



Green H2 Team

Facilitación de la Adopción Local de Hidrogeno Verde:

*Cadena de abastecimiento para transporte terrestre de carga pesada y
pasajeros*

Autores:

Rodrigo Araya Garcia¹

Javiera Espinoza Morales²

Esteban Leiva Rivera ³

Joaquín Schiesewitz Knaak⁴

Diego Ramírez Cid⁵

Noviembre, 2023

¹Correo: rodrigo.arayag@usm.cl - Rut: 20.428.183-1

²Correo: javiera.espinozam@usm.cl - Rut: 20.564.129-7

³Correo: esteban.leivar@usm.cl - Rut: 20.175.127-6

⁴Correo: joaquin.schiesewitz@usm.cl - Rut: 20.460.451-7

⁵Correo: diego.ramirez@usm.cl - Rut: 20.484.475-5

1 Resumen Ejecutivo

En este proyecto se ha propuesto la creación de una cadena de abastecimiento de hidrógeno verde para transporte terrestre de carga pesada y pasajeros en Chile. Lo anterior, con el fin de alinearse con los estándares y directrices internacionales de reducción de emisiones y eliminación del uso de combustibles fósiles, presentando una solución estratégica particularmente relevante para el sector de transporte, que actualmente es responsable del 24% de las emisiones de gases de efecto invernadero en Chile (INGEI, 2018). Esta propuesta cobra relevancia sobre la electromovilidad basada en baterías, debido a su autonomía y tiempos de carga, parámetros claves dada la extensa geografía del país.

La cadena de abastecimiento considera el transporte del hidrógeno verde desde la Región de Antofagasta a la Región Metropolitana, para luego realizar su posterior distribución a empresas de transporte de pasajeros y transporte de carga pesada. Se propone separar el proyecto en 4 fases: Utilización de H₂ gaseoso a alta presión (GH₂), Cambio de camiones de combustibles fósiles a camiones de hidrógeno, Utilización de H₂ Licuado (LH₂) para transporte de largas distancias y Aumento de la distribución a gran parte de Chile. Para ello se tendrán cuatro pilares fundamentales: Una Planta de Carga, Un Sistema de Transporte, Una Planta de Distribución Principal y Una Planta de Distribución Local. En la primera fase, se plantea utilizar estanques de material compuesto de GH₂ con aproximadamente 800 [kg]. Luego en la segunda fase, se plantea mantener los estanques y paralelamente reemplazar los camiones a combustión interna por camiones con celdas de combustible. Posteriormente, en la tercera fase, se propone utilizar estanques de LH₂ con una capacidad aproximada de 7000 [kg]. Finalmente en la cuarta etapa, se sugiere la implementación de métodos de transporte de mayor escala, como gaseoductos y buques de carga.

Dado que el proyecto es ideal para cambios paulatinos, se propone comenzar con una planta de distribución ubicada en Santiago, en las cercanías de la ruta 5, la cual abastecerá a los camiones de reparto de hidrógeno. Luego, a medida que se quiera escalar el proyecto se propone incorporar la distribución a grandes empresas de camiones que estén ubicadas fuera de la Región Metropolitana, para posteriormente dar paso a la distribución de hidrógeno a nivel nacional.

Por todo lo anterior, el proyecto es políticamente valioso al demostrar compromiso con la sostenibilidad y lucha contra el cambio climático, lo que mejora la imagen del gobierno. Además, crea empleos, mejora la calidad del aire y aborda problemas sociales relacionados con el transporte de carga. En el ámbito tecnológico, se enfoca en la innovación y seguridad operativa. Legislativamente, se propone un marco basado en estándares europeos y promueve la igualdad de género. Ambientalmente, destaca la reducción de emisiones y el uso de energía renovable. Económicamente, se planea una distribución basada en la demanda para optimizar costos y logística a medida que crece la demanda.

2 Problema

2.1 Problemática general

En la actualidad, la producción de hidrógeno verde está experimentando un crecimiento constante, impulsado por las crecientes preocupaciones medioambientales a nivel global. A pesar de la existencia de numerosos proyectos relacionados con este combustible, se enfrenta un desafío fundamental: la falta de una infraestructura de distribución eficiente que facilite su uso a nivel local. En este contexto, se plantea la necesidad imperante de establecer una red logística especializada en el transporte de hidrógeno verde desde las plantas de producción hasta las principales áreas urbanas, donde se utilizará en diferentes ámbitos, como lo es el transporte de carga pesada y pasajeros.

