

<https://doi.org/10.69639/arandu.v13i1.2113>

Evaluación de materiales de soporte para la inmovilización de TiO₂ en el proceso fotocatalítico de degradación del Dodecilbenceno Sulfonato Sódico

Evaluation of support materials for the immobilization of TiO₂ in the photocatalytic degradation process of Sodium Dodecylbenzene Sulfonate

Gilda Esther Rodríguez Espinoza

gildaroes1@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8915-3377>

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Lima – Perú

Víctor Pascual Sarmiento Maza

<https://orcid.org/0000-0001-8915-3377>

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Lima - Perú

Adriana María Castillo Corzo

acastillo@unjfsc.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0002-7415-1501>

Universidad Nacional José Faustino Sanchez Carrión
Huacho – Perú

Miguel Angel Castillo Corzo

mcastilloc@unmsm.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0002-2652-799X>

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Lima - Perú

*Artículo recibido: 18 febrero 2026-Aceptado para publicación: 20 marzo 2026
Conflictos de intereses: Ninguno que declarar.*

RESUMEN

El Dodecilbenceno Sulfonato Sódico (DBSNa) es un surfactante aniónico de uso generalizado, cuya presencia en aguas residuales, representa un desafío por su toxicidad y persistencia en el medio acuático, pese a tratamientos convencionales realizados. Una alternativa viable para esta situación, sería aplicar Procesos de Oxidación Avanzada (POA) como es la fotocatalisis heterogénea con dióxido de titanio (TiO₂), semiconductor eficaz en la mineralización de una amplia gama de compuestos. Por lo general los efluentes industriales y/o domésticos contienen ciertas cantidades de DBSNa, el cual es considerado contaminante ambiental significativo. Estudios evidencian que su presencia sobre los límites permisibles, representa un riesgo potencial debido a los efectos tóxicos sobre diversos organismos acuáticos y terrestres. En la parte experimental se llevará a cabo el proceso fotocatalítico de degradación del DBSNa a nivel laboratorio, por lo que se realizó pruebas en soluciones de 30 ppm de DBSNa, empleando nanopartículas de TiO₂ Degussa P25 (NPs-P25) en un sistema de reacción batch y una fuente de


luz artificial UV. Al realizar pruebas con el fotocatalizador en suspensión, con una concentración de 0.4 g/L de TiO₂ el proceso es más eficiente debido a una mayor superficie efectiva de las nanopartículas expuestas a la fuente de luz UV. Finalmente se inmovilizó las NPs-P25, mediante soportes de vidrio y polipropileno, con diferentes características superficiales. La evolución del proceso fotocatalítico en todas las pruebas, se evaluó por espectrofotometría UV-visible y se demostró la viabilidad del soporte de vidrio con superficie rugosa. Los porcentajes de degradación del DBSNa con las NPs- P25 en suspensión y de manera soportada en el vidrio rugoso, alcanzaron valores de 99.60% y 52.70% respectivamente.

Palabras clave: Fotocatálisis heterogénea, nanopartículas de TiO₂, Dodecibenceno Sulfonato Sódico, soporte de vidrio

ABSTRACT

Sodium dodecylbenzene sulfonate (DBSNa) is a widely used anionic surfactant whose presence in wastewater poses a challenge due to its toxicity and persistence in aquatic environments, despite conventional treatments. A viable alternative to this situation would be to apply Advanced Oxidation Processes (AOPs) such as heterogeneous photocatalysis with titanium dioxide (TiO₂), an effective semiconductor in the mineralization of a wide range of compounds. Industrial and/or domestic effluents generally contain certain amounts of DBSNa, which is considered a significant environmental pollutant. Studies show that its presence above permissible limits represents a potential risk due to its toxic effects on various aquatic and terrestrial organisms. In the experimental phase, the photocatalytic degradation process of DBSNa was carried out at the laboratory level. Tests were performed in 30 ppm DBSNa solutions using Degussa P25 TiO₂ nanoparticles (P25-NPs) in a batch reaction system with an artificial UV light source. When testing with the photocatalyst in suspension, at a concentration of 0.4 g/L TiO₂, the process was more efficient due to the larger effective surface area of the nanoparticles exposed to the UV light source. Finally, the P25-NPs were immobilized using glass and polypropylene supports with different surface characteristics. The evolution of the photocatalytic process in all tests was evaluated by UV-visible spectrophotometry, demonstrating the viability of the rough-surfaced glass support. The degradation percentages of DBSNa with P25 nanoparticles in suspension and supported on rough glass reached values of 99.60% and 52.70%, respectively.

Keywords: Heterogeneous photocatalysis, TiO₂ nanoparticles, sodium dodecylbenzene sulfonate, glass support

Todo el contenido de la Revista Científica Internacional Arandu UTIC publicado en este sitio está disponible bajo licencia Creative Commons Attribution 4.0 International. 

INTRODUCCIÓN

La aplicación de procesos de Oxidación Avanzada (POA), como es el proceso de degradación por fotocatalisis, contribuye a la solución de problemas de contaminación ambiental debido a su viabilidad desde el punto de vista tecnológico y ambiental. De acuerdo a Aguirre (2019) estos procesos basados en principios fisicoquímicos, pueden cambiar la estructura de los contaminantes, involucrando la generación y el uso de especies transitorias con elevado poder oxidante, como es el radical hidroxilo OH° , con gran efectividad para la oxidación de materia orgánica recalcitrante.

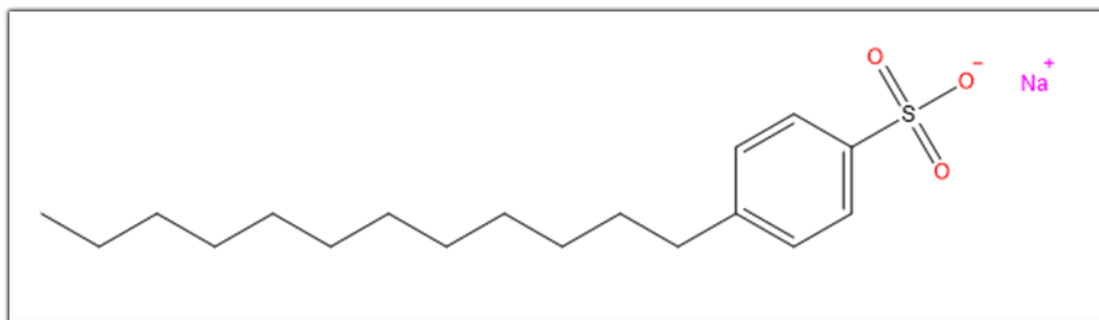
El Dodecilbenceno Sulfonato Sódico (DBSNa) es un surfactante aniónico de naturaleza anfipática, el cual pertenece a la familia de los alquilbenceno sulfonatos lineales (LAS), con una cadena alquílica de doce átomos de carbono (Showell, 2006). De acuerdo a Li et al., (2023) el DBSNa se utiliza en una diversidad de sectores industriales, que abarcan desde la formulación de detergentes y productos de limpieza hasta aplicaciones en pesticidas y productos farmacéuticos, por lo que el contacto humano es permanente. La magnitud de su empleo se refleja en un consumo global anual estimado en 4×10^6 toneladas, y su descarga representaría un riesgo de contaminación potencial para los ecosistemas acuáticos (Zhang et al., 2015).

