kg

C_U : capacidad física del ultrasonido en m^3

ρ_A : densidad del agua en kg/m^3

Ejemplo de cálculo

$$m_{AU} = \left(97 \text{ L} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \right) \times 997,045 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 96,71 \text{ kg}$$

- Para el caso de Mena (2018), se consideró la mitad de la capacidad (48,5 L), pues para el baño se empleó una solución de etanol al 50% v/v (se utilizó la misma ecuación).

FICHA TÉCNICA IX

CÁLCULO DE LA MASA DE ETANOL PARA EL BAÑO DE ULTRASONIDO

Objetivo: Determinar la cantidad de etanol necesaria para el baño de ultrasonido para el tratamiento de Mena (2018).

Ejemplo de cálculo:

- Se tomó como capacidad del baño de ultrasonido la mitad (48,5 L) ya que para el baño se emplea una solución de etanol al 50% v/v. A partir de ese dato y con la densidad del etanol se determinó la cantidad de etanol para lavado necesaria en el ultrasonido, mediante la Ecuación FTIX.1:

$$m_{EU} = C_U \times \rho_E \quad \text{[FTIX.1]}$$

Donde:

m_{EU} : masa de etanol necesaria en el ultrasonido en kg

C_U : capacidad física del ultrasonido en m^3

ρ_E : densidad de etanol en kg/m^3

Ejemplo de cálculo

$$m_{EU} = \left(48,5 \text{ L} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \right) \times 797,06 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 38,657 \text{ kg}$$

FICHA TÉCNICA X

CÁLCULO DE LA MASA DE AGUA PARA REPOSICIÓN DE PÉRDIDAS EN EL BAÑO DE ULTRASONIDO

Objetivo: Determinar la cantidad de agua necesaria para reponer las pérdidas por evaporación en el baño de ultrasonido para ambos tratamientos.

Ejemplo de cálculo:

- Se asume que el espesor de película que queda en la lámina de PET o fibra de vidrio y TiO₂ es de 0,1 mm. Por lo tanto, se calculó la masa evaporada de agua mediante la Ecuación FTX.1:

$$m_{pérdidas_U} = A_{reactor} \times 2 \times e_{peva} \times \rho_A \quad [FTX.1]$$

Donde:

$m_{pérdidas_U}$: masa de agua evaporada en para reponer al baño de ultrasonido en kg

$A_{reactor}$: área del reactor semi industrial en m²

e_{peva} : espesor de película evaporada en m

ρ_A : densidad de agua en kg/m³

Ejemplo de cálculo

$$\begin{aligned} m_{pérdidas_U} &= 26,334 \text{ m}^2 \times 2 \times \left(0,1 \text{ mm} \times \frac{1 \text{ cm}}{10 \text{ mm}} \times \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right) \times 997,045 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ &= 5,2512 \text{ kg} \end{aligned}$$

- De igual manera se calcularon las pérdidas de agua por evaporación para el caso de la fibra de vidrio.

FICHA TÉCNICA XI

CÁLCULO DE LA MASA DE ETANOL PARA REPOSICIÓN DE LAS PÉRDIDAS EN EL BAÑO DE ULTRASONIDO

Objetivo: Determinar la cantidad de etanol necesaria para reponer las pérdidas por evaporación en el baño de ultrasonido para el tratamiento de Mena (2018).

Ejemplo de cálculo:

- Se asume que el espesor de película que queda en la fibra de vidrio y TiO_2 es de 0,1 mm. Por lo tanto, se calculó la masa evaporada de agua mediante la Ecuación FTXI.1:

$$m_{pérdidas_{U_{ETOH}}} = A_{reactor} \times 2 \times e_{peva} \times \rho_E \quad [\text{FTXI.1}]$$

Donde:

$m_{pérdidas_{U_{ETOH}}}$: masa de etanol evaporado en para reponer al baño de ultrasonido en kg

$A_{reactor}$: área del reactor semi industrial en m^2

e_{peva} : espesor de película evaporada en m

ρ_E : densidad de etanol en kg/m^3

Ejemplo de cálculo

$$\begin{aligned} m_{pérdidas_U} &= 26,334 \text{ m}^2 \times 2 \times \left(0,1 \text{ mm} \times \frac{1 \text{ cm}}{10 \text{ mm}} \times \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right) \times 797,06 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ &= 4,1981 \text{ kg} \end{aligned}$$

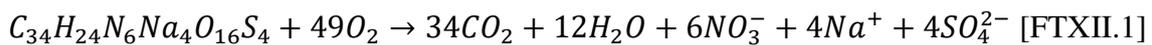
FICHA TÉCNICA XII

CÁLCULO DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO) INICIAL Y FINAL

Objetivo: Determinar el valor de DQO con el que ingresa el agua al tratamiento y el valor de DQO con el que sale el agua tratada.

Ejemplo de cálculo:

- La DQO inicial, expresada en mg de oxígeno (O_2) por L, se calculó con base en la ecuación FTXII.1:



$$50 \text{ g Direct Blue 1 (DB1)} \times \frac{1 \text{ mol Direct Blue 1 (DB1)}}{992 \text{ g Direct Blue 1 (DB1)}} \times \frac{49 \text{ mol } O_2}{1 \text{ mol Direct Blue 1 (DB1)}} \times \frac{32 \text{ g } O_2}{1 \text{ mol } O_2} = 79,0323 \text{ g } O_2$$

Unidad funcional: 1 m^3

$$DQO \text{ inicial} = \frac{79,0323 \text{ g } O_2}{1 \text{ m}^3} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \times \frac{1000 \text{ mg } O_2}{1 \text{ g } O_2} = 79,0323 \frac{\text{mg } O_2}{\text{L}}$$

- La DQO final, expresada en mg de oxígeno (O_2) por L, se calculó con base en la ecuación FTXII.2:

$$DQO \text{ final} = DQO \text{ inicial} \frac{\text{mg } O_2}{\text{L}} \times \% \text{ Remoción DQO} \quad [FTXII.2]$$

$$DQO \text{ final} = 79,0323 \frac{\text{mg } O_2}{\text{L}} \times 0,5 = 39,5161 \frac{\text{mg } O_2}{\text{L}}$$

FICHA TÉCNICA XIII

CÁLCULO DEL CALOR REQUERIDO PARA FUNDIR EL PET

Objetivo: Determinar la cantidad de calor requerida para fundir el PET reciclado.

Ejemplo de cálculo:

- La temperatura y el calor de fusión del PET se consideran en el punto de fusión de equilibrio ya que son los mayores valores de estas propiedades del PET.

$T^{\circ}_{fusión} = 285\text{ }^{\circ}\text{C} = 553\text{ K}$ y $Calor\ de\ fusión = 140\ \frac{J}{g}$. El calor requerido

para la fundición del PET se calculó a partir de la Ecuación FTXIII.1:

$$Q_{PET} = Q_{sensible_{PET}} + Q_{latente_{PET}} \quad [\text{FTXIII.1}]$$

Donde:

Q_{PET} : calor requerido para fundir el PET en J

$Q_{sensible_{PET}}$: calor sensible del PET en J

$Q_{latente_{PET}}$: calor latente PET en J

- Se desarrolló la Ecuación FTXIII.1 y se obtuvo la Ecuación FTXIII.2:

$$Q_{PET} = m_{PET} \times C_{p_{PET}} \times \Delta T_{PET} + m_{PET} \times L_{p_{PET}} \quad [\text{FTXIII.2}]$$

Donde:

Q_{PET} : calor requerido para fundir el PET en J

m_{PET} : masa del PET en kg

$C_{p_{PET}}$: capacidad calorífica del PET en J/K·kg

ΔT_{PET} : delta de temperatura (temperatura de fusión del PET y temperatura ambiente)
en K

$L_{p_{PET}}$: calor latente del PET en J/kg

Ejemplo de cálculo

$$Q_{PET} = (15,0627 \text{ kg}) \times \left(1350 \frac{J}{K \times kg}\right) \times (553 - 298) K$$

$$+ (15,0627 \text{ kg}) \times \left(140000 \frac{J}{kg}\right)$$

$$Q_{PET} = 7294110 J$$

$$Q_{PET} = 7294110 J \times \frac{1 W - h}{3600 J} = 2026,1 W - h = 2,0261 kW - h$$

FICHA TÉCNICA XIV

CÁLCULO DE LA MASA DE PET (TEREFTALATO DE POLIETILENO)

Objetivo: Determinar la masa de PET (tereftalato de polietileno) requerida para el escalado con base en el estudio de Sandoval et al. (2017).

Desarrollo:

Se calculó la densidad del PET usado en el estudio de Sandoval et al. (2017). Para esto, se realizó el siguiente procedimiento: 1) se recortaron pedazos de PET en forma de cuadrado de 1 cm de lado, 2) se unieron los pedazos, 3) se midió el espesor mediante un calibrador marca ESSER y 4) se pesaron con una balanza I-2000 (Kanji). En la Figura FTXIV.1 se presentan las imágenes del procedimiento.

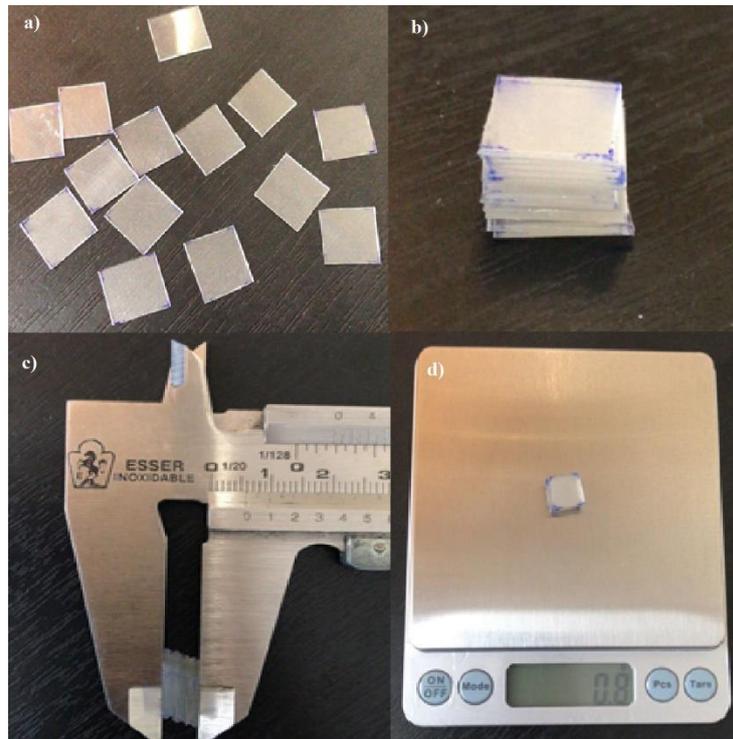


Figura FTXIV.1 Procedimiento medición de la densidad del PET

Ejemplo de cálculo:

- Cálculo de la densidad

El espesor medido de las 14 láminas fue de $0,6 \text{ cm}$ y mediante la ecuación FTXIV.1 se determinó el espesor para cada lámina:

$$e_l = \frac{e_m}{n_T} \quad \text{[FTXIV.1]}$$

Donde:

e_l : espesor de 1 lámina en cm

e_m : espesor de las láminas medido en cm

n_T : número de láminas totales

Ejemplo de cálculo

$$e_l = \frac{0,6 \text{ cm}}{14} = 0,0429 \text{ cm} = 0,43 \text{ mm}$$

Se calculó el volumen total de las láminas de PET mediante la ecuación FTXIV.2:

$$V_l = A_l \times e_m \quad \text{[FTXIV.2]}$$

Donde:

V_l : volumen de las láminas en cm^3

A_l : área de las láminas en cm^2

e_m : espesor de las láminas medido en cm

Ejemplo de cálculo

$$V_l = 1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 0,6 \text{ cm} = 0,6 \text{ cm}^3$$

La masa de PET que se obtuvo de las 14 láminas fue de $0,8 \text{ g}$. Mediante la ecuación FTXIV.3 se calculó la densidad del PET:

$$\rho_{PET} = \frac{m_{PET}}{V_{PET}} \quad \text{[FTXIV.3]}$$

Donde:

ρ_{PET} : densidad del PET en g/cm^3

m_{PET} : masa del PET en g

V_{PET} : volumen del PET en cm^3

Ejemplo de cálculo

$$\rho_{PET} = \frac{0,8 \text{ g}}{0,6 \text{ cm}^3} = 1,3333 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

- Cálculo del área total del soporte (PET) empleado por Sandoval et al. (2017)

Para esto se empleó la ecuación FTXIV.4

$$A_{TPET} = \pi \times (R^2 - r^2) \quad \text{[FTXIV.4]}$$

Donde:

A_{TPET} : área total del PET en cm^2

R : radio exterior del PET en cm

r : radio interior del PET en cm

Ejemplo de cálculo

$$A_{TPET} = \pi \times (4,5^2 \text{ cm}^2 - 0,5^2 \text{ cm}^2) = 62,8318 \text{ cm}^2$$

- Cálculo del volumen total del soporte (PET) empleado por Sandoval et al. (2017)

El volumen fue calculado utilizando la ecuación FTXIV.5

$$V_{TPET} = A_{TPET} \times e_l \quad \text{[FTXIV.5]}$$

Donde:

V_{TPET} : volumen total del PET en cm^3

A_{TPET} : área total del PET en cm^2

e_l : espesor de 1 lámina en cm

Ejemplo de cálculo

$$V_{T_{PET}} = 62,8318 \text{ cm}^2 \times 0,0429 \text{ cm} = 2,6955 \text{ cm}^3$$

- Cálculo de la masa de PET

Ejemplo del cálculo

$$m_{PET} = 2,6955 \text{ cm}^3 \times 1,3333 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 3,5939 \text{ g}$$

$$m_{PET} = \frac{3,5939 \text{ g}}{62,8318 \text{ cm}^2} \times \frac{(100 \text{ cm})^2}{1 \text{ m}^2} \times 26,334 \text{ m}^2 = 15062,7171 \text{ g} = 15,0627 \text{ kg}$$

FICHA TÉCNICA XV

CÁLCULO DE LA MASA DE DIÓXIDO DE TITANIO (TiO_2)

Objetivo: Determinar la masa de dióxido de titanio (TiO_2) requerida para el escalado de cada estudio.

Ejemplo de cálculo:

- Masa de TiO_2 con base al estudio de Sandoval et al. (2017):

- Para 1 tratamiento:

$$m_{TiO_2Sandoval} = 0,399 \frac{mg}{cm^2} \times \frac{(100 cm)^2}{1 m^2} \times \frac{1 g}{1000 mg} \times 26,334 m^2$$

$$= 105,0727 g TiO_2$$

- Para todos los tratamientos:

$$m_{TiO_2Sandoval total} = \frac{105,0727 g TiO_2}{74,3145 L} \times 1000 L = 1413,89 g TiO_2$$

$$= 1,4139 kg TiO_2$$

- Masa de TiO_2 con base al estudio de Mena (2018):

$$m_{TiO_2Mena} = \frac{0,1618 g TiO_2}{62,8318 cm^2} \times \frac{(100 cm)^2}{1 m^2} \times 26,334 m^2 = 678,1345 g TiO_2$$

$$= 0,6781 kg de TiO_2$$

FICHA TÉCNICA XVI

CÁLCULO DE LA MASA DE SILICONA LÍQUIDA

Objetivo: Determinar la masa de la silicona líquida requerida para el proceso de escalado.

