

## Aplicaciones de los catalizadores y su evaluación a través de análisis de ciclo de vida

Cristhian David, Chicaiza Ortiz<sup>1\*</sup>; Kimberly Valeria, Salazar García<sup>2</sup>;  
Karel, Diéguez Santana<sup>3</sup>; Ángel Fabián, Chicaiza Ortiz<sup>4</sup>;  
Vanessa Pamela, Navarrete Villa<sup>5</sup>; Jingxin Zhang<sup>6</sup>

### Resumen

En los próximos años, el uso de catalizadores sigue aumentando, ya que desempeña un papel importante en la fabricación de productos básicos, petroquímicos, químicos, farmacéuticos y alimenticios, además de servir como una herramienta para la mejora el rendimiento de las nuevas tecnologías energéticas. Por otro lado, los procesos de síntesis de catalizadores generan residuos en los laboratorios y fábricas, convirtiéndose en un desafío ambiental debido a su composición particular. En este contexto, se pueden utilizar herramientas como el análisis de ciclo de vida (ACV) para cuantificar los impactos ambientales e identificar los puntos débiles, que deberán ser mitigados. Por lo tanto, en esta revisión, se evaluaron tres catalizadores: Zn, Pd, Pt, al igual que sus impactos ambientales. Finalmente, se encontraron algunos de los usos potenciales en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y el aumento en el rendimiento de la producción de energía y urea, así como el aumento del rendimiento en el gas total y de hidrógeno; también se consideró el uso de los residuos de base como catalizadores, por ejemplo, en la industria del petróleo y las cenizas generadas durante los procesos de combustión de residuos sólidos urbanos (RSU), neumáticos y carbón.

**Palabras claves:** RSU, catalizadores, evaluación ambiental, ACV

## Catalyst applications and their evaluation through life cycle assessment

### Abstract

Catalyst use will continue to increase in the coming years, as they are essential in the manufacture of commodities and petrochemicals and chemicals, pharmaceuticals, and foodstuffs, and also serves as a tool for improving the performance of new energy technologies. On the other hand, the synthesis of catalysts generates waste in laboratories and factories, presenting an environmental challenge due to its particular composition. In this context, life cycle analysis (LCA) can quantify environmental impacts and identify areas of vulnerability that should be addressed. As a result, this review evaluated three catalysts: Zn, Pd, and Pt, as well as their environmental impacts. Finally, some possible uses include reducing greenhouse gas (GHG) emissions and increasing energy and urea production yields, as well as total gas and hydrogen yields; the use of base residues as catalysts was also considered, for example, in the petroleum industry and the ashes generated during municipal solid waste (MSW) combustion processes.

**Keywords:** MSW, Catalysts, Environmental assessment, LCA.

**Recibido:** 5 de mayo de 2021  
**Aceptado:** 10 de agosto de 2021

<sup>1</sup> Master of Engineering in Environmental Engineering, Universidad Estatal Amazónica – Sede El Pangui, Ecuador  
<https://orcid.org/0000-0003-3970-4550>

<sup>2</sup> Ingeniería en Biotecnología Ambiental, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador

<sup>3</sup> MSc. en Ingeniería en Saneamiento Ambiental, Facultad Ciencias de la Vida, Universidad Estatal Amazónica, Pastaza-Ecuador  
<https://0000-0003-4064-0566>

<sup>4</sup> MSc. en Ingeniería civil - Construcciones civiles, Ciudades Amazónicas. Facultad Ciencias Socio Ambientales. Universidad  
<https://0000-0002-2405-2783>

<sup>5</sup> MSc. Environmental Science & Engineering, Tianjin University, China  
<https://0000-0002-4867-486X>

<sup>6</sup> Ph.D. in Environmental Engineering, China-UK Low Carbon College, Shanghai Jiao Tong University, China

\*Autor para correspondencia: [cristhianchicaiza@hotmail.com](mailto:cristhianchicaiza@hotmail.com)

## I. INTRODUCCIÓN

La deficiencia de recursos se convirtió en un bloqueo para el desarrollo de la sociedad, mientras que el rápido desarrollo de la economía, la crisis energética mundial se ha convertido cada vez más en un problema urgente. Hoy en día, el despilfarro de recursos se ha vuelto alarmante. Algunos investigadores se han centrado en resolver el problema, mejorando el proceso con elementos catalíticos, reciclando, encontrando nuevas tecnologías energéticas, entre otros (Chen et al, 2018). Al mismo tiempo, el aumento constante de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en los últimos años ha despertado el interés por las soluciones adecuadas; por ejemplo, una opción es la utilización del CO<sub>2</sub> con el CH<sub>4</sub> para producir gas de síntesis mediante el reformado catalítico (Abdullah et al, 2017). La aplicación directa de los catalizadores está dirigida hacia el aumento drástico de la velocidad de la reacción y la distribución de los productos de la reacción, en la que se favorece la producción de uno en específico, sin que este sea consumido durante la reacción; a esta característica se le denomina selectividad (Zanella, 2014).

¿Cómo pueden los investigadores tener la certeza de que un nuevo proceso alternativo resulta mejor que las prácticas actuales? Uno de los métodos más recurrentes utilizados para la evaluación ambiental es el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), es un método aceptado por la comunidad científica dirigido hacia la caracterización y cuantificación de los impactos producidos sobre el medio asociado a un producto o procesos (Hernández y Diaz, 2018), que adopta un enfoque holístico y ofrece una visión completa de los impactos ambientales a lo largo de la mayor parte del ciclo de vida de un servicio o producto, lo que permite a los responsables políticos disponer de una herramienta que proporciona una visión clara y facilita la toma de decisiones adecuadas (Mu et al, 2010). La aplicación del ACV a áreas como la catálisis o incluso la nanotecnología tendría que incluir todos los elementos de las actividades de la cuna a la tumba, es decir, desde la extracción de las materias primas, las etapas de producción, el uso de los productos, y la gestión final del producto incluyendo el reciclaje y su eliminación en la etapa de fin de vida (Feijoo et al, 2017).

El enfoque de esta investigación está dirigido

a valorar la importancia de los catalizadores y su utilización para la remoción de contaminantes en agua y aire; en el presente documento se resume los principales hallazgos y algunos casos de estudio de los últimos años y los avances en cuanto a química verde.

Hasta la fecha, se calcula que el 60% de los productos químicos y el 90% de los procesos químicos emplean catalizadores, así como la mayoría de los procesos de refinado del petróleo. La función de los catalizadores en la síntesis química es facilitar las vías de reacción con energías de activación más bajas y evitar la producción de subproductos no deseados (Umile, 2015). Se requieren regularmente catalizadores de alto rendimiento en el sistema; y los catalizadores monolíticos resultan más prometedores que los catalizadores peletizados debido a la baja caída de presión y a las altas tasas de transferencia de calor y masa en los canales de flujo de reactivos (Hirano, T. y Xu, Y., 2017).