El DBSNa es una mezcla compleja de isómeros, su fórmula semidesarrollada general se describe como $\text{Na}^+ -\text{O}_3\text{S}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CHR}_1\text{R}_2$, donde R_1 y R_2 representan cadenas alquílicas lineales, que poseen un rango de cadena C10 a C15, es decir entre 10 y 15 átomos de carbono (Salager & Fernández, 2004). La molécula se caracteriza por presentar un anillo bencénico central disustituido en posición *para* (carbonos 1 y 4), el cual es bioresistente a la degradación bajo tratamientos convencionales. A la vez presenta un grupo Sulfónico ionizado (SO_3^-) que sería la cabeza polar y una cadena alquílica lineal con característica apolar o hidrófoba. (Jariyanosade & Junyapoon, 2018).

La dualidad estructural del DBSNa presente en los detergentes, le brinda la capacidad de reducir la tensión superficial del líquido en el cual se encuentra disuelto y formar micelas, las cuales encapsularan grasas y otras moléculas insolubles en agua, por lo que disminuyen las fuerzas de adhesión de las partículas de suciedad a una superficie. (Silva & Nieto, 2023). En la figura 1 se esquematiza la estructura molecular del DBSNa.

Figura 1

Estructura molecular del Dodecibenceno Sulfonato Sódico (DBSNa)



Fuente: Elaboración propia

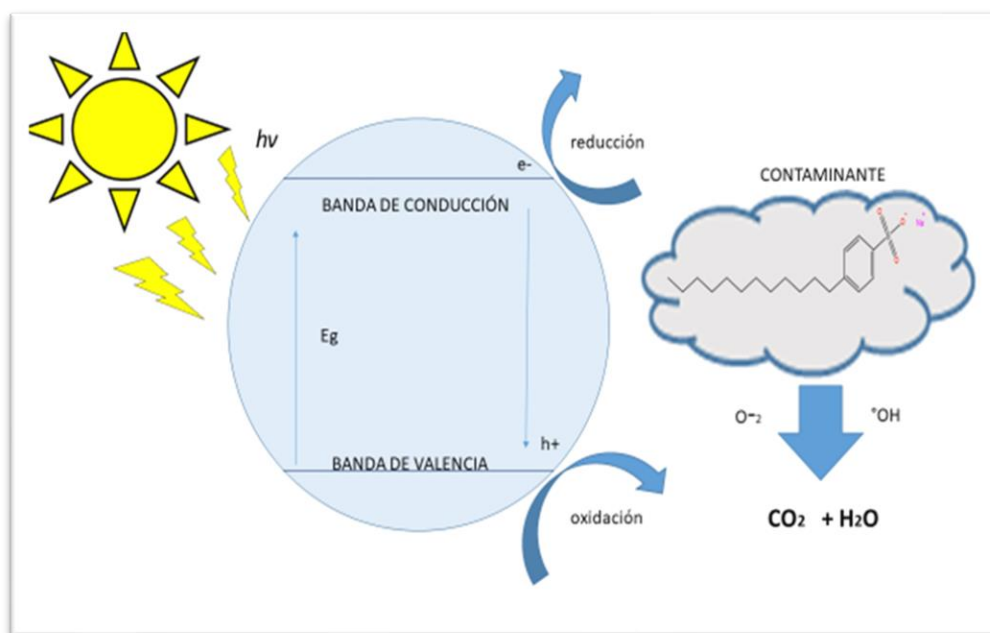
El DBSNa se presenta como un sólido de color blanco a amarillo pálido, el cual se encuentra incluido en la lista de sustancias peligrosas (Hazardous Substance List), por parte de agencias reguladoras como el Departamento de Transporte (DOT) y la Agencia de Protección Ambiental (EPA) en Estados Unidos. La exposición prolongada al DBSNa puede acarrear diversos efectos adversos; su inhalación puede provocar irritación de nariz, garganta y pulmones, lo que ha sido asociada con la inducción de bronquitis. El contacto directo con la piel y los ojos puede causar irritación y posible de daño ocular (TCI América, 2018)

En 1967 los investigadores A. Fujishima y K. Honda descubrieron la reacción de fotocatalisis, al exponer el TiO_2 bajo una luz visible, se produce la disociación fotocatalítica del agua, surgiendo la producción de Hidrógeno y Oxígeno molecular. Los electrones y huecos (e^- y h^+) fotogenerados en la superficie del catalizador TiO_2 tienen un fuerte poder de reducción y oxidación respectivamente, lo cual impulsa una variedad de reacciones, como la generación de radicales con elevada capacidad oxidante hidróxilo ($\cdot\text{OH}$) y superóxido (O_2^-), aprovechable en la degradación y mineralización de contaminantes orgánicos e inorgánicos, y posterior transformación en productos inocuos como H_2O y CO_2 (Tomodachi, 2020).

La fotocatalisis heterogénea con TiO_2 es un proceso químico inducido por la absorción de luz por parte del material semiconductor, denominado fotocatalizador, el cual inicia cuando un fotón con una energía igual o superior a la banda prohibida (E_g) del TiO_2 incide sobre su superficie. La absorción del fotón promueve un electrón (e^-) de la banda de valencia a la banda de conducción, generando simultáneamente un hueco positivo (h^+) en la banda de valencia (Redalyc, 2025). En la figura 2 se observa el efecto fotocatalítico con TiO_2 durante el proceso de degradación de contaminantes orgánicos.

Figura 2

Proceso de fotocatalisis Heterogénea con TiO₂



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a lo reportado por PEY (2008) la aplicación de la fotocatalisis resulta de utilidad cuando la concentración del contaminante es por lo general valores menores a 0,5 g/L, en caso que los tratamientos biológicos no sean efectivos, para el tratamiento de contaminantes bajo la forma de mezcla compleja y situaciones en que los procesos convencionales resulten complicados y costosos.

Las nanopartículas de TiO₂ (NPs-P25) presentan carácter semiconductor, siendo capaces de provocar reacciones de reducción y oxidación en los procesos de fotocatalisis heterogénea, que permitirán la degradación y mineralización de sustancias contaminantes. En la naturaleza se encuentra en sus tres formas cristalinas: brookita (estructura ortorrómbica), anatasa (estructura octaédrica) y rutilo (estructura tetragonal), de las cuales el rutilo muestra cierta estabilidad, mientras que las fases anatasa y brookita presentan energías superficiales menores que el rutilo. (Rzaij, J. & Abass, A., 2020).

Las características principales del TiO₂ son: sensibilidad a la luz (capacidad de absorber radiación electromagnética en la región del UV), nula toxicidad y resistencia a fotocorrosión. En cuanto a las propiedades estructurales, se considera que la anatasa y el rutilo presentan alta fotoactividad, y la combinación sinérgica de ambas mejoraría la efectividad del fotocatalizador. (Rodríguez et al., 2024). De acuerdo a Khedr et al. (2021), una transferencia de electrones desde la fase anatasa a la fase rutilo, inhibe la recombinación de estos con los huecos h⁺ generados, permaneciendo en la anatasa y permitiendo que ambas fases tengan actividad en el proceso de fotocatalisis. La ampliación del espectro de absorción de luz se extiende hasta la zona visible, siendo la fase rutilo la que proporciona la estabilidad al fotocatalizador.

