

Artículo Científico.

Síntesis experimental de una solución de Urea grado Automotriz para vehículos de motor de combustión a Diésel aplicado como aditivo para la reducción de emisiones de Óxido de Nitrógeno según normativa EURO

Experimental synthesis of an automotive grade urea solution for Diesel combustion engine vehicles applied as an additive for the reduction of nitrogen oxide emissions according to EURO regulations

 Sergio Weimar Lazarte Mercado¹  Carla Alejandra Apaza Rojas²
 Jaime Hamel Fonseca³

Citar como: Lazarte Mercado, S. W., Apaza Rojas, C. A., & Hamel Fonseca, J. (2023). Síntesis Experimental de una Solución de Urea grado Automotriz para Vehículos de motor de Combustión a Diésel Aplicado como Aditivo para la Reducción de Emisiones de Óxido de Nitrógeno según Normativa Euro: Experimental synthesis of an automotive grade urea solution for Diesel combustion engine vehicles applied as an additive for the reduction of nitrogen oxide emissions according to EURO regulations. *Journal Boliviano De Ciencias*, 19(Especial), 131-149 <https://doi.org/10.52428/20758944.v19iEspecial.453>

Revisado: 26/06/2023
Aceptado: 27/06/2023
Publicado: 28/06/2023

Declaración: Derechos de autor 2023 Sergio Weimar Lazarte Mercado, Carla Alejandra Apaza Rojas, Jaime Hamel Fonseca
Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).
Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



1. Ing. Petróleo, Gas y Energías. Univalle. Cochabamba. Bolivia. sergiolazarte1@hotmail.com
2. Ing. Química. Univalle. Cochabamba. Bolivia. capazar@univalle.edu
3. Lic. Química. Univalle. Cochabamba. Bolivia. jhamelf@univalle.edu

RESUMEN

El presente estudio, muestra la síntesis del aditivo de solución de urea grado automotriz o AdBlue, a partir de la urea granulada proveniente de la planta petroquímica de amoniaco y urea (PAU), como propuesta de aplicación secundaria a esta materia prima. El análisis de caracterización de urea YPFB mostró los siguientes resultados: contenido de nitrógeno de 46,2%, densidad aparente 719,33 kg/m³, contenido Biuret 0,93% w/w y Formaldehído 0,61% w/w. Se caracterizó el aditivo conforme a la normativa ISO 22241:2019, obteniendo los siguientes resultados: concentración de urea 32,5%, densidad 1092 g/ml, índice de refracción 1,3836, Biuret 0,31% w/w, aldehídos 2816,80 mg/kg, pH 9,4 a 20 °C y alcalinidad 0,007% w/w, que a excepción del contenido de Biuret y Aldehídos, el aditivo se encuentra enmarcado dentro especificaciones de dicha normativa. Se verificó el desempeño del aditivo sintetizado en laboratorios de química y petróleo de la Universidad Privada del Valle bajo el nombre de Blue Truck frente a otras marcas comerciales importadas AdBlue y BlueDEF, certificadas por la Verband der Automobilindustrie (VDA). Estos aditivos fueron probados en un camión con especificación EURO V, mostrando una reducción de gases de NO_x por debajo del valor especificado de la normativa EURO V, que es de 2 g/kWh para NO_x.

Palabras clave: AdBlue, Urea, Diesel, Óxidos de Nitrógeno (NO_x), SCR.

ABSTRACT

This study shows the synthesis of the automotive grade urea solution additive or AdBlue, from granulated urea from the ammonia and urea petrochemical plant (PAU), as a proposed secondary application to this raw material. The YPFB urea characterization analysis showed the following results: nitrogen content of 46.2%, apparent density 719.33 kg/m³, Biuret content 0.93% w/w and Formaldehyde content 0.61% w/w. The additive was characterized according

to ISO 22241:2019, obtaining the following results: urea concentration 32.5%, density 1092 g/ml, refractive index 1.3836, Biuret 0.31% w/w, aldehydes 2816.80 mg/kg, pH 9.4 at 20 °C and alkalinity 0.007% w/w, that except for the Biuret and Aldehydes content, the additive is framed within specifications of the mentioned standard. The performance of the additive synthesized in the Universidad Privada del Valle chemistry and petroleum laboratories under the name Blue Truck was verified against other imported commercial brands AdBlue and BlueDEF, both certified by the Verband der Automobilindustrie (VDA). These additives were tested in a truck with EURO V specification, showing a reduction of NO_x gases below the specified value of the EURO V regulation, which is 2 g/kWh for NO_x.

Keywords: AdBlue, Urea, Diesel, Nitrogen Oxides (NO_x), SCR.

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con lo señalado por Usame Demir (2021), la producción de vehículos Diésel de 2000 a 2019 aumentó en un 54% y persiste la demanda debido a que los motores Diésel ofrecen alta eficiencia, durabilidad y confiabilidad, así como bajos costos operativos. Estas importantes características lo convierten en el motor elegido, especialmente para vehículos pesados (Ibrahim Aslan, 2015). Sin embargo, las emisiones de los vehículos pesados Diésel (HDV, acrónimo en inglés) contienen hidrocarburos no quemados (Hcs), monóxido de carbono (CO), material particulado (PM) y óxidos de nitrógeno (NO_x) (Ante Kozina, 2020), que son los principales y más dañinos contaminantes ambientales emitidos por el sector del transporte (Ming-Feng Hsieh, 2012).

Las partículas de los gases de escape de los motores Diésel, conforme lo señalado por Kegl (2020), pueden clasificarse, debido a la distribución típica del tamaño de las partículas, en cinco tamaños de diámetro aerodinámico: grandes (>10 μm.), gruesas (2,5-10 μm o PM₁₀), finas (0,1-2,5 μm o PM_{2,5}), ultrafinas (50-100 nm) y nanométricas (<50 nm.). Las emisiones de partículas de los motores Diésel son peligrosas, entre las cuales las partículas nucleares de tamaño de partícula (<50 nm) constituyen la mayoría del material particulado total, dado que pueden ingresar a los pulmones y la sangre a través del tracto respiratorio (Yunhua Zhang, 2024), también ocasiona la contaminación del aire por partículas urbanas y regionales (Louise Gren, 2021).

En este sentido, los métodos más adecuados son los sistemas de postratamiento de gases de escape y los sistemas de inyección de combustible. Las principales emisiones contaminantes son el PM y los NO_x de los motores de combustión interna. Por lo tanto, existen límites en las emisiones de los motores Diésel, como los motores Diésel móviles de servicio pesado (Hakan Caliskan, 2017).