El tráfico automotor y la industria son las fuentes de contaminación del aire más importantes en el mundo occidental, siendo estas responsables de las emisiones de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) y todo tipo de compuestos orgánicos. La catálisis permite la transformación de estas moléculas dañinas para el ambiente en especies benignas como la formación de nitrógeno molecular (N<sub>2</sub>), vapor de agua (H<sub>2</sub>O) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) aunque este último es un gas precursor del efecto invernadero (Chorkendorff y Iemantsverdriet, 2003). Los procesos catalíticos están dirigidos a evitar daños en la salud humana y el ambiente; como lo es su uso en los convertidores catalíticos de los automóviles, refinado del petróleo en procesos de alquilación, degradación de compuestos orgánicos y amoniacos presentes en el agua, procesamiento de energía, en procesos de craqueo catalítico (ruptura de hidrocarburos de cadena larga), reformado de nafta y la conversión de hidrocarburos en gas de síntesis (Zanella, 2014).

## II. METODOLOGÍA

Se realizó una selección de la literatura científica tanto en inglés como en español, considerando los siguientes criterios:

- a. Capítulos de libros relacionados directamente al tema de investigación como son los

- procesos catalíticos, diseños y aplicaciones.
- b. Para la revisión de artículos científicos se utilizaron palabras clave de acuerdo a los temas de interés como: catálisis, biodiésel, motores, combustión, ACV, líquidos iónicos, nanopartículas, biopolímeros, entre otros; la búsqueda se realizó en bases de datos internacionales relevantes entre ellos Scopus, Science Direct y artículos publicados por universidades; en los cuales luego de ser seleccionados se procedió a su revisión por la pertinencia y relevancia de la información para el tema de estudio.
  - c. El orden cronológico de artículos y libros publicados corresponde desde el 2017 en adelante (45%), entre el 2011-2016 (22%), 2006-2010 (17%) y publicaciones en años menores al 2005 (14%).

ser empleados en nuevas tecnologías siendo estos de gran importancia, contribuyendo con la disminución de los impactos ambientales; su diseño consta de materiales cerámicos con incrustaciones de metales como paladio y platino; mismos que pueden ser utilizados en motores a diésel, estos metales van a oxidar el monóxido de carbono CO, así como también a hidrocarburos HC transformándolos en carbono C y vapor de agua H<sub>2</sub>O. La función de los catalizadores es disminuir la toxicidad de los compuestos generados por la combustión evitando daños a la salud humana y el ambiente (Hernández C., 2018).

La función de los catalizadores es generar un mecanismo de tipo alternativo, en el cual se involucra un estado de transición diferente y una energía de activación menor, como se muestra en la Figura 1; en la que el catalizador no va a modificar la reacción, ya que solo acelera la velocidad de la misma en condiciones de equilibrio (Zanella, 2014).

### III. DESARROLLO Y DISCUSIÓN.

Los catalizadores son dispositivos que pueden

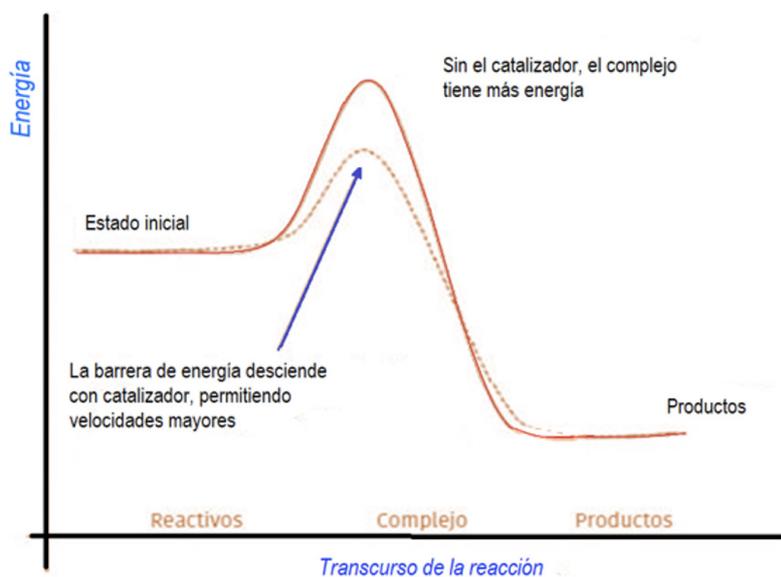


Figura 1. Energía necesaria para llevar a cabo la reacción en reacciones catalizadas y no catalizadas.

Fuente: (Pedroza, Y. 2014) adaptado de (Zanella, 2014).

#### 3.1 Situación actual del proceso de catálisis

La catálisis está muy extendida en las disciplinas científicas y de ingeniería, como demuestra el gran número de revistas que se dedican al tema cada año. Los catalizadores han sido fundamentales en la producción industrial de materias primas químicas, poliolefinas y otros materiales poliméricos (Mathers y

Meier, 2011). En este sentido, un caso de aplicación es el área de producción de hidrógeno basada en varios catalizadores soportados como Pt, Pd, Ir, y otros que exhibieron una mayor resistencia a la deposición de coque y una alta actividad. Sin embargo, debido a su alto coste y limitada accesibilidad, los catalizadores basados en Ni han sido ampliamente investigados y

empleados como alternativas a los metales nobles en los procesos de reformado, principalmente debido a sus ventajas de bajo coste y amplia disponibilidad (Damyanova et al, 2018).

Se han publicado numerosos artículos sobre el desarrollo de catalizadores activos y resistentes al coque para la reacción de reformado en seco del metano (DRM). La reacción de DRM se cataliza frecuentemente con catalizadores como Ru, Rh, Pt, Ni y Co (Abdullah et al, 2017). Otra aplicación de la catálisis es la optimización de la síntesis de amoníaco de NTP, que es un sistema catalítico-promotor muy eficiente. Se trata de un catalizador multifuncional heterogéneo compuesto por una variedad de sitios catalíticos de superficie sólida. El rutenio es uno de los catalizadores más activos para la síntesis de amoníaco (Peng et al, 2017).

La catálisis juega un papel importante en la degradación de compuestos organofosforados permitiendo que los procesos de hidrólisis sean mucho más eficientes incrementando su velocidad. Esta puede ser por medio de la coordinación con un grupo saliente en el que intervienen iones metálicos, estos pueden ser  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ; o en sistemas homogéneos en los cuales se dan reacciones de hidrólisis en la superficie de los óxidos metálicos y silicatos. El catión metálico que es absorbido ya sea en el óxido o en el silicato, se coordinan con un compuesto orgánico para dar lugar a su hidrólisis. La degradación de contaminantes hidrosolubles puede llevarse a cabo a través del carácter ácido de algunos silicatos laminares, cuyos puntos de carga cero son extremadamente bajos, haciendo que el proceso de hidrólisis sea ácido (Domènech y Peral, 2012).