El surfactante aniónico DBSNa es considerado un contaminante potencial en el ecosistema acuático, por lo que es necesario continuar investigando técnicas avanzadas para su tratamiento en aguas residuales, como los procesos de oxidación avanzada POAs con TiO₂. De acuerdo al Decreto supremo N° 004-2017-MINAM de la legislación peruana, los valores permisibles del surfactante aniónico presente en aguas residuales deberían estar en el rango de 0,5 mg/L a 1 mg/L. Si se requiere destinar el agua para riego de vegetales, su concentración deberá estar por debajo de un valor de concentración de 0,2 mg/L.

Ríos (2014) en sus estudios realizó pruebas de tratamiento biológico aerobio, con el fin de degradar un surfactante aniónico y demostró que a concentraciones iniciales de 25 y 30 mg/L del surfactante aniónico, rango el proceso de degradación es eficiente, sin embargo, al incrementar la concentración inicial, los detergentes actuarían en contra de los microorganismos encargados de la degradación. En el presente trabajo se utilizó soluciones de 30 ppm del DBSNa, tomando en cuenta que, en un proceso de lavado convencional, se genera un valor estimado de 29.46 ppm del surfactante aniónico en el efluente doméstico

Deza (2018) caracterizó nanopartículas de TiO₂ comercial Degussa P25 por difracción de rayos X (DRX) y determinó su composición, la cual es de 80% de anatasa y 20% de rutilo. El catalizador comercial P25 es un estándar en los procesos de fotocatalisis heterogénea, y se puede utilizar de manera soportada, con la finalidad de eliminar las etapas de filtración y recuperación del fotocatalizador. El vidrio y polipropileno, son materiales que podrían ser utilizados como soportes, debido a que son considerados inertes, no interactúan con el fotocatalizador, no promueven y tampoco inhiben la reacción química, sin embargo, en algunos casos se busca mejorar la actividad fotocatalítica del TiO₂, dopándolo o soportándolo con otros elementos, modificando sus estructuras o mejorando sus propiedades texturales (Khlyustova et al., 2020; Yang et al., 2022).

METODOLOGÍA

Los procedimientos experimentales fueron realizados en el Laboratorio del grupo de investigación DEINPRO de la Facultad de Química e Ingeniería Química de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Para los ensayos de degradación fotocatalítica del DBSNa, se utilizó como semiconductor las nanopartículas de TiO₂ P25 de la compañía Degussa (NPs-P25). Según especificaciones del proveedor su composición es aproximadamente 75% de anatasa y 25 % de rutilo, rango de tamaño promedio 30-50 nm y área superficial de 55 ±15 m²/g.

La identificación de las fases cristalinas presentes en la muestra comercial de NPs-P25 fue realizado por la técnica de difracción de rayos X, con un difractómetro XPERT-PRO modelo X pert MPD, de la marca PANalytical, con una fuente α_1 -Cu de $\lambda = 1,54069 \text{ \AA}$. El rango de la medida fue realizado en 50 a 80 ° (2 Θ) con un paso de 0,03 grados y un tiempo de 50 segundos

por paso, con un tiempo aproximado de 16 minutos. Las pruebas fotocatalíticas se realizaron en un sistema UV/TiO₂, que consistió en un reactor tipo batch con capacidad de 1 litro, conectado a una fuente de radiación ultravioleta que simula la luz solar ULTRA Vitalux de 230V y un flujo de aireación continua de 3 L/min (AC 220V 50Hz 2W), en condiciones ambientales.

Pruebas fotocatalíticas con TiO₂ en suspensión

Inicialmente se evaluó la efectividad fotocatalítica del TiO₂ en suspensión, para lo cual se utilizó NPs-P25 en concentraciones de 0,1 g/L, 0,2 g/L, 0,4 g/L y 0,6 g/L y disoluciones de 30 mg/L de DBSNa preparadas a partir de una solución patrón de 100 mg/L. El volumen de trabajo fue de 1 litro de solución, la cual estuvo saturada con aire y el sistema de reacción se colocó dentro un concentrador de luz elaborado con una caja de madera cubierta internamente con papel aluminio, a fin de reflejar los rayos UV. El sistema estuvo expuesto a radiación de luz artificial durante 3 horas. La degradación del DBSNa se estudió mediante espectrofotometría UV-visible a 220 nm, tomando alícuotas cada 10 minutos, durante 180 minutos utilizando el espectrofotómetro UV-visible modelo PERSEE T7 en la medición de absorbancias que nos permitan finalmente determinar la variación de concentración de DBSNa en función del tiempo de exposición a la fuente de radiación UV.

Impregnación de NPs-P25 de TiO₂ sobre vidrio y polipropileno

Con la finalidad de evitar la pérdida en masa del TiO₂ durante el proceso de degradación y la contaminación del agua tratada, se utilizó soportes para la impregnación de las NPs-P25, por lo que se utilizó materiales de vidrio y polipropileno, con diferentes estructuras y superficies. Para el caso del vidrio se trabajó con placas de superficies lisa y rugosa, mientras que para el propileno se trabajó con 3 tipos de estructuras: placa de superficie lisa, película (film) y tela, las 2 últimas con superficie áspera.

En el caso de las placas de vidrio, las dimensiones fueron 4 cm x 5 cm y 4mm de espesor. Para los soportes de polipropileno (pp), las placas tenían dimensiones de 4 cm x 5 cm y 2 mm de espesor, en las estructuras tipo película sus dimensiones fueron de 3,5 cm x 20 cm y 1 mm de espesor, mientras que en la estructura de tela sus dimensiones fueron 3,5 cm x 20 cm y 0.6mm de espesor.

El pretratamiento de los soportes consistió en la activación química superficial de las placas, película y tela, las cuales fueron sumergidas en solución de HCl a 0,01 M y pH 2, durante 5 horas, posteriormente se enjuagan y secan. El procedimiento de impregnación de nanopartículas se realiza por aspersión húmeda, con una suspensión homogénea de NPS-P25 al 2% en peso. Posterior los soportes se secan al ambiente por 24 horas y pasan a tratamiento térmico con temperaturas de 673 K para el vidrio y de 348 K para el polipropileno, durante 1 hora. Este proceso de fijación se repite por tres veces y finalmente mediante la prueba de estabilidad permite determinar que tipo de soporte presenta la mayor adherencia del fotocatalizador. Esta prueba

consiste en tomar un peso inicial del soporte, pasar por un flujo de agua, secar y volver a pesar. De esta manera se calculará la cantidad de TiO_2 que permanece en el soporte.