Ejemplo de cálculo:

- Según Mena (2018), la proporción de dióxido de titanio TiO_2 y silicona es 1:3 (0,25 g de TiO_2 y 0,75 g de silicona líquida por cada 1 gramo de masa en conjunta). Por lo tanto:

Ejemplo de cálculo

$$m_{silicona} = 0,6781 \text{ kg} * 3 = 2,0343 \text{ kg silicona}$$

FICHA TÉCNICA XVII

CÁLCULO DE LA MASA DE FIBRA DE VIDRIO

Objetivo: Determinar la masa de la fibra de vidrio requerida para el proceso de escalado.

Ejemplo de cálculo:

- Se calculó el área de la fibra de vidrio utilizada por Mena (2018) mediante la Ecuación FTXVII.1:

$$A_{TFV} = \pi \times (R_1^2 - r_1^2) \quad \text{[FTXVII.1]}$$

Donde:

A_{TFV} : área total de la fibra de vidrio en cm^2

R_1 : radio exterior de la fibra de vidrio en cm

r_1 : radio interior de la fibra de vidrio en cm

Ejemplo de cálculo

$$A_{TFV} = \pi \times (4,5^2 cm^2 - 0,5^2 cm^2) = 62,8318 cm^2$$

- Masa de fibra de vidrio utilizada al escalar

$$m_{fv} = \frac{2,8497 g}{62,8318 cm^2} \times \frac{(100 cm)^2}{1 m^2} \times 26,334 m^2 = 11943,6336 g = 11,9436 kg$$

FICHA TÉCNICA XVIII

CÁLCULO DEL VOLUMEN DE ÁCIDO Y BASE

Objetivo: Determinar el volumen de ácido clorhídrico (HCl) requerido para llevar $1 m^3$ de agua pura de $pH = 7$ a un $pH = 2,5$ y el volumen de hidróxido requerido para retornar a $pH = 7$.

Ejemplo de cálculo:

- Volumen de ácido clorhídrico. Presentación comercial 36 % w/w. Se determinó la cantidad de $[H_3O^+]$ mediante la ecuación FTXVIII.1.

$$[H_3O^+] = 10^{-pH} \quad [FTXVIII.1]$$

Ejemplo de cálculo

$$[H_3O^+] = 10^{-2,5} = 3,1623 \times 10^{-3} M$$

- Concentración molar de la solución al 36 % w/w

$$\begin{aligned} C.MOLAR &= \frac{36 g HCl}{100 g solución} \times \frac{1,19 g solución}{cm^3 solución} \times \frac{1000 cm^3}{1 L} \times \frac{1 mol HCl}{36,5 g HCl} \\ &= 11,7370 M \end{aligned}$$

- Al definir molaridad como moles de soluto sobre litro de solución se obtiene la ecuación FTXVIII.2.

$$Molaridad = \frac{n_s}{V}$$

$$n_s = 11,7370 (V) \quad [FTXVIII.2]$$

Donde:

n_s : moles de soluto

V : volumen de la solución en L

- La ecuación FTXVIII.3 representa la concentración de iones $[H_3O^+]$ para obtener el pH requerido.

$$[H_3O^+] = \frac{n_{ST}}{V_{total}} \quad \text{[FTXVIII.3]}$$

Donde:

n_{ST} : moles de soluto totales

V_{total} : volumen total de la solución en L

- Al reemplazar la ecuación FTXVIII.2 en la ecuación FTXVIII.3 se obtiene el volumen de ácido clorhídrico requerido.

Ejemplo de cálculo

$$[H_3O^+] = \frac{n_{ST}}{V_{total}}$$

$$3,1623 \times 10^{-3} = \frac{11,74 V}{V + 1000}$$

$$(3,1623 \times 10^{-3}) \times (V + 1000) = 11,74 V$$

$$V_{HCl} = 0,2694 \text{ L de HCl}$$

- Para retornar a $pH = 7$ se debe consumir el H_3O^+ aportado por el HCl . Si se agregaron 0,2694 L de HCl de concentración 11,74 M (36% w/w) para llegar a $pH = 2,5$; este se neutraliza con 0,2694 L de $NaOH$ de concentración 11,74 M.

- Masa de HCl requerida

$$m_{HCl} = 0,2694 \text{ L de HCl} \times \frac{1000 \text{ cm}^3}{1 \text{ L}} \times \frac{1,19 \text{ g}}{\text{cm}^3} = 320,586 \text{ g HCl } 36 \% \frac{w}{w}$$

$$= 0,3206 \text{ kg HCl } 36 \% \frac{w}{w}$$

- Masa de NaOH requerida

$$\begin{aligned} m_{NaOH} &= 0,2694 \text{ L de NaOH} \times \frac{11,74 \text{ moles NaOH}}{1 \text{ L}} \times \frac{40 \text{ g NaOH}}{1 \text{ mol NaOH}} \\ &= 126,792 \text{ g NaOH } 99 \% \frac{w}{w} = 0,1268 \text{ kg NaOH } 99 \% w/w \end{aligned}$$

FICHA TÉCNICA XIX

CÁLCULO DE LA MASA DE ETANOL PARA LA DILUCIÓN CON SILICONA

Objetivo: Determinar la masa de etanol requerida para el proceso de dilución con silicona.

Ejemplo de cálculo:

- Según Mena (2018), se diluyen 0,75 g de silicona líquida en 15 mL de etanol al 96% en v/v. Por lo tanto:

$$\begin{aligned}
 m_{es} &= 2,0343 \text{ kg silicona} \times \frac{100 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \times \frac{15 \text{ mL}}{0,75 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \times \frac{797,06 \text{ kg}}{\text{m}^3} \\
 &= 32,4292 \text{ kg etanol}
 \end{aligned}$$

FICHA TÉCNICA XX

CÁLCULO DEL TIEMPO DE REACCIÓN

Objetivo: Determinar el tiempo de reacción requerido, según la constante cinética, para cada caso de estudio.

Ejemplo de cálculo:

- Según Sandoval et al. (2017), la constante cinética obtenida en su estudio fue: $k = 0,0838 \text{ min}^{-1}$, para una reacción de pseudo-primer orden. Por lo tanto, para determinar el tiempo requerido para alcanzar una remoción del 99,06%, que es el porcentaje de remoción que alcanza Mena (2018) se emplea la Ecuación FTXX.1:

$$\ln\left(\frac{C_{A,0}}{C_A}\right) = k \times t_r \quad \text{[FTXX.1]}$$

Donde:

$C_{A,0}$: concentración inicial del colorante en mg/L

C_A : concentración final del colorante en mg/L

k : constante de velocidad observada en min^{-1}

t_r : tiempo de reacción en min

Ejemplo de cálculo

$$\ln\left(\frac{50 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{50 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times \frac{100 - 99,06 \text{ mg}}{100} \frac{\text{mg}}{\text{L}}}\right) = 0,0838 \text{ min}^{-1} \times t_r$$

$$t_r = 55,69 \text{ min}$$

- Según Mena (2018), la constante cinética obtenida en su estudio fue: $k = 0,1453 \text{ min}^{-1}$, para una reacción de pseudo-primer orden. Por lo tanto, para

determinar el tiempo requerido para alcanzar una remoción del 99,06% se emplea la Ecuación FTXX.1:

Ejemplo de cálculo

$$\ln\left(\frac{50 \frac{mg}{L}}{50 \frac{mg}{L} \times \frac{100 - 99,06 \frac{mg}{L}}{100}}\right) = 0,1453 \text{ min}^{-1} \times t_r$$

$$t_r = 32,12 \text{ min}$$

FICHA TÉCNICA XXI

CÁLCULO DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LAS LÁMPARAS UV

Objetivo: Determinar el número de lámparas UV necesarias, tiempo de operación y el consumo energético de estas para ambos casos de estudio.

Ejemplo de cálculo:

- Según el estudio realizado por Fredes et al. (2021) (Estimation of the Ultraviolet-C Doses from Mercury Lamps and Light-Emitting Diodes Required to Disinfect Surfaces), la potencia de salida UV-C de las lámparas modelo GPH436T5L4PSE (marca Atlantic Ultraviolet) es de 13 W a 254 nm.
- Para el caso de Sandoval et al. (2017) la dosis de radiación expuesta es de $111,910 \frac{W}{m^2}$, según mediciones de laboratorio a 2 cm de distancia y por un tiempo de 40 s. Por lo tanto, la dosis requerida se determinó mediante la Ecuación FTXXI.1:

$$D_r = d \times t_r \times A_{T_{PET}} \quad [FTXXI.1]$$

Donde:

D_r : dosis requerida en J

d: dosis expuesta en $J/m^2 \cdot s$

t_r : tiempo de reacción en s

$A_{T_{PET}}$: área total del PET en m^2

Ejemplo de cálculo

$$D_r = \left(111,91 \frac{J}{m^2 \times s} \right) \times \left(56 \text{ min} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right) \times \left(62,83 \text{ cm}^2 \times \frac{1 \text{ m}^2}{100^2 \text{ cm}^2} \right) = 2362,5186 \text{ J}$$

La dosis requerida para el ensayo de laboratorio fue de $D_r = 2362,5186 \text{ J}$. Al escalar a nivel semi industrial:

$$D_r = 2362,5186 J \times \frac{26,334 m^2}{\left(62,83 cm^2 \times \frac{1 m^2}{100^2 cm^2}\right)} = 9902047,478 J$$

- Al equilibrar el tiempo de tratamiento con el número de lámparas, se propone lo siguiente:
- Para el reactor semi industrial, con base en el artículo de Sandoval et al. (2017), se requieren 70 lámparas de 13 W cada una y un tiempo de operación de 3,23 h. A continuación, se determinó la dosis proporcionada por las 70 lámparas mediante la Ecuación FTXXI.2:

$$D_p = P_{lam} \times n_{lam} \times t_{OLPET} \quad [FTXXI.2]$$

Donde:

D_p : dosis proporcionada en J

P_{lam} : Potencia de salida UV-C de la lámpara en W

n_{lam} : número de lámparas

t_{OLPET} : tiempo de operación de las lámparas para el PET en s

Ejemplo de cálculo

$$D_p = (13W \times 70 \text{ lámparas}) \times \left(3,23h \times \frac{3600 s}{1 h}\right) = 10581480 J$$

\therefore Es superior a la dosis requerida

- Finalmente, se determinó el consumo energético de las lámparas para el caso de Sandoval et al. (2017) mediante la Ecuación FTXXI.3:

$$E_{lam} = P_{lam} \times n_{lam} \times t_{OLPET} \quad [FTXXI.3]$$

Donde:

E_{lam} : consumo energético de las lámparas en kW-h

P_{lam} : Potencia de salida UV-C de la lámpara en W

n_{lam} : número de lámparas

t_{OLPET} : tiempo de operación de las lámparas para el PET en h

Ejemplo de cálculo

$$E_{lam} = (13W \times 70 \text{ lámparas}) \times \frac{1 kW}{1000 W} \times (3,23h) = 2,9393 kW - h$$

- De la misma manera, se procedió para el cálculo del número de lámparas, tiempo de operación y consumo energético para el caso de Mena (2018). Los datos son presentados a continuación en la Tabla FTXXI.1:

Tabla FTXXI.1 Número de lámparas, tiempo de operación y consumo energético Mena (2018)

Parámetro	Valor
Número de lámparas	70
Tiempo de operación	2,16 h
Consumo energético	1,9656 kW-h

FICHA TÉCNICA XXII

CÁLCULO DEL CONSUMO DE AGUA PARA LA INMOVILIZACIÓN POR “DIP COATING”

Objetivo: Determinar la masa de agua necesario para la inmovilización por “dip coating”.

Ejemplo de cálculo:

- Según Sandoval et al. (2017), por cada 2 g de TiO_2 se requiere 1 L de agua. Por lo tanto, mediante la Ecuación FTXXII.1 se determinó la cantidad de agua requerida:

$$m_{A_I} = m_{TiO_2Sandoval\ total} \times f_{conv} \times \rho_A \quad [FTXXII.1]$$

Donde:

m_{A_I} : masa de agua requerida para la inmovilización en kg

$m_{TiO_2Sandoval\ total}$: masa total de TiO_2 en g (basado en el estudio de Sandoval et al., 2017)

f_{conv} : factor de conversión

ρ_A : densidad del agua en kg/m^3

Ejemplo de cálculo

$$\begin{aligned} m_{A_I} &= \left(1,4139\ kg \times \frac{1000\ g}{1\ kg} \right) \times \left(\frac{1\ L\ de\ agua}{2\ g\ de\ TiO_2} \times \frac{1\ m^3}{1000\ L} \right) \times \frac{997,045\ kg}{m^3} \\ &= 704,86\ kg \end{aligned}$$

FICHA TÉCNICA XXIII

CÁLCULO DE LA MASA DE AGUA PARA REPOSICIÓN POR PÉRDIDAS EN LA INMOVILIZACIÓN POR “DIP COATING”

Objetivo: Determinar la cantidad de agua necesaria para reponer las pérdidas que puedan generarse en el proceso de inmovilización por “dip coating” para el caso de Sandoval et al. (2017).

Ejemplo de cálculo:

- Se asume que el espesor de película que queda en la lámina de PET y TiO₂ es de 0,1 mm. Además, se supone que para 1 m³ se deben realizar 3,5 veces la inmovilización. Por lo tanto, se calculó la masa evaporada de agua mediante la Ecuación FTXXIII.1:

$$m_{pérdidas_{DC}} = A_{reactor} \times 2 \times e_{peva} \times \rho_A \times n_{v\ inmo} \quad [FTXXIII.1]$$

Donde:

$m_{pérdidas_{DC}}$: masa de agua evaporada en kg, para reponer pérdidas por “dip coating”

$A_{reactor}$: área del reactor semi industrial en m²

e_{peva} : espesor de película de agua sobre la lámina que luego es evaporada, en m

ρ_A : densidad de agua en kg/m³

$n_{v\ inmo}$: número de veces teóricas que se debe realizar la inmovilización

Ejemplo de cálculo

$$\begin{aligned} m_{pérdidas_{DC}} &= 26,334 \text{ m}^2 \times 2 \times \left(0,1 \text{ mm} \times \frac{1 \text{ cm}}{10 \text{ mm}} \times \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right) \times 997,045 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 3,5 \\ &= 18,3793 \text{ kg} \end{aligned}$$

FICHA TÉCNICA XXIV

INVENTARIO DE CICLO DE VIDA CON SUS ENTRADAS, SALIDAS Y DISPOSICIONES FINALES

Objetivo: Presentar el inventario de ciclo de vida para cada escenario, donde se muestren los valores de entradas, salidas y disposiciones finales de cada reactivo, parámetro y energía.

Ejemplo de cálculo:

- En la Tabla FTXXIV.1 se presenta el inventario de ciclo de vida, con sus valores de entradas, salidas y disposiciones final para el escenario de no actuación.

Tabla FTXXIV.1. Inventario de ciclo de vida para el escenario de no actuación. Unidad funcional 1 m³ de agua sintética que sale del proceso de teñido

Descripción	Entrada	Salida	Disposición final
[kg] Colorante Direct Blue 1 (Azul BRL)	0,05	0,05	Descarga directa a cuerpos de agua
[kg] Agua (H ₂ O)	997,05	997,05	Descarga directa a cuerpos de agua
[mg/L] DQO	79,03	79,03	Descarga directa a cuerpos de agua

- En la Tabla FTXXIV.2 se presenta el inventario de ciclo de vida, con sus valores de entradas, salidas y disposiciones final para el escenario de PET.