### 3.1.1. Catálisis homogénea y heterogénea

Dado que la catálisis homogénea es un proceso altamente selectivo, es útil a nivel industrial en procesos exotérmicos en los que se prefiere la disposición calórica. Entre los mecanismos de reacción se encuentran la hidrogenación de alquenos, la formación de compuestos de coordinación y las reacciones de inserción. En comparación, la catálisis heterogénea emplea un número limitado de catalizadores que deben soportar temperaturas y presiones elevadas. No requieren un proceso separado de separación de catalizadores, como hace la catálisis homogénea; la catálisis se produce en una

gran superficie de contacto entre las sustancias que reaccionan (que pueden ser líquidas o gaseosas e incluso estar suspendidas en un soporte electrónico) y el catalizador. Los llamados catalizadores uniformes presentan una amplia selectividad geométrica, ya que actúan como tamices moleculares cuando las moléculas que intentan penetrar en su espacio intracrystalino interactúan con ellos. Este es el principio subyacente de varios procesos industriales de refinado y petroquímicos que requieren la separación selectiva de isómeros; esta catálisis tiene un importante impacto económico a nivel industrial (Brown, 2005).

### 3.2. Níquel

El níquel puede catalizar la telomerización, la diferencia con la catálisis del paladio es que los catalizadores de níquel dan lugar a más subproductos. Algunos catalizadores de níquel importantes que son activos en la telomerización del butadieno son  $[\text{NiCl}_2]$ , difos,  $\text{NaBH}_4$ ;  $[\text{Ni}(\text{acac})_2]$   $\text{PPh}(\text{OPri})_2$ ,  $\text{NaBH}_4$ ;  $[\text{NiCl}_2]$ ,  $\text{PR}_3$ ,  $\text{BuLi}$ ;  $[\text{NiBr}_2]$ ,  $\text{PR}_3$ ,  $\text{NaOPh}$ ;  $[\text{NiL}_4]$ ,  $[\text{NiCp}_2]$ ,  $\text{PR}_3$ ; etc. (Umile, 2015) en estudios recientes, se investigaron los catalizadores Ni/SO<sub>4</sub> en metanol, etanol y para el reformado de alquitrán, dando como resultado una mejora en el rendimiento del gas de síntesis, así como en el reformado de vapor de tolueno (SRT) como compuesto modelo de alquitrán de biomasa sobre Ni/zeolita, Ni-Fe/zeolita y Ni-Fe-Mg/zeolita en términos de supresión de la deposición de coque y mejora de la estabilidad (Ahmed et al, 2018).

Dadas sus aplicaciones prácticas, es esencial asegurar un buen rendimiento catalítico en un amplio rango de variables, como la velocidad espacial, la relación S/C y la temperatura. Sin embargo, sigue existiendo un problema con respecto al catalizador de nido de abeja de Ni desarrollado (Hirano, T. y Xu, Y., 2017). El trabajo presentado en (Huang et al, 2017), tenía como objetivo explorar catalizadores baratos basados en Ni para la despolimerización de lignina Kraft con ácido fórmico a temperaturas más bajas que otros catalizadores. Otro ejemplo es el desarrollo de pilas de combustible de urea que podría establecer una fuente de energía sostenible que es eficiente, silenciosa, respetuosa con el medio ambiente, además, puede aplicarse en campos sin conexión a la red; aunque el catalizador de Ni muestra

un buen rendimiento para la oxidación de la urea, en las pilas de combustible de urea, el rendimiento de la actividad es bajo a escala comercial (Abdelkareem et al, 2018).

En cuanto a las emisiones de GEI, los óxidos de nitrógeno (NOx) generados por los gases de escape de los motores a diésel y los combustibles fósiles del sector industrial, provocan una serie de graves problemas ambientales como la lluvia ácida o el esmog fotoquímico. Por lo tanto, se han desarrollado diferentes métodos para el control de los NO<sub>x</sub>, por medio del catalizador de óxido de Ni-Ce-Ti, que ha demostrado ser selectivo para el NH<sub>3</sub>-SCR de los NOx en un amplio rango de temperaturas (Abdelkareem et al, 2018).

### 3.3. Platino

Algunos catalizadores de metales nobles pueden presentar una elevada actividad catalítica a bajas temperaturas. Por ejemplo, el catalizador de Pt tiene un buen rendimiento en la hidroxigenación del palmitato de metilo, pero su elevado coste y la baja selectividad de los productos alcanos frenan su desarrollo (Chen et al, 2018). Para facilitar las reacciones en una pila de combustible y al mismo tiempo producir más energía eléctrica en una sola pila, es necesario un catalizador, el Pt se utiliza a menudo resultando vital en los catalizadores de varias pilas de combustible e insustituible para las pilas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEM). Sin embargo, el Pt es relativamente caro, lo que aumenta el coste de producción de las pilas de combustible (Hanindriyo et al, 2017).

### 3.4. Paladio

Un estudio de un novedoso catalizador de nanofibra de carbono de Pd se descubrió que era activo en la reducción catalítica del bromato para la purificación del agua. Los resultados del ACV también muestran las vías de optimización de la fabricación de catalizadores basados en CNF/SMF; en comparación con la falta de oportunidades de optimización en el caso del catalizador basado en alúmina. Por lo tanto, podría adoptarse el concepto de catalizadores jerárquicos (Yaseneva et al, 2014).

### 3.5. Catálisis y cuestiones ambientales

La sociedad actual requiere que las nuevas

tecnologías deben tener un impacto mínimo en el ambiente, siendo estos "limpios" en dirección a evitar la generación de subproductos o residuos peligrosos. El desempeño de los catalizadores en la reducción de emisiones nocivas provenientes de pilas de combustibles de hidrógeno, procesos de hidrodesulfuración, generación de energía y tráfico automotor; por ello es importante la limpieza catalítica, ya que se promueve la reducción de la contaminación ambiental (Chorkendorff y Iemantsverdriet, 2003).

Recientemente ha habido mucho interés en el desarrollo de catalizadores con menor impacto ambiental, mediante la obtención de piensos y reactivos a partir de materiales de desecho o incluso de fuentes renovables. Además, la reutilización de los catalizadores para otras reacciones, así como el uso de catalizadores preparados a partir de escorias ricas en CaO, para fijar el CO<sub>2</sub> (Hill, J.M, 2017).