En consecuencia, de acuerdo con lo señalado por Selleri (2022), el Parlamento de la Unión Europea emitió una serie de directivas y reglamentos, denominadas EURO para vehículos pesados Diésel (HDV, acrónimo en inglés), cada norma de emisiones conduce a tecnologías de control de emisiones más avanzadas y eficientes. La actual norma de emisiones EURO VI reduce aproximadamente un 95% de los principales contaminantes ambientales de los vehículos pesados a Diésel, siendo material particulado (PM_{2,5}) y (NO_x) respecto a valores de referencia de la norma EURO II (Yihao Xie, 2020).

Estas normas de emisiones se han revisado cada cierto tiempo, en vista de la amenaza que supone para la atmósfera, tal como se ilustra en la Tabla 1 (EUR-Lex, 2022), (Tommaso Selleri A. D., 2021).

Tabla 1. Evolución de la norma EURO

Emisión (g/kWh)	EURO I	EURO II	EURO III	EURO IV	EURO V	EURO VI	EURO VI (*)
Año	1992	1998	2000	2005	2008	2013	2022
NO _x	8	7	5	3,5	2	0,4	0,35

Fuente: EUR-Lex, 2022.

Nota: La fecha propuesta para la entrada en vigor de la norma EURO VII es el 01 de julio de 2025 (DieselNET, 2022).

Para cumplir con las exigencias de reducción de gases de escape emitidos por vehículos pesados Diésel, se incorporaron tecnologías de postratamiento de gases de escape como recirculación de gases de escape (EGR), sistema de inyección de combustible controlado electrónicamente y sistema de Reducción Catalítica Selectiva (SCR), tecnología aplicada para reducir los NO_x mediante el amoniaco (NH₃) como agente reductor (Filip Kuternowski, 2020). Adicionalmente, de acuerdo con lo señalado por Kegl (2020) otras de las tecnologías más prometedoras que pueden reducir la liberación de emisiones nocivas al medio ambiente son combinaciones de: catalizador de oxidación Diesel (DOC), trampa de NO_x pobre (LNT) y filtros de partículas Diésel (DPF). La tecnología de reducción catalítica selectiva (SCR) para aliviar las emisiones de NO_x en el tubo de escape, es combinada con filtros de partículas Diésel (DPF) para la reducción de PM y catalizadores de oxidación Diésel (DOC) para la oxidación de productos de combustión incompletos. Asimismo, la adopción de SCR reduce significativamente las emisiones de NO_x y, como algunos investigadores afirman, los NO_x de los HDV podrían ser en algunos casos inferiores a los de los vehículos ligeros (LDV, acrónimo en inglés), según Grigoratos (2019).

SCR es un sistema avanzado de tecnología y activo de control de emisiones que reduce las emisiones NO_x del tubo de escape hasta niveles cercanos a cero en los vehículos y equipos de nueva generación con motor Diésel. Los gases de escape calientes salen del motor y entran en el sistema SCR, donde se rocía urea acuosa o Líquido de Escape Diésel (DEF, acrónimo en inglés) sobre un catalizador especial (Diesel Technology Forum, 2023).

Como señala B. Ashok (2022), normalmente, los sistemas SCR convencionales, que utilizan urea como agente reductor, son capaces de controlar entre el 70% y el 90% de las emisiones de NO_x y la eficacia del control de dichas emisiones depende del tipo de catalizador y agente reductor utilizado frente al volumen de gases emitidos.

De acuerdo con lo señalado por Ligang Tan (2017), la tecnología SCR aplicada a vehículos pesados Diésel es la tecnología urea-SCR, siendo la más favorable para la reducción de NO_x. Esta tecnología requiere de una solución de urea en agua, que actúa como agente reductor de NO_x y es inyectado en los gases de escape calientes

(Boxi Shen, 2017). La solución de urea-agua es el precursor del amoníaco (NH_3), este reacciona con los NO_x convirtiéndolo en nitrógeno gaseoso (N_2) y vapor de agua (H_2O), ambos compuestos inertes para el medio ambiente (Shahariar, 2018).

Las emisiones de NO_x , que incluyen óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO_2), óxido nitroso (N_2O), pentóxido de di nitrógeno (N_2O_5), entre otros, y generalmente se refieren a NO y NO_2 , no son constantes, por los cambios de carga y velocidad y producen diferentes composiciones de gases de escape. En consecuencia, varían las condiciones termodinámicas, y el sistema de inyección del agente reductor se ajusta continuamente para mantener bajos niveles de emisiones de NO_x (Guevara-Zavala, 2018).

Para que la reducción de NO_x funcione de manera eficaz dentro del sistema SCR, la urea debe descomponerse en amoníaco (M. Börnhorst, 2021). Las principales reacciones químicas que ocurren en el catalizador SCR se detallan a continuación en la Tabla 2 (Guevara-Zavala, 2018).

Tabla 2. Reacción dentro el sistema SCR

Reacción de Hidrólisis	$(\text{NH}_2) * 2 \text{CO}_{(l)} \rightarrow \text{HNCO}_{(g)} + \text{NH}_3_{(g)}$ $\text{HNCO}_{(g)} + \text{H}_2\text{O}_{(v)} \rightarrow \text{NH}_3_{(g)} + \text{CO}_{2(g)}$
Reacción en SCR	$8\text{NH}_3_{(g)} + 6\text{NO}_2_{(g)} \rightarrow 7\text{N}_2_{(g)} + 12\text{H}_2\text{O}_{(g)}$ $4\text{NH}_3_{(g)} + 4\text{NO}_{(g)} + \text{O}_2_{(g)} \rightarrow 4\text{N}_2_{(g)} + 6\text{H}_2\text{O}_{(g)}$ $2\text{NH}_3_{(g)} + \text{NO}_{(g)} + \text{NO}_2_{(g)} \rightarrow 2\text{N}_2_{(g)} + 3\text{H}_2\text{O}_{(g)}$
Reacción de Oxidación	$4\text{NH}_3_{(g)} + 3\text{O}_2_{(g)} \rightarrow 2\text{N}_2_{(g)} + 6\text{H}_2\text{O}_{(g)}$

Fuente: Guevara-Zavala, 2018.

