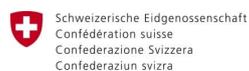




GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE MAQUINARIA MÓVIL NO DE CARRETERA *(Cálculo de Emisiones del Inventario)*



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Agencia Suiza para el Desarrollo
y la Cooperación COSUDE



CALAC+ es un programa de COSUDE ejecutado por Swisscontact

Guía metodológica para la construcción del inventario de maquinaria móvil no de carretera (Estimación de la población de maquinaria)

Documento elaborado en el marco del Programa Clima y Aire Limpio en Ciudades de América Latina - CALAC+ (Fase 1) financiado por la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación - COSUDE y ejecutado por la Fundación Suiza de Cooperación para el Desarrollo Técnico - Swisscontact

La presente guía metodológica es de carácter informativo y no necesariamente refleja los puntos de vista u opiniones de las organizaciones y gobiernos participantes.

Las denominaciones utilizadas y la presentación del material de esta publicación no implican en lo absoluto la expresión de ninguna opinión sobre el estatus legal de un país, territorio, ciudad o área, sobre sus autoridades.

Lo contenido en este documento debe ser estudiado con cuidado, por las entidades o gobiernos interesados, considerando las condiciones locales propias (ej. riesgos para salud, viabilidad tecnológica, aspectos económicos, factores políticos y sociales, nivel de desarrollo, la capacidad nacional o local, entre otros) antes de adoptar total o parcialmente contenidos de esta guía directamente en instrumentos con validez jurídica.

Elaborado por:

Mijahil Aliosha Reinoso Duran
Experto en Maquinaria Non-Road

Revisado por:

Adrián Montalvo
Director Programa CALAC+

Helberth Santiago Morales Pinilla
Coordinador Non-Road CALAC+

Guisselle Nancy Castillo Coila
Coordinadora CALAC+ para Perú

Fotografía de Portada:

TECSUP sede Lima, Perú; AVESCO Langenthal Suiza (abajo); Minicargador en vía pública en Lima, Perú (arriba).

Edición: febrero 2020

El Programa Clima y Aire Limpio en Ciudades de América Latina (CALAC+) persigue una visión de ciudades más sanas que reducen sus emisiones de contaminantes y gases de efecto invernadero (GEI), mediante el fomento de un cambio hacia autobuses urbanos y maquinaria móvil no de carretera libres de hollín y bajos en emisiones de carbono.

Esta guía forma parte de una serie de 7 documentos técnicos desarrollados por CALAC+ para fomentar el conocimiento y la gestión ambiental de reducción de emisiones de maquinaria en el contexto latinoamericano. Los temas tratados incluyen la generación de inventarios, estimación de contaminantes, sistemas de control de emisiones, políticas de estándares normativos y fiscalización de las medidas adoptadas.

La Guía metodológica para la estimación de emisiones de la maquinaria móvil no de carretera completa a la primera guía y aporta los fundamentos y antecedentes para la estimación de las emisiones de dicha flota.

Contenido

1.	INTRODUCCIÓN	5
2.	METODOLOGIA PARA EL CÁLCULO DE EMISIONES	7
3.	FACTOR DE EMISIÓN ESTADO ESTACIONARIO PARA EQUIPO NUEVO	10
4.	NIVEL DE ACTIVIDAD	15
5.	FACTOR DE CARGA	17
6.	FACTOR DE DETERIORO.....	18
7.	FACTOR DE AJUSTE TRANSITORIO.....	21
8.	AJUSTE POR AZUFRE EN EL COMBUSTIBLE	23
9.	PROYECCIÓN DE LA POBLACIÓN DE MAQUINARIA NO DE CARRETERA.....	25
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	28

1. INTRODUCCIÓN

La presente metodología es para la elaboración de un inventario de emisiones de la Maquinaria Móvil No de carretera (MMNC), en los países del Programa Clima y Aire Limpio en Ciudades de América Latina (CALAC+)¹, se ha desarrollado con base a la experiencia de Santiago de Chile en la elaboración de su inventario de Maquinaria Móvil No de Carretera (MMNC), del año 2013. Esta guía es complementaria a la **GUÍA METODOLÓGICA PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL INVENTARIO DE MAQUINARIA MOVIL NO DE CARRETERA**, que corresponde a la estimación de la población de este tipo de fuentes. El objetivo ahora es mostrar los fundamentos y antecedentes para la estimación de las emisiones de dicha flota.