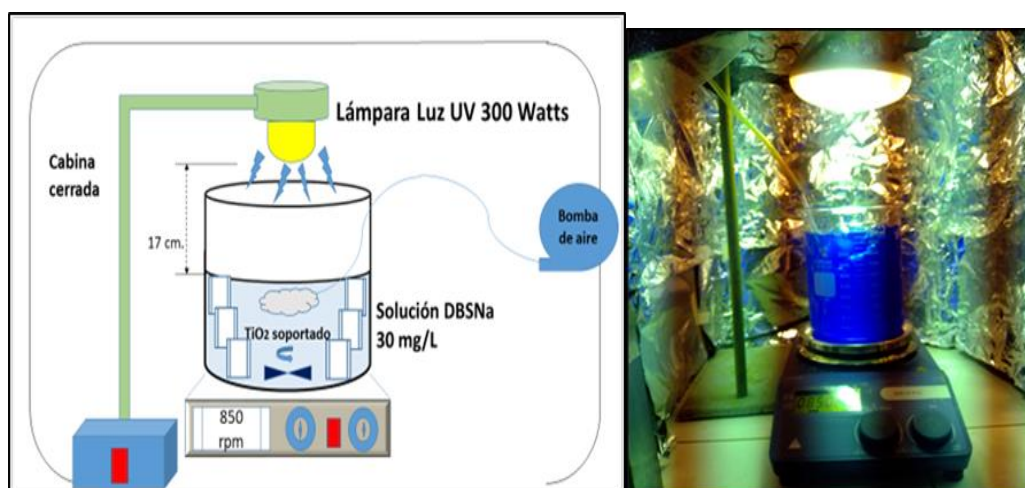
Pruebas fotocatalíticas con TiO_2 soportado

Para los ensayos de degradación fotocatalítica con TiO_2 soportado, se utilizaron disoluciones de 30 mg/L de DBSNa preparadas en volúmenes de trabajo 500 ml. También se utilizó 0.4 g/L fotocatalizador soportado, por ser la concentración óptima al realizar las pruebas con TiO_2 en suspensión, lo cual representaría una masa 0,2 g de TiO_2 adherido en los diferentes soportes.

Se realizó pruebas repetitivas de fotodegradación del surfactante DBSNa con NPs- TiO_2 adherido a los materiales de soporte seleccionados de acuerdo a los resultados de la prueba de estabilidad. Durante las pruebas fotocatalíticas, los soportes permanecieron inmersos en la solución de DBSNa, distribuidas de manera vertical apoyadas en las paredes internas del reactor, de acuerdo a la figura 3.

Figura 3

Diseño de reactor de fotocatalisis heterogénea a nivel laboratorio



El proceso fotocatalítico fue monitoreado con un espectrofotómetro UV-visible modelo PERSEE T7, rango de longitud de onda (λ) de 190 – 1100 nm, con el software de control WinGLP. Se tomó alícuotas de 5ml en intervalos de tiempo de 10 y 20 minutos para la medición de absorbancias, durante tiempos de prueba de 180 minutos. Se toma en cuenta los espectros de absorción del DBSNa en la región ultravioleta, el cual presenta un pico máximo en $\lambda = 220$ nm atribuible al doble enlace conjugado correspondiente a los anillos bencénicos. Con los datos experimentales de la remoción del DBSNa, se obtuvo los parámetros estadísticos de regresión lineal que permitieron determinar el modelo cinético del proceso fotocatalítico.

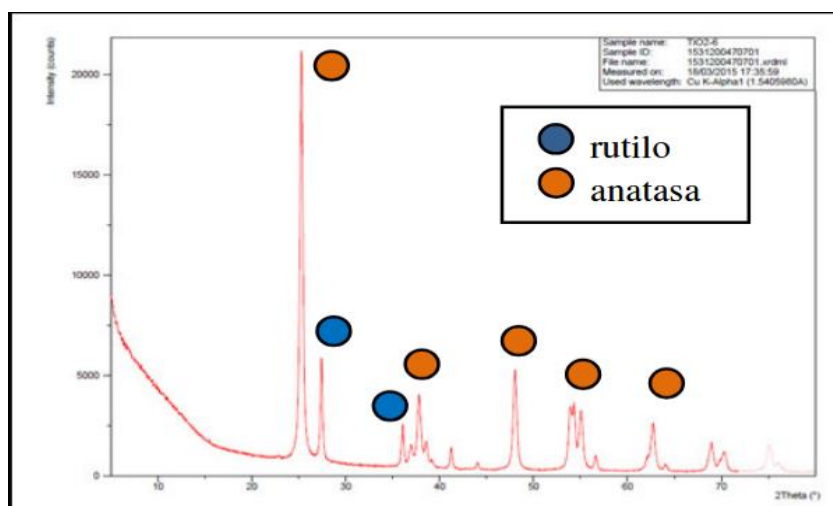
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de TiO₂ por difracción de rayos X

La muestra comercial Degussa NPs-P25 se caracterizó por difracción de rayos X (DRX). El difractograma se muestra en la figura 4 y se evidencia que hay presencia de las tres fases cristalinas anatasa, rutilo y brookita. Se utilizó como referencia la base de datos “Joint Committee Powder Diffraction Standard” (JCPDS, por sus siglas en inglés).

Figura 4

Difractogramas de la muestra comercial Degussa NPs-P25



Fuente: Laboratorio de Difracción de Rayos X

De acuerdo al difractograma de las NPs-P25, se exhibieron las líneas de difracción con picos más intensos en los ángulos $2\Theta = 25.36^\circ, 48.14^\circ, 53.97^\circ, 55.19^\circ, 62^\circ, 71^\circ$ y 75° que caracterizan a la fase anatasa (tetragonal), también los ángulos $2\Theta = 27.44^\circ, 36.09^\circ, 41.25^\circ, 44^\circ$ y 56.64° que pertenecen a la fase rutilo (tetragonal), que se encuentra en menor proporción. La cuantificación de fases presentes fue estimada por el método Rietveld, lo que permitió obtener los porcentajes en peso (%W) de cada de cada fase, de acuerdo a la tabla 1.

Tabla 1

Cuantificación porcentual de las fases en las NPs-P25 de TiO₂

Nombre del mineral	Fórmula química	Matches lines	Total lines	% Weight
Anatase	TiO ₂	13	13	80
Rutile	TiO ₂	15	16	20

Fuente: Elaboración propia

Como podemos apreciar en la tabla 1, hay mayor presencia de fase anatasa, con respecto a la fase rutilo, lo cual guarda relación con su difractograma.

Dispersión dinámica de luz (DLS)

Para determinar el tamaño aproximado de las nanopartículas de la muestra comercial Degussa P25, se utilizó la técnica de Dispersión Dinámica de luz (DLS), con una una dispersión

diluida de TiO₂ sonicada por una hora . Se obtuvo la distribución del tamaño hidrodinámico en cuanto a intensidad, volumen y numero, lo que nos permitió concluir que las nanopartículas presentan un diámetro significativo de 21.7 nm de acuerdo a la distribución Gaussiana.

Degradación fotocatalítica del DBSNa con TiO₂ en suspensión

Al evaluar la efectividad fotocatalítica del TiO₂ Degussa P25, se empleó concentraciones de 0,1 g/L, 0,2 g/L, 0,4 g/L y 0,6 g/L del fotocatalizador en 1 litro de solución, a una concentración de 30 mg/L de DBSNa y tiempos de 180 minutos. En la tabla 2 se muestran las eficiencias alcanzadas en la remoción del DBSNa y en la figura 6 se muestra el progreso de la remoción del DBSNa a diferentes concentraciones de TiO₂.