Esta iniciativa se presenta como una solución estratégica particularmente relevante para el sector de transporte, que actualmente es responsable del 24% de las emisiones de gases de efecto invernadero del país, según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEI, 2018). Para avanzar en esta dirección, es esencial priorizar la creación de una red de estaciones de carga de hidrógeno verde a lo largo del territorio, considerando detenidamente la logística necesaria para el transporte desde los puntos de producción hasta los puntos de distribución. Este enfoque logístico es el pilar fundamental de este proyecto, y constituye una respuesta crítica a la creciente demanda de una solución sostenible en el ámbito del transporte y la energía.

2.2 Problemática particular y necesidades del usuario

En un contexto donde los planes energéticos a nivel mundial y gubernamental convergen hacia la progresiva eliminación de los combustibles fósiles, la industria del transporte se enfrenta a una amenaza inminente. Ante esta necesidad de cambio, dos alternativas emergen como las más viables: la Electromovilidad basada en baterías y la Tecnología de Celdas de Hidrógeno.

La primera opción, a pesar de sus promisorias ventajas, plantea significativos desafíos relacionados con la autonomía y los tiempos de carga, obstáculos que se intensifican en un país con una geografía extensa. Es en este escenario donde la propuesta del hidrógeno cobra relevancia, ya que no solo permite que la industria del transporte se alinee con los objetivos de carbono neutralidad, sino que también garantiza la sostenibilidad a largo plazo de este sector en un futuro donde la preservación del medio ambiente y la reducción de emisiones se convierten en requisitos inevitables.

3 Propuesta de valor y solución

3.1 Propuesta de valor

La propuesta de valor se centra en un sistema integral de distribución y suministro de hidrógeno verde, que parte desde la Región de Antofagasta y abarca, en una primera fase, la zona central del país. Este sistema se basa en cuatro pilares esenciales: una Planta de Carga, un Sistema de Transporte, una Planta de Distribución Principal y una Planta de Distribución Local. La elección entre el transporte gaseoso o líquido del hidrógeno depende de diversos factores, como la distancia y la demanda, lo que permite optimizar la eficiencia del proceso.

Inicialmente, el sistema de distribución se enfocará en facilitar el suministro de hidrógeno para el transporte de pasajeros con base en la Región Metropolitana. Con el tiempo, se planea expandir

su alcance para abarcar el transporte de carga pesada con sede en regiones circundantes además de otros posibles clientes, con el objetivo de fortalecer la confiabilidad y la robustez del sistema a medida que crece.

Se propone separar el proyecto en 4 fases (Ver Anexo, figura 1)

- **Fase 1:** En esta fase se planea utilizar solo H₂ gaseoso a alta presión.
- **Fase 2:** En esta fase se planea cambiar los camiones de combustibles fósiles a camiones de celdas de hidrógeno.
- **Fase 3:** En esta fase se planea utilizar H₂ Licuado para transporte de largas distancias.
- **Fase 4:** En esta fase se planea aumentar la escala a niveles que permitan distribuir a más lugares de Chile.

3.2 Aplicación de la propuesta de valor

3.2.1 Planta de carga

El proyecto contempla el inicio del proceso en una Planta de Carga, donde se almacena el hidrógeno en estado gaseoso provisto por AES. Desde aquí, se utiliza un sistema de tuberías aisladas al vacío para transportar el gas hacia un compresor de pistón, que emplea tecnología de vanguardia similar a la utilizada en la industria ecológica líder en Europa. En este compresor, el gas se comprime y se lleva a un dispensador para cargar los camiones de GH₂. En la etapa 3 se añade el proceso de licuefacción donde se lleva el gas a un proceso de enfriamiento, seguido de una expansión y regulación térmica. Al final de este proceso, el hidrógeno se encuentra en estado líquido a una temperatura de aproximadamente -252 [°C]. Para el almacenamiento temporal, se utiliza un pequeño tanque criogénico. Cuando la demanda comienza, una bomba multietapa eleva el hidrógeno hacia un dispensador que carga los vehículos a través de mangueras.