El alcance de esta guía cubre los siguientes contaminantes atmosféricos:

- Material particulado (MP y MP2.5),
- Monóxido de carbono (CO),
- Hidrocarburos (HC)
- Óxidos de nitrógeno (NOx)

Además, se incluyen:

- Dióxido de carbono (CO₂)
- Carbono Negro (BC o Black Carbon)
- consumo de combustible.

Respecto de la maquinaria considerada, el alcance abarca aquellas con motores Diésel de potencias nominales entre 19 y 560 kW, consistente con los alcances de la guía anterior.

Para la elaboración de esta guía se revisaron las siguientes metodologías a manera de referencia: MOVES² de la Agencia Ambiental de Estados Unidos (EPA), definida en sus respectivos reportes técnicos; CORINAIR de la Unión Europea (UE), definida en el documento “EMEP/EEA emission inventory guidebook 2016” [CORINAIR 2016] y el “Non-road energy consumption and pollutant emissions” de la Oficina de Medioambiente de Suiza (FOEN).

Para el caso del modelo MOVES, los reportes técnicos considerados en la presente metodología corresponden a los documentos y que se indican en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

¹ Actualmente participan en esta iniciativa las ciudades de Bogotá, Ciudad de México, Lima y Santiago de Chile.

² Moves es el modelo de emisiones para la componente en ruta y No de Carretera de la EPA. La parte No de Carretera corresponde a la adopción del modelo NONROAD anterior.

Tabla 1: Documentos EPA de referencia para estimación de emisiones MMNC

Reporte Técnico	Ver en Bibliografía
<i>Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Compression-Ignition Engines</i>	[EPA2014b]
<i>Median Life, Annual Activity and Load Factor Values for Nonroad Engine Emissions Modeling</i>	[EPA2008]
<i>User's Guide for the Final NONROAD2005 Model</i>	[EPA2005]
<i>Calculation of Age Distributions in the Nonroad Model: Growth and Scrappage</i>	[EPA2005-A]
<i>Geographic Allocation of Nonroad Engine Population Data to the State and County Level</i>	[EPA2005-B]
<i>Nonroad Engine Growth Estimates</i>	[EPA2005-C]

2. METODOLOGIA PARA EL CÁLCULO DE EMISIONES

La metodología propuesta para la estimación del inventario de emisiones es aquella que calcula las emisiones de la flota a partir del nivel de actividad en horas anuales de uso y su tasa de emisión, para lo cual es necesario estratificar o segmentar la población de maquinarias según los atributos técnicos que determinan tanto el nivel de actividad como la tasa de emisión de contaminantes. Los atributos que las metodologías de referencia definen como relevantes para esta caracterización son los que se señalan a continuación:

Tabla 2: Atributos técnicos para la caracterización de las emisiones de la flota.