Los NO_x son producto de la reacción entre el nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2), los motores Diésel para quemar el combustible utilizan aire caliente altamente comprimido. Normalmente, en este proceso, el nitrógeno del aire no reacciona con el oxígeno de la cámara de combustión. Sin embargo, a temperaturas superiores a 1600 °C el nitrógeno reacciona con el oxígeno y produce NO_x . Por lo tanto, las principales fuentes de generación de NO_x son la temperatura y la concentración de oxígeno durante la combustión (Ibrahim Aslan, 2015).

Las emisiones de NO_x como monóxido de nitrógeno (NO) y dióxido de nitrógeno (N_2O), son considerados perjudiciales para el medio ambiente, debido a que provocan lluvia ácida, destruyen el equilibrio de la formación natural de ozono (O_3) provocando un aumento en la incidencia de enfermedades humanas, como el cáncer de piel. Un análisis de la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) informó que un tercio de las emisiones totales de NO_x son por parte del transporte (Hoon Lee, 2016).

Por tanto, la solución de urea grado automotriz o AdBlue al ser una solución acuosa de urea compuesta por 32,5% de urea de alta pureza y 67,5% de agua desionizada, tiene como propósito la reducción de gases NO_x en vehículos Diésel. AdBlue es una marca registrada de Verband der Automobilindustrie (VDA) y la norma ISO 22241 describe los límites de composición, análisis de los métodos, almacenamiento

y transporte. Cumpliendo con dicha normativa se logra la certificación para la fabricación y comercialización del aditivo (Verband der Automobilindustrie, 2020).

El aditivo AdBlue debe cumplir con la concentración de urea determinada por la ISO 22241, debido a que los catalizadores de SCR están diseñados para trabajar a una determinada concentración de urea, precisamente de 32,5% w/w, debido a que la eficiencia del sistema SCR en la reducción de NO_x depende principalmente de este parámetro, la concentración debe mantenerse con un límite permisible de $\pm 1,5\%$ que puede verse afectado durante el almacenaje en los vehículos Diésel (PalaniKumar Gurusamy, 2017).

Otras metodologías para la determinación de la concentración de urea en el aditivo, son el análisis de regresión multidimensional (Adam Polcar, 2016), y de acuerdo con lo señalado por Fojtíková, el método de titulación potenciométrica y la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC, acrónimo en inglés).

Un punto importante en el aditivo es el contenido de Biuret, debido a que la reacción de hidrólisis sucede lentamente, ocasionando que el ácido isocianico HNCO reaccione con la urea sin descomponerse, dando origen a compuestos no deseados como Melamina, Biuret, Amelina, Triuret, Ácido Cianúrico y Ammelide (Shahariar, 2018). De acuerdo con lo señalado por Gierth (2022), el subproducto Biuret se descompone solo por encima de los $180\text{ }^\circ\text{C}$ y el Ácido Cianúrico por encima de los $300\text{ }^\circ\text{C}$, que influye en mayor producción de estos subproductos. Por otro lado, estos compuestos se acumulan en las paredes del tubo de escape, en el inyector y en la superficie del catalizador, provocando un aumento en la contrapresión del motor, impidiendo el flujo de los gases de escape y reduciendo la conversión de NO_x , problema que se origina principalmente a temperaturas menores de $100\text{ }^\circ\text{C}$.

Stamicarbon es una marca líder mundial en el diseño y desarrollo de plantas de urea y licencias de tecnologías para la industria de la nutrición y plantas fertilizantes. Actualmente, existen tres métodos diferentes para producir AdBlue (Stamicarbon, 2017):

- a) Dilución de Gránulos de urea en agua desionizada
- b) Dilución de Polvo de urea evaporado en seco en agua desionizada
- c) Directamente de una solución acuosa de urea

En Bolivia la tecnología aplicada en la Planta Petroquímica de Amoniaco y Urea (PAU) operada por Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos (YPFB) para producir urea granulada es TOYO Engineering, que por medio de la reacción de amoniaco y dióxido de carbono y un proceso de deshidratación obtiene la síntesis de urea, para luego pasar al proceso de concentración, evaporación y granulación (Toyo Engineering Corporation, 2012).

De acuerdo con lo señalado por Meessen (2014), dentro de las reacciones de obtención de la síntesis de urea, sucede una reacción no deseada que por acción de la temperatura se produce el compuesto Biuret, causado por la unión de dos moléculas de urea y la liberación de una molécula de amoniaco. Por tanto, superando el punto de fusión de la urea, de $132\text{ }^\circ\text{C}$ se produce el Biuret afectando la composición final del producto (Denghui Wang, 2019).

El contenido de Biuret es un indicador de la calidad de la urea para la venta. Una especificación estándar mundial de Biuret en urea fertilizante es 1% w/w. Para aplicaciones como solución de urea, este parámetro debe ser mucho menor. Una forma de reducirlo en la composición de la urea es la adición de un exceso de amoníaco en la corriente de la síntesis de urea (United States Patente n° US 10,526,281 B2, 2020).

Otro componente de la urea granulada es el contenido de Formaldehído. La presencia de este componente es atribuible a la finalidad que se le da a la materia prima, debido a que el Formaldehído favorece en la dureza del grano y mantiene el contenido de nitrógeno en su almacenamiento. La urea presenta un contenido de nitrógeno de 46%.

Como Bolivia incursionó en la producción de urea para el sector agrícola, el presente estudio pretende dar una aplicación secundaria a la materia prima producida en la PAU y que se encuentra disponible en el país, sintetizando un aditivo para los vehículos fabricados bajo normativa EURO que circulan dentro de su parque automotor.

2. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

2.1 Especificaciones de Materias Primas Utilizadas

La urea granulada para la síntesis del aditivo presenta las especificaciones descritas en la Tabla 3. Asimismo, las especificaciones de materias primas de diferente procedencia se detallan, para evidenciar las diferencias de pureza. Por otro lado, se consideraron lotes diferentes de urea YPFB de la gestión 2019 y 2021.

Tabla 3. Especificaciones de Materias Primas

Especificación	Urea granulada Bolivia (PAU, YPFB) 2019	Urea granulada Bolivia (PAU, YPFB) 2021	Urea p.a. Scharlau	Urea granulada Perú (Romero Fertilizantes)
Nitrógeno Total	46,4%	46,3%	46%	46%
Fósforo	-	-	-	0%
Potasio	-	-	-	0%
Amoníaco Libre	55 ppm	4,49 ppm	-	-
Contenido de Biuret	0,70%	0,75%	-	-
Contenido de Humedad	0,30%	0,27%	-	-
Contenido de Formaldehído	0,53%	0,75%	-	-
Densidad a granel esperada	723 kg/m ³	697 kg/m ³	750 kg/m ³	-

Fuente: YPFB Refinación (2019, 2021), Scharlau (2021), Romero Fertilizantes (2021).