Tabla FTXXIV.2. Inventario de ciclo de vida para el escenario con PET. Unidad funcional 1 m³ de agua sintética que sale del proceso de teñido

Etapa	Entrada	Descripción	Salida	Descripción	Disposición final
Calidad de agua (sintética)	0,05	[kg] Colorante Direct Blue 1 (Azul BRL)	4,70E-04	[kg] Colorante Direct Blue 1 (Azul BRL)	Descarga directa a cuerpos de agua
	997,05	[kg] Agua (H ₂ O)	997,05	[kg] Agua (H ₂ O)	Descarga directa a cuerpos de agua
	79,03	[mg/L] DQO	39,52	[mg/L] DQO	Descarga directa a cuerpos de agua
Transformación PET	2,03	[kWh] Fundición de PET			Consumo energético
Tratamiento	15,06	[kg] PET	1,51	[kg] PET	Relleno sanitario
	1,41	[kg] TiO ₂ (anatasa-nanoparticulado)	1,41	[kg] TiO ₂ (anatasa-nanoparticulado)	Relleno sanitario
	0,32	[kg] Ácido clorhídrico (HCl) 36% w/w	0,18	[kg] Cloruro de sodio	Descarga directa a cuerpos de agua
	0,13	[kg] Hidróxido de sodio (NaOH) 99% w/w	0,27	[kg] Agua (H ₂ O)	Descarga directa a cuerpos de agua
	704,86	[kg] Agua (H ₂ O) para preparar suspensiones con TiO ₂ para inmovilización mediante “dip coating”	18,38	[kg] Agua (H ₂ O) para preparar suspensiones con TiO ₂ para inmovilización mediante “dip coating”	Emisiones a la atmósfera
	18,38	[kg] Agua (H ₂ O) para restaurar el agua evaporada en la inmovilización por “dip coating”			
	96,71	[kg] Agua (H ₂ O) para el baño de ultrasonido	1,93	[kg] Agua (H ₂ O) para el baño de ultrasonido	Descarga al alcantarillado

Tabla FTXXIV.2. Inventario de ciclo de vida para el escenario con PET. Unidad funcional 1 m³ de agua sintética que sale del proceso de teñido.
Continuación

Etapa	Entrada	Descripción	Salida	Descripción	Disposición final
Tratamiento	5,25	[kg] Agua (H ₂ O) para el baño de ultrasonido (reposición)	5,25	[kg] Agua (H ₂ O) para el baño de ultrasonido	Emisiones a la atmósfera
	0,07	[kWh] Bomba centrífuga (1 bomba) – marca: Trupper; código: 10072; modelo europeo; potencia: ½ HP; altura máxima: 23 m; flujo máximo: 90 L/min; diámetro de entrada/salida: 1” NPT; velocidad: 3,45 r/min; consumo: 5 A			Consumo energético
	0,90	[kWh] Baño ultrasonido (1 equipo) – marca: Elma; modelo: Elmasonic xtra ST 1400H; frecuencia de ultrasonido: 25/45 kHz; volumen útil de la cuba: 97 L; potencia de ultrasonidos efectivo – 60tlanti: 1800 W			Consumo energético
	2,94	[kWh] Lámparas germicidas UV-C (70 lámparas) – marca: 60tlantic ultraviolet corporation. STER-L-RAY; modelo: GPH436T5L/HO/4PSE 4 Pin; longitud de onda: 254 nm; potencia de salida UV-C: 13 W; potencia: 48 W			Consumo energético

- En la Tabla FTXXIV.3 se presenta el inventario de ciclo de vida, con sus valores de entras, salidas y disposiciones final para el escenario de fibra de vidrio (2).

Tabla FTXXIV.3. Inventario de ciclo de vida para el escenario con fibra de vidrio (2). Unidad funcional 1 m³ de agua sintética que sale del proceso de teñido

Etapas	Entrada	Descripción	Salida	Descripción	Disposición final
Calidad de agua (sintética)	0,05	[kg] Colorante Direct Blue 1 (Azul BRL)	4,70E-04	[kg] Colorante Direct Blue 1 (Azul BRL)	Descarga directa a cuerpos de agua
	997,05	[kg] Agua (H ₂ O)	997,05	[kg] Agua (H ₂ O)	Descarga directa a cuerpos de agua
	79,03	[mg/L] DQO	39,52	[mg/L] DQO	Descarga directa a cuerpos de agua
	11,94	[kg] Fibra de vidrio	0,60	[kg] Fibra de vidrio	Relleno sanitario
	0,68	[kg] TiO ₂ (anatasa-nanoparticulado)	0,03	[kg] TiO ₂ (anatasa-nanoparticulado)	Relleno sanitario
	2,03	[kg] silicona	0,10	[kg] silicona	Relleno sanitario
	0,32	[kg] Ácido clorhídrico (HCl) 36% w/w	0,18	[kg] Cloruro de sodio	Descarga directa a cuerpos de agua
Tratamiento	0,13	[kg] Hidróxido de sodio (NaOH) 99% w/w	0,27	[kg] Agua (H ₂ O)	Descarga directa a cuerpos de agua
	48,36	[kg] Agua (H ₂ O) para el baño de ultrasonido	0,97	[kg] Agua (H ₂ O) para el baño de ultrasonido	Descarga al alcantarillado
	5,25	[kg] Agua (H ₂ O) para el baño de ultrasonido (reposición)	5,25	[kg] Agua (H ₂ O) para el baño de ultrasonido	Emisiones a la atmósfera
	38,66	[kg] Etanol (C ₂ H ₅ OH) al 96% v/v para el baño de ultrasonido	0,77	[kg] Etanol (C ₂ H ₅ OH) al 96% v/v para el baño de ultrasonido	Descarga al alcantarillado
	4,20	[kg] Etanol (C ₂ H ₅ OH) al 96% v/v para el baño de ultrasonido (reposición)	4,20	[kg] Etanol (C ₂ H ₅ OH) al 96% v/v para el baño de ultrasonido	Emisiones a la atmósfera

Tabla FTXXIV.3. Inventario de ciclo de vida para el escenario con fibra de vidrio (2). Unidad funcional 1 m³ de agua sintética que sale del proceso de teñido. Continuación

Etapas	Entrada	Descripción	Salida	Descripción	Disposición final
Tratamiento	32,43	[kg] Etanol (C ₂ H ₅ OH) al 96% v/v para dilución con silicona	1,62	[kg] Etanol (C ₂ H ₅ OH) al 96% v/v para dilución con silicona	Emisiones a la atmósfera
	0,07	[kWh] Bomba centrífuga (1 bomba) – marca: Trupper; código: 10072; modelo europeo; potencia: ½ HP; altura máxima: 23 m; flujo máximo: 90 L/min; diámetro de entrada/salida: 1” NPT; velocidad: 3,45 r/min; consumo: 5 A			Consumo energético
	0,15	[kWh] Baño ultrasonido (1 equipo) – marca: Elma; modelo: Elmasonic xtra ST 1400H; frecuencia de ultrasonido: 25/45 kHz; volumen útil de la cuba: 97 L; potencia de ultrasonidos efectivo – dynamic: 1800 W			Consumo energético
	1,97	[kWh] Lámparas germicidas UV-C (70 lámparas) – marca: atlantic ultraviolet corporation. STER-L-RAY; modelo: GPH436T5L/HO/4PSE 4 Pin; longitud de onda: 254 nm; potencia de salida UV-C: 13 W; potencia: 48 W			Consumo energético

- En la Tabla FTXXIV.4 se presenta el inventario de ciclo de vida, con sus valores de entradas, salidas y disposiciones final para el escenario de fibra de vidrio (5).

Tabla FTXXIV.4. Inventario de ciclo de vida para el escenario con fibra de vidrio (5). Unidad funcional 1 m³ de agua sintética que sale del proceso de teñido

Etapas	Entrada	Descripción	Salida	Descripción	Disposición final	
Calidad de agua (sintética)	0,05	[kg] Colorante Direct Blue 1 (Azul BRL)	4,70E-04	[kg] Colorante Direct Blue 1 (Azul BRL)	Descarga directa a cuerpos de agua	
	997,05	[kg] Agua (H ₂ O)	997,05	[kg] Agua (H ₂ O)	Descarga directa a cuerpos de agua	
	79,03	[mg/L] DQO	39,52	[mg/L] DQO	Descarga directa a cuerpos de agua	
	11,94	[kg] Fibra de vidrio	0,24	[kg] Fibra de vidrio	Relleno sanitario	
	0,68	[kg] TiO ₂ (anatasa-nanoparticulado)	0,01	[kg] TiO ₂ (anatasa-nanoparticulado)	Relleno sanitario	
	2,03	[kg] silicona	0,04	[kg] silicona	Relleno sanitario	
	0,32	[kg] Ácido clorhídrico (HCl) 36% w/w	0,18	[kg] Cloruro de sodio	Descarga directa a cuerpos de agua	
	0,13	[kg] Hidróxido de sodio (NaOH) 99% w/w	0,27	[kg] Agua (H ₂ O)	Descarga directa a cuerpos de agua	
	Tratamiento	48,36	[kg] Agua (H ₂ O) para el baño de ultrasonido	0,97	[kg] Agua (H ₂ O) para el baño de ultrasonido	Descarga al alcantarillado
		5,25	[kg] Agua (H ₂ O) para el baño de ultrasonido (reposición)	5,25	[kg] Agua (H ₂ O) para el baño de ultrasonido	Emisiones a la atmósfera
38,66		[kg] Etanol (C ₂ H ₅ OH) al 96% v/v para el baño de ultrasonido	0,77	[kg] Etanol (C ₂ H ₅ OH) al 96% v/v para el baño de ultrasonido	Descarga al alcantarillado	

Tabla FTXXIV.4. Inventario de ciclo de vida para el escenario con fibra de vidrio (5). Unidad funcional 1 m³ de agua sintética que sale del proceso de teñido. Continuación

Etapas	Entrada	Descripción	Salida	Descripción	Disposición final
Tratamiento	4,20	[kg] Etanol (C ₂ H ₅ OH) al 96% v/v para el baño de ultrasonido (reposición)	4,20	[kg] Etanol (C ₂ H ₅ OH) al 96% v/v para el baño de ultrasonido	Emisiones a la atmósfera
	32,43	[kg] Etanol (C ₂ H ₅ OH) al 96% v/v para dilución con silicona	1,62	[kg] Etanol (C ₂ H ₅ OH) al 96% v/v para dilución con silicona	Emisiones a la atmósfera
	0,07	[kWh] Bomba centrífuga (1 bomba) – marca: Trupper; código: 10072; modelo europeo; potencia: ½ HP; altura máxima: 23 m; flujo máximo: 90 L/min; diámetro de entrada/salida: 1” NPT; velocidad: 3,45 r/min; consumo: 5 A			Consumo energético
	0,15	[kWh] Baño ultrasonido (1 equipo) – marca: Elma; modelo: Elmasonic xtra ST 1400H; frecuencia de ultrasonido: 25/45 kHz; volumen útil de la cuba: 97 L; potencia de ultrasonidos efectivo – dynamic: 1800 W			Consumo energético
	1,97	[kWh] Lámparas germicidas UV-C (70 lámparas) – marca: atlantic ultraviolet corporation. STER-L-RAY; modelo: GPH436T5L/HO/4PSE 4 Pin; longitud de onda: 254 nm; potencia de salida UV-C: 13 W; potencia: 48 W			Consumo energético

- En la Tabla FTXXIV.5 se presenta el inventario de ciclo de vida, con sus valores de entradas, salidas y disposiciones final para el escenario de fibra de vidrio (10).

Tabla FTXXIV.5. Inventario de ciclo de vida para el escenario con fibra de vidrio (10). Unidad funcional 1 m³ de agua sintética que sale del proceso de teñido

Etapas	Entrada	Descripción	Salida	Descripción	Disposición final
Calidad de agua (sintética)	0,05	[kg] Colorante Direct Blue 1 (Azul BRL)	4,70E-04	[kg] Colorante Direct Blue 1 (Azul BRL)	Descarga directa a cuerpos de agua
	997,05	[kg] Agua (H ₂ O)	997,05	[kg] Agua (H ₂ O)	Descarga directa a cuerpos de agua
	79,03	[mg/L] DQO	39,52	[mg/L] DQO	Descarga directa a cuerpos de agua
Tratamiento	11,94	[kg] Fibra de vidrio	0,12	[kg] Fibra de vidrio	Relleno sanitario
	0,68	[kg] TiO ₂ (anatasa-nanoparticulado)	6,80E-03	[kg] TiO ₂ (anatasa-nanoparticulado)	Relleno sanitario
	2,03	[kg] silicona	0,02	[kg] silicona	Relleno sanitario
	0,32	[kg] Ácido clorhídrico (HCl) 36% w/w	0,18	[kg] Cloruro de sodio	Descarga directa a cuerpos de agua
	0,13	[kg] Hidróxido de sodio (NaOH) 99% w/w	0,27	[kg] Agua (H ₂ O)	Descarga directa a cuerpos de agua
	48,36	[kg] Agua (H ₂ O) para el baño de ultrasonido	0,97	[kg] Agua (H ₂ O) para el baño de ultrasonido	Descarga al alcantarillado
	5,25	[kg] Agua (H ₂ O) para el baño de ultrasonido (reposición)	5,25	[kg] Agua (H ₂ O) para el baño de ultrasonido	Emisiones a la atmósfera
	38,66	[kg] Etanol (C ₂ H ₅ OH) al 96% v/v para el baño de ultrasonido	0,77	[kg] Etanol (C ₂ H ₅ OH) al 96% v/v para el baño de ultrasonido	Descarga al alcantarillado

Tabla FTXXIV.5. Inventario de ciclo de vida para el escenario con fibra de vidrio (10). Unidad funcional 1 m³ de agua sintética que sale del proceso de teñido. Continuación

Etapas	Entrada	Descripción	Salida	Descripción	Disposición final
Tratamiento	4,20	[kg] Etanol (C ₂ H ₅ OH) al 96% v/v para el baño de ultrasonido (reposición)	4,20	[kg] Etanol (C ₂ H ₅ OH) al 96% v/v para el baño de ultrasonido	Emisiones a la atmósfera
	32,43	[kg] Etanol (C ₂ H ₅ OH) al 96% v/v para dilución con silicona	1,62	[kg] Etanol (C ₂ H ₅ OH) al 96% v/v para dilución con silicona	Emisiones a la atmósfera
	0,07	[kWh] Bomba centrífuga (1 bomba) – marca: Trupper; código: 10072; modelo europeo; potencia: ½ HP; altura máxima: 23 m; flujo máximo: 90 L/min; diámetro de entrada/salida: 1” NPT; velocidad: 3,45 r/min; consumo: 5 A			Consumo energético
	0,15	[kWh] Baño ultrasonido (1 equipo) – marca: Elma; modelo: Elmasonic xtra ST 1400H; frecuencia de ultrasonido: 25/45 kHz; volumen útil de la cuba: 97 L; potencia de ultrasonidos efectivo – dynamic: 1800 W			Consumo energético
	1,97	[kWh] Lámparas germicidas UV-C (70 lámparas) – marca: atlantic ultraviolet corporation. STER-L-RAY; modelo: GPH436T5L/HO/4PSE 4 Pin; longitud de onda: 254 nm; potencia de salida UV-C: 13 W; potencia: 48 W			Consumo energético

FICHA TÉCNICA XXV

RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL SOFTWARE SIMAPRO

Objetivo: Exponer los resultados obtenidos para mediante el software SimaPro versión 9.3. para cada categoría de impacto y tipo de escenario propuesto.