Atributo	Descripción	Acrónimo
Rango de Potencia	Rango de potencia al que pertenece la maquinaria según su potencia nominal del motor en [kW]. Se caracteriza la flota en rangos de potencia normalizados según [EPA2008].	<i>Rpot</i>
Tipo Motor	Se define según el tipo de encendido: por chispa (Otto) o por compresión (Diésel). También según el tipo de combustible (gasolina, GNC/GLP, Diésel). Para los motores encendidos por chispa se subclasifican en dos o cuatro tiempos. Para el alcance de estudio se consideran sólo los motores Diésel. Esta tipificación es una de las que caracteriza, el estándar de emisiones aplicable y por ende también la tasa de emisión o factor de emisión por contaminante.	<i>Mtip</i>
Tipo Maquinaria o Equipo	El tipo de maquinaria (o equipo), corresponde a las tipologías estandarizadas en la metodología EPA y detallada en la GUÍA METODOLÓGICA PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL INVENTARIO DE MAQUINARIA MOVIL NO DE CARRETERA de CALAC+ que es consistente con [EPA2005]. Esto es por ejemplo: Bulldozer, Cargador Frontal, Excavadora, etc.	<i>Etip</i>
Nivel de Emisiones.	El Nivel de Emisiones es como caracterizamos la tecnología de control de emisiones que a su vez determina las tasas de emisión del contaminante, conforme el cumplimiento de alguna (o ninguna), norma o estándar de emisiones. Para aquellos equipos de origen europeo corresponde a las normas definidas en [CORINAIR 2016] y para aquellos de origen estadounidense a las definidas en [EPA2014b]. Para armonizar este atributo bajo una misma metodología de cálculo, se considera la	<i>Eniv</i>

Atributo	Descripción	Acrónimo
	Tabla 5 , de equivalencias entre ambas. Esto es necesario para el caso de flotas con importación de maquinarias de diverso origen, como es el caso de los países miembros de CALAC+.	
Edad	La edad de la maquinaria se determina a partir de La distribución de la flota por año de fabricación y se relaciona con aspectos tales como el factor de deterioro o desgaste.	<i>Edad</i>

En vista de la tabla anterior es necesario calcular las emisiones sobre cada subsegmento (*sub*), que agrupe a las máquinas con idénticos atributos técnicos y que por lo tanto son equivalentes en el comportamiento de sus emisiones y niveles de actividad. Para llevar a cabo dicho cálculo en todas las metodologías de referencia se pueden encontrar formas muy similares para su expresión algebraica. Una forma extendida de la ecuación fundamental para el cálculo de emisiones es la siguiente:

$$E_i = \sum_{sub} [N_{sub} \cdot NA_{sub} \cdot Pot_{sub} \cdot FC_{sub} \cdot (FE_{sub,i} \cdot FAT_{sub,i} \cdot FD_{sub,i} - SMP_{sub,i})]$$

Ecuación 1

Dónde:

Sub : Índice que señala al subsegmento de la flota con iguales atributos técnicos: rango de potencia, tipo de motor, tipo de maquinaria, nivel de emisiones y edad.

E_i : Emisiones para el subsegmento *sub* de la flota, para el contaminante *i* durante el período de cálculo del inventario (típicamente un año), en [g].

N_{sub} : Población o parque en unidades de equipos del subsegmento *sub* de la flota.

NA_{sub} : Nivel de Actividad por máquina en horas de uso al año [hr], para los equipos del subsegmento *sub* de la flota.

Pot_{sub} : Potencia nominal promedio del motor en [kW], para la población en el rango de potencias del subsegmento *sub*.

FC_{sub} : Factor de carga representativo de las condiciones de operación de la flota del subsegmento *sub*. Representa la fracción de la potencia nominal del motor, a la que típicamente opera la maquinaria (adimensional).

FE_{sub,i} : Factor de emisión del contaminante *i* del equipo nuevo (hora cero), para cualquier unidad del subsegmento *sub*, operando en estado estacionario. Representa la tasa de emisiones en gramos por unidad de trabajo, [g/kW-hr].

$FAT_{sub,i}$: Factor de ajuste transitorio del factor de emisión en estado estacionario $FE_{sub,i}$ de los equipos del subsegmento sub , para ajustar las emisiones del motor desde la operación estacionaria a la operación transitoria³, (adimensional).

$FD_{sub,i}$: Factor de deterioro, representa el ajuste del factor de emisiones del contaminante i , por el envejecimiento o deterioro del motor y los sistemas de control de emisiones de los equipos del subsegmento sub , (adimensional).

$SMP_{sub,i}$: Ajuste o descuento de masa de MP por variación del contenido de azufre en el combustible respecto de los valores de azufre del combustible de certificación utilizado para la medición de $FE_{sub,i}$. Para otros contaminantes distintos del MP $S_{MP} = 0$. Se expresa en [g/kW-hr].