2.2 Caracterización de Materias Primas

Los parámetros de las materias primas señaladas en la Tabla 3, fueron analizadas bajo técnicas y normativas internacionales descritas en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros analizados de Urea YPFB, Urea Perú y Urea p.a.

Variables	Normativa
Densidad Aparente	Norma Venezolana NTE INEN – ISO 7837:2014
Contenido de Nitrógeno	Norma Venezolana COVENIN 1138-2018
Contenido de Biuret	ISO 22241-2; Anexo E.
Contenido de Formaldehído	ISO 22241-2; Anexo F.
Contenido de Humedad	Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 222:2013

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los métodos aplicados para la caracterización de materia prima, se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 5. Caracterización de Materia Prima

Parámetros	Unidad	Urea YPFB	Urea Perú	Urea p.a.
Densidad Aparente	Kg/m ³	719,33	713,77	750
Contenido de Biuret	% w/w	0,934	0,846	0,0183
Contenido de Humedad	%	0,14	0,23	0,07
Contenido de Nitrógeno	%	46,19	46,12	46,0
Contenido de Formaldehído	mg/kg	6218,62	3839,30	0,03

Fuente: Elaboración propia.

Considerando los resultados de la urea YPFB obtenidos en laboratorio, se procedió a la síntesis del aditivo.

2.2 Síntesis del Aditivo

2.2.1 Demanda del Aditivo en el Departamento de Cochabamba

Hoy en día los camiones EURO del departamento buscan formas de anular los sistemas (SCR), debido al costo del aditivo AdBlue, lo que implica un mayor costo operacional del vehículo.

Para determinar el tamaño de muestra, se recurrió a la fórmula estadística de Murray y Larry para una población finita, con la que se obtuvo el número de encuestas a realizar para determinar la demanda del aditivo y las marcas comerciales en el departamento. En la Tabla 6 se muestra la fórmula aplicada.

Tabla 6. Sondeo de demanda del aditivo en el departamento de Cochabamba

Técnica Aplicada	Fórmula
Método Murray y Larry	$n = \frac{N * Z^2 * \sigma^2}{(N - 1) * e^2 + Z^2 * \sigma^2}$

Fuente: Elaboración propia.

Del total de 90 encuestas, se identificó que 34 camiones utilizan el aditivo AdBlue y los restantes 56 ya no lo utilizan. Además de que los aditivos más consumidos por los usuarios son AdBlue y BlueDEF.

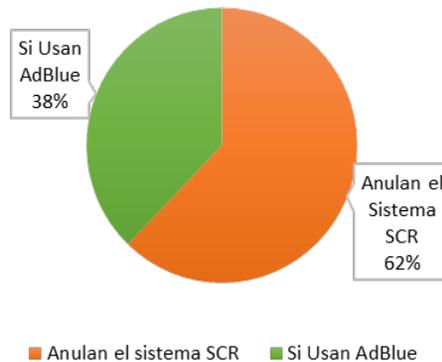


Figura 1. Demanda del Aditivo. Fuente: Elaboración propia.

2.2.2 Parámetros de Sintetización del Aditivo

Durante el proceso de síntesis del aditivo, se observó una dependencia de la temperatura en función de la velocidad de agitación. Por lo que se analizó este parámetro de producción, con el fin de determinar la velocidad de agitación adecuada para el proceso, en la Tabla 7 se describe el equipo utilizado.

Tabla 7. Parámetros de análisis de velocidad de agitación

Unidad de Observación	Variabes	Técnica Aplicada
Blue Truck	Velocidad de agitación	Agitador Magnético MSH 420 Termocupla Tipo T

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 2 se aprecia la incidencia de la temperatura en la velocidad de agitación.

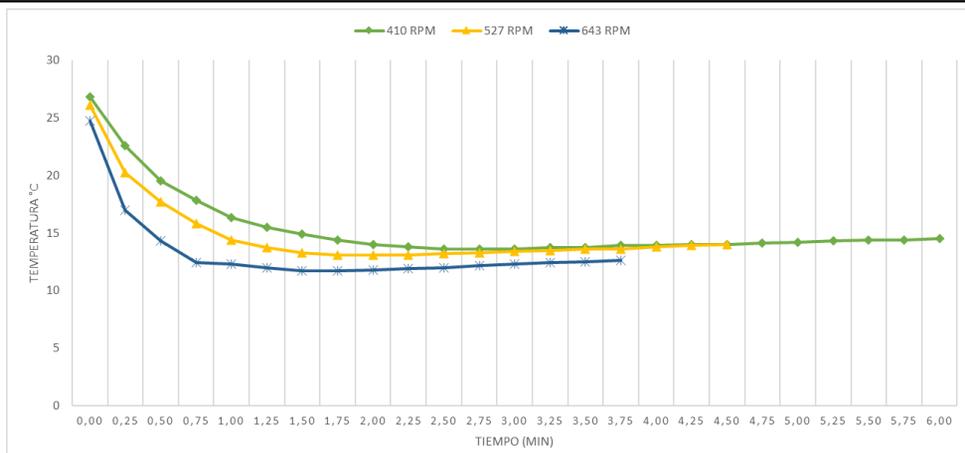


Figura 2. Efecto de la temperatura en la velocidad de agitación

Fuente: Elaboración propia.

El método para determinar la concentración de la urea propuesto por la norma ISO 22241-2 (2019) Anexo C, es determinado por fórmula por medio del índice de refracción. Se realizó una curva de calibración de índice de refracción respecto a la concentración de urea, obtenido con urea p.a.



Figura 3. Curva de Calibración

Fuente: Elaboración propia.

2.2.3 Caracterización del aditivo según normativa ISO 22241

El aditivo Blue Truck sintetizado, requiere de agua de alta pureza, por lo que se utilizó agua de ósmosis inversa con las especificaciones descritas en la Tabla 8.

Tabla 8. Especificaciones de Agua de Ósmosis Inversa

Especificación	Valor
pH	6,09
Sólidos Totales Disueltos (TDS)	0,92 ppm
Conductividad	0,46 μ S/cm
Metales Pesados	0 ppm

Fuente: Elaboración propia.