3.2.2 Transporte

Para el transporte desde la Región de Antofagasta hasta la Región Metropolitana, se consideran dos métodos principales: Transporte criogénico (LH₂) y Transporte gaseoso a alta presión (GH₂). Cada método tiene ventajas y desventajas que deben evaluarse antes de tomar una decisión. En la primera fase del proyecto, se planea utilizar camiones de carga con la capacidad necesaria para transportar los estanques de GH₂, que tienen una capacidad de aproximadamente 800 [kg] de GH₂ y están fabricados con estanques de material compuesto. Para la segunda fase, se planea utilizar camiones de celda de combustible con la autonomía necesaria, manteniendo los estanques de transporte iguales. La tercera fase considera utilizar estanques de LH₂ que tienen una capacidad aproximada de 7000 [kg]. Para la cuarta fase se planea utilizar métodos de transporte a mayor escala, como gaseoductos y transporte por buques de carga.

Para el transporte local desde el centro de distribución a los clientes, se utilizan camiones que transportan estanques de GH₂ a presiones cercanas a 500 [bar]. Estos estanques son de material compuesto (Tipo IV) y permiten el almacenamiento a alta presión sin un excesivo aumento en el peso en comparación con los estanques de acero (Tipo I). En la primera fase, se utilizan camiones con combustibles fósiles, y en las fases posteriores, se emplean camiones de celda de combustible para cumplir con los objetivos de sostenibilidad.

3.2.3 Planta de distribución principal

Dado que el enfoque del proyecto es el suministro local a empresas de camiones y buses, se prevé una planta de distribución ubicada en Santiago, en las cercanías de la Ruta 5, para brindar acceso directo a los camiones de hidrógeno licuado procedentes de la planta productora en Antofagasta. En esta planta, el hidrógeno líquido se descarga mediante mangueras hacia un calentador criogénico que eleva gradualmente la temperatura del hidrógeno, transformándolo en gas. Luego, el gas se comprime a través de tuberías aisladas y se almacena en estanques Tipo I hasta que esté listo para la distribución a camiones de reparto o directamente a las celdas de hidrógeno de los camiones de los clientes. La zona de carga en la planta requiere una subestación para suministrar directamente a las celdas de combustible y dispositivos de carga para camiones de reparto. Se pueden necesitar sistemas de refrigeración en la salida del compresor para manejar el calor generado por el proceso de compresión. Además, se implementarán medidas de seguridad, como válvulas de alivio y sensores de monitoreo de temperatura y presión. En la fase 1 y 2 no será necesario la planta de vaporización ya que se trabajará solo en GH₂.

3.2.4 Sistema de distribución local

Para el suministro a el sector del transporte, se deben implementar estaciones de carga de hidrógeno verde, denominadas “hidrolinerías”, ubicadas estratégicamente en áreas de descanso frecuentadas por conductores de estos vehículos. Cada hidrolinería consta de componentes clave, como un compresor, un intercambiador de calor para enfriar el gas, un sistema de enfriamiento para mantener la temperatura adecuada durante la carga y sistemas de almacenamiento de alta presión. Estas estaciones permiten la carga eficiente y segura de hidrógeno en vehículos de diferentes tipos, brindando una solución de recarga práctica para los usuarios finales, similar a una gasolinera o estación de combustible tradicional (3).

3.3 Impactos asociados

El plan tiene un valor político significativo, ya que demuestra un compromiso con la sostenibilidad y la lucha contra el cambio climático. Alinearse con esta propuesta puede mejorar la imagen y la reputación del gobierno en materia medioambiental. Además, la transición hacia tecnologías más limpias, como las celdas de hidrógeno, crea empleos en el sector de energías renovables y tecnologías limpias, fortaleciendo la política medioambiental. La reducción de la contaminación del aire mejora la calidad de vida de la población, lo que puede ganar el apoyo de los ciudadanos.

En el ámbito social, la implementación de hidrógeno verde generaría hasta 100,000 nuevos puestos de trabajo ([3]). Además, reduciría las emisiones de CO₂ y mejoraría la calidad del aire en la zona central del país, beneficiando a la comunidad y cumpliendo con la Ley 19.300. También abordaría problemas político-sociales relacionados con la amenaza que enfrentan los camioneros ante la idea de “Trenes para Chile”.

Desde el punto de vista tecnológico, la propuesta incorpora componentes innovadores, como compresores especializados y estanques de material compuesto, para reducir el consumo de energía y los costos operativos. Se centra en la seguridad operativa mediante componentes comunes de amplio uso en la industria.

En el aspecto legislativo, se propone un Marco Normativo General basado en los principios y directrices de la Unión Europea para regular el hidrógeno verde en Chile. También, se promueve la

igualdad de género en las operaciones del proyecto, cumpliendo con las leyes chilenas.