Los próximos capítulos de este documento ahondarán en el desarrollo de cada una de estas variables y factores, considerando principalmente las recomendaciones y valores propuestos por la EPA para cada una de éstas. No obstante, se recomienda buscar en todos los casos valores locales representativos para dichas variables y factores, o al menos una discusión con expertos locales de la industria de la Maquinaria Móvil No de Carretera, para su validación.

EJEMPLO 1: PASO 1

A continuación, se presenta, a manera de ejemplo, una flota de maquinaria de construcción, con motor diésel, agrupada en subsegmentos, según sus atributos técnicos para la caracterización de las emisiones de la flota indicados en la Tabla 2. El ejemplo considera la estimación de las emisiones para el año 2015.

<i>sub</i>	<i>Rubro</i>	<i>Etip</i>	<i>Rpot [kW]</i>	<i>Año</i>	<i>Edad [años]</i>	<i>N_{sub}</i>	<i>Pot_{sub} [kW]</i>	<i>Eniv</i>
1	Construcción	Excavadora	130 ≤ kW < 225	2012	4	47	136,4	Tier 3
2	Construcción	Excavadora	130 ≤ kW < 225	2009	7	25	145,3	Tier 2
3	Construcción	Excavadora	75 ≤ kW < 130	2009	7	12	122,7	Tier 2
4	Construcción	Motoniveladora	130 ≤ kW < 225	2012	4	50	184,3	Tier 3
5	Construcción	Motoniveladora	75 ≤ kW < 130	2012	4	38	89,5	Tier 3

Se puede observar de la tabla anterior, que cada subsegmento difiere de los otros en alguno de los atributos técnicos relevantes para caracterizar sus emisiones. Para hacer posible el cálculo de las emisiones E_i , conforme la Ecuación 1, se requiere determinar el valor de NA , FC , FE , FAT , FD , SMP . Estos se irán calculando en los siguientes pasos del desarrollo de este ejemplo, en la presente Guía.

³ Se entiende aquí por operación transitoria del motor aquella que resulta del cambio permanente de la velocidad y la carga, como ocurre en la operación real. Tiene el sentido opuesto de operación estacionaria, en condiciones de velocidad y carga constantes, como ocurre durante el ciclo de certificación de emisiones.

3. FACTOR DE EMISIÓN ESTADO ESTACIONARIO PARA EQUIPO NUEVO

La tasa de emisión que se expresa en la **Ecuación 1**, como Factor de Emisión de Equipo Nuevo, para el contaminante i ($FE_{sub,i}$), representa la condición de emisión del motor al momento de la certificación de emisiones con cero horas de uso. Esto es que todos los motores certificados para algún estándar de emisiones, conforme $Eniv$, han debido acreditarlo con mediciones de sus emisiones de escape y del consumo de combustible, bajo un ciclo de operación estacionaria, es decir en un conjunto de puntos de operación de torque y velocidad del motor constantes. Los ciclos para dicha certificación están regulados en la norma ISO DP 8178, y el ciclo particular utilizado depende del tipo de aplicación del motor. Por ejemplo, para **MMNC** se utilizan los ciclos C1 y C2 como se muestra en **Tabla 3**.

A su vez los estándares de emisión que debe cumplir la maquinaria en la certificación de emisiones, y que definen los niveles tecnológicos según $Eniv$, se han establecido conforme rango de potencia del motor⁴, por lo que finalmente los factores de emisión son dependientes de los atributos $Eniv$ y $Rpot$. Para representar este valor de $FE_{sub,i}$ los modelos de referencia utilizan el valor de certificación directamente medido (EPA), agrupados según subsegmentos $Eniv$ y $Rpot$, o el estándar de emisión correspondiente (COPERT), pudiendo también definir algún valor intermedio. Los valores que se presentan en la **Tabla 4** corresponden a los definidos por el modelo de la EPA, el que considera los valores de certificación, con excepción de las tecnologías anteriores a la implementación de estándares de emisión, para las que considera valores disponibles de otras mediciones realizadas. Otros valores de FE por nivel de emisiones y rango de potencia, se pueden encontrar en [CORINAIR 2016].