Tabla 2

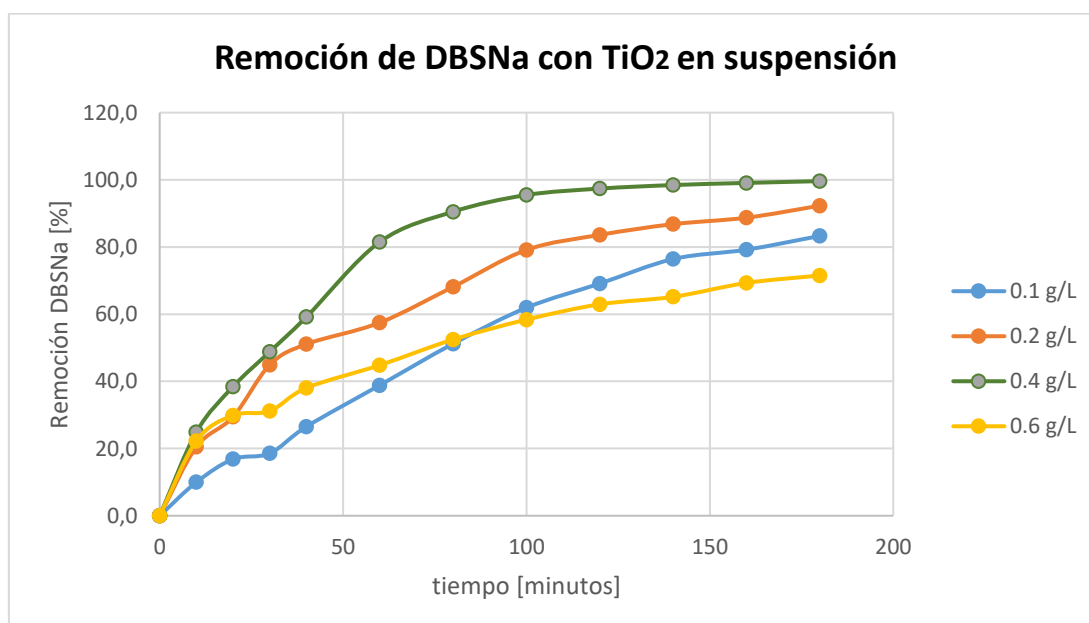
Porcentajes de remoción del DBSNa a diferentes concentraciones del fotocatalizador NPs- P25 y diferentes tiempos

tiempo (min)	% remoción del DBSNa a diferentes concentraciones			
	0.1 g/L	0.2 g/L	0.4 g/L	0.6 g/L
60 minutos	38,85%	57,48%	81,50%	44,82%
120 minutos	69,12%	83,60%	97,38%	62,94%
180 minutos	83,28%	92,29%	99,60%	71,52%

Fuente: Elaboración propia

Figura 6

Remoción del DBSNa con diferentes concentraciones de TiO₂ Degussa P25



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los valores de la tabla 2, se evidencia que para una concentración de 0,4 g/L de TiO₂, se alcanza el mayor porcentaje de remoción del DBSNa, sin embargo, al incrementar a 0,6 g/L, la eficiencia de remoción tiende a disminuir. Estos resultados indican que al aumentar la

concentración de nanopartículas de TiO₂ por encima de 0,4 g/L se produciría un efecto de sombreado debido a la mayor densidad de nanopartículas en el medio de reacción, disminuyendo el área superficial efectiva y ocasionando que parte de ellas no se encuentren expuestas a la luz. (Pellegrino et al. 2017).

Impregnación de NPs-P25 de TiO₂ y prueba de estabilidad

También se utilizó 0.4 g/L fotocatalizador soportado, por ser la concentración óptima al realizar las pruebas con TiO₂ en suspensión. Al trabajar con una suspensión de 500 ml de DBSNa, se requirió trabajar con 0,2 g de TiO₂ impregnado en los soportes.

De acuerdo a los resultados de las pruebas de estabilidad, en la tabla 3 se evidencia que el vidrio con superficie rugosa alcanzó el 96.43 % de impregnación, lo cual evidencia una mejor estabilidad. En el caso del polipropileno, las placas con superficie lisa tuvieron mejor respuesta alcanzando un 91,49 % de impregnación, mientras que las estructuras tipo lámina y tela reportaron los valores más bajos frente a la prueba de estabilidad, por lo que se descartó realizar pruebas fotocatalíticas con estos 2 últimos tipos soporte. En la figura 7 se muestra la comparación entre cantidades de TiO₂ impregnado para cada tipo de soporte.

Tabla 3

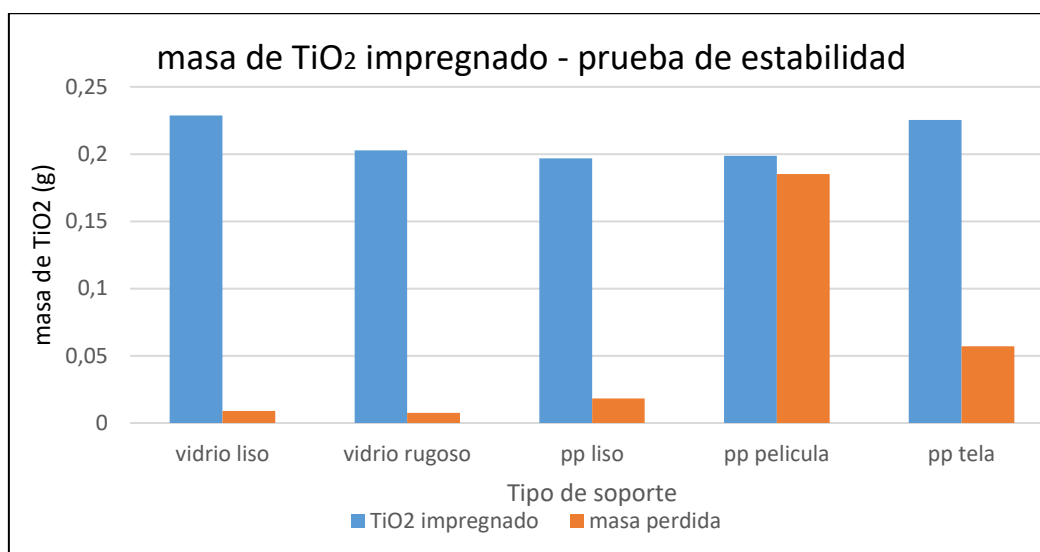
Resultados de la prueba de estabilidad con respecto a la cantidad de TiO₂ impregnado en los soportes de vidrio y polipropileno

Material	Tipo y cantidad de soportes			Prueba de estabilidad			% TiO ₂ impregnado
	Estructura	Superficie	Nº	peso TiO ₂ inicial (g)	peso TiO ₂ final (g)	Pérdida de TiO ₂ (g)	
vidrio	placa	lisa	6	0.2377	0.2288	0.0089	96.25
	placa	rugosa	6	0.2102	0.2027	0.0075	96.43
pp	placa	lisa	6	0.2151	0.1968	0.0183	91.49
	Película	áspera	3	0.3839	0.1988	0.1851	51.78
	tela	áspera	3	0.2824	0.2253	0.0571	79.78