En cuanto al medio ambiente, la propuesta destaca la reducción significativa de emisiones al utilizar hidrógeno en vehículos comerciales.((4), (5)) Esto contribuye a la mejora de la calidad del aire y al cumplimiento de los objetivos medioambientales. Se planifica el uso de energía renovable en todas las operaciones que requieren electricidad, garantizando un enfoque sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

En el ámbito económico, si bien no han sido evaluado los costos de inversión (puesto que difieren según la producción requerida), la tabla anexada (2) permite fundamentar las fases propuestas para la distribución, donde para una baja demanda, es conveniente emplear en primera instancia un transporte de gas comprimido. Una vez que los camiones de hidrógeno se hayan masificado, se espera el cambio de la maquinaria, de modo que se obtenga una economía circular del proceso de transporte, para que finalmente, cuando la demanda sea la suficiente, se invierta en equipos de licuefacción. Si bien, el caso ideal para LH_2 , esperado para 2030, sigue teniendo un costo específico operacional superior al del gas comprimido, a una mayor demanda se vuelve imperativo reducir el número de viajes o camiones empleados para transportar grandes cantidades, pues de otra forma, es logísticamente inviable.

3.4 Aspectos que diferencian a AES Andes de otros proyectos de hidrógeno verde

Lo que diferencia en gran medida esta propuesta de otros proyectos de hidrógeno verde, es su enfoque en el establecimiento de la infraestructura fundamental para el desarrollo de todos los proyectos de consumo. Esto es relevante ya que los proyectos de generación existentes se centran en las regiones del norte y sur del país, mientras que la industria y la mayor parte de la población se encuentran en la zona central. Por lo tanto, el transporte y la distribución de hidrógeno se convierten en un componente crítico.

En Chile, existe una multitud de proyectos y empresas que requieren un sistema de distribución de hidrógeno, pero muchos de ellos aún no han avanzado a escalas significativas debido a la falta de infraestructura adecuada. Al mismo tiempo, otros proyectos de transporte y distribución requieren una demanda considerable para justificar su inicio, y esta demanda aún no ha alcanzado niveles óptimos.

Una ventaja destacada de este proyecto radica en su alta escalabilidad, lo que significa que se puede iniciar con una fase piloto y, a medida que la demanda crece, aumentar la capacidad de distribución de manera flexible y eficiente. Esto facilita la adaptación y el crecimiento del proyecto en consonancia con las necesidades cambiantes del mercado. Es un proyecto ideal para cambios paulatinos.

Referencias

- [1] Asesoría Técnica Parlamentaria (2021, septiembre). *Industria del hidrógeno verde: costos de producción*. Recuperado de https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32538/1/BCN___Hidrogeno_verde_Costos_de_produccion_Sept21.pdf
- [2] Ghafri, S. Z. A., Munro, S., Cardella, U., Funke, T., Notardonato, W., Trusler, J. P. M., Leachman, J., Span, R., Kamiya, S., Pearce, G., Swanger, A., Rodriguez, E. D., Bajada, P., Jiao, F., Peng, K., Siahvashi, A., Johns, M. L., & May, E. F. (2022). *Hydrogen Liquefaction: A review of the fundamental physics, engineering practice and future opportunities*. Energy and Environmental Science, 15(7), 2690-2731. Recuperado de <https://doi.org/10.1039/d2ee00099g>
- [3] InvestChile. *Hidrógeno generará 100 mil empleos y US\$200 mil millones en inversión*. Recuperado de <https://blog.investchile.gob.cl/bloges/hidrogeno-verde-generara-100-mil-empleos-y-us200-mil-millones-en-inversion>
- [4] Shell Deutschland Oil GmbH (2017). *SHELL HYDROGEN STUDY: Energy of the future? Sustainable Mobility through Fuel Cells and H2*. Recuperado de https://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2017/68185/pdf/shell_h2_study_new.pdf
- [5] Nigel N. Clark, Mridul Gautam, Donald W. Lyons, Reda M. Bata, and Wenguang Wang (1997). *Natural Gas and Diesel Transit Bus Emissions: Review and Recent Data*. Recuperado de <https://www.jstor.org/stable/44722785>
- [6] Hong Huo, Zhiliang Yao, Yingzhi Zhang, Xianbao Shen, Qiang Zhang and Kebin He (2012) *On-board measurements of emissions from diesel trucks in five cities in China*. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.01.068>