Tabla 3: Puntos de operación estacionarios ciclo ISO DP 8178

Torque, %	100	75	50	25	10	100	75	50	25	10	0
RPM	Velocidad Nominal					Velocidad Intermedia					Ralentí
Vehículos No de Carretera (factor de ponderación de cada punto de operación en el resultado final de emisiones)											
Tipo C1	0.15	0.15	0.15	-	0.10	0.10	0.10	0.10	-	-	0.15
Tipo C2	-	-	-	0.06	-	0.02	0.05	0.32	0.30	0.10	0.15

Factores de Emisiones del cárter HC

Las emisiones del cárter son aquellas emisiones que se escapan de la cámara de combustión más allá de los anillos de pistón, en el cárter. Para los motores diésel con cárteres con ventilación a la atmósfera el factor de emisión de HC del cárter es igual al 2.0% del factor de emisión de HC a la salida del escape, incluido el deterioro. Esto es válido para todos los motores Tier 3 y anteriores. Para motores Tier 4, se supone las emisiones del cárter igual a cero.

Fracción de MP_{2.5} y de Carbono Negro (BC)

Los factores de emisión entregados en la **Tabla 4** son para calcular el MP de 10 micras o menos de diámetro. [EPA2014b] considera un ajuste de 0.97 que se aplica a todos los valores de MP,

⁴ Los estándares de emisión también son dependientes del año de fabricación desde y hasta el cual se aplica determinada norma de emisiones. Esta consideración respecto de que norma de emisión cumplen los motores debe formar parte de las características de la flota de MMNC conforme "Guía Metodológica para la Construcción del Inventario de MMNC"

para transformar a emisiones de MP2.5 (menores a 2.5 micras). Esto es que sólo una pequeña fracción de 0.03 del MP es mayor a 2.5 micrones. A su vez, para transformar los factores de emisión de MP a BC, ya que en la metodología [MOVES2014] no se encuentra indicada la fracción de BC en el MP, se pueden utilizar las fracciones reportadas en [CORINAIR 2016] que se indican **Tabla 6**.