El aditivo sintetizado en laboratorio bajo el nombre Blue Truck fue analizado con el aditivo AdBlue y BlueDEF. Estos aditivos fueron analizados bajo la normativa ISO 22241-2:2019 Diesel Engines, NO_x reduction agent AUS32 - Part 2: Test Methods, descritos en la Tabla 9.

Tabla 9. Parámetros Analizados de los aditivos

Variables a Analizar	Normativa
Concentración de urea	ISO 22241-2; Anexo B.
Índice de Refracción	Norma ASTM D1747 y ISO 22241-2; Anexo C.
Contenido de Biuret	ISO 22241-2; Anexo E.
Contenido de Aldehídos	ISO 22241-2; Anexo F.
Alcalinidad como NH ₃	ISO 22241-2; Anexo D.
Densidad	ISO 386
pH	Método Potenciométrico

Fuente: Elaboración propia

Los reactivos utilizados para las pruebas de análisis y caracterización de las diferentes materias primas y aditivos son descritos en la Tabla 10.

Tabla 10. Especificaciones de Reactivos

Reactivo	Concentración	Industria
Ácido Sulfúrico	95-97%	Merck
Ácido Clorhídrico	37%	Merck
Hidróxido de Sodio	99%	Merck
Carbonato de Sodio Anhidro	99%	Merck
Ácido Cromo trópico	-	Scharlau
Urea p.a.	99,80%	Scharlau
Tartrato de Sodio y Potasio	99-102%	Scharlau
Sulfato de Sodio Anhidro	99,0-100,5%	Sigma Aldrich
Solución de Biuret p.a.	97%	Acros Organics
Indicador Verde de Bromocresol	-	Hach
Indicador Rojo de Metilo	-	Hach
Solución Tampón estándar pH 4	-	Cicarelli
Solución Tampón estándar pH 7	-	Cicarelli
Solución Tampón estándar pH 10	-	Cicarelli
Alcohol Etilico	96%	Grado Analítico
Ácido Bórico	-	Grado Analítico
Sulfato de Cobre	-	Grado Analítico
Formaldehído	37%	Grado Analítico

Fuente: Elaboración propia

Los resultados del análisis de calidad al aditivo Blue Truck, AdBlue y BlueDEF se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Caracterización de diferentes aditivos AdBlue

Parámetros	Unidad	Límites ISO 22241	AdBlue Alemania	BlueDEF U.S.A	Blue Truck
Contenido de urea	% w/w	31,8-33,2	32,5	32,5	32,5
Densidad a 20 °C	kg/m ³	1087 – 1093	1089	1088	1092
Índice de Refracción a 20 °C	-	1,3814 -1,3843	1,3835	1,3836	1,3836
Alcalinidad como NH ₃	% w/w	0,20 máx.	0,04	0,01	0,007
Biuret	% w/w	0,30 máx.	0,03	0,26	0,31
Aldehídos	mg/kg	5 máx.	1,32	1,74	>5
pH	-	10	9,35	9,26	9,38

Nota: El aditivo Blue Truck se produjo con el lote de producción de urea del 2021.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 12 se aprecia los resultados de análisis al aditivo Blue Truck almacenado por 5 meses bajo condiciones ambiente de la ciudad de Tiquipaya del departamento de Cochabamba.

Tabla 12. Caracterización de diferentes aditivos AdBlue

Parámetros	Unidad	Límites	Aditivo Blue Truck Fresco	Aditivo Blue Truck 5 meses
Contenido de urea	% w/w	31,8-33,2	32,50	32,53
Densidad a 20 °C	kg/m ³	1087-1093	1091	1093
Índice de refracción a 20 °C	-	1,3814-1,3843	1,3838	1,3842
Alcalinidad como NH ₃	% w/w	0,20 máx.	0,07	0,12
Biuret	% w/w	0,30 máx.	0,270	0,274

Nota: Este aditivo fue sintetizado con un lote de producción de urea del 2019.

Fuente: Elaboración propia

2.3 Efectividad del Aditivo en la Reducción de NO_x

La prueba de efectividad de reducción de NO_x se desarrolló para el aditivo Blue Truck y el aditivo comercializado BlueDEF, poniéndolos a prueba en diferentes semanas en un camión volvo FM 410 modelo 2011, regido a la norma EURO V.

Adicionalmente, se realizó una medición de gases de combustión a un camión Volvo FH Samuray modelo 2017 fabricado bajo normativa EURO VI, dicho camión contaba con combustible Diésel y el aditivo AdBlue de su país de origen, Holanda.

El análisis de gases de escape se realizó por medio de un analizador de gases de combustión KANE Auto plus 5-2.

Los resultados de los análisis de gases de escape del aditivo Blue Truck, el aditivo BlueDEF y un aditivo de industria Neerlandesa, se muestran a continuación:

Tabla 13. Análisis de Gases de Escape a Vehículos pesados Diésel EURO con SCR

Gases de Combustión	Limite EURO VI	Camión EURO VI	Limite EURO V	Camión EURO V	Camión EURO V
		AdBlue Holanda		AdBlue U.S.A.	AdBlue Blue Truck
CO (g/kWh)	1,5	0,00	1,5	35,91	143,64
HC (g/kWh)	0,13	0,00	0,46	0,00	0,00
NOx (g/kWh)	0,4	0,02	2	1,49	1,88
PM (g/kWh)	0,01	-	0,02	-	-

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 14 se aprecia los valores obtenidos de los análisis de gases de escape a vehículos pesados Diesel que no requiere el aditivo AdBlue y un vehículo pesado Diesel con el sistema SCR anulado.

Tabla 14. Análisis de gases de escape a vehículos Diésel EURO sin SCR

Camión Volvo sin sistema SCR		Camión Americano sin sistema SCR		Camión con sistema SCR anulado EURO V	
Gases De Escape	Valor Emitido	Gases De Escape	Valor Emitido	Gases De Escape	Valor Emitido
CO ₂ (g/kWh)	0,11	CO ₂ (g/kWh)	0,11	CO ₂ (g/kWh)	0,17
CO (g/kWh)	538,65	CO (g/kWh)	323,19	CO (g/kWh)	754,11
O ₂ (g/kWh)	572,28	O ₂ (g/kWh)	635,87	O ₂ (g/kWh)	506,24
HC (g/kWh)	0.06	HC (g/kWh)	0.00	HC (g/kWh)	0.07
NO (g/kWh)	4,43	NO (g/kWh)	3,99	NO (g/kWh)	8,14

Fuente: Elaboración propia.