La comprensión de los flujos de materiales en su totalidad puede ayudar a cuantificar los potenciales puntos fuertes de la fuente, gestionar el recurso de forma más adecuada y utilizarlos de manera eficiente, por ejemplo, el uso de esta información basada en el ACV puede guiar a los desarrolladores de catalizadores metálicos en la elección de un metal con el menor impacto ambiental, al diseñar nuevos compuestos catalíticos metálicos. Varios estudios en el ámbito de la química verde y la catálisis sostenible califican las técnicas y los productos como "sostenibles" o "más ecológicos" sin tener en cuenta una herramienta como el ACV o similar. Por lo tanto, esas limitaciones hacen que la evaluación no sea lo suficientemente sólida. Se espera que estas herramientas se apliquen cada vez más en el diseño de catalizadores y procesos químicos para ayudar a evitar consecuencias no deseadas (Umile, 2015).

Una de las propuestas para la aplicación de los catalizadores en tecnologías limpias es en la gasificación, ya que sus propiedades son esenciales ayudando a mejorar la calidad del gas sintético y le confiere una mayor vida útil en cuanto a selectividad, estabilidad y actividad. Los catalizadores de metales alcalinos han demostrado ser más activos en el proceso de gasificación que los catalizadores de metales alcalino-térreos y de transición, debido a que poseen una alta difusividad y una mayor temperatura de descomposición; entre los más representativos

se encuentran el potasio (K) y el sodio (Na), ya que son utilizados en la eliminación del alquitrán y para mejorar la calidad del gas de salida. Entre los catalizadores alcalino-térreos se encuentran el magnesio (Mg) y el calcio (Ca), este último se utiliza para la captura de CO<sub>2</sub>, esto va a ayudar al aumento de las concentraciones de hidrógeno y monóxido de carbono (CO) en el gas sintético (Acevedo et al, 2019).

### 3.6. Propuesta de uso del ACV en el proceso de catálisis

#### 3.6.1. Describir todo el proceso

El ACV se considera uno de los mejores marcos para evaluar los posibles impactos ambientales, debe ser flexible con información actualizada de diferentes campos de la ciencia y permitir una aplicación constante del análisis; asimismo, sus resultados podrían utilizarse para la identificación de un campo específico en lugar de otro. Por lo tanto, el futuro enfoque de estudio de casos podría representar una metodología adecuada (Bobba et al, 2016). El estudio reportó el potencial de las cenizas de combustión generadas a partir del carbón, los neumáticos y los RSU tiene el potencial de ser reciclados como catalizadores a través del proceso de reformado de vapor pirolítico-catalítico, mostrando un rendimiento significativamente mayor en el gas total y H<sub>2</sub> (Al-Rahbi, 2019). Es bien sabido que los residuos de la industria petroquímica provocan cargas ambientales debido a su contenido peligroso como es el caso de los catalizadores gastados; sin embargo, existe una buena oportunidad en el reciclaje de algunos metales base como V, Ni, Co, Mo, representando una oportunidad económica en el aprovechamiento de estos residuos (Akcil et al, 2015).

Para la inmovilización de un catalizador se requieren ligandos bidentados permite la retención del metal en el soporte, además el uso de un ligando en exceso va a suprimir la lixiviación del metal. La mayoría de estos experimentos se lo realizan por lotes, por lo que no representan procesos continuos. Para la determinación de la lixiviación de los metales se requieren mediciones que sean entre 1 a 10 (partes por billón) ppb; debido a que en ciertos procesos se utilizan productos de alto valor, las pérdidas en ppm son económicamente aceptables, pero también se debe tomar en cuenta temas de salud, seguridad y ambiente. La selectividad de los catalizadores está

dominada por la coordinación del ligando, esta permanece idéntica al análogo homogéneo, si son utilizados ligando bidentados quelantes; al utilizar ligandos monodentados se corre el riesgo de obtener especies coordinadas de monofosfinas, debido a que el aislamiento del sitio de los ligandos puede prevenir la biscoordinación (Cole-Hamilton y Tooze, 2006).

#### 3.6.2. Evaluar los elementos del proceso que podrían ser sustituidos

Numerosos trabajos confirman que la conversión de productos de desecho a gran escala en catalizadores solo consume una pequeña fracción de los residuos. Sin embargo, el proceso requiere que el catalizador pueda ser más económico y con menos cargas ambientales cuando se utilizan los residuos. Por ejemplo, si se evitan las cargas asociadas a las emisiones de CO<sub>2</sub>, se sugiere una evaluación económica también. El estudio (Mathers y Meier, 2011) indicó que se pueden lograr reducciones significativas de las emisiones de GEI en un 93% y ahorros de energía en un 96%, respectivamente, en la producción de catalizadores basados en bicarbonato en comparación con los catalizadores convencionales de níquel basados en alúmina.

Paralelamente al creciente interés por la producción de nuevos elementos, se ha desarrollado una amplia investigación sobre las posibles implicaciones medioambientales y sanitarias de su producción y uso; la incertidumbre existente está asociada a los posibles efectos toxicológicos que deben evaluarse para desarrollar políticas de eliminación específicas (Feijoo et al, 2017).

En el estudio "evaluación del ciclo de vida de dos catalizadores utilizados en el proceso de limpieza del gas de síntesis del biocombustible y análisis de la variabilidad en la gasificación" se introdujo el ACV para analizar el rendimiento de la sostenibilidad de la producción de un catalizador metálico frente a un catalizador de bicarbonato delicado. Entre los resultados, se encontró que la producción de bicarbonato tiene una reducción significativa de las emisiones de GEI y de energía que el catalizador metálico, pero la producción de bicarbonato tiene más impactos potenciales en la calidad del ecosistema, en términos generales, presentó menos impactos negativos en la salud humana que la producción del catalizador de fabricación (Jin, 2012).

Los procesos de síntesis de catalizadores dan lugar a la formación de residuos que comprenden principalmente gases de escape, residuos líquidos y una cantidad menor de residuos sólidos. El impacto medioambiental depende en gran medida del proceso de síntesis y de los materiales de partida (Agarski, et al, 2017). Es bastante complicado desglosar los datos para entender completamente los modelos de AVC y, sobre todo, utilizar sus resultados para mejorar los análisis o para gestionar otros nuevos (Bobba et al, 2016).

Los microorganismos presentes en el suelo también actúan en un sin número de reacciones redox siendo estos sus catalizadores, estos utilizan compuestos químicos como aceptores o donadores de electrones incrementando así la velocidad de las reacciones. Dentro de esta categoría se encuentran las bacterias heterótrofas aeróbicas, mismas que son capaces de metabolizar carbono orgánico disponible a través del uso de aceptores de electrones ya sean de nitrógeno inorgánico ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ), óxidos de hierro y magnesio; así también compuestos como  $\text{As}_4^{3-}$  y de  $\text{Se}_4^{3-}$  (Domènech y Peral, 2012).