Tabla 4 Factor de emisión equipo nuevo y consumo de combustible

Potencia Motor [kW]	Estándar de Emisiones	BSFC [g/kW- hr]	Factor de Emisión [g/kW-hr]			
			HC	CO	NOx	PM
>18 A 37	Tier 0	246	2.4138	6.7051	9.2531	1.0728
	Tier 1		0.3740	2.0548	6.3402	0.4545
	Tier 2		0.3740	2.0548	6.3402	0.4545
	Tier 4IA		0.5632	1.8412	5.2367	0.2159
	Tier 4FA		0.1824	0.5471	3.7039	0.0362
	Tier 4FC		0.0241	0.0630	2.9288	0.0013
>37 A 56	Tier 0	246	1.3276	4.6802	9.2531	0.9682
	Tier 1		0.6987	3.1729	7.5084	0.6343
	Tier 2		0.4922	3.1729	6.3028	0.3218
	Tier 4IA		0.2374	1.3115	4.0633	0.1998
	Tier 4FA		0.0992	0.3581	3.7374	0.0322
	Tier 4FC		0.0241	0.0738	2.9744	0.0013
>56 A 75	Tier 0	246	1.3276	4.6802	9.2531	0.9682
	Tier 1		0.6987	3.1729	7.5084	0.6343
	Tier 2		0.4922	3.1729	6.3028	0.3218
	Tier 3B		0.2467	3.1729	4.0231	0.2682
	Tier 4IA		0.1167	0.5257	3.3807	0.1542
	Tier 4IC		0.0094	0.0362	2.6217	0.0094
	Tier 4FA		0.1006	1.7997	4.3905	0.2494
	Tier 4FB		0.0161	0.1354	0.1824	0.0201
	Tier 4FC		0.0000	0.0000	2.7679	0.0094
	Tier 4FD		0.0107	0.0000	0.1220	0.0000
>75 A 130	Tier 0	221	0.9119	3.6208	11.2378	0.5391
	Tier 1		0.4533	1.1627	7.5795	0.3755
	Tier 2		0.4533	1.1627	5.4982	0.2414
	Tier 3		0.2467	1.1627	3.3526	0.2950
	Tier 4IA		0.0469	0.2682	2.6499	0.0443
	Tier 4IB		0.0228	0.3513	2.7209	0.0148
	Tier 4IC		0.0040	0.0121	2.5318	0.0054
	Tier 4ID		0.0094	0.1006	0.3004	0.0000
	Tier 4FB		0.0094	0.0697	0.1931	0.0148
	Tier 4FC		0.0040	0.0054	2.4514	0.0027
	Tier 4FD		0.0134	0.0308	0.1287	0.0013
	>130 A 225		Tier 0	221	0.9119	3.6208
Tier 1		0.4144	1.0031		7.4789	0.3379
Tier 2		0.4144	1.0031		5.3641	0.1770
Tier 3		0.2467	1.0031		3.3526	0.2012
Tier 4IA		0.1529	2.2020		3.3083	0.1448
Tier 4IB		0.0107	0.3312		1.4751	0.0148
Tier 4IC		0.0148	0.0697		1.4966	0.0013
Tier 4ID		0.0375	0.0000		0.1475	0.0094
Tier 4FB		0.0107	0.0268		0.1985	0.0121
Tier 4FC		0.0148	0.2870		1.5462	0.0000
Tier 4FD		0.0134	0.0201		0.1059	0.0027
>225 to 450		Tier 0	221		0.9119	3.6208
	Tier 1	0.2722		1.7514	8.0662	0.2695

Potencia Motor [kW]	Estándar de Emisiones	BSFC [g/kW- hr]	Factor de Emisión [g/kW-hr]			
			HC	CO	NOx	PM
	Tier 2		0.2240	1.1305	5.8133	0.1770
	Tier 3		0.2240	1.1305	3.3526	0.2012
	Tier 4IA		0.1529	2.2020	3.3083	0.1448
	Tier 4IB		0.0107	0.3312	1.4751	0.0148
	Tier 4IC		0.0161	0.0711	1.4952	0.0013
	Tier 4ID		0.0375	0.0000	0.1475	0.0094
	Tier 4FB		0.0107	0.0268	0.1985	0.0121
	Tier 4FC		0.0148	0.2870	1.5462	0.0000
	Tier 4FD		0.0134	0.0201	0.1059	0.0027
>450 a 560	Tier 0	221	0.9119	3.6208	11.2378	0.5391
	Tier 1		0.1971	1.7795	7.8074	0.2950
	Tier 2		0.2240	1.7795	5.4982	0.1770
	Tier 3		0.2240	1.7795	3.3526	0.2012
	Tier 4IA		0.1529	2.2020	3.3083	0.1448
	Tier 4IB		0.0107	0.3312	1.4751	0.0148
	Tier 4IC		0.0161	0.0711	1.4952	0.0013
	Tier 4ID		0.0375	0.0000	0.1475	0.0094
	Tier 4FB		0.0107	0.0268	0.1985	0.0121
	Tier 4FC		0.0148	0.2870	1.5462	0.0000
	Tier 4FD		0.0134	0.0201	0.1059	0.0027

Notas: Los valores originales en HP fueron transformados por su equivalencia en kW (1HP=0,745kW).

Tier 4I = Tier 4 Interim; Tier 4F = Tier 4 Final; Tipos de tecnología Tier 4/Tier 3:

Índice	DPF	SCR
A	No	No
B	No	Si
C	Si	No
D	Si	Si

Fuente: Elaboración propia, a partir de [MOVES2014b]

Para el caso de flotas con importación de maquinarias de diverso origen, como puede ser el caso de los países miembros de CALAC+, la flota estará constituida al menos por tecnologías Tier o Stage, por lo que se hace necesario definir una equivalencia entre los niveles tecnológicos entre ambos tipos de regulación, la que afortunadamente en general existen. La

Tabla 5 muestra las equivalencias utilizadas en el inventario de Chile.