4 Anexos

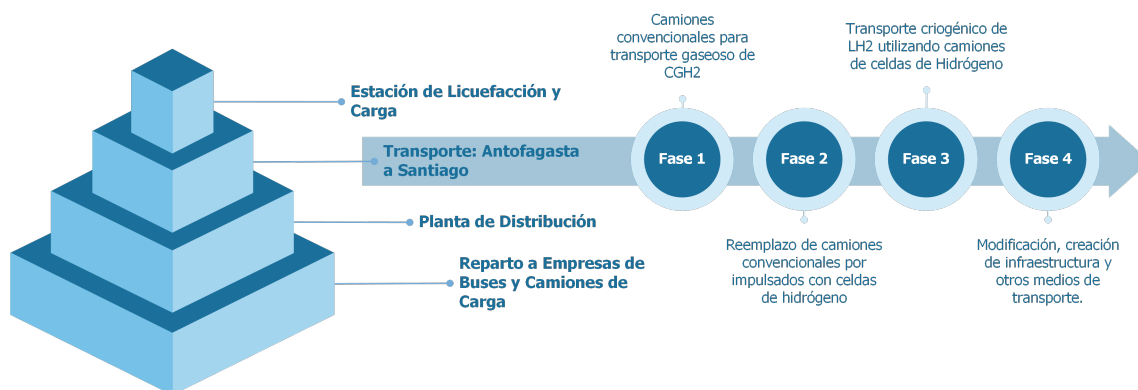


Figura 1: Diagrama de flujo del proyecto.

	Dato	Unidad	CGH2 (350 bar)	LH2 (base)	LH2 (ideal)
Costo Producción:					
Electrólisis:	Año 2021	[USD/kg]	5,3	5,3	5,3
	Año 2030	[USD/kg]	1,4	1,4	1,4
Compresión-Almacenamiento:		[USD/kg]	0,28	3,0	0,5
Masa:	7000	[kg]			
Total:		[USD]	38.710	57.750	40.250
Costo Transporte:					
Autonomía Camión Convencional	0,20	[L/km]			
Autonomía Camión Celda de H2	0,09	[kg/km]			
Capacidad Estanque de Transporte		[kg]	900	7.000	7.000
Número de Viajes		[-]	8	1	1
Distancia: (Antofagasta - Santiago)	1370	[km]			
Precio Diesel:	1,15	[USD/L]			
Costo por viaje:					
Camión Convencional	315	[USD/viaje]			
Camión Celda de H2					
	Año 2021	[USD/viaje]	693	1033	720
	Año 2030		210	551	238
Total:					
Camión Convencional		[USD]	2.521	315	315
Camión Celda de H2	Año 2021	[USD]	5.541	1.033	720
	Año 2030	[USD]	1.683	551	238
OPEX (Total)					
Camión Convencional		[USD]	41.231	58.065	40.565
Camión Celda de H2	Año 2021	[USD]	44.251	58.783	40.970
	Año 2030	[USD]	40.393	58.301	40.488
Costo Especifico					
Densidad Energética	33,3	[kWh/kg]			
Camión Convencional		[USD/MWh]	172	249	174
Camión Celda de H2	Año 2021	[USD/MWh]	185	252	176
	Año 2030	[USD/MWh]	168	250	174

Figura 2: Análisis de costo operacional del proyecto de distribución de Hidrógeno Verde. (Elaboración Propia. Valores estimados desde [1], [2], [4], entre otros. Compresión-Almacenamiento: incluye todo el proceso de compresión o licuefacción, según corresponda.)