Ejemplo de cálculo:

- En la Tabla FTXXV.1 se presentan los resultados obtenidos para cada categoría de impacto y escenario propuesto mediante el indicador: caracterización:

Tabla FTXXV.1. Resultados obtenidos. Indicador: caracterización.

Categoría de impacto	Unidad	(A) PET	(B) Fibra de vidrio (2)	(B) Fibra de vidrio (5)	(B) Fibra de vidrio (10)	(C) No actuación
Cambio climático	kg CO ₂ eq	14,2689959	8,50482055	7,32093412	6,94929151	0,31269596
Agotamiento de ozono	kg CFC11 eq	1,5007E-06	1,1631E-06	1,0079E-06	9,5826E-07	1,9619E-08
Radiación ionizante	kBq U-235 eq	0,42844968	0,23786463	0,19689712	0,18387412	0,03229277
Formación de ozono fotoquímico	kg NMVOC eq	0,04837537	3,95513085	3,95007804	3,94848118	0,00066089
Material particulado	kg PM 2.5	9,8068E-07	7,1866E-07	6,3848E-07	6,1362E-07	9,5682E-09
Toxicidad humana, efectos no cancerígenos	CTUh	5,2942E-07	2,0225E-06	1,9648E-06	1,9467E-06	3,7212E-09

Tabla FTXXV.1. Resultados obtenidos. Indicador: caracterización. Continuación

Categoría de impacto	Unidad	(A) PET	(B) Fibra de vidrio (2)	(B) Fibra de vidrio (5)	(B) Fibra de vidrio (10)	(C) No actuación
Toxicidad humana, efectos cancerígenos	CTUh	2,059E-08	9,8563E-08	9,7397E-08	9,7055E-08	1,1339E-10
Acidificación	mol H ⁺ eq	0,10242421	0,09663819	0,08807033	0,0854074	0,00149669
Eutrofización, de agua dulce	kg P eq	0,00050475	0,00106282	0,00102601	0,00101465	2,0412E-05
Eutrofización, marina	kg N eq	0,01470467	0,03421354	0,03259825	0,03208449	0,00020653
Eutrofización, Terrestre	mol N eq	0,1451262	0,35653572	0,3390097	0,33341314	0,00230213
Ecotoxicidad, de agua dulce	CTUe	348,942344	1964,33107	1944,57269	1938,69813	4,32236486
Uso de suelo	Pt	81,2495395	534,240201	531,185028	530,357697	0,49519939
Agotamiento de recursos, hídricos	m ³ eq de agua	47,3468933	74,667477	74,1180171	73,9518046	39,02901
Agotamiento de recursos, fósiles	MJ	152,284765	76,2961997	60,5744388	55,5772432	4,62695014
Agotamiento de recursos, minerales y metales	kg Sb eq	0,00015013	3,9879E-05	2,7797E-05	2,4115E-05	2,1355E-06
Cambio climático, fósil	kg CO ₂ eq	13,8948224	6,39979064	5,22184262	4,85210271	0,31172022
Cambio climático, biogénico	kg CO ₂ eq	0,36135334	0,31378899	0,30911736	0,3076204	0,00046499
Cambio climático, uso del suelo y cambio del uso del suelo	kg CO ₂ eq	0,01282011	1,79124092	1,78997415	1,7895684	0,00051075

Tabla FTXV.1. Resultados obtenidos. Indicador: caracterización. Continuación

Toxicidad humana, efectos no cancerígenos - orgánicos	CTUh	6,4207E-09	5,6347E-07	5,6297E-07	5,6282E-07	8,8492E-11
Toxicidad humana, efectos no cancerígenos - inorgánicos	CTUh	3,5895E-07	8,952E-07	8,8927E-07	8,8807E-07	2,8734E-10
Toxicidad humana, efectos no cancerígenos - metales	CTUh	1,6593E-07	5,6442E-07	5,1301E-07	4,9621E-07	3,375E-09
Toxicidad humana, efectos cancerígenos - orgánicos	CTUh	1,3911E-09	8,9777E-08	8,9618E-08	8,9567E-08	2,3334E-11
Toxicidad humana, efectos cancerígenos – metales	CTUh	1,9199E-08	8,7855E-09	7,7784E-09	7,488E-09	9,0057E-11
Ecotoxicidad, de agua dulce - orgánicos	CTUe	3,0053518	1717,92432	1717,78702	1717,74589	0,02882593
Ecotoxicidad, de agua dulce - inorgánicos	CTUe	60,7632668	48,2006903	44,6781727	43,6284172	0,69936823
Ecotoxicidad, de agua dulce - metales	CTUe	285,173725	198,206062	182,107497	177,323819	3,5941707

- En la Tabla FTXV.2 se presentan los resultados obtenidos para cada categoría de impacto y escenario propuesto mediante el indicador ponderación:

Tabla FTXXV.2. Resultados obtenidos. Indicador: ponderación.

Categoría de impacto	Unidad	(A) PET	(B) Fibra de vidrio (2)	(B) Fibra de vidrio (5)	(B) Fibra de vidrio (10)	(C) No actuación
Total	mPt	1,7158	7,1636	7,0440	7,0068	0,3141
Cambio climático	mPt	0,3711	0,2212	0,1904	0,1807	0,0081
Agotamiento de ozono	mPt	0,0018	0,0014	0,0012	0,0011	0,0000
Radiación ionizante	mPt	0,0051	0,0028	0,0023	0,0022	0,0004
Formación de ozono fotoquímico	mPt	0,0570	4,6564	4,6505	4,6486	0,0008
Material particulado	mPt	0,1476	0,1082	0,0961	0,0924	0,0014
Toxicidad humana, efectos no cancerígenos	mPt	0,0424	0,1620	0,1574	0,1560	0,0003
Toxicidad humana, efectos cancerígenos	mPt	0,0260	0,1242	0,1228	0,1223	0,0001
Acidificación	mPt	0,1143	0,1078	0,0983	0,0953	0,0017
Eutrofización, de agua dulce	mPt	0,0088	0,0185	0,0179	0,0177	0,0004
Eutrofización, marina	mPt	0,0223	0,0518	0,0494	0,0486	0,0003
Eutrofización, terrestre	mPt	0,0305	0,0748	0,0712	0,0700	0,0005
Ecotoxicidad, de agua dulce	mPt	0,1570	0,8837	0,8748	0,8721	0,0019
Uso de suelo	mPt	0,0079	0,0518	0,0515	0,0514	0,0000
Agotamiento de recursos, hídricos	mPt	0,3513	0,5540	0,5499	0,5487	0,2896
Agotamiento de recursos, fósiles	mPt	0,1949	0,0976	0,0775	0,0711	0,0059
Agotamiento de recursos, minerales y metales	mPt	0,1781	0,0473	0,0330	0,0286	0,0025

- En la Tabla FTXXV.3 se presentan los resultados obtenidos para cada categoría de impacto y escenario propuesto mediante el indicador puntuación única:

Tabla FTXXV.3. Resultados obtenidos. Indicador: puntuación única.

Categoría de impacto	Unidad	(A) PET	(B) Fibra de vidrio (2)	(B) Fibra de vidrio (5)	(B) Fibra de vidrio (10)	(C) No actuación
Total	mPt	1,7158	7,1636	7,0440	7,0068	0,3141
Cambio climático	mPt	0,3711	0,2212	0,1904	0,1807	0,0081
Agotamiento de ozono	mPt	0,0018	0,0014	0,0012	0,0011	0,0000
Radiación ionizante	mPt	0,0051	0,0028	0,0023	0,0022	0,0004
Formación de ozono fotoquímico	mPt	0,0570	4,6564	4,6505	4,6486	0,0008
Material particulado	mPt	0,1476	0,1082	0,0961	0,0924	0,0014
Toxicidad humana, efectos no cancerígenos	mPt	0,0424	0,1620	0,1574	0,1560	0,0003
Toxicidad humana, efectos cancerígenos	mPt	0,0260	0,1242	0,1228	0,1223	0,0001
Acidificación	mPt	0,1143	0,1078	0,0983	0,0953	0,0017
Eutrofización, de agua dulce	mPt	0,0088	0,0185	0,0179	0,0177	0,0004
Eutrofización, marina	mPt	0,0223	0,0518	0,0494	0,0486	0,0003
Eutrofización, terrestre	mPt	0,0305	0,0748	0,0712	0,0700	0,0005
Ecotoxicidad, de agua dulce	mPt	0,1570	0,8837	0,8748	0,8721	0,0019
Uso de suelo	mPt	0,0079	0,0518	0,0515	0,0514	0,0000
Agotamiento de recursos, hídricos	mPt	0,3513	0,5540	0,5499	0,5487	0,2896

Tabla FTXXV.3. Resultados obtenidos. Indicador: puntuación única. Continuación

Agotamiento de recursos, fósiles	mPt	0,1949	0,0976	0,0775	0,0711	0,0059
Agotamiento de recursos, minerales y metales	mPt	0,1781	0,0473	0,0330	0,0286	0,0025

FICHA TÉCNICA XXVI

RESULTADOS OBTENIDOS PARA LAS DISTINTAS CATEGORÍAS DE IMPACTOS AMBIENTALES

Objetivo: Exponer las gráficas obtenidas para las distintas categorías de impactos ambientales.

Ejemplo de cálculo:

- En la Figura FTXXVI.1 se presentan los resultados obtenidos para la categoría de impacto: acidificación para cada tipo de escenario propuesto:

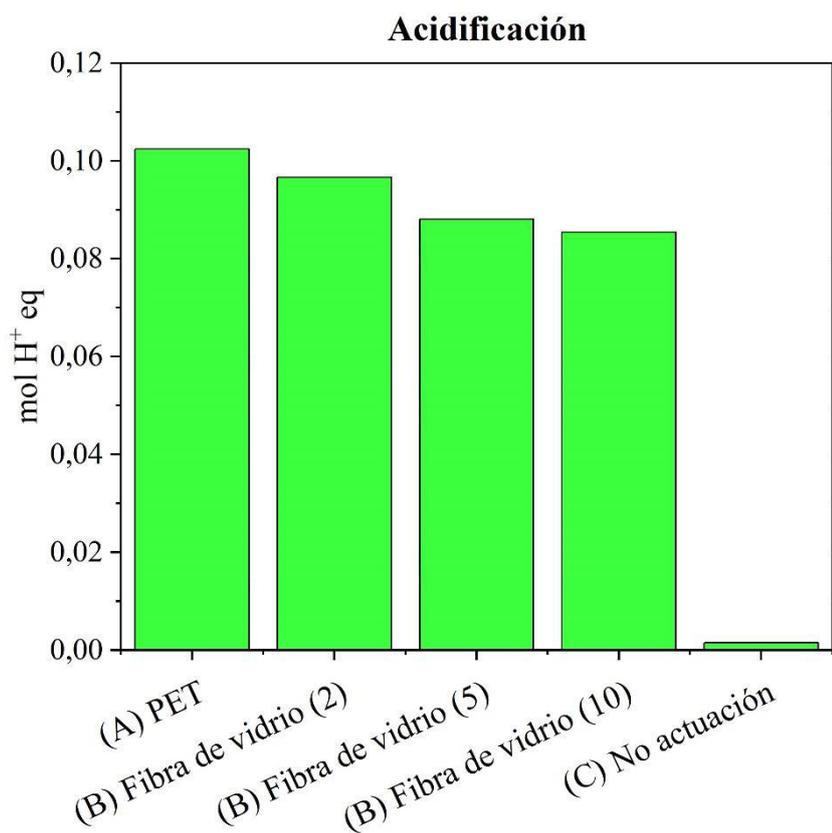


Figura FTXXVI.1 Gráfica obtenida para la categoría de impacto: acidificación

- En la Figura FTXXVI.2 se presentan los resultados obtenidos para la categoría de impacto: agotamiento de ozono para cada tipo de escenario propuesto:

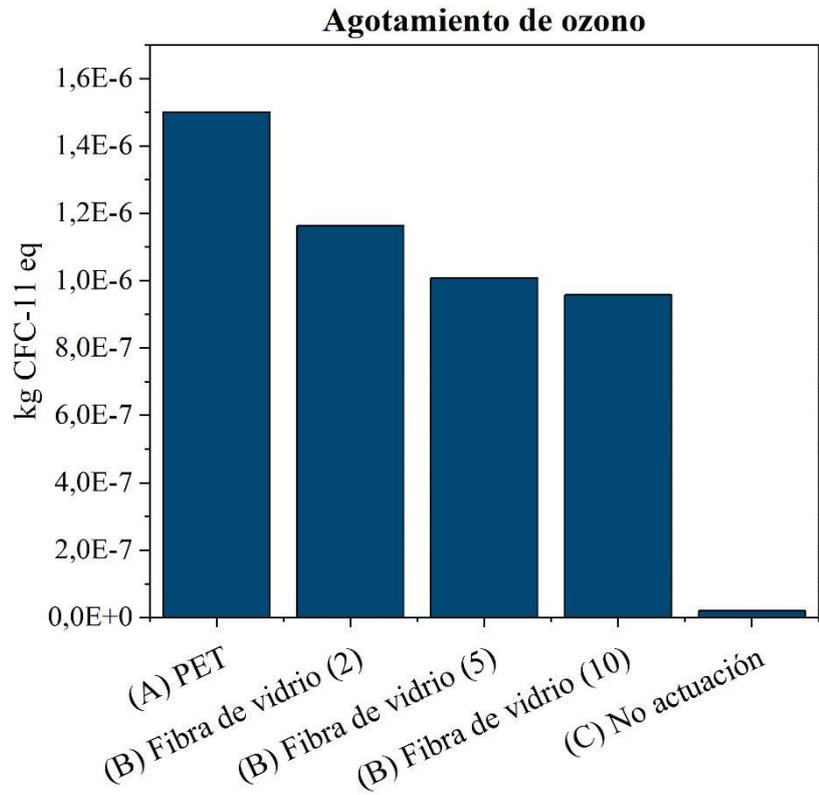


Figura FTXXVI.2 Gráfica obtenida para la categoría de impacto: agotamiento de ozono

- En la Figura FTXXVI.3 se presentan los resultados obtenidos para la categoría de impacto: agotamiento de recursos, fósiles para cada tipo de escenario propuesto:

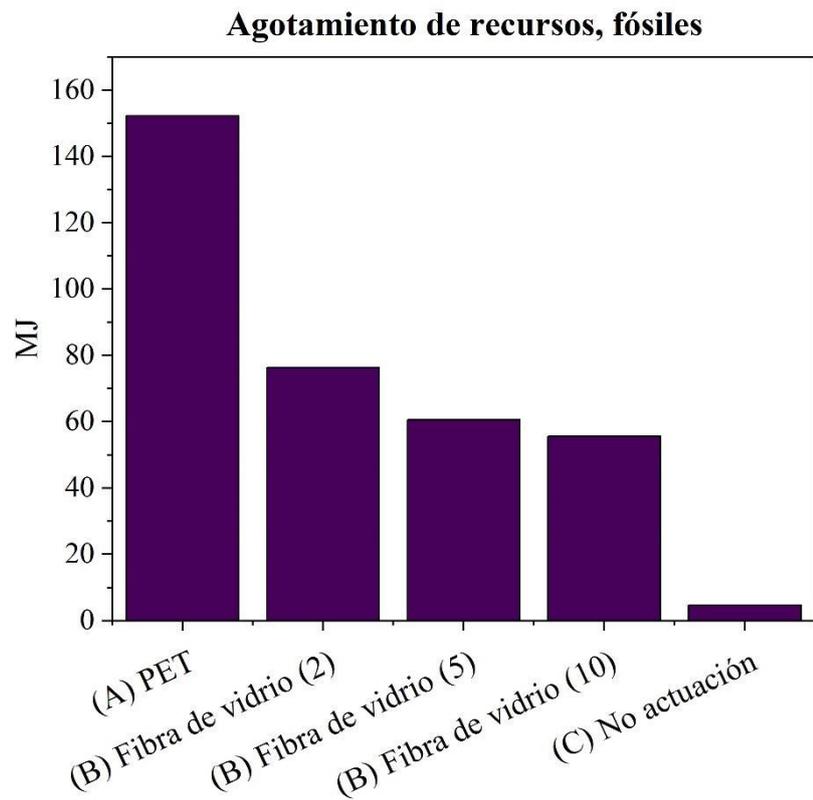


Figura FTXXVI.3 Gráfica obtenida para la categoría de impacto: agotamiento de recursos, fósiles