Tabla 5: Equivalencias entre Estándar de Emisiones EPA y Stage⁵

EPA	Stage
Tier 0	Pre Stage I
Tier 1	Stage I
Tier 2	Stage II
Tier 3	Stage IIIA
Tier 4 Interim	Stage IIIB
Tier 4 Final	Stage IV
Tier 4FD	Stage V

Fuente: A partir de [GEASUR 2014]

Tabla 6: Fracción de Carbono Negro en el MP de motores No de Carretera

Tecnología	Diesel < 130 kW		Diesel ≥ 130 kW	
	f-BC	+/- (%)	f-BC	+/- (%)
<1981	0.55	10	0.50	20
1981-1990	0.55	10	0.50	20
1991-Stage I	0.55	10	0.50	20
Stage I	0.80	10	0.70	20
Stage II	0.80	10	0.70	20
Stage IIIA	0.80	10	0.70	20
Stage IIIB, no DPF	0.80	50	0.70	20
Stage IIIB, DPF	0.15	50	0.15	20
Stage IV, no DPF	0.80	50	0.70	30
Stage IV, DPF	0.15	50	0.15	30
Stage V	0.15	50	0.15	30

Fuente: Elaboración propia, a partir de [CORINAIR 2016]

Factor de Emisión del CO₂

El factor de emisión de CO₂, por lo general es calculado en base al consumo específico de combustible al freno (BSFC). A continuación, se presenta la ecuación para el cálculo de dicho factor de emisión:

$$FE_{CO_2} = (BSFC - FE_{HC}) \cdot 0.87 \cdot (44/12)$$

Ecuación 2

Dónde:

FE_{CO_2} : Factor de emisión de CO₂ en [g/kW-hr].

⁵ Para el caso de Stage V, vigente en Europa desde 2018, no existe una equivalencia con Tier, ya que incluyó el límite de Número de Partículas, no considerado por la EPA. No obstante para efectos de la elaboración del inventario de emisiones se debe considerar los factores de emisión correspondientes a Tier 4FD.

BSFC : Consumo de combustible por unidad de trabajo erogado por el motor al eje (Break Specific Fuel Consumption), en [g/kW-hr], calculado durante el ciclo de certificación.

FE_{HC} : Factor de emisión de HC en [g/kW-hr] (Ver valores en Tabla 4).

0.87 : Fracción en masa de carbono en el diésel.

44/12 : Proporción entre la masa del CO₂ y su masa de carbono.

En todo caso para obtener los valores de emisión agregados expresados en la **Ecuación 1**, como E_{CO_2} y E_{SO_2} , se deben aplicar los factores de ajuste transitorio y de deterioro sobre **BSFC** y **FE_{HC}** previamente y cuando corresponda.

EJEMPLO 1: PASO 2

Continuando con nuestro ejemplo, podemos incorporar ahora, a partir de los valores que entrega la Tabla 4, el factor de emisión de cada subsegmento, según R_{pot} y $Eniv$, como sigue:

<i>sub</i>	<i>Rubro</i>	<i>Etip</i>	<i>Rpot</i> [kW]	<i>Año</i>	<i>Edad</i> [años]	<i>N_{sub}</i>	<i>Pot_{sub}</i>	<i>Eniv</i>	<i>FE_{sub,mp}</i> [g/kW-hr]
1	Construcción	Excavadora	130 ≤ kW < 225	2012	4	47	136,4	Tier 3	0,2012
2	Construcción	Excavadora	130 ≤ kW < 225	2009	7	25	145,3	Tier 2	0,1770
3	Construcción	Excavadora	75 ≤ kW < 130	2009	7	12	122,7	Tier 2	0.2414
4	Construcción	Motoniveladora	130 ≤ kW < 225	2012	4	50	184,3	Tier 3	0,2012
5	Construcción	Motoniveladora	75 ≤ kW < 130	2012	4	38	89,5	Tier 3	0,2950