3. DISCUSIÓN

De la caracterización de la materia prima se puede indicar:

- La densidad aparente de la urea puede variar dependiendo de su procedencia, es decir, no todas presentan el mismo tamaño de grano, por lo que presentan una variabilidad en los resultados.
- La urea YPF y urea Perú presentan un contenido de Biuret cerca al límite permisible de 1% w/w para urea granulada fertilizante, pero cumplen con este parámetro.
- El límite establecido para contenido de nitrógeno en un fertilizante es de 46%, por tanto, todos presentan un 46% de nitrógeno total.

- El contenido de Formaldehído en la urea YPFB y urea Perú son elevados, atribuible a la finalidad que se le da a la materia prima.

La demanda del aditivo permitió determinar la demanda real del aditivo, así como el impacto ambiental que genera el sector de camiones que anulaban el sistema SCR.

Durante la etapa de disolución de urea en agua se observó una variable operativa en el proceso de agitación, una velocidad de agitación mayor a 600 RPM induce una caída de la temperatura brusca, esta caída de temperatura origina la formación de cristales de urea en las paredes del recipiente, al igual que la disminución de la solubilidad de la urea provocando un mayor tiempo de disolución, al mismo tiempo la formación de cristales de urea influye directamente en la concentración de urea, reduciendo la concentración de urea preparada. La Figura 2 muestra el descenso de la temperatura a distintas velocidades de agitación. La velocidad de agitación óptima para la dilución de la urea en agua es de 410 RPM, con el fin de evitar la formación de cristales de urea.

La curva de calibración a diferentes concentraciones de urea, medida a 20 °C, permite determinar la concentración de urea de un aditivo de acuerdo al índice de refracción, siendo un método importante para identificar la calidad del aditivo de forma rápida y confiable.

Los resultados del análisis de laboratorio realizado a los distintos aditivos se contrastaron con la norma ISO 22241:2019.

- Para la densidad, los aditivos analizados se encuentran dentro especificación, la variación de densidades de los 3 aditivos se debe a la materia prima utilizada para la síntesis de cada aditivo. Esta variabilidad se puede contrastar con el aditivo exhibido por Terzis (2018), presentando un AdBlue comercial con una densidad de 1083 kg/m³, y por Palanikumar (2017), presentando un AdBlue con una densidad de 1093 kg/m³ a 20 °C, frente al Blue Truck con 1092 kg/m³ que difiere de una unidad respecto a Palanikumar (2017). Por otro lado, los valores de densidad en los aditivos pueden variar por el almacenaje en los vehículos Diésel con el paso del tiempo, según Fojtíková (2019).
- En especificaciones de índice de refracción todos los aditivos presentan el mismo valor. Este parámetro determina la concentración de urea, por tanto, la calidad del aditivo, tal como se especificó en la Figura 3.
- En especificaciones de alcalinidad todos los aditivos presentan un valor por debajo de lo establecido, sin embargo, el aditivo Blue Truck puede verse afectado por el pH del agua de ósmosis inversa utilizada para su síntesis.
- El aditivo Blue Truck superó el límite de contenido de Biuret, en 0,01% w/w del valor establecido, debido a que la materia prima utilizada partió con un contenido de Biuret de 0,934% w/w.
- El límite de aldehídos establecido por la norma es de 5 mg/kg, el aditivo Blue Truck presenta un valor muy elevado de aldehídos, debido a que se partió de una materia prima con contenido de Formaldehído de 6218,62 mg/kg.
- La prueba de pH se encuentra dentro los límites establecidos y de valores similares con las marcas comerciales analizadas, al ser de un valor elevado pH 9 presenta también cierto grado de corrosividad.

Aunque las propiedades del aditivo almacenado por 5 meses a condiciones ambiente presentan leves variaciones en todos los parámetros, se encuentran dentro de los límites establecidos por la ISO 22241. Asimismo, se verifica que las propiedades del aditivo pueden cambiar con el paso del tiempo, por lo que el límite del tiempo máximo de almacenamiento es de 12 meses, según dicha norma.

Los resultados de los análisis de gases de escape indican que:

- Para el análisis de un vehículo pesado Diésel sujeto a la EURO VI, los resultados de análisis de emisión de gases de escape es casi cero para todos los compuestos, a excepción de los NO_x emitiéndose un 5% del límite establecido por la norma EURO VI, siendo el límite 0,4 g/kWh, esto puede ser influenciado por el combustible Diésel, debido a que en Europa los combustibles comercializados son biocombustibles, por ende son combustibles limpios y tienen una menor emisión de gases de escape (Fernando Daniel Ramos, 2016). De acuerdo con lo señalado por Panoutsou (2021), la mezcla más utilizada de biodiésel en Europa es B7 o B10, es decir, para un B7 la mezcla es 7 partes de biodiésel y 93 partes de Diésel.
- Los análisis de gases de escape realizados a un vehículo pesado Diésel sujeto a un EURO V, indican que el aditivo de industria U.S.A. y el Blue Truck cumplen con su objetivo, reduciendo los NO_x .

Los resultados de la Tabla 14 contrastados con los resultados de la Tabla 13, permiten indicar que:

En el camión EURO V con sistema SCR anulado, se evidencia que los valores de emisión con respecto a los NO_x exceden 4 veces lo permitido por la norma EURO V, demostrando que el uso del aditivo contribuye a la reducción y emisión de gases NO_x .

4. CONCLUSIONES

El proyecto de investigación permitió obtener los resultados de la urea grado agrícola proveniente de la PAU para estudiar su aplicación como materia prima en la síntesis de urea grado automotriz.

- Los análisis de laboratorio realizado a la urea YPFB, evidenciaron un contenido de Biuret de 0,934%w/w y un contenido de Formaldehído de, 6218,62 mg/kg, lo que influye directamente en parámetros de Biuret y Aldehídos en el aditivo sintetizado. Un alto contenido de Biuret se produce cuando las temperaturas sobrepasan el punto de fusión de la urea, específicamente en el proceso de granulación, provocando una reacción secundaria de formación de Biuret, por otra parte, para que el grano de urea no se rompa al tacto y mantenga el contenido de nitrógeno en el almacenamiento se le añade Formaldehído, afectando la composición final de la urea granulada.
- El aditivo Blue Truck sintetizado a partir de urea agrícola YPFB cumple con las normativas internacionales con excepción del contenido de Biuret y Formaldehído, siendo directamente influenciado por la materia prima.
- Determinar la concentración de urea en función del índice de refracción por método gráfico, afirma que es un método adecuado y preciso para determinar la calidad del aditivo, siendo un método alternativo al propuesto por la normativa ISO 22241-2.