- En la Figura FTXXVI.4 se presentan los resultados obtenidos para la categoría de impacto: agotamiento de recursos, hídricos para cada tipo de escenario propuesto:

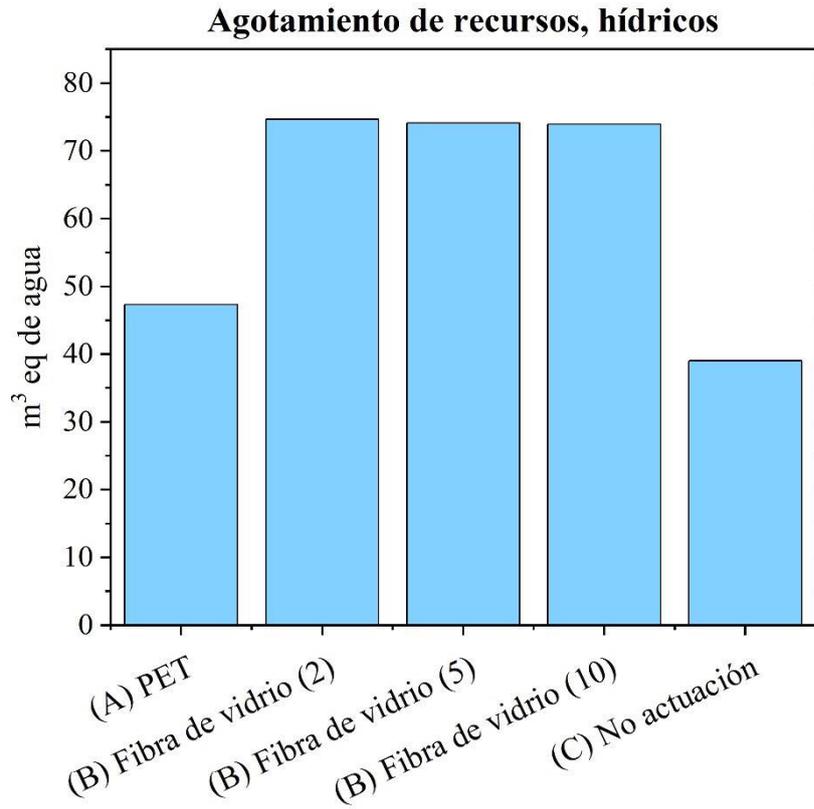


Figura FTXXVI.4 Gráfica obtenida para la categoría de impacto: agotamiento de recursos, hídricos

- En la Figura FTXXVI.5 se presentan los resultados obtenidos para la categoría de impacto: agotamiento de recursos, minerales y metales para cada tipo de escenario propuesto:

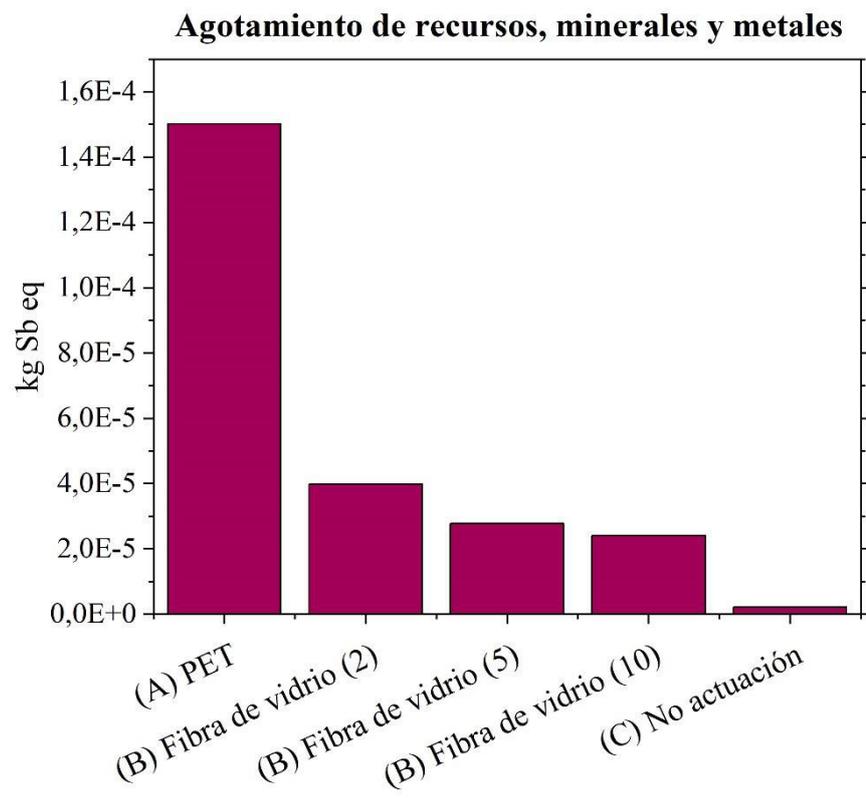


Figura FTXXVI.5 Gráfica obtenida para la categoría de impacto: agotamiento de recursos, minerales y metales

- En la Figura FTXXVI.6 se presentan los resultados obtenidos para la categoría de impacto: cambio climático para cada tipo de escenario propuesto:

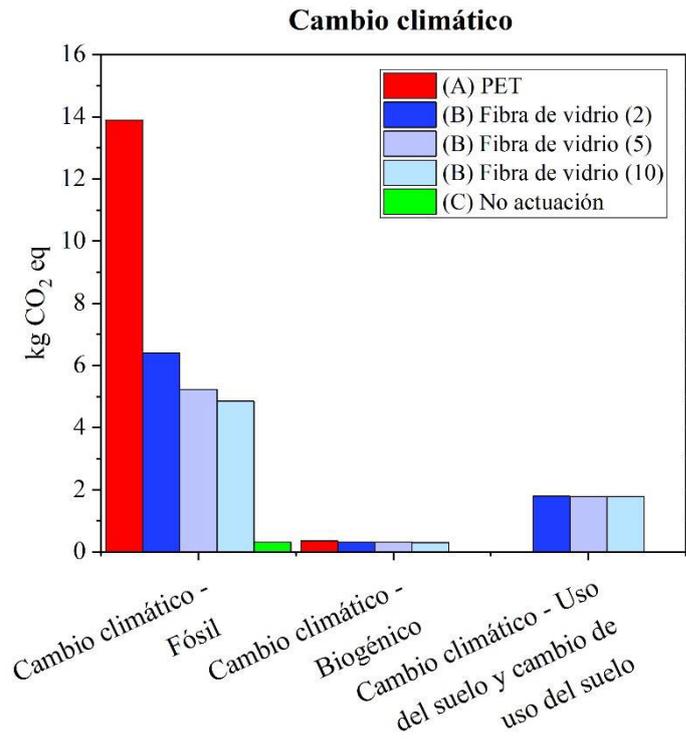


Figura FTXXVI.6 Gráfica obtenida para la categoría de impacto: cambio climático

- En las Figuras FTXXVI.7 y FTXXVI.8 se presentan los resultados obtenidos para la categoría de impacto: ecotoxicidad, de agua dulce para cada tipo de escenario propuesto:

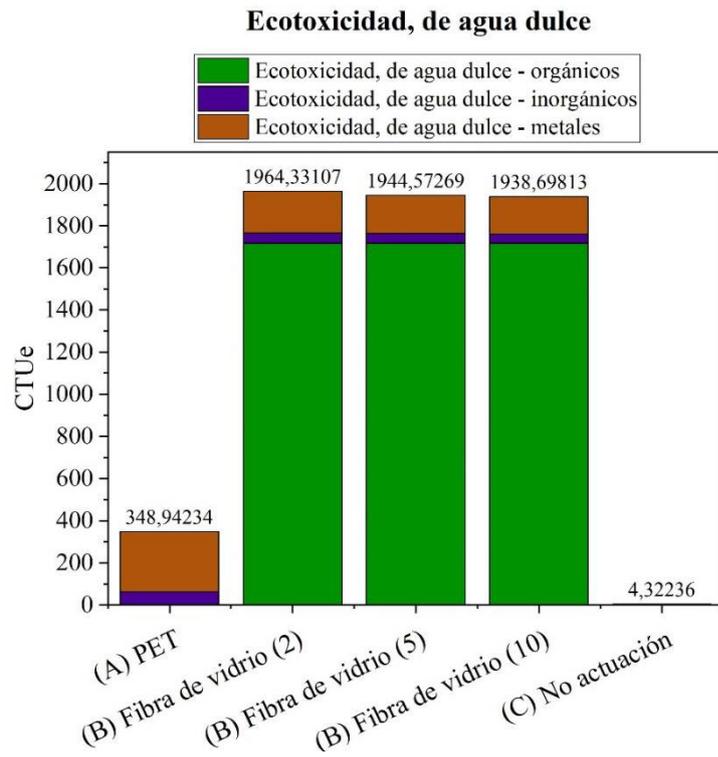


Figura FTXXVI.7 Gráfica obtenida para la categoría de impacto: ecotoxicidad, de agua dulce en función de los escenarios propuestos

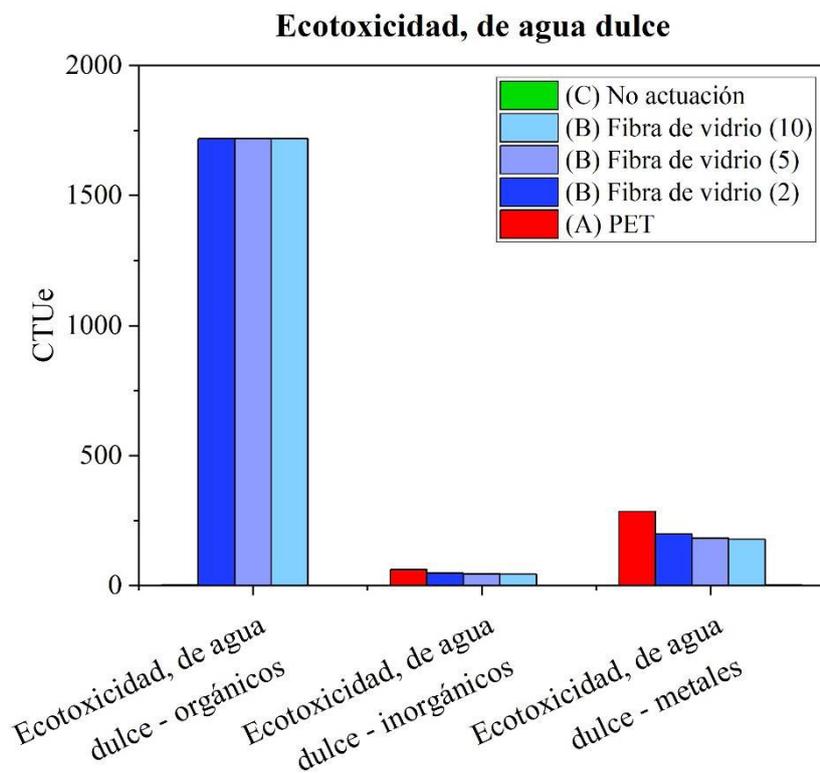


Figura FTXXVI.8 Gráfica obtenida para la categoría de impacto: ecotoxicidad, de agua dulce en función de orgánicos, inorgánicos y metales

- En la Figura FTXXVI.9 se presentan los resultados obtenidos para la categoría de impacto: eutrofización, de agua dulce para cada tipo de escenario propuesto:

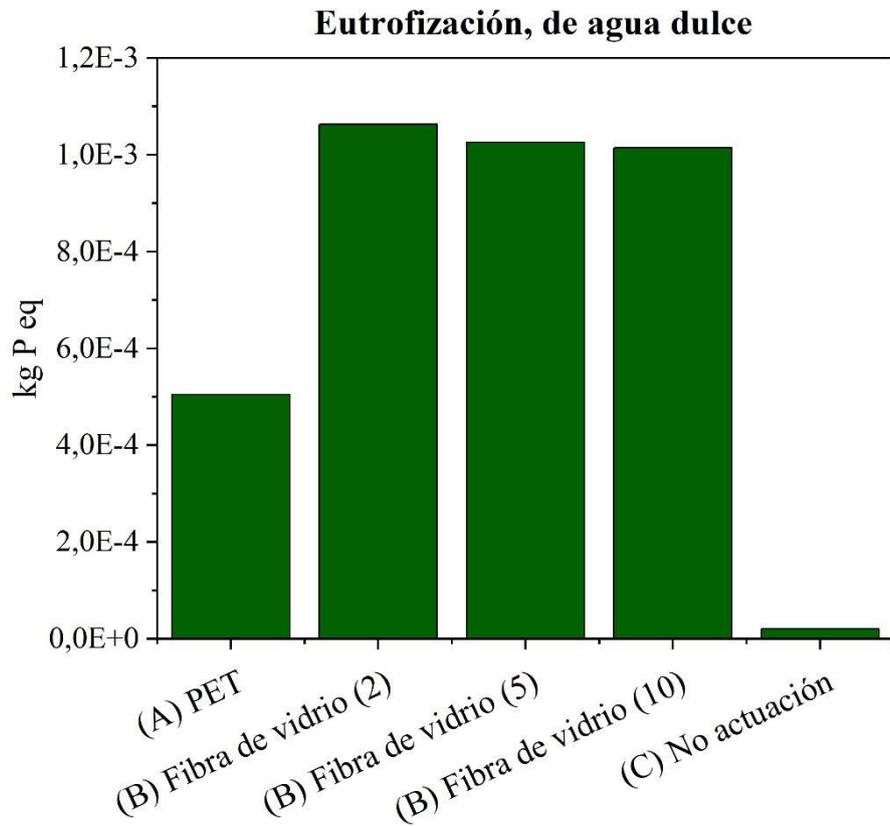


Figura FTXXVI.9 Gráfica obtenida para la categoría de impacto: eutrofización, de agua dulce

- En la Figura FTXXVI.10 se presentan los resultados obtenidos para la categoría de impacto: eutrofización, marina para cada tipo de escenario propuesto:

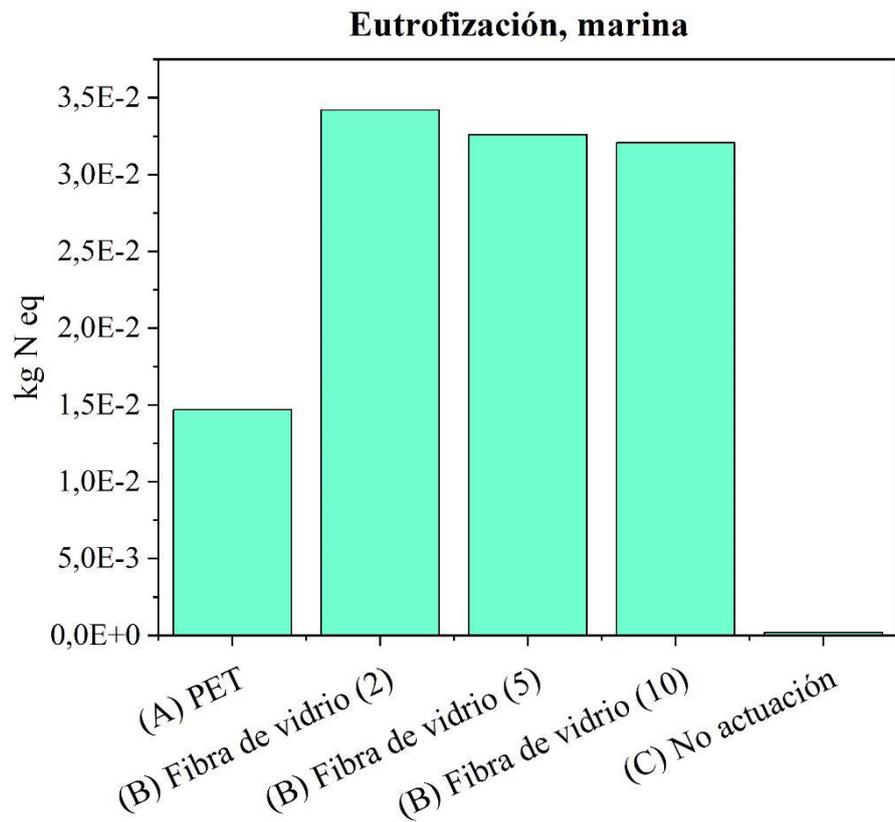


Figura FTXXVI.10 Gráfica obtenida para la categoría de impacto: eutrofización, marina

- En la Figura FTXXVI.11 se presentan los resultados obtenidos para la categoría de impacto: eutrofización, terrestre para cada tipo de escenario propuesto:

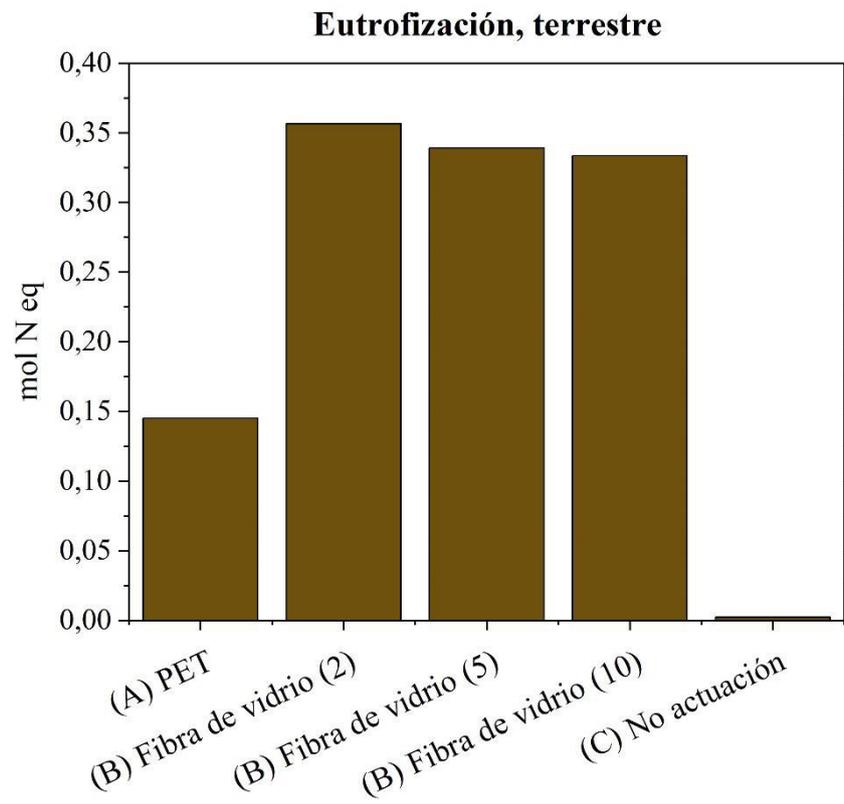


Figura FTXXVI.11 Gráfica obtenida para la categoría de impacto: eutrofización, terrestre

- En la Figura FTXXVI.12 se presentan los resultados obtenidos para la categoría de impacto: material particulado para cada tipo de escenario propuesto:

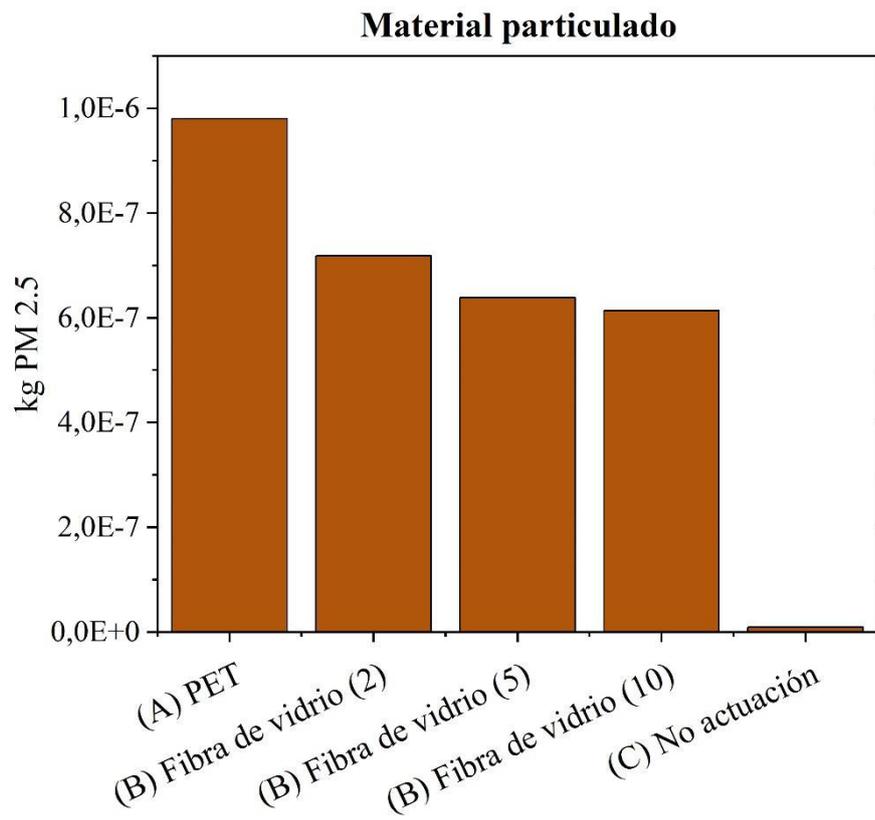


Figura FTXXVI.12 Gráfica obtenida para la categoría de impacto: material particulado

- En la Figura FTXXVI.13 se presentan los resultados obtenidos para la categoría de impacto: radiación ionizante para cada tipo de escenario propuesto:

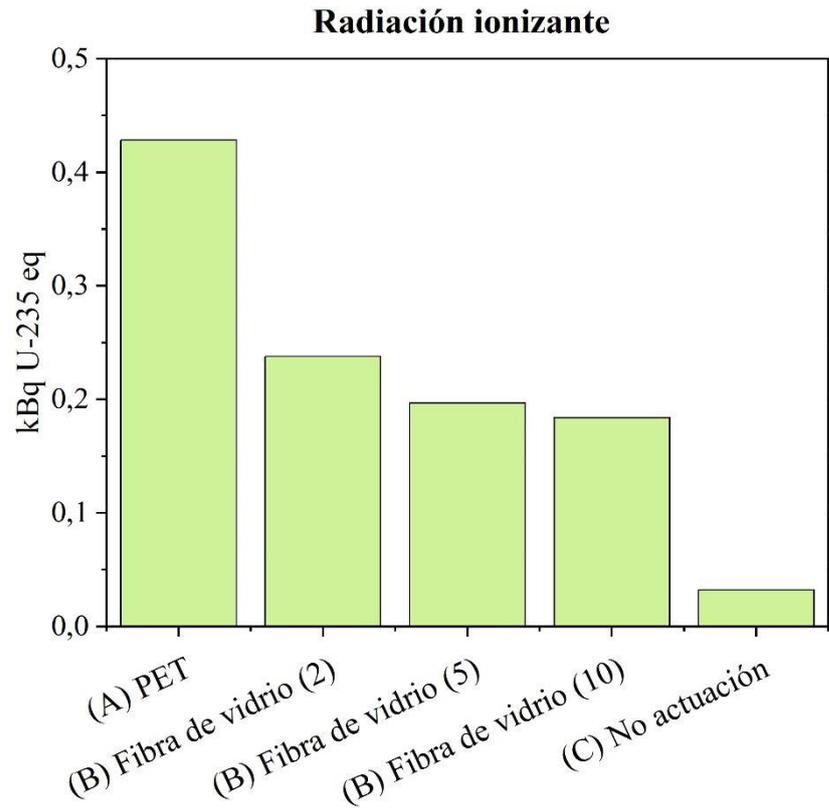


Figura FTXXVI.13 Gráfica obtenida para la categoría de impacto: radiación ionizante

- En las Figuras FTXXVI.14 y FTXXVI.15 se presentan los resultados obtenidos para la categoría de impacto: toxicidad humana, efectos cancerígenos para cada tipo de escenario propuesto:

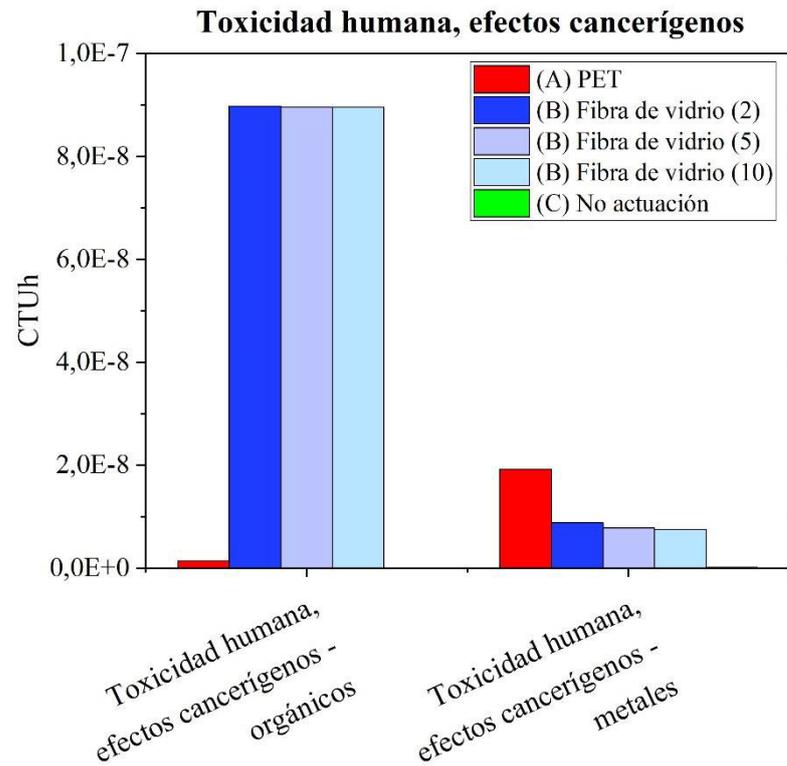


Figura FTXXVI.14 Gráfica obtenida para la categoría de impacto: toxicidad humana, efectos cancerígenos en función de orgánicos y metales

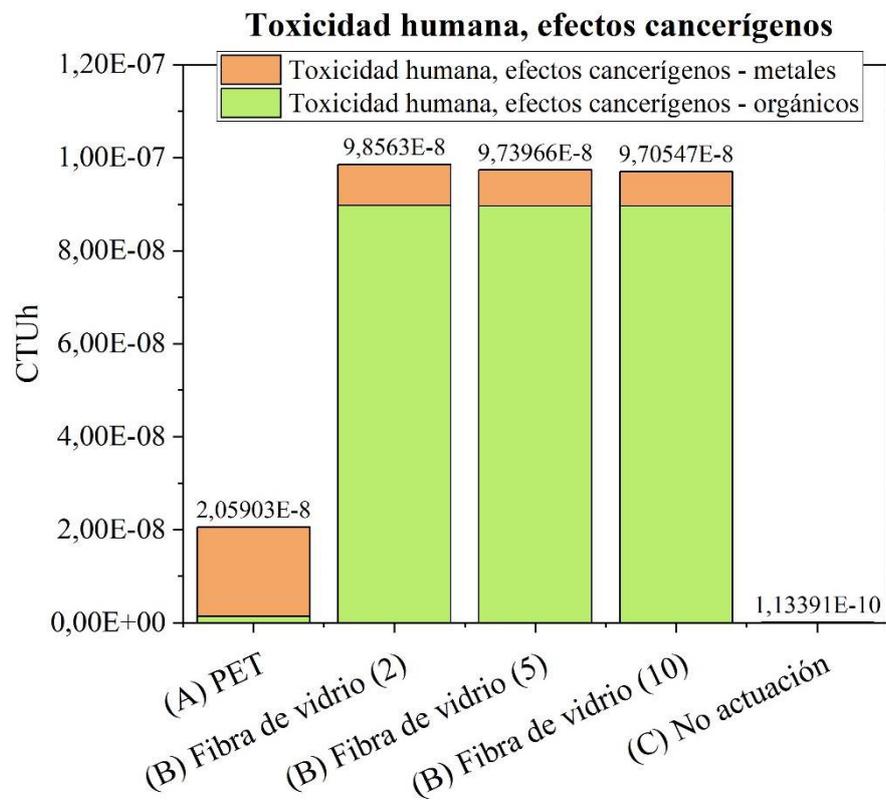


Figura FTXXVI.15 Gráfica obtenida para la categoría de impacto: toxicidad humana, efectos cancerígenos en función del tipo de escenario

- En las Figuras FTXXVI.16 y FTXXVI.17 se presentan los resultados obtenidos para la categoría de impacto: toxicidad humana, efectos no cancerígenos para cada tipo de escenario propuesto:

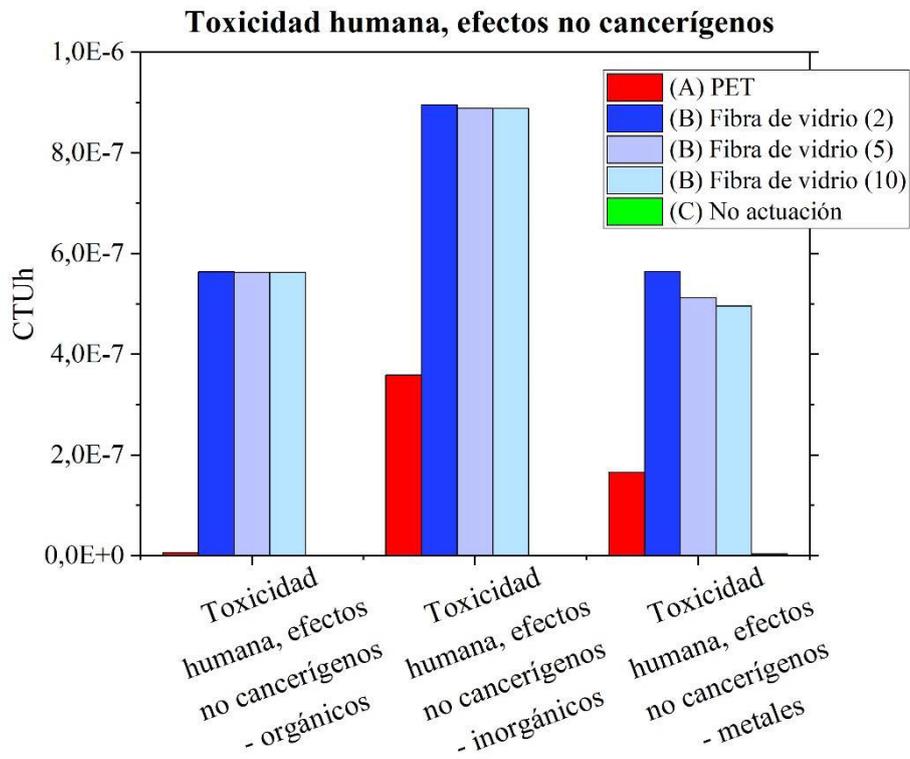


Figura FTXXVI.16 Gráfica obtenida para la categoría de impacto: toxicidad humana, efectos no cancerígenos en función de orgánicos, inorgánicos y metales

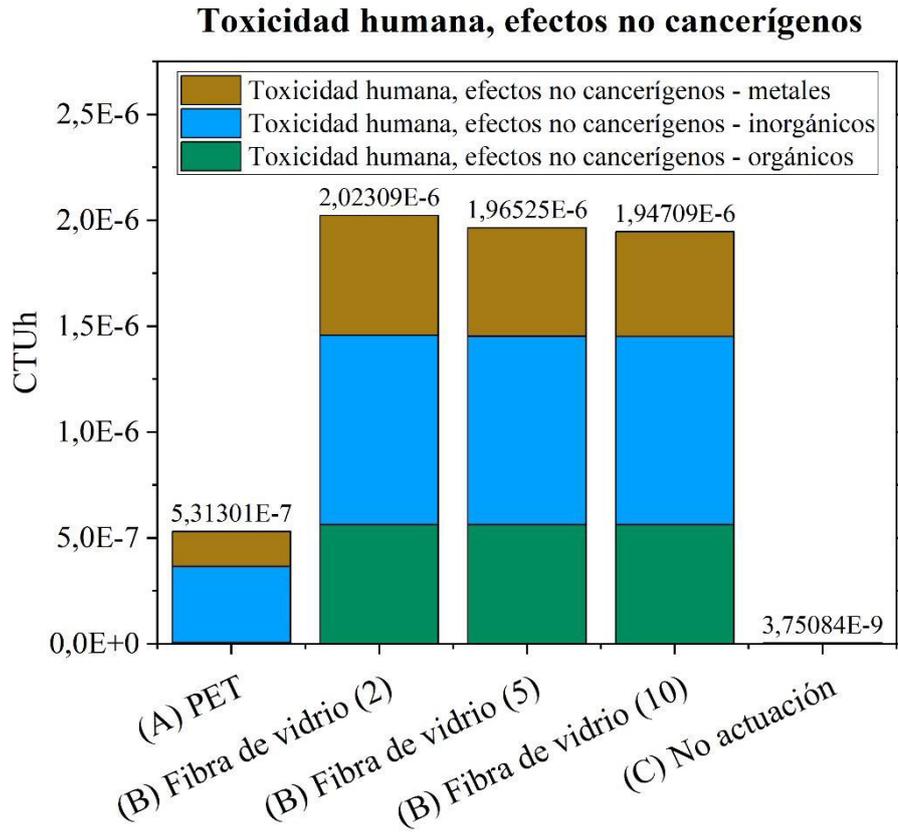


Figura FTXXVI.17 Gráfica obtenida para la categoría de impacto: toxicidad humana, efectos no cancerígenos en función del tipo de escenario

- En la Figura FTXXVI.18 se presentan los resultados obtenidos para la categoría de impacto: uso de suelo para cada tipo de escenario propuesto:

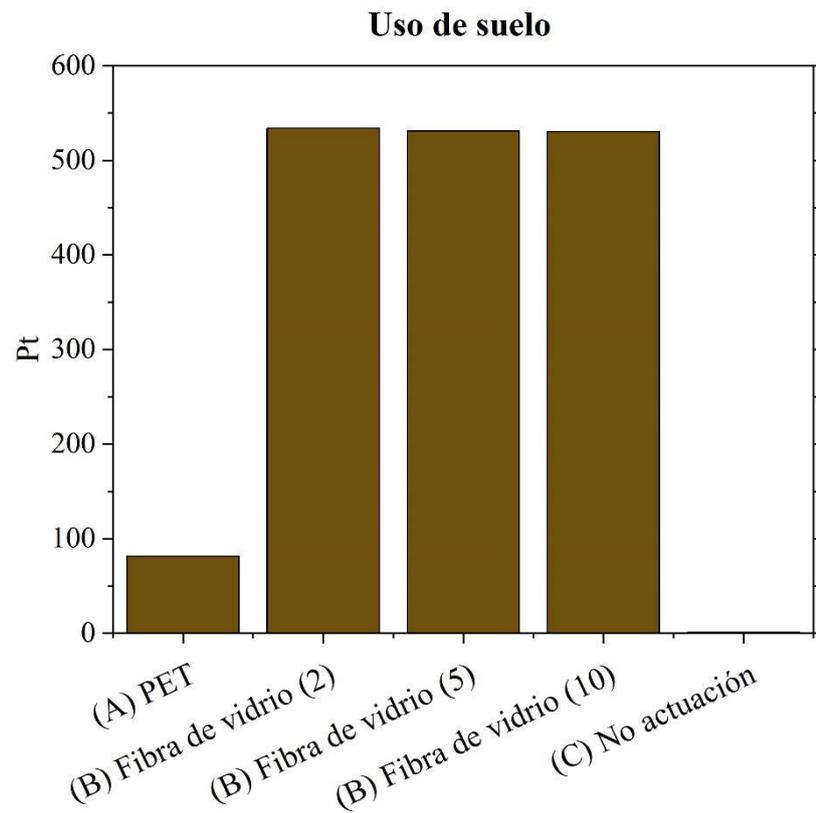


Figura FTXXVI.18 Gráfica obtenida para la categoría de impacto: uso de suelo

- En la Figura FTXXVI.19 se presentan los resultados obtenidos para las categorías de impacto ambiental evaluadas mediante el indicador caracterización:

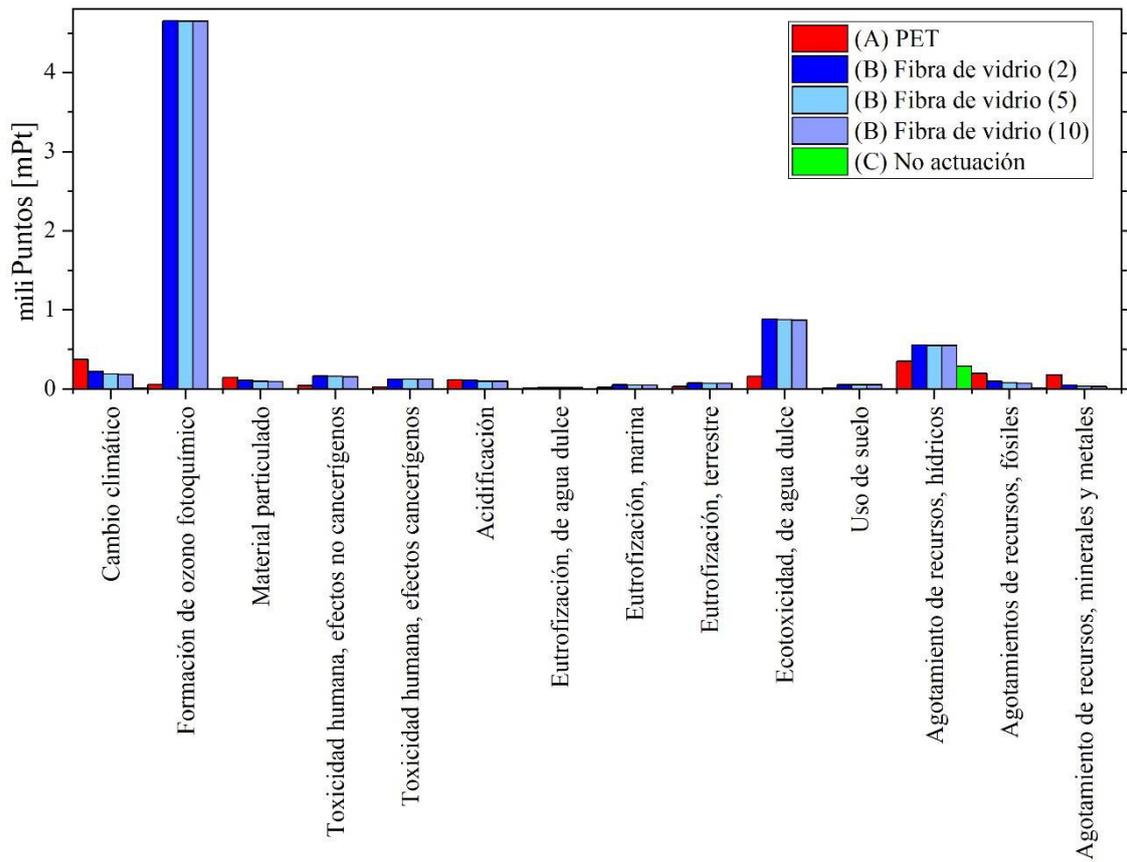


Figura FTXXVI.19 Gráfica obtenida para las categorías de impacto ambiental evaluadas.
Indicador: caracterización

FICHA TÉCNICA XXVII

RESULTADOS OBTENIDOS PARA GRUPOS DE IMPACTO

Objetivo: Exponer los resultados obtenidos para los tres grupos de impacto (disponibilidad de recursos, ecosistemas y salud humana).

Ejemplo de cálculo:

- En la Tabla FTXXVII.1 se presentan los resultados obtenidos:

Tabla FTXXVIII.1. Resultados obtenidos para los tres grupos de impacto propuestos.

Categoría de impacto	Grupo de afectación final	(A) PET	(B) Fibra de vidrio (2)	(B)Fibra de vidrio (5)	(B) Fibra de vidrio (10)	(C) No actuación
Cambio climático						
Agotamiento del ozono						
Formación de ozono fotoquímico						
Uso de suelo	Impacto a la disponibilidad de recursos	1,1620 (67,72%)	5,6297 (78,59%)	5,5540 (78,85%)	5,5303 (78,93%)	0,3070 (97,74%)
Agotamiento de recursos, hídricos						
Agotamiento de recursos, minerales, fósiles y renovables						
Toxicidad humana, efectos no cancerígenos						
Toxicidad humana, efectos cancerígenos	Impacto a la salud humana	0,2211 (12,88%)	0,3973 (5,54%)	0,3786 (5,37%)	0,3728 (5,32%)	0,0023 (0,73%)
Material particulado						

Tabla FTXXVIII.1. Resultados obtenidos para los tres grupos de impacto propuestos.
Continuación

Categoría de impacto	Grupo de afectación final	(A) PET	(B) Fibra de vidrio (2)	(B)Fibra de vidrio (5)	(B) Fibra de vidrio (10)	(C) No actuación
Radiación ionizante para la salud						
Acidificación						
Eutrofización terrestre						
Eutrofización de agua dulce	Impacto a los ecosistemas	0,3328 (19,40%)	1,1367 (15,87%)	1,1115 (15,78%)	1,1037 (15,75%)	0,0048 (1,53%)
Eutrofización marina						
Ecotoxicidad de agua dulce						

FICHA TÉCNICA XXVIII

SUPOSICIONES DEL PRESENTE ESTUDIO

Objetivo: Exponer las suposiciones realizadas en el presente estudio.

Ejemplo de cálculo:

- Escenario (A) PET:
 1. El agua sintética (colorante más agua) no tiene un comportamiento ácido-base y se comporta como agua pura con densidad $997,045 \frac{kg}{m^3}$ (25 °C).
 2. La concentración del colorante que se consideró como inicial para el tratamiento es $50 \frac{mg}{L}$. Esta concentración se utilizó en los estudios cinéticos de degradación de colorante y, se puede decir, que es mucho más grande que las concentraciones que se espera en un efluente real de una industria textil que realiza teñido de ropa. En un efluente real, además, hay otros contaminantes, por ejemplo, tensoactivos, ciertas grasas, etc., que no son considerados en este estudio.
 3. La temperatura de referencia para cualquier cálculo y propiedad es 25 °C.
 4. Se realiza un cálculo de la DQO inicial. Este valor se obtiene considerando la fórmula molecular de la molécula de colorante ($C_{34}H_{24}N_6Na_4O_{16}S_4$) y suponiendo una reacción con oxígeno (O_2) para producir CO_2 , H_2O , NO_3^- , Na^+ y SO_4^{2-} . Esto quiere decir que la molécula del colorante se transforma químicamente a las especies inorgánicas más oxidadas y se obtiene la cantidad de oxígeno (O_2) que se necesita para ello.
 5. El porcentaje de remoción de DQO es un valor que, de acuerdo a la literatura, sería 50% (valor aproximado de remoción de DQO cuando se degradan azo colorantes similares al Azul BRL mediante fotocatalisis heterogénea con TiO_2 y se llega a 99% de remoción de colorante).
 6. El agua que entra y sale del proceso se refiere a la cantidad de agua pura de la unidad funcional (1 m^3 de agua sintética).
 7. Se utiliza PET reciclado, posiblemente, de botellas usadas. Este PET es fundido para producir una lámina de espesor 0,43 mm, la cual es el soporte para el TiO_2 .

El TiO_2 se deposita sobre la superficie de la lámina de PET mediante el proceso “dip coating”. Se calcula la cantidad de energía necesaria para calentar y fundir el PET. Para las propiedades del PET a reciclar, se consideraron a la temperatura de fusión de equilibrio y el calor de fusión de equilibrio.

8. La lámina de PET se reutiliza múltiples veces. Sobre la lámina de PET se deposita el TiO_2 y este material se utiliza para el tratamiento de agua. Como consecuencia del tratamiento de agua con colorante, parte del colorante se deposita por adsorción sobre la superficie del TiO_2 , y esto resulta en una disminución considerable de la eficiencia del tratamiento fotoquímico. Es por esta razón que se remueve con la ayuda de un cepillo el TiO_2 después de haber realizado el tratamiento de 10 m^3 de agua residual y este TiO_2 se lleva al relleno sanitario. Es importante destacar que la cantidad de colorante depositado sobre el TiO_2 es pequeña comparada con la masa de TiO_2 , por tanto, se puede despreciar.
9. Se utiliza ácido clorhídrico (HCl) e hidróxido de sodio (NaOH) para modificar el pH del agua residual. Primero se baja el pH hasta 2,5 y luego se lleva a pH 7 justo antes de la descarga a un cuerpo de agua receptor. Se desprecia el consumo de iones H^+ debido al proceso fotocatalítico, por tanto, el HCl y el NaOH ingresan al agua en proporciones estequiométricas. El agua a la salida ya no tendrá HCl y NaOH, sino el cloruro de sodio (NaCl) resultante de la neutralización que se calcula por estequiometría. Como consecuencia de la neutralización también se produce H_2O misma que es descargada.
10. Para la inmovilización del TiO_2 por el proceso de “dip coating” se prepara una suspensión en agua de TiO_2 en la que se coloca la lámina de PET para la inmovilización sobre esta de TiO_2 . Cada vez que se saca la lámina con TiO_2 inmovilizado, se tiene una cantidad de agua que moja tanto la lámina como el TiO_2 y que se elimina por evaporación. Esta agua que se saca de la suspensión de TiO_2 es repuesta.
11. El baño ultrasónico que se utiliza para acondicionar la lámina de PET previo a la inmovilización del TiO_2 tiene un volumen de 97 L. Se lo llena en su totalidad con agua potable y esta agua es utilizada para 50 acondicionamientos. Se suponen ciertas pérdidas por evaporación (emisión atmosférica) y una parte del agua es descargada al alcantarillado.
12. La bomba centrífuga se utiliza para el movimiento del agua residual con fines de tratamiento.