La ciencia y la ingeniería han creado catalizadores de sílice-alúmina, paredes de sólidos mesoporosos, catalizadores de oxidación multicomponente, entre otros y en un futuro se plantea el uso de catalizadores en el desarrollo de reacciones ultrarrápidas para la generación de energía por combustión catalítica y la producción de moléculas útiles, para ello se necesita que la textura del catalizador sea adaptable a la nueva población de radicales reactivos. Además, se plantea el desarrollo de catalizadores híbridos para mejorar la selectividad de los mismos, además el diseño de catalizadores heteropoliácidos que permiten el aprovechamiento al máximo de su capacidad en reacciones difíciles. Uno de los obstáculos con el desarrollo de los nuevos catalizadores más eficientes son las nuevas formulaciones químicas y texturas que estén adaptados a las técnicas correspondientes; asimismo, las demandas de los nuevos tipos de reactores han permitido desarrollar reactores de flujo inverso y ultrarrápidos, microrreactores y reactores utilizados para fotocatalisis (Regalbutto, 2007).

Hernández C. y Díaz M. 2018, mencionan que el ACV proporciona una oportunidad de mejora en la producción de biodiésel obtenido de aceites vegetales residuales, al cambiar el catalizador homogéneo por

uno heterogéneo basado en zeolita natural, por lo que fue necesaria una evaluación de los impactos ambientales producidos en las diferentes etapas del proceso de producción y además se evaluaron las reacciones de transesterificación tanto en catalizador homogéneo como heterogéneo; obteniéndose como resultado que el catalizador heterogéneo es más selectivo que el catalizador homogéneo, ya que facilita la separación de productos, subproductos, reduce el uso de insumos y la generación de residuos es mínima; así mismo, este tipo de catalizador genera entre un 65% y 95% menos emisiones de contaminantes que un catalizador homogéneo; por lo que tienen un alto potencial de reducción de daños en la capa de ozono, lo cual es causado por el uso de agua destilada (Hernández y Díaz, 2018).

Otro estudio realizado por L.M. Petkovic, D.M. Ginosar, K.C. Burch. 2005, mencionan el uso de fluidos supercríticos como una tecnología de recuperación de catalizadores emergente, que ha sido utilizada en la industria de la refinería y en procesos de alquilación con el uso del fluido supercrítico isobutano para la remoción de hidrocarburos presente en catalizadores desactivados en los que se utilizan principalmente catalizadores de zeolita como mordenita, zeolita y zeolita beta; de los cuales se ha recuperado hasta el 100% de su actividad inicial (Petkovic et al, 2005). Además, este proceso de recuperación puede ser utilizado múltiples veces (Thompson et al, 2005).

### 3.6.2.1. Reciclaje de catalizador con líquidos iónicos

El cambio de los procesos catalíticos homogéneos existentes a la nueva tecnología de líquidos iónicos, permite en algunos casos un mayor rendimiento de los procesos, con una velocidad de reacción mejorada y selectiva; debido a que la recuperación del catalizador es más eficiente y le confiere una mejor compatibilidad ambiental. Una de las limitantes es el costo de los líquidos iónicos para el reciclaje de catalizadores, su competencia con los productos químicos y los actuales catalizadores; además no existen estudios en los que se ha determinado si cabe la posibilidad del reciclaje de estas sustancias y si su vida útil resulta lo suficientemente larga. Las investigaciones realizadas en cuanto a líquidos iónicos se centran en: a) diseños de nuevos ligandos iónicos para la excelente inmovilización de

catalizadores y alta regioselectividad, b) la aplicación exitosa de líquidos iónicos baratos libres de alógenos en procesos de hidroformilación bifásica catalizada por rodio, c) el desarrollo de conceptos inusuales de reacciones multifásicas para hidroformilación, como catálisis en catalizadores SILP y CO<sub>2</sub> líquido / supercrítico iónico. Los líquidos iónicos son una alternativa para la inmovilización de catalizadores homogéneos tanto en procesos de catálisis bifásica líquido-líquido como en catálisis líquida-iónica soportada (SILP); ya que estos al ser no volátiles con un poder de solubilización sintonizable, amplios rangos de líquido, propiedades de coordinación / acidez, pueden ser un disolvente “inocente”, precursor de ligandos, cocatalizador o catalizador; esto va a depender de la combinación específica catión/anión y de la reacción a ser investigada (Cole-Hamilton y Tooze, 2006).

### 3.6.2.2. Nanopartículas soportadas para catálisis homogénea y heterogénea

El uso de nanopartículas soportadas en procesos de catálisis permite la obtención de compuestos químicos y combustibles obtenidos a partir de biomasa con alto valor añadido. Estos son derivados de biopolímeros, así como también de materias renovables, óxidos metálicos (Fe y Cu) que se encuentran soportados sobre materiales porosos y nanopartículas metálicas; además otros catalizadores pueden prepararse controlando sus propiedades singulares como son: tamaño, forma, distribución de nanopartículas, grupos funcionales, entre otros. Este tipo de catalizadores suelen ser mucho más eficientes a nivel industrial y sostenibles con el ambiente. La demanda de energía en el sector del transporte hace que los biocombustibles puedan constituir una parte fundamental en nuestra sociedad; a los cuales se les ha denominado combustibles de segunda generación, ya que estos no compiten con el sector alimentario, disminuyen sus emisiones de CO<sub>2</sub> y otros gases nocivos para la salud y el ambiente; debido a que estos se producen a partir de biomasa y residuos “biorefinería” (Luque, 2010).

La importancia de los nanomateriales yace en la maximización del área específica del catalizador, pero a su vez estos necesitan estar soportados por una partícula de óxido de forma que no se pongan en contacto unos con otros; debido a la inestabilidad

causada por el estado del metal, a los cuales se les denominan catalizadores metálicos soportados, estos pueden ser metálicos o cerámicos con la finalidad de incrementar su superficie específica (Castells, 2012). Muchos de estos catalizadores pueden actuar cuando se disuelven en una fase líquida como son protones, iones hidroxilo, sales o complejos orgánicos metálicos (Zanella, 2014).

Otra de la importancia de las nanopartículas es en el uso de catalizadores de oro manométrico soportado son partículas que poseen un tamaño menor a 5 nm, el mismo es depositado sobre un catalizador óxido metálico suficientemente activo, utilizados en procesos oxidación de CO y en la descontaminación del aire para la reducción de N<sub>2</sub>O y NO<sub>x</sub>, descomposición de ozono y en procesos de oxidación completa de hidrocarburos. Para mejorar su actividad catalítica se diseñan estructuras en forma de soportes que mejoran el anclaje de las partículas de oro haciendo que estas se estabilicen mejorando así la actividad catalítica de los catalizadores dopados con Cobalto; además otro de los factores que influyen en el mejoramiento de la actividad catalítica es el tratamiento térmico de los mismos, a temperaturas cercanas a los 300°C a 1 atm de presión (Reza y Zanella., 2011).