- Para evitar la cristalización resultante del descenso de temperatura exhibido en el proceso de disolución de urea, el proceso debe partir de temperaturas entre los 20 a 26 °C a una velocidad de agitación de 400 RPM.
- El parámetro más importante para el almacenamiento del aditivo es la temperatura, en un rango de -11 °C a 30 °C, según lo indicado por la norma ISO 22241-3 *Manejo, Transporte y Almacenaje*. El aditivo Blue Truck se almacenó por 5 meses a temperaturas de 20 a 30 °C, mostrando un incremento del contenido de Biuret en un 0,04% w/w del valor inicial.
- Las pruebas de efectividad de reducción de emisión de NOx del aditivo sintetizado Blue Truck cumple con su función, dado que los resultados indican que este aditivo puede ser utilizado en camiones EURO como cualquier otro producto comercial, aunque podría influir en la degradación del catalizador.
- El sondeo realizado nos permitió identificar que el 23% del transporte pesado utiliza el aditivo, con un consumo estimado de 236 m³ mensuales para este año y, con una proyección de 301 m³ para el año 2027. Si el parque automotor del departamento de Cochabamba consumiría en su totalidad el aditivo, la demanda sería de 7013 m³ mensuales.
- Para lograr una producción industrial y mejorar la calidad del aditivo propuesto, es necesario partir de urea con mayor pureza. Los parámetros de mayor incidencia en el desempeño del aditivo son el Biuret y el Formaldehído, los cuales deben presentarse en un contenido no mayor a 0,40% y 3 mg/kg respectivamente, de esta manera poder producir y certificar un aditivo AdBlue Premium Quality.
- Considerando que, en Bolivia, la Planta de Amoniaco y Urea (PAU) se considera potencial productor de este aditivo, se recomienda que se realicen estudios de investigación posteriores y complementarios dentro de las líneas de proceso de la PAU, antes del proceso de granulación, con el fin de asegurar la pureza de la materia prima, tal como propone Stamicarbon.
- La producción del aditivo AdBlue bajo la norma ISO 22241 (2019) en cumplimiento con las especificaciones establecidas, puede lograr una certificación de fabricación y comercialización, avalada por la Asociación Alemana de la Industria del Automóvil (VDA).

AGRADECIMIENTO

A la Dirección Nacional de Investigación de la Universidad Privada del Valle por apoyar con el financiamiento para la ejecución del proyecto.

5. REFERENCIAS

- A. Fendri, P. B. (2015). AdBlue Quality Control using Impedance Spectroscopy. *Proceedings SENSOR*, 830-832. doi:10.5162/sensor2015/P7.3
- A. Terzis, M. K. (2018). Splashing characteristics of diesel exhaust fluid (AdBlue) droplets impacting on urea-water solution films. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 102, 152-162. doi:10.1016/j.expthermflusci.2018.11.002
- Adam Polcar, J. Č. (05 de 2016). Influence of Urea Concentration on Refractive Index of AdBlue Fluid Evaluated by Regression Analysis. 64(2), 509-516. doi:10.11118/actaun201664020509
- Ante Kozina, G. R. (12 de Marzo de 2020). Analysis of methods towards reduction of harmful pollutants from diesel engines. (C. M. Almeida, Ed.) *Cleaner Production*, 262. doi:10.1016/j.jclepro.2020.121105
- ASTM D1747. (2009). *Standard Test Method for Refractive Index of Viscous Materials*. Estados Unidos : ASTM.
- B. Ashok, A. J. (2022). Chapter 3 - NOx and PM trade-off in IC engines. *NOx Emission Control Technologies in Stationary and Automotive Internal Combustion Engines*, 69-93. doi:10.1016/B978-0-12-823955-1.00003-6
- Boxi Shen, Z. L. (Diciembre de 2017). Development of a 1D Urea-SCR system model coupling with wall film decomposition mechanism based on engine bench test data. *Energy Procedia*, 142, 3492-3497. doi:10.1016/j.egypro.2017.12.235
- Calliope Panoutsou, S. G. (3 de 03 de 2021). Advanced biofuels to decarbonise European transport by 2030: Markets, challenges, and policies that impact their successful market uptake. *Energy Strategy Reviews*, 34. doi:10.1016/j.esr.2021.100633
- COVENIN 1138. (2018). *Fertilizantes. Determinación del Nitrógeno Total (Metodo Kjeldahl)*. Venezuela: FODENORCA. Obtenido de <http://www.sencamer.gob.ve/sencamer/normas/1138-2018.pdf>
- Denghui Wang, N. D. (15 de 04 de 2019). Analysis of urea pyrolysis in 132.5–190 °C. *Fuel*, 242, 62-67. doi:10.1016/j.fuel.2019.01.011
- Diesel Technology Forum. (2023). *Diesel Technology Forum*. Obtenido de <https://dieselforum.org/selective-catalytic-reduction-scr>
- DieselNET. (11 de 11 de 2022). *DieselNET*. Obtenido de <https://dieseln.net/news/2022/11eu.php>
- Eelco Mostert, H. (. (07 de 01 de 2020). *United States Patente n° US 10,526,281 B2*. Obtenido de <https://patents.google.com/patent/US10526281B2/en>
- EUR-Lex. (06 de 09 de 2022). *EUR-Lex Access to European Union Law*. Obtenido de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32009R0595>
- Fernando Daniel Ramos, M. S. (01 de 01 de 2016). Biocombustibles. *Ciencia Hoy*, 25(147), 69-73. Obtenido de [eu-repo/semantics/altIdentifier/url/http://cienciahoy.org.ar/2016/01/biocombustibles/](http://cienciahoy.org.ar/2016/01/biocombustibles/)

Filip Kuternowski, M. S. (6 de 07 de 2020). Modeling of Urea Decomposition in Selective Catalytic Reduction (SCR) for Systems of Diesel Exhaust Gases Aftertreatment by Finite Volume Method. *Computational Catalysis*, 749. [doi:10.3390/catal10070749](https://doi.org/10.3390/catal10070749)

Guevara-Zavala, R. (2018). *Desarrollo de un sistema de control y monitoreo en un banco de pruebas Urea-SCR*. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME), Mexico.