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7

Cantidad de TiO₂ impregnado y masa desprendida en soportes de vidrio y pp



Fuente: Elaboración propia

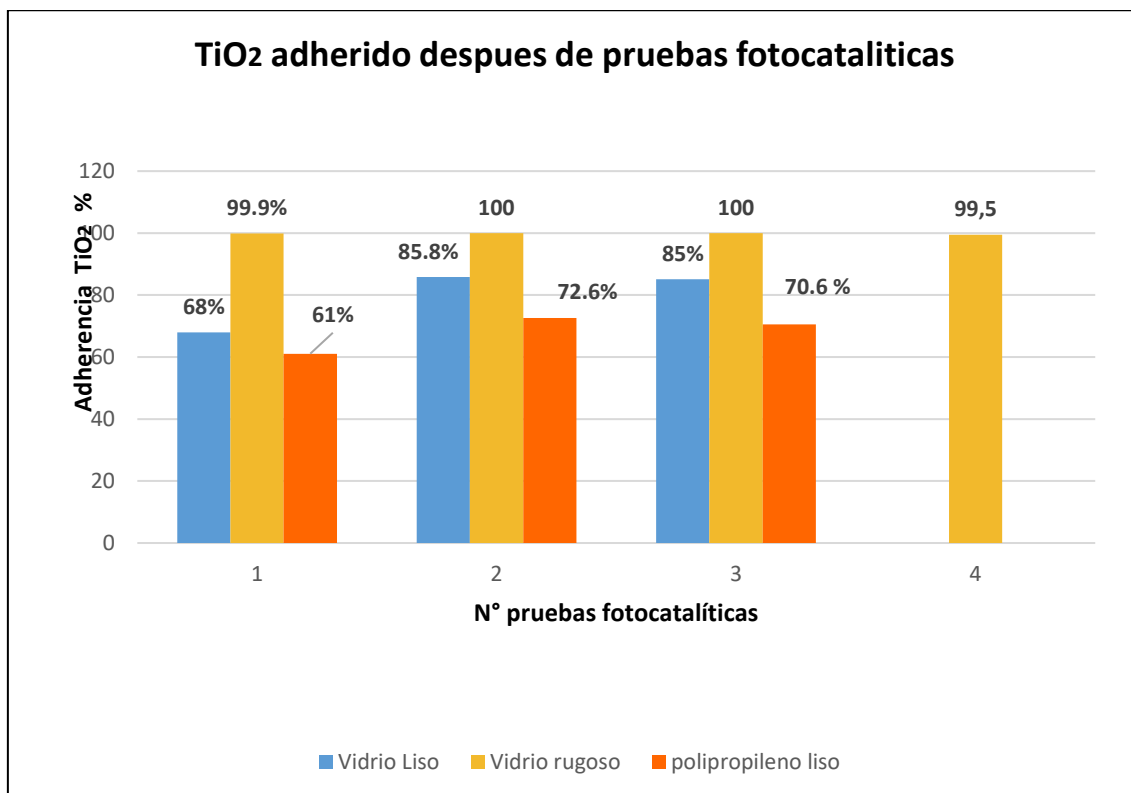
Degradación fotocatalítica del DBSNa con TiO₂ soportado

Para las pruebas fotocatalíticas con NPs-TiO₂ soportado, se trabajó con 0.4 g/L de fotocatalizador y en este caso se utilizó aproximadamente 0,2 g de TiO₂ de manera soportada.

Las placas de vidrio y polipropileno con superficie lisa fueron reutilizadas en 3 pruebas fotocatalíticas, posteriormente empezó a disminuir la masa del TiO₂ adherida. En el caso de las placas de vidrio con superficie rugosa, después de las 3 pruebas fotocatalíticas, aún se conservaba la misma masa de TiO₂ en los soportes, por lo que se decide realizar una cuarta prueba de fotodegradación. En la figura 8 se muestra los porcentajes de TiO₂ que permanece impregnado después de cada prueba con los diferentes soportes.

Figura 8

Porcentajes de TiO₂ adherido para los tres tipos de soporte



Fuente: Elaboración propia

Al comparar las eficiencias de la remoción del DBSNa con los diferentes soportes, se evidencia que el vidrio con superficie rugosa sería el material más idóneo debido a la mejor adhesión de TiO₂ en todo el proceso.

En las figuras 9 y 10, se muestran los espectros de absorción UV-visible del proceso de degradación del DBSNa, con TiO₂ en suspensión y TiO₂ sobre placas de vidrio rugoso (primer uso). Podemos observar la variación de sus bandas en la región ultravioleta, tomando como referencia el pico máximo $\lambda = 220$ nm.

Figura 9

Espectros de absorción UV-visible del proceso de degradación de 30 mg/L de DBSNa, con TiO₂ en suspensión

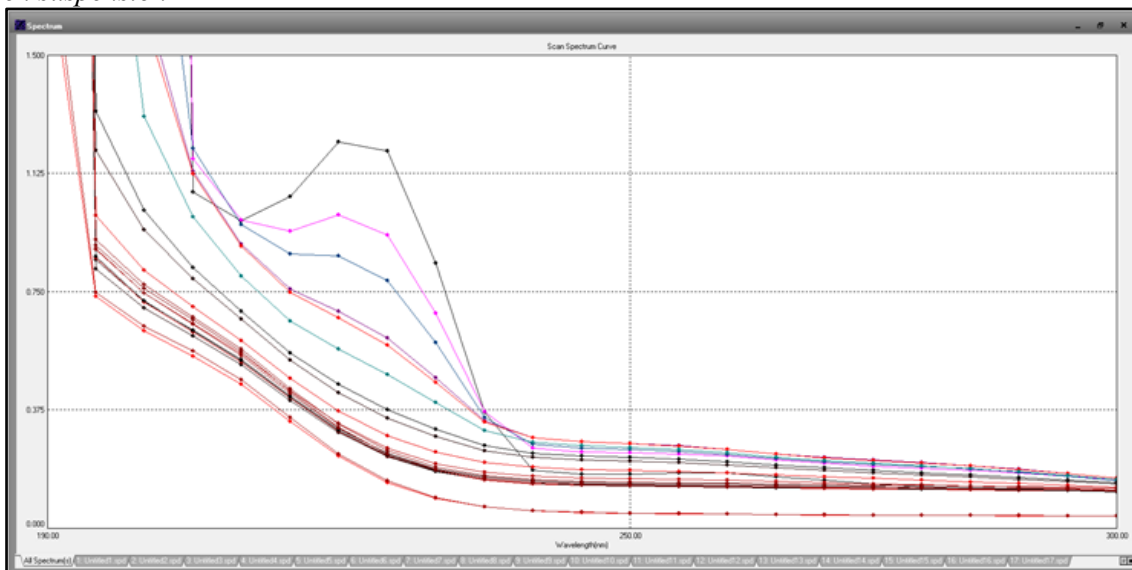
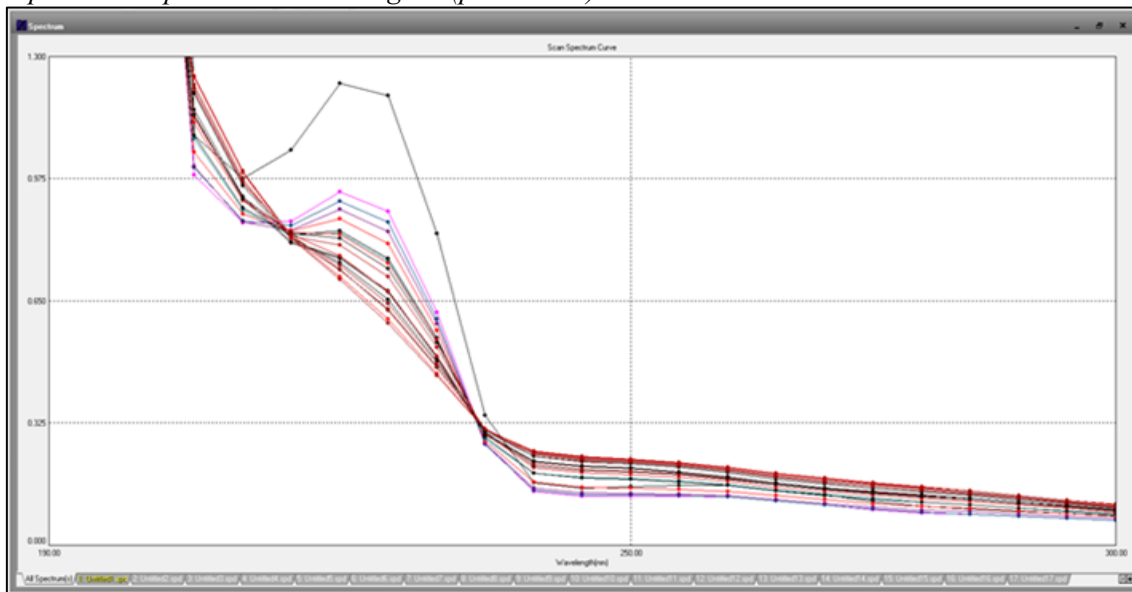