### 3.6.2.3. Tratamiento y disposición final de los catalizadores

La actividad catalítica de los catalizadores se debe a la presencia de un área superficial elevada y centros metálicos activos, los mismos van decreciendo con el paso del tiempo debido a la disminución del área superficial y a las elevadas temperaturas a las que trabaja; provocando la aparición de coque o la disminución en la dispersión de los metales nobles presentes en este, debido a fenómenos de sinterización. La desactivación catalítica se refiere a la pérdida de la actividad catalítica de los catalizadores estas pueden ocurrir por procesos mecánicos, térmicos y químicos, haciendo que estos catalizadores no cumplan con las emisiones de contaminantes requeridas por la legislación, haciendo que estos necesiten un tratamiento y disposición final (Asencio et al, 2008).

Generalmente los catalizadores son retirados de los automotores como fuente de metales nobles (platino, paladio, rodio, entre otros), este tipo

de gestión ocasiona la generación de residuos líquidos y sólidos, ya que son sometidos a procesos hidrometalúrgicos altamente abrasivos y corrosivos para la recuperación de estos metales (Christou et al, 2007). Por lo que se ha propuesto una técnica de regeneración verdadera de estos, evitando tratar los catalizadores como un residuo peligroso y disminuir el coste de inversión en catalizadores nuevos. Entre las técnicas de recuperación se encuentran las térmicas que se basan en provocar la redispersión del metal presente en el catalizador, generándose así en la primera etapa óxidos metálicos que al ser reducidos darán lugar a la formación del clústers metálicos en la superficie de los catalizadores; en esta técnica se emplean gases como: hidrógeno (poco eficiente), aire (elevada eficiencia para altas cargas metálicas) o mezclas de oxígeno-cloro (requiere un tratamiento final para la eliminación de trazas de cloro y la estabilización del catalizador) (Lee T.J., y Kim Y.G., 1984). La técnica de regeneración química se fundamenta en la recuperación catalítica a través del uso de compuestos desactivantes como ácidos orgánicos débiles como el acético, oxálico y cítrico, debido a que estos no van a destruir el sustrato del catalizador (para la remoción de P, Fe, Zn, Cr, Pb, Ni y Cu) y AEDT (para la remoción de Pb, Ca, Zn, Fe, Cu y Ni) (Christou et al, 2007), pero al utilizar este último se necesita un tratamiento de descontaminación

del efluente (complejo AEDT-metal) lo que infiere negativamente al coste económico del proceso y un impacto ambiental severo (Asencio et al, 2008).

Un catalizador gastado debe ser reemplazado para mantener bajo el contenido de metales durante su alimentación, como medida de prevención en la fuente y que el riesgo de generación de impactos ambientales sea mínimo; los análisis de lixiviados EPA 1311 permite la determinación de los catalizadores como un residuo peligroso o no para su gestión y disposición final. Aquellos catalizadores que se encuentren por debajo de los límites permisibles de la normativa antes mencionada, son utilizados como fuentes de materias primas en cementeras para su aprovechamiento y valorización (Suárez et al, 2017).

Los catalizadores al poseer un soporte metálicos pueden ser utilizados para el reciclaje de metales y aquellos que son de soportes cerámicos tienen mayores inconvenientes, que, al no contener gran cantidad del metal catalizador, estos se envían a un horno Clínquer para la extracción del metal; y si esto no es factible, se envía como material para la construcción. Uno de los problemas de la valorización de los catalizadores es la especificidad de estos y los metales que los componen, lo que va a hacer que sus posibilidades de reciclaje aumenten, se muestran las siguientes alternativas de aprovechamiento en la Tabla 1 (Castells, 2012).

**Tabla 1.** Estrategias de valorización y reutilización de catalizadores agotados.

Tipo de catalizador agotado	Estrategia de gestión ambiental		
	Recuperación de metales	Materia Prima en cementeras	Nutrientes de fósforo
Polimerización	-	-	√
Craqueo catalítico (FCC)	√	√	-
Reformado catalítico	√	-	-
Hidrocracking	√	-	-
Hidrotratamiento	√	√	-
Óxido de plomo	√	-	-
Alúmina activa en alquilación	-	√	-
Alúmina activa del proceso Clauss			
Cloruro de cobre	√	-	-
Conversión en cloruros	-	√	-
Reformado de vapor	√	-	-
Unidad de desulfuración (HDS)	√	-	-

Fuente: (Castells, 2012) y (Suárez et al, 2017)

La biocatálisis es una alternativa ambientalmente amigable que se basa en el uso de enzima para la realización de procesos catalíticos; estos procesos utilizan precursores los cuales van a alimentar el biocatalizador, el mismo será transformado a un producto deseado a partir de un limitado número de etapas. Las fuentes de carbono y energía utilizadas en la biocatálisis deben ser fácilmente metabolizables como el azúcar, metano y aceite de soja (Castells, 2012). Siendo la biocatálisis una alternativa viable para la detección, cuantificación y transformación

de contaminantes emergentes a través del uso de enzimas oxidativas como las peroxididasas y lacasas; generando productos con mínima o nula toxicidad, además de una transformación rápida de los compuestos y altas conversiones. A continuación, se muestra en la Figura 2. el avance de las reacciones con y sin enzimas catalizadoras; se observa que en una reacción catalizada utiliza la misma cantidad de sustratos y generan igual cantidad de productos que una reacción no catalizada; utilizando una menor energía de activación. (Torres y Mendez, 2014)

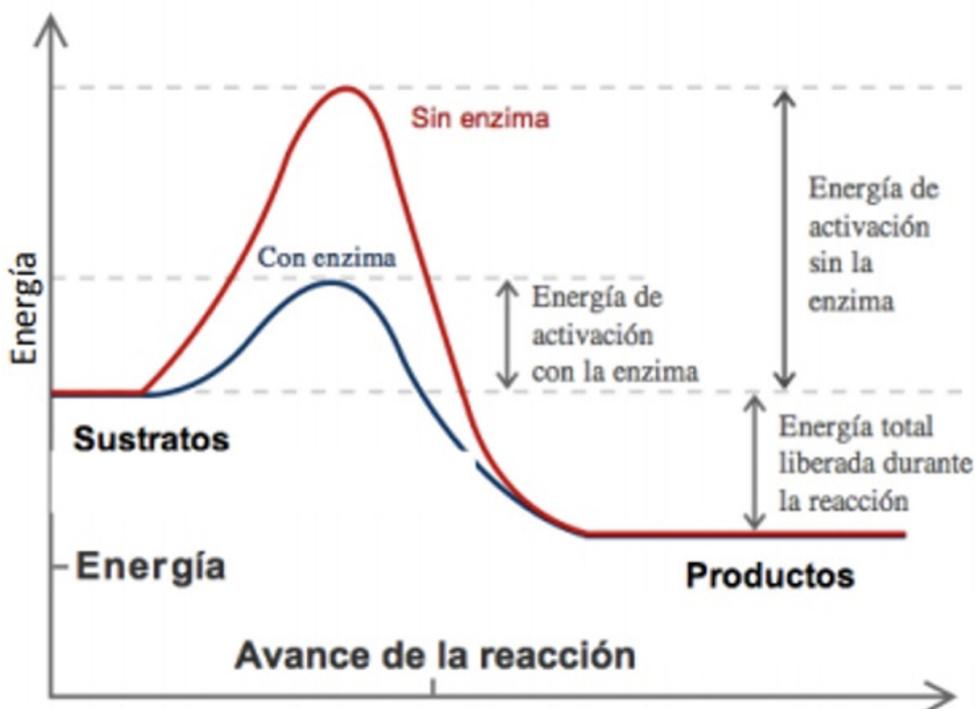


Figura 2. Esquema del cambio en la energía de activación de una reacción catalizada por enzimas comparada con una no catalizada.