Hakan Caliskan, K. M. (01 de 06 de 2017). Environmental, enviroeconomic and enhanced thermodynamic analyses of a diesel engine with diesel oxidation catalyst (DOC) and diesel particulate filter (DPF) after treatment systems. *Energy*, 128, 128-144. [doi:10.1016/j.energy.2017.04.014](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.014)

Hoon Lee, T. H. (10 de 02 de 2016). Experimental verification of optimized NOX reduction strategies in a decrepit Euro-3 diesel engine retrofitted with a cooled EGR system. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30, 2873-2880. [doi:10.1007/s12206-016-0546-2](https://doi.org/10.1007/s12206-016-0546-2)

Ibrahim Aslan, R. A. (2015). The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17, 15-27. [doi:10.1007/s10098-014-0793-9](https://doi.org/10.1007/s10098-014-0793-9)

Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (29 de Mayo de 2020). *Instituto Nacional de Estadísticas (INE)*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadísticas (INE): <https://www.ine.gob.bo/index.php/publicaciones/estadisticas-del-parque-automotor-2005-2019/>

ISO 22241-2. (2019). *Diesel Engines, NOx reduction agent AUS32 - Part 2: Test Methods*. Alemania: ISO.

Louise Gren, V. B. (08 de 2021). Effects of renewable fuel and exhaust aftertreatment on primary and secondary emissions from a modern heavy-duty diesel engine. *Journal of Aerosol Science*, 156. [doi:10.1016/j.jaerosci.2021.105781](https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2021.105781)

M. Börnhorst, O. D. (21 de 07 de 2021). Advances and challenges of ammonia delivery by urea-water sprays in SCR systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 87. [doi:10.1016/j.peccs.2021.100949](https://doi.org/10.1016/j.peccs.2021.100949)

Meessen, J. (10 de 11 de 2014). Urea Synthesis. *Chemie Ingenieur Technik*, 86(12), 2180-2189. [doi:10.1002/cite.201400064](https://doi.org/10.1002/cite.201400064)

Ming-Feng Hsieh, J. W. (Enero de 2012). Adaptive and Efficient Ammonia Storage Distribution Control for a Two-Catalyst Selective Catalytic Reduction System. *Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 134, 1. [doi:10.1115/1.4005372](https://doi.org/10.1115/1.4005372)

NTE INEN 222. (2013). *Fertilizantes. Determinación del contenido de Humedad*. Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN. Obtenido de <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/222-1R.pdf>

NTE INEN ISO 7837. (2014). *Fertilizantes. Determinación de la densidad aparente sin compactar en fertilizantes de grano fino*. Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN. Obtenido de https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_iso_7837.pdf

- Official Journal of the European Union, Regulation (EC). (18 de 06 de 2009). *EUR-Lex*.
- PalaniKumar Gurusamy, U. G. (17 de 04 de 2017). Measurement of Diesel Exhaust Fluid Concentration in Urea-SCR after-Treatment System. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 18(8), 1085–1092. doi:10.1007/s12541-017-0127-z
- Pavla Fojtíková, D. K. (19 de 09 de 2019). Tracking AdBlue properties during tests of selective. *International Journal of Energy Research*, 1-11. doi:10.1002/er.4921
- Samsung Engineering. (2013). *Business Portfolio Petrochemicals*. Obtenido de <https://www.samsungengineering.com/business/unit/common/buView>
- Sandro Gierth, S. H. (19 de 01 de 2022). Urea Conversion for Low-Temperature Selective Catalytic Reduction in a Swirled Diesel Exhaust Gas Configuration. *Chemical Engineering Technology*, 45(4), 610-619. doi: 10.1002/ceat.202100571
- Shahariar, G. M. (Marzo de 2018). Investigation of urea aqueous solution injection, droplet breakup and urea decomposition of selective catalytic reduction systems. *Mechanical Science and Technology*, 32, 3473–3481. doi:10.1007/s12206-018-0651-5
- Stamicarbon. (11 de 2017). *STAMI AdBlue Technologies*. Obtenido de https://www.stamicarbon.com/sc_files/142/download?token=vn2qF-Fq
- Tan, L. (Noviembre de 2017). CFD studies on effects of SCR mixers on the performance of urea conversion and mixing of the reducing agent. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 123, 82-88. doi:10.1016/j.cep.2017.11.003
- Theodoros Grigoratos, G. F. (15 de Marzo de 2019). Real world emissions performance of heavy-duty Euro VI diesel vehicles. *Atmospheric Environment*, 201, 348-359. doi:10.1016/j.atmosenv.2018.12.042
- Tina Kegl, A. K. (2020). Chapter 2 Diesel Engines. *Nanomaterials for Environmental Application Fuel Additives for Diesel Engines*, 5-28. doi:10.1007/978-3-030-54708-0_2
- Tommaso Selleri, A. D. (23 de 03 de 2021). An Overview of Lean Exhaust deNOx Aftertreatment Technologies and NOx Emission Regulations in the European Union. *Catalysts*, 11(3). doi:10.3390/catal11030404
- Tommaso Selleri, R. G. (27 de Enero de 2022). Measuring Emissions from a Demonstrator Heavy-Duty Diesel Vehicle under Real-World Conditions - Moving Forward to Euro VII. *Catalysts*, 12(2), 184. doi:10.3390/catal12020184
- Toyo Engineering Corporation. (2012). ACES21 Urea Process by Toyo. *Toyo Engineering*. Obtenido de https://www.toyo-eng.com/jp/ja/products/chemical/urea/technical_paper/pdf/ACES21_Brochure.pdf
- Usame Demir, A. K. (24 de Agosto de 2021). Experimental investigation of the effect of urea addition to fuel on engine performance and emissions in diesel engines. *FUEL*, 331, 1. doi:10.1016/j.fuel.2021.122578

Verband der Automobilindustrie. (2020). *Verband der Automobilindustrie*. Obtenido de Verband der Automobilindustrie: <https://en.vda.de/en/topics/innovation-and-technology/ad-blue/AdBlue-brand-list-and-licensees-list.html>

Yihao Xie, F. P. (Abril de 2020). Diesel sulfur content impacts on Euro VI soot-free vehicles: Considerations for emerging markets. *The International Council on Clean Transportation*, 11, 1-15.

Yunhua Zhang, A. L. (2024). Effect of catalyst diesel particulate filter aging and catalyst loadings on particulate emission characteristics from a diesel vehicle. *Journal of Environmental Sciences*, 136, 35-44. [doi:10.1016/j.jes.2022.10.014](https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.10.014)