Figura 10

Espectros de absorción UV-visible del proceso de degradación de 30 mg/L de DBSNa, con TiO₂ soportado en placas de vidrio rugoso (primer uso)



Al comparar los espectros de las figuras 9 y 10, observamos que con el TiO₂ soportado la disminución de las bandas es parcial en la región Ultravioleta en comparación con el TiO₂ en suspensión. Estas diferencias indican que el fotocatalizador en suspensión siempre tendrá mayor efectividad en la degradación del DBSNa, sin embargo, el uso de un buen soporte permitirá la reutilización del fotocatalizador en pruebas posteriores, siendo un proceso económico y sustentable.

En la tabla 4 se muestran las concentraciones y los porcentajes de degradación del DBSNa alcanzados durante un tiempo de 180 minutos. Los resultados indican que al utilizar nanopartículas soportadas, la mitad de la superficie efectiva de cada nanopartícula se encuentra

expuesta al medio de reacción y a la luz, por lo que su efectividad se reduce a la mitad alcanzando una remoción de DBSNa del 52.70%.

Tabla 4

Porcentajes de degradación fotocatalítica de DBSNa utilizando TiO₂ en suspensión y soportado durante 180 minutos

Tiempo (minutos)	TiO ₂ suspensión		TiO ₂ soportado (vidrio rugoso)	
	Concentración (mg/L)	Porcentaje de degradación %	Concentración (mg/L)	Degradación porcentual
0	30	0	30	0
20	18.52	38,42	23.29	22.87
40	12,28	59,17	20.17	33.20
60	5,56	81,50	19.60	35.10
80	2,86	90,50	17.56	41.84
100	1,36	95,48	17.21	43.00
120	0,79	97,38	16.51	45.32
140	0,47	98,44	15.43	48.91
160	0,28	99,07	14.54	51.86
180	0,12	99,60	14.28	52.70

Fuente: Elaboración propia

La figura 8 muestra el progreso de la remoción del DBSNa durante el tiempo de irradiación de 180 minutos, utilizando TiO₂ P25 en suspensión y soportado en placas de vidrio rugoso. Los datos experimentales determinaron que la cinética de degradación para ambas situaciones se aproxima al modelo cinético de pseudo primer orden. En la tabla 5 se muestran los parámetros estadísticos de la regresión lineal y en la figura 11 se muestra la gráfica de la cinética de Pseudo-primer orden.

Tabla 5

Constantes cinéticas y porcentaje de remoción

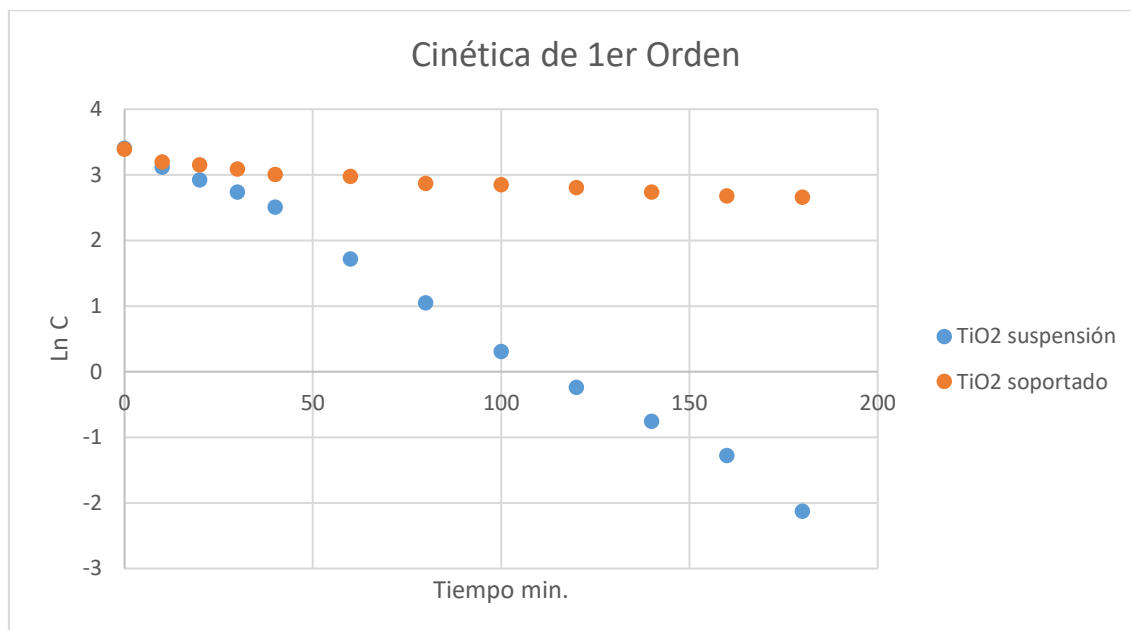
ORDEN DE REACCION	Disposición de TiO ₂	Suspensión	TiO ₂ soportado (vidrio rugoso)
		% Remoción de DBSNa	99.60
Parámetros estadísticos Cinética de 1er orden	k ₁	0.0309	0.0035
	R ₁ ²	0.9964	0.916
	SCE	0.0036	0.084

SCE: Suma residual de cuadrados

Fuente: Elaboración propia

Figura 11

Cinética de Pseudo-primer orden para el TiO₂ en suspensión y dispuesto de manera soportada en placas de vidrio rugoso



CONCLUSIONES

Las técnicas de caracterización del fotocatalizador permitieron conocer sus composición y propiedades estructurales. En esta investigación se toma en cuenta la técnica de DRX para identificar las fases cristalinas presentes y la técnica del DLS para estimar el tamaño de las nanopartículas de TiO₂.

La inmovilización de las nanopartículas de TiO₂ es una estrategia necesaria en el tratamiento de aguas residuales, para no realizar procesos costosos de separación del fotocatalizador en la suspensión.

Al utilizar el fotocatalizador TiO₂ dispuesto de manera soportada, se evidencia que el rendimiento en la degradación del DBSNa se reduce a la mitad respecto a la forma suspendida, lo que guarda relación con el área de contacto de las nanopartículas al medio de reacción. Una sección de cada nanopartícula está inmovilizada e impregnada al material de soporte.