13. El baño ultrasónico se utiliza para acondicionar la lámina de PET.
14. Las lámparas germicidas UV-C se utilizan en el tratamiento fotocatalítico.
15. La bomba centrífuga, el baño ultrasónico y las lámparas germicidas son equipos y materiales que se utilizan a la escala de planta piloto como está concebido el diseño de este proceso.

- Escenario (B) Fibra de vidrio:

1. El agua sintética (colorante más agua) no tiene un comportamiento ácido-base y se comporta como agua pura con densidad $997,045 \frac{kg}{m^3}$ (25 °C).
2. La concentración del colorante que se consideró como inicial para el tratamiento es $50 \frac{mg}{L}$. Esta concentración se utilizó en los estudios cinéticos de degradación de colorante y, se puede decir, que es mucho más grande que las concentraciones que se espera en un efluente real de una industria textil que realiza teñido de ropa. En un efluente real, además, hay otros contaminantes, por ejemplo, tensoactivos, ciertas grasas, etc., que no son considerados en este estudio.
3. La temperatura de referencia para cualquier cálculo y propiedad es 25 °C.
4. Se realiza un cálculo de la DQO inicial. Este valor se obtiene considerando la fórmula molecular de la molécula de colorante ($C_{34}H_{24}N_6Na_4O_{16}S_4$) y suponiendo una reacción con oxígeno (O_2) para producir CO_2 , H_2O , NO_3^- , Na^+ y SO_4^{2-} . Esto quiere decir que la molécula del colorante se transforma químicamente a las especies inorgánicas más oxidadas y se obtiene la cantidad de oxígeno (O_2) que se necesita para ello.
5. El porcentaje de remoción de DQO es un valor que, de acuerdo a la literatura, sería 50% (valor aproximado de remoción de DQO cuando se degradan azo colorantes similares al Azul BRL mediante fotocatalisis heterogénea con TiO_2 y se llega a 99% de remoción de colorante).
6. El agua que entra y sale del proceso se refiere a la cantidad de agua pura de la unidad funcional (1 m³ de agua sintética).
7. Para inmovilizar el TiO_2 se utiliza silicona. La silicona permite inmovilizar el TiO_2 sobre la fibra de vidrio. Para facilitar la aplicación del TiO_2 y la silicona sobre la fibra de vidrio, y garantizar una distribución uniforme sobre la superficie, se agrega etanol al 96% v/v, y este se termina evaporando (emisión atmosférica).

EL material resultante es muy resistente y se puede reutilizar múltiples veces. Una dificultad operativa es que el TiO_2 adsorbe colorante y gradualmente, conforme se reutiliza, se pierde la eficacia en el tratamiento. Por esta razón, se usa el material para el tratamiento de 4 lotes de agua residual (74,31 L de agua residual para cada lote). Después, de los 4 lotes tratados, el TiO_2 soportado sobre la fibra de vidrio es regenerado por exposición por algunas horas a la luz del sol. El TiO_2 soportado sobre fibra de vidrio es reutilizado para el tratamiento. Para este caso, se consideraron 3 escenarios posibles: (2) se puede aplicar para 20 m^3 de agua residual y al final se elimina el material en el relleno sanitario. (5) se puede aplicar para 50 m^3 de agua residual y al final se elimina el material en el relleno sanitario. (10) se puede aplicar para 100 m^3 de agua residual y al final se elimina el material en el relleno sanitario. La cantidad de fibra de vidrio, TiO_2 , silicona y etanol eliminados tanto al relleno sanitario como emisión a la atmósfera son proporcionales a la unidad funcional (1 m^3).

8. Se utiliza ácido clorhídrico (HCl) e hidróxido de sodio (NaOH) para modificar el pH del agua residual. Primero se baja el pH hasta 2,5 y luego se lleva a pH 7 justo antes de la descarga a un cuerpo de agua receptor. Se desprecia el consumo de iones H^+ debido al proceso fotocatalítico, por tanto, el HCl y el NaOH ingresan al agua en proporciones estequiométricas. El agua a la salida ya no tendrá HCl y NaOH, sino el cloruro de sodio (NaCl) resultante de la neutralización que se calcula por estequiometría. Como consecuencia de la neutralización también se produce H_2O misma que es descargada.
9. El baño ultrasónico que se utiliza para acondicionar la fibra de vidrio previo a la inmovilización del TiO_2 tiene un volumen de 97 L. Se lo llena en su totalidad con agua potable y etanol y esta agua y etanol es utilizada para 50 acondicionamientos. Se suponen ciertas pérdidas por evaporación (emisión atmosférica) y una parte del agua y etanol es descargada al alcantarillado.
10. La bomba centrífuga se utiliza para el movimiento del agua residual con fines de tratamiento.
11. El baño ultrasónico se utiliza para acondicionar la fibra de vidrio.
12. Las lámparas germicidas UV-C se utilizan en el tratamiento fotocatalítico.
13. La bomba centrífuga, el baño ultrasónico y las lámparas germicidas son equipos y materiales que se utilizan a la escala de planta piloto como está concebido el diseño de este proceso.

- Escenario (C) No actuación:
 1. El agua sintética (colorante más agua) no tiene un comportamiento ácido-base y se comporta como agua pura con densidad $997,045 \frac{kg}{m^3}$ (25 °C).
 2. La concentración del colorante que se consideró como inicial para el tratamiento es $50 \frac{mg}{L}$. Esta concentración se utilizó en los estudios cinéticos de degradación de colorante y, se puede decir, que es mucho más grande que las concentraciones que se espera en un efluente real de una industria textil que realiza teñido de ropa. En un efluente real, además, hay otros contaminantes, por ejemplo, tensoactivos, ciertas grasas, etc., que no son considerados en este estudio.
 3. La temperatura de referencia para cualquier cálculo y propiedad es 25 °C.
 4. Se realiza un cálculo de la DQO inicial. Este valor se obtiene considerando la fórmula molecular de la molécula de colorante ($C_{34}H_{24}N_6Na_4O_{16}S_4$) y suponiendo una reacción con oxígeno (O_2) para producir CO_2 , H_2O , NO_3^- , Na^+ y SO_4^{2-} . Esto quiere decir que la molécula del colorante se transforma químicamente a las especies inorgánicas más oxidadas y se obtiene la cantidad de oxígeno (O_2) que se necesita para ello.
 5. El agua que entra y sale del proceso se refiere a la cantidad de agua pura de la unidad funcional ($1 m^3$ de agua sintética).

FICHA TÉCNICA XXIX

REACTOR FOTOCATALÍTICO PROPUESTO

Objetivo: Exponer diferentes ángulos del reactor fotocatalítico propuesto en el presente estudio.

Ejemplo de cálculo:

- En la Figura FTXXIX.1 se presenta el reactor fotocatalítico propuesto:

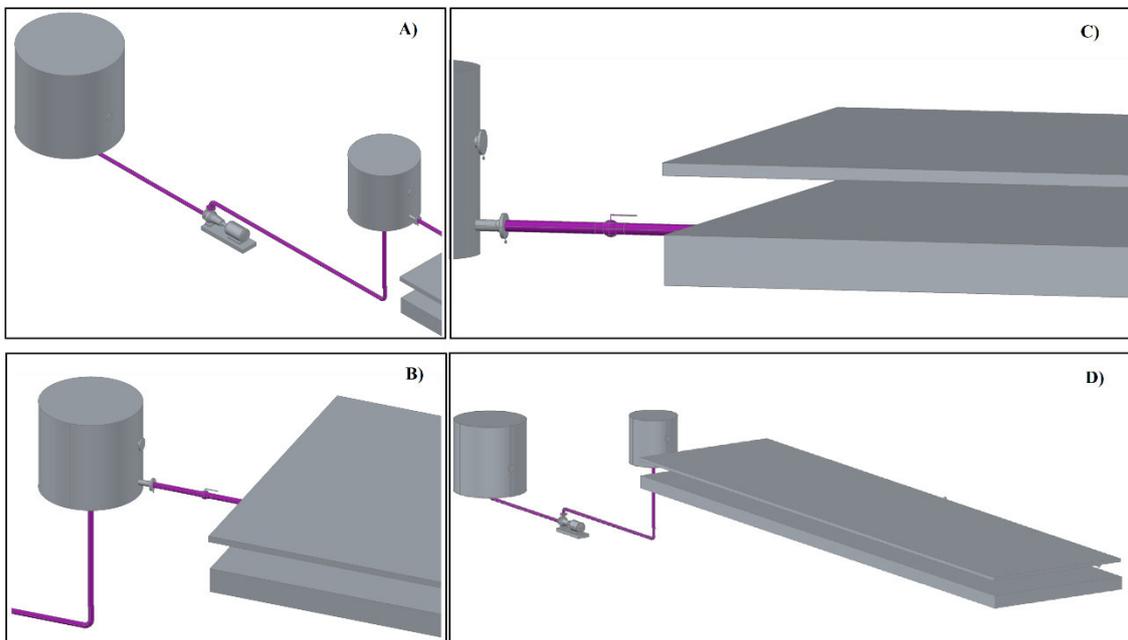


Figura FTXXIX.1 Gráfica obtenida del reactor fotocatalítico. A) corresponde al tanque A, posteriormente la bomba centrífuga y el tanque B; B) corresponde al tanque B y después se observa la válvula de bola; C) se visualiza la válvula de bola, el reactor y el sistema de lámparas UV encima del mismo; D) un esquema completo del sistema

FICHA TÉCNICA XXX

NOMENCLATURA

Objetivo: Presentar la nomenclatura ocupada en las fichas técnicas.

Nomenclatura:

$A_{reactor}$:	área del reactor semi industrial
e_p :	espesor de película
V_{CP} :	volumen de la caja Petri
A_{CP} :	área de la caja Petri
h_A :	altura del tanque de almacenamiento A
D_A :	diámetro del tanque de almacenamiento A
V_{TTA} :	volumen total del tanque de almacenamiento A
A_{TA} :	área del tanque de almacenamiento A
V_{AR} :	volumen de agua en el reactor
L_R :	largo del reactor
An_R :	ancho del reactor
e_R :	espesor del reactor
h_B :	altura del tanque de almacenamiento B
D_B :	diámetro del tanque de almacenamiento B
V_{TTB} :	volumen total del tanque de almacenamiento B
A_{TB} :	área del tanque de almacenamiento B
t :	tiempo de descarga

h :	altura final del agua sintética en el tanque B
h_0 :	altura inicial del agua sintética en el tanque B
g :	gravedad
\emptyset :	diámetro del tanque B
\emptyset_0 :	diámetro del orificio
V_{TB} :	volumen total de agua en el tanque B
V_{UB} :	volumen de agua en el tanque B al cabo de 1 tratamiento
t_{pd} :	tiempo promedio de descarga
t_1 :	tiempo con el nivel del líquido en el tanque B para 4 tratamientos
t_2 :	tiempo con el nivel del líquido en el tanque B para 3 tratamientos
t_3 :	tiempo con el nivel del líquido en el tanque B para 2 tratamientos
t_4 :	tiempo con el nivel del líquido en el tanque B para 1 tratamientos
t_{UB} :	tiempo de uso de la bomba
Q_{max} :	flujo máximo de la bomba
E_B :	consumo energético de la bomba
P :	potencia de la bomba
E_{US} :	consumo energético del baño de ultrasonido para escenario del PET
P_U :	potencia del baño de ultrasonido
t_{UU_S} :	tiempo de uso del baño de ultrasonido para el estudio de Sandoval et al.
m_{AU} :	masa del agua necesaria en el ultrasonido
C_U :	capacidad física del ultrasonido
ρ_A :	densidad del agua
m_{EU} :	masa de etanol necesaria en el ultrasonido
$m_{pérdidasU}$:	masa de agua evaporada en para reponer al baño de ultrasonido

e_{peva} :	espesor de película evaporada
ρ_E :	densidad de etanol
$m_{pérdidas_{U_{ETOH}}}$:	masa de etanol evaporado en para reponer al baño de ultrasonido
$m_{pérdidas_{DC}}$:	masa de agua evaporada en para reponer pérdidas por “dip coating”
$n_{v\ inmo}$:	número de veces teóricas que se debe realizar la inmovilización
$DQO\ final$:	demanda química de oxígeno final
$QO\ inicial$:	demanda química de oxígeno inicial
$\% \text{ Remoción } DQO$:	porcentaje de remoción de DQO
Q_{PET} :	calor requerido para fundir el PET
$Q_{sensible_{PET}}$:	calor sensible del PET
$Q_{latente_{PET}}$:	calor latente PET
m_{PET} :	masa del PET
$C_{p_{PET}}$:	capacidad calorífica del PET
ΔT_{PET} :	delta de temperatura (temperatura de fusión del PET y temperatura ambiente)
$L_{p_{PET}}$:	calor latente del PET
e_l :	espesor de 1 lámina
e_m :	espesor de las láminas medido
n_T :	número de láminas totales
V_l :	volumen de las láminas
A_l :	área de las láminas
ρ_{PET} :	densidad del PET
V_{PET} :	volumen del PET
$A_{T_{PET}}$:	área total del PET
R :	radio exterior del PET

r :	radio interior del PET
$V_{T_{PET}}$:	volumen total del PET
$m_{TiO_2Sandoval}$:	masa de TiO_2 para 1 tratamiento para el escenario del PET
$m_{TiO_2Sandoval\ total}$:	masa de TiO_2 total con base al escenario del PET
m_{TiO_2Mena} :	masa de TiO_2 con base al escenario de la fibra de vidrio
$m_{silicona}$:	masa de silicona
m_{fv} :	masa de la fibra de vidrio
A_{TFV} :	área total de la fibra de vidrio
R_1 :	radio exterior de la fibra de vidrio
r_1 :	radio interior de la fibra de vidrio
n_s :	moles de soluto
V :	volumen de la solución
n_{ST} :	moles de soluto totales
V_{total} :	volumen total de la solución
V_{HCl} :	volumen de ácido clorhídrico
m_{HCl} :	masa de ácido clorhídrico
m_{NaOH} :	masa de hidróxido de sodio
m_{es} :	masa de etanol requerida para diluir con silicona
$C_{A,0}$:	concentración inicial del colorante
C_A :	concentración final del colorante
k :	constante cinética
t_r :	tiempo de reacción
D_r :	dosis requerida
d :	dosis expuesta

D_p :	dosis proporcionada
P_{lam} :	potencia de salida UV-C de la lámpara
n_{lam} :	número de lámparas
t_{OLPET} :	tiempo de operación de las lámparas para el PET
t_{OLFV} :	tiempo de operación de las lámparas para la fibra de vidrio
E_{lam} :	consumo energético de las lámparas
m_{AI} :	masa de agua requerida para la inmovilización
f_{conv} :	factor de conversión