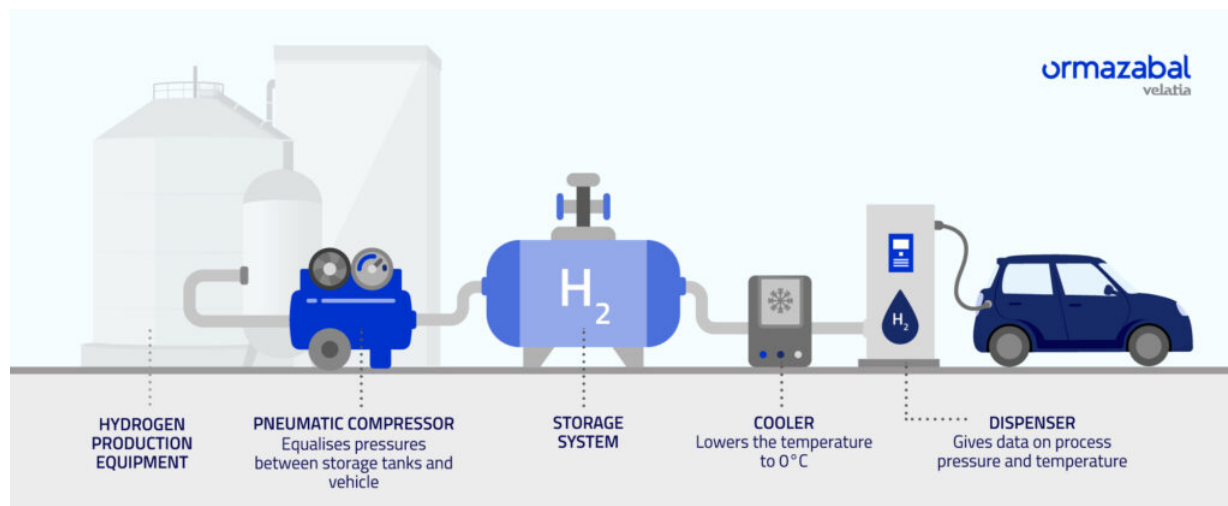


Figura 3: Esquema de funcionamiento de una hidrogenera, que es equivalente a una hidrolinera solo que la generación ocurre in situ.

Emissions Results (g/mile)							Fuel Economy		
Run Sequence Number	CO	NO _x	FIDHC	CH ₄	NMHC	PM	CO ₂	mile/gal	BTU/mile
825-1	8.89	18.3	14.5	12.6	0.71	0.04	2405	3.05	42189
825-2	8.92	20.7	14.6	12.8	0.63	0.03	2501	2.94	43758
825-3	9.02	21.0	15.3	13.2	0.72	0.02	2458	2.98	43146
825-4	9.22	21.4	15.1	13.0	0.80	0.02	2556	2.87	44785
825-5	9.17	19.8	15.1	13.1	0.70	0.02	2495	2.94	43648
825 Average	9.04	20.2	14.9	12.9	0.71	0.03	2483	2.95	43505
Std. Dev	0.15	1.2	0.3	0.3	0.06	0.01	56	0.06	947
CV%	1.6	6.2	2.2	2.1	8.7	41.9	2.3	2.2	2.2

Figura 4: Análisis de emisiones generadas por un bus comercial, que funciona a diesel, en un recorrido específico en Atlanta, Estados Unidos. (Valores estimados desde [5])

	g km ⁻¹			
	HC	CO	NO _x	PM _{2.5}
<i>LDDTs</i>				
Euro 0	2.1 ± 0.5	6.0 ± 4.9	4.3 ± 1.2	0.35 ± 0.18
Euro I	1.4 ± 0.6	3.3 ± 3.0	5.0 ± 2.1	0.23 ± 0.19
Euro II	1.2 ± 0.5	2.9 ± 2.1	5.3 ± 2.2	0.17 ± 0.13
Euro III	0.6 ± 0.4	1.1 ± 0.4	3.2 ± 1.9	0.01 ± 0.00
<i>MDDTs</i>				
Euro 0	2.4 ± 1.3	5.4 ± 2.0	10.7 ± 3.6	0.55 ± 0.45
Euro I	1.4 ± 0.6	3.8 ± 1.7	9.7 ± 2.6	0.49 ± 0.29
Euro II	0.3 ± 0.1	1.1 ± 0.3	3.6 ± 0.8	0.07 ± 0.05
Euro III	0.2 ± 0.1	1.5 ± 1.2	6.4 ± 1.9	0.11 ± 0.08
<i>HDDTs</i>				
Euro 0	1.9	18.6	14.8	0.91
Euro I	1.4 ± 0.7	5.5 ± 4.2	9.9 ± 5.0	0.26 ± 0.23
Euro II	1.0 ± 0.8	6.3 ± 5.0	10.2 ± 7.5	0.23 ± 0.20
Euro III	0.3 ± 0.2	1.6 ± 0.9	8.1 ± 4.2	0.09 ± 0.10
Euro IV	—	1.2 ± 0.4	5.3 ± 1.2	0.02 ± 0.00

Figura 5: Emisiones generadas por diferentes tipos de camiones de carga pesada, que funcionan a diesel, en 5 ciudades de China. (Valores estimados desde [6])