Los espectros absorción en los procesos fotocatalíticos con TiO₂ soportado, reflejan una disminución parcial de las bandas en la región Ultravioleta con respecto a la prueba con TiO₂ en suspensión. Se evidencia una reducción de efectividad en la degradación del DBSNa al trabajar con nanopartículas soportadas, sin embargo, a escala real, la inmovilización tiene beneficios como la reutilización del fotocatalizador, la minimización de pérdida y la reducción de contaminación secundaria por residuos del fotocatalizador en el efluente.

REFERENCIAS

- Aguirre, F. J. (2019). *Estudio de fotocatalizadores nanoestructurados [SrAl₂O₄:Ln_x Y TiO₂] para la posible eliminación de Cr⁺⁶ en efluentes de Teneria*. Tesis doctoral. pp. 13-15
- CERIDE. *Degradación del Petróleo y detergentes con Microorganismos*. s.f. <http://www.santafe-conicet.gov.ar/servicios/comunica/petroleo.htm>
- Decreto supremo N° 004-2017-MINAM (2017) *Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA). Plataforma del Estado Peruano* <https://www.minam.gob.pe/uploads/2017/06>
- Deza E. (2018). *Estudio de catalizadores basados en Nanopartículas de TiO₂ para la degradación fotocatalítica del colorante Cibacron Navy H-2G presente en efluentes Textiles*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Hazardous Substance List (2002). *Lista de substancias peligrosas* <https://share.google/ou52FW1PpAnGHAfKT>
- Jariyanosade A., & Junyapoon S. (2018). *Factors Affecting the Degradation of Linear Alkylbenzene Sulfonate by TiO₂ assisted Photocatalysis and its Kinetics*. Environment Asia 11(1). DOI: [10.14456/ea.2018.4](https://doi.org/10.14456/ea.2018.4)
- Khedr T., El-Sheikh S., Kowalska E., Abdeldayem H. (2021). *The synergistic effect of anatase and brookite for photocatalytic generation of hydrogen and diclofenac degradation*. Journal of Environmental Chemical Engineering, Volume 9, Issue 6, 2021, 106566, ISSN 2213-3437, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106566>.
- Khlyustova A., Sirotkin N., Kusova T., Kraev A., Titova V. & Agafonov A. (2020). *“Doped TiO₂: the effect of doping elements on photocatalytic activity”* Mater. Adv., 2020,1, 1193-1201
- Li, H., Yang, Y., Li X. & Ullah H. (2023). *Remediation of Surfactants Used by VUV/O₃: Degradation Efficiency, Pathway and Toxicological Analysis*. Molecules. 28 (8), 3312. <https://doi.org/10.3390/molecules28083312>
- Meneses M. L. (2018). *Determinación de la efectividad de agentes microbianos para la degradación de Tensoactivos Dodecibencen Sulfonato de Sodio Lineal*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba.
- Pellegrino F., Pellutiè L., Sordello F., Minero C., Ortel E., Hodoroaba V., Maurino V. (2017). *“Influence of agglomeration and aggregation on the photocatalytic activity of TiO₂ nanoparticles”*, Applied Catalysis B: Environmental, Volume 216, Pages 80-87, <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.05.046>
- Peñas-Garzón M., Moreno-Medina I., Bedia J. y Belder C. (2022). *Synthesis and evaluation of fotocatalizadores TiO₂ / carbón activo photocatalysts*. Un enfoque multidisciplinario and cooperativo para estudiantes de ingeniería química.

- Pey Clemente, J. (2008). *Aplicación de procesos de oxidación avanzada (Fotocatálisis solar) para el tratamiento y reutilización de efluentes textiles [Tesis doctoral]*. Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/2241>
- Redalyc (2025). *La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales*. Acceso: julio 1, 2025, <https://www.redalyc.org/pdf/695/69511013.pdf>
- Rodríguez-Alfaro, L. F., Luévano-Hipólito, E. & Torres-Martínez, L. (2024). *Nanopartículas de TiO₂ fotocatalíticas incorporadas en materiales de construcción. ¡Construyamos edificios inteligentes!. Mundo nano*. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología, 17(32), e00090. Epub 01 de abril de 2024. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2024.32.69737>
- Salager, J. L., & Fernández, A. (2004). *Surfactantes: III. Surfactantes aniónicos*. Módulo de enseñanza en fenómenos interfaciales. Laboratorio FIRP, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Los Andes, Venezuela. Recuperado de <http://www.firp.ula.ve>
- Showell, M. (Ed.). (2006). *Manual de detergentes. Parte D: Formulación*. (1.^a ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420028713>
- Silva, D. & Nieto, R. (2023). “*Degradación del tensoactivo aniónico mediante ozono/luz UV/TiO₂ en aguas residuales provenientes de una lavandería comercial*”, Tesis para optar el grado de Maestría, Universidad Nacional del Callao, Callao, Perú.
- Ríos Ruiz, F. *Comportamiento ambiental de tensioactivos comerciales: Biodegradabilidad, toxicidad y ozonización*. Granada: Universidad de Granada, 2016. [\[http://hdl.handle.net/10481/42048\]](http://hdl.handle.net/10481/42048)
- Rzaij, J. & Abass, A. (2020). *Review on: TiO₂ Thin Film as a Metal Oxide Gas Sensor*. Journal of Chemical Reviews, Volume 2, Issue 2, Pages 114-121. TCI AMERICA, <https://www.spectrumchemical.com/media/sds/TCI-D0990.pdf>
- Tomodachi (2020). *La fotosíntesis artificial convierte el CO₂ en energía*. Revista electronica oficial del gobierno japonés pp. 26-27. https://www.japan.go.jp/tomodachi/_userdata/pdf/2020/earllysummer2020es/
- Tolentino Castillo, A., Benites Alfaro, E., & Cabrera Carranza, C. (2019). *Aguas residuales de lavandería y su tratamiento por Oxidación fotocatalítica con dióxido de titanio (TiO₂) y luz ultra violeta (UV) en Instituto Nacional de Salud del Niño, San Borja- 2017*. Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia y Ciencias geográficas, 22(43), 3-8. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v22i43.16680>
- Yang H., Yang B., Chen W., Yang J. (2022). *Preparation and Photocatalytic Activities of TiO₂-Based Composite Catalysts*. *Catalysts*. 2022; 12(10):1263. <https://doi.org/10.3390/catal12101263>

- Ying Zhang, Jing Ma, Siyun Zhou, Fang Ma, (2015). *Concentration-dependent toxicity effect of SDBS on swimming behavior of freshwater fishes*, Environmental Toxicology and Pharmacology, Volume 40, Issue 1, 2015, Pages 77-85, ISSN 1382-6689, <https://doi.org/10.1016/j.etap.2015.05.005>.
- Zhang Y, Ma J, Zhou S, Ma F. *Concentration-dependent toxicity effect of SDBS on swimming behavior of freshwater fishes*. Environmental Toxicology and Pharmacology. 2015 Jul;40(1):77-85. doi: [10.1016/j.etap.2015.05.005](https://doi.org/10.1016/j.etap.2015.05.005). Epub 2015 May 16. PMID: 26093194.
- Zegarra J. (2022). *Nuevos parámetros ambientales para determinar la cantidad de sustancia química contaminante en efluentes y emisiones en la legislación peruana*. Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas, 25(50), 265–272. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v25i50.24249>