Fuente: (Torres y Mendez, 2014)

#### IV. CONCLUSIÓN

Se presentaron una amplia gama de alternativas para reducir los contaminantes atmosféricos nocivos tales como: óxido de azufre y de nitrógeno, pilas de combustible de hidrocarburos y bio-semihíbridos. En un futuro cercano, se pueden utilizar los catalizadores necesarios para apoyar la sostenibilidad en otros sectores como la agricultura, conservación de los bosques, así como la nitrificación y la purificación de hidrocarburos, y la purificación del agua.

Los catalizadores de residuos son necesarios para evaluar los beneficios reales y potenciales del uso de diferentes materiales, de igual manera para diseñar

nuevos catalizadores con mejores componentes. Los catalizadores a base de níquel demuestran un excelente rendimiento en biorremediación de contaminantes emergentes. Son reutilizables, los catalizadores gastados pueden tener un segundo periodo de vida útil, durante el cual los materiales pueden ser expuestos a diversos tratamientos de superficie, y además existe un coste adicional significativo, no hay suficiente literatura a nivel comercial para guiar el proceso. Por lo tanto, un enfoque diferente de maximizar el uso de estos catalizadores es su recuperación, siempre y cuando no se creen materiales peligrosos en el proceso y la

eliminación final sea correcta. Los estudios realizados en los últimos años han tenido una importancia limitada, lo que hace necesario el desarrollo de más investigación en este sector.

## V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdullah, B., N.A. Abd Ghani y D.-V.N. Vo (2017). Recent advances in dry reforming of methane over Ni-based catalysts, *Journal of Cleaner Production*, 162, 170-185. doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.176

Abdelkareem, M.A., et al., (2018). Ni-Cd carbon nanofibers as an effective catalyst for urea fuel cell, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(1), 332-337. doi.org/10.1016/j.jece.2017.12.007

Acevedo J., Arenas E., Zapata Z. y Posso F., (2019). La importancia de los catalizadores en la gasificación de biomasa: Una revisión de la literatura, *Desarrollo e innovación en ingeniería*, 4, 153-171. doi:10.5281/zenodo.3787679.

Agarski, B., et al., (2017). Comparative life cycle assessment of Ni-based catalyst synthesis processes. *Journal of Cleaner Production*, (pp.7-15). doi:10.1016/j.jclepro.2017.06.012

Ahmed, T., et al., (2018). Investigation of Ni/Fe/Mg zeolite-supported catalysts in steam reforming of tar using simulated-toluene as model compound, *Fuel*, 211, 566-571. doi.org/10.1016/j.fuel.2017.09.051

Akcil, A. et al. (2015) "A review of metal recovery from spent petroleum catalysts and ash", *Waste Management*, 45, pp. 420-433. doi: 10.1016/j.wasman.2015.07.007.

Al-Rahbi, A. S. y Williams, P. T. (2019) "Waste ashes as catalysts for the pyrolysis-catalytic steam reforming of biomass for hydrogen-rich gas production", *Journal of Material Cycles and Waste Management. Springer Japan*, 21(5), pp. 1224-1231. doi: 10.1007/s10163-019-00876-8.

Asencio I., Rincón J., Camarillo R. y Martín A., (2008). RECICLADO DE CATALIZADORES DE AUTOMÓVILES ANÁLISIS DE LAS TÉCNICAS

ACTUALES Y PROPUESTAS DE FUTURO, *Red Iberoamericana en gestión y aprovechamiento de residuos*. Recuperado de: <http://www.redisa.net/doc/artSim2008/tratamiento/A3.pdf>

Bobba, S., et al. (2016), LCA of tungsten disulphide (WS<sub>2</sub>) nano-particles synthesis: state of art and from-cradle-to-gate LCA, *Journal of Cleaner Production*, (Supplement C), 1478-1484. doi:10.1016/j.jclepro.2016.07.091

Brown A., (2005). Consideraciones sobre el estudio de catálisis homogénea y heterogénea, *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 39(1), 10-14. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120659002.pdf>

Castells, X. (2012). *Reciclaje de residuos industriales "Residuos sólidos urbanos y fangos de depuradoras"* (Segunda ed.). Madrid, España: Diaz de Santos. Obtenido de [https://books.google.com.ec/books/about/Reciclaje\\_de\\_residuos\\_industriales.html?id=8yWSZEbQSXgC&printsec=frontcover&source=kp\\_read\\_button&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Hidrotratamiento&f=false](https://books.google.com.ec/books/about/Reciclaje_de_residuos_industriales.html?id=8yWSZEbQSXgC&printsec=frontcover&source=kp_read_button&redir_esc=y#v=onepage&q=Hidrotratamiento&f=false)

Chen, S., et al, (2018). Study of catalytic hydrodeoxygenation performance of Ni catalysts: Efectos del método preparado, *Renewable Energy*, 115, 1109- 1117. doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.028

Chorkendorff I. y Iemantsverdriet J., (2003), *Concepts of Modern Catalysis and Kinetics, Weinheim, Alemania, WILEY- VCH Verlag GmbH & Co. KGaA*, (pp: 377).

Christou S.Y., Birgersson H., Efstathiou A.M., (2007). Reactivation of severely aged commercial three-way catalysts by washing with weak EDTA and oxalic acid solutions. *Applied Catalysis B: Environmental*, 71 (3-4), 185-198. Doi: 10.1016/j.apcatb.2006.09.008

Cole-Hamilton D. J. y Tooze R. P., (2006) *Catalysis by Metal Complexes Volume 30, de CATALYST SEPARATION, RECOVERY AND RECYCLING Chemistry and Process Design*,

Dordrecht, Holanda, Springer, (pp: 206-209).

Damyanova, S., et al, (2018). Structure and surface properties of ceria-modified Ni- based catalysts for hydrogen production, *Applied Catalysis B: Ambiental*, 225, 340-353. doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.12.002

Domènech X. y Peral J., (2012), *Química Ambiental de sistemas terrestres, CAPÍTULO 4 Comportamiento y destino de los contaminantes en los sistemas terrestres, Barcelona, España, Reverté. S.A., (pp: 152)*. Recuperado de: <https://books.google.com.ec/books?id=S4bjFOEXRzMC&pg=PA180&dq=X.+Dom%C3%A8nech+y+J.+Peral+Comportamiento+y+destino+de+los+contaminantes+en+los+sistemas+terrestres&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjnx8LF4K7wAhXDc98KHXJtBXoQ6AEwAHoECAAQAg#v=onepage&q=X.%20Dom%C3%A8nech%20y%20J.%20Peral%20Comportamiento%20y%20destino%20de%20los%20contaminantes%20en%20los%20sistemas%20terrestres&f=false>

Feijoo, S., et al, (2017). Comparative life cycle assessment of different synthesis routes of magnetic nanoparticles, *Journal of Cleaner Production*, 143, 528-538. doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.079

Hanindriyo, A.T., et al., (2017). Computational Design of Ni-Zn Based Catalyst for Direct Hydrazine Fuel Cell Catalyst Using Density Functional Theory, *Procedia Engineering*, 170, 148-153. doi.org/10.1016/j.jece.2017.12.007

Hernández C. (2018), Repositorio Digital Universidad Técnica del Norte. Recuperado de: <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/8090/2/ARTÍCULO.pdf>

Hernández S. y Diaz M. d. L., (2018). EVALUACIÓN DE UN PROCESO INDUSTRIAL DE PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA, *Revista internacional de contaminación ambiental*, 34 (3), 453-465. doi: 10.20937/rica.2018.34.03.08

Hill, J.M., Sustainable and/or waste sources for catalysts: porous carbon development and

gasification. *Catalysis Today*, 2017. 285: p. 204-210

Hirano, T. y Xu, Y., (2017). Catalytic properties of a pure Ni coil catalyst for methane steam reforming, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(52), 30621-30629. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.135

Huang, S., et al., (2017). Reductive depolymerization of kraft lignin with formic acid at low temperatures using inexpensive supported Ni-based catalysts, *Fuel*, 209, 579-586. doi.org/10.1016/j.fuel.2017.08.031

Jin, E. (2012), LIFE CYCLE ASSESSMENT OF TWO CATALYSTS USED IN THE BIOFUEL SYNGAS CLEANING PROCESS AND ANALYSIS OF VARIABILITY IN GASIFICATION, Oklahoma, United State. Recuperado de: [https://shareok.org/bitstream/handle/11244/14910/Jin\\_okstate\\_0664M\\_13506.pdf?sequence=1](https://shareok.org/bitstream/handle/11244/14910/Jin_okstate_0664M_13506.pdf?sequence=1)

Lee T.J., y Kim Y.G., (1984). Redispersion of Supported Platinum Catalysts. *J. Catal.* 90 (2), 279-291. doi: 10.1016/0021-9517(84)90256-2

Luque R., (2010). Catalizadores de diseño para la producción de compuestos químicos, *Dialnet*, 106(4), 296-303. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3347192>

Mathers, R.T. y Meier, M.A.R., (2011). *Green Polymerization Methods: Renewable Starting Materials, Catalysis and Waste Reduction*, Wiley. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.135

Mu, D., et al, (2010). Comparative life cycle assessment of lignocellulosic ethanol production: biochemical versus thermochemical conversion, *Environ Manage.* 46(4): p. 565-578. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00267-010-9494-2>

Peng, P., et al., (2017), Ru-based multifunctional mesoporous catalyst for low-pressure and non-thermal plasma synthesis of ammonia, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(30), 19056-19066. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.06.118

- Petkovic L.M., Ginosar D.M., Burch K.C., (2005). Supercritical Fluid Removal of Hydrocarbons Adsorbed on Wide-Pore Zeolite Catalysts. *J. Catal.* 234 (2), 328- 339. doi: 10.1016/j.jcat.2005.06.027
- Regalbuto J., (2007), *CATALYST PREPARATION Science and Engineering*, Boca Raton, Estados Unidos, CRC PressTaylor & Francis Group, (pp: 449-451).
- Reza, O. A., y Zanella., R. (2011). "Síntesis, caracterización y pruebas de actividad de catalizadores compuestos de nanopartículas de oro soportadas en TiO<sub>2</sub> dopado con Itrio y Cobalto". Obtenido de NanoMe'11 es el IV Encuentro Internacional e Interdisciplinario en Nanociencia y Nanotecnología organizado por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) Recuperado de: <https://www.ceiich.unam.mx/nanomex2011/MemoriasNanomex/obt%20y%20caract%20PDF/56-OR.pdf>
- Suárez, D., Coral, K., y Gallegos, W. (2017). estrategias de gestión ambiental para el manejo y disposición final del catalizador gastado de la unidad de craqueo catalítico fluidizado (FCC) generado en una refinería estatal de Ecuador. *Revista de la Universidad Internacional del Ecuador, INNOVA Research Journal*, 28-44.
- Thompson D.N., Ginosar D.M., Burch K.C., (2005). Regeneration of a Deactivated USY Alkylation Catalyst Using Supercritical Isobutane. *Applied Catalysis A: General*, 279(1-2), 109-116. doi: 10.1016/j.apcata.2004.10.018
- Torres, E. y. Méndez A. (2014). Biocatálisis Ambiental: Detección, cuantificación y tratamiento de. BUAP, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México. Recuperado de: <https://icup.buap.mx/sites/default/files/revista/2014/01/biocatalisis.pdf>
- Umile, T.P., (2015), *Catalysis for Sustainability: Goals, Challenges, and Impacts. 8 Life Cycle Thinking Informs Catalysis Choice and Green Chemistry*. CRC Press. Recuperado de: [https://scholar.google.com/ec/scholar?q=Catalysis+for+Sustainability:+Goals,+Challenges,+and+Impacts.+8+Life+Cycle+Thinking+Informs+Catalysis+Choice+and+Green&hl=es&as\\_sdt=0&as\\_vis=1&oi=scholart](https://scholar.google.com/ec/scholar?q=Catalysis+for+Sustainability:+Goals,+Challenges,+and+Impacts.+8+Life+Cycle+Thinking+Informs+Catalysis+Choice+and+Green&hl=es&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholart)
- Yaseneva, P., et al., Efficient reduction of bromates using carbon nanofibre supported catalysts: Estudio experimental y de evaluación comparativa del ciclo de vida. *Chemical Engineering Journal*, 2014. 248: p. 230-241. doi:10.1016/j.cej.2014.03.034
- Zanella R., (2014). Aplicación de los nanomateriales en catálisis\*, *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 7 (12), 66-82. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/57163>