En particular se ha incorporado el FE de Material Particulado. Se puede observar que, para los dos rangos de potencia presentes en el ejemplo, el factor de emisión para MP sufre un incremento desde Tier 2 a Tier 3. Esto se debe, por una parte, a que dichos estándares no reducen el límite para este contaminante, y por la otra, a que los factores de emisión utilizados corresponden a valores de certificación de emisiones, por lo que existe en general son más bajos que el límite y cuentan con holgura para subir, sin sobrepasar el límite. En la práctica es probable que, si tomamos en cuenta el compromiso cruzado que existe entre el NO_x y el MP, una reducción en el límite del NO_x para el estándar Tier 3, este se resolvió en parte, aumentando las emisiones de MP.

4. NIVEL DE ACTIVIDAD

El nivel de actividad del parque de la maquinaria No de Carretera es un parámetro importante en el cálculo de las emisiones y corresponde en general a condiciones locales del uso que se le da a la maquinaria. No obstante, en ausencia de estadísticas locales sobre este parámetro, se pueden considerar los niveles de actividad reportados en el documento [EPA2008]. Como se verá en la **Tabla 7**, el nivel de actividad se considera función del tipo de maquinaria.

Tabla 7 Nivel de actividad por tipo de maquinaria.

Tipo de maquinaria	NA [Hrs/año]
Asfaltadora	821
Barredoras	1220
Bulldozer	899
Camiones Fuera de Carretera	1641
Cargador de troncos	1276
Cargador Frontal	761
Cosechadora Agricultura	110
Dumper	566
Excavadoras	1092
Grúa Horquilla	1700
Grúa horquilla todo terreno	662
Grúa telescópica	990
Manipulador	878
Minicargadoras	818
Miniexcavadoras	818
Motoniveladoras	962
Otro Equipo Agrícola	381
Otro equipo de construcción	606
Otro Equipo Para Minería Subterránea	1533
Perforador	466
Plataforma telescópica	384
Quitanieve	40
Retroexcavadora	1135
Rodillos	760
Tractores no agrícolas	1135
Tractores agrícolas y forestal	475
Zanjadoras	593

Fuente: Elaboración propia a partir de [EPA2008]

Existen antecedentes que indica que el Nivel de Actividad puede ser decreciente con la edad de los equipos. En este sentido [FOEN2015], propone, para el caso específico de Suiza, una corrección por edad de la flota. No obstante, por no existir información local al respecto, esta guía adopta el criterio de la EPA, de no hacer correcciones por antigüedad.

EJEMPLO 1: PASO 3

A continuación, incorporaremos el Nivel de Actividad que entrega la Tabla 7, a cada subsegmento del ejemplo, lo anterior según *Etip*, como sigue:

<i>sub</i>	<i>Etip</i>	<i>Rpot</i> [kW]	<i>Año</i>	<i>Edad</i> [años]	<i>N_{sub}</i>	<i>Pot_{sub}</i>	<i>Eniv</i>	<i>FE_{sub,mp}</i> [g/kW-hr]	<i>NA</i> [hr/año]
1	Excavadora	130 ≤ kW < 225	2012	4	47	136,4	Tier 3	0,2012	1092
2	Excavadora	130 ≤ kW < 225	2009	7	25	145,3	Tier 2	0,1770	1092
3	Excavadora	75 ≤ kW < 130	2009	7	12	122,7	Tier 2	0,2414	1092
4	Motoniveladora	130 ≤ kW < 225	2012	4	50	184,3	Tier 3	0,2012	962
5	Motoniveladora	75 ≤ kW < 130	2012	4	38	89,5	Tier 3	0,2950	962

5. FACTOR DE CARGA

El Factor de Carga (FC), representa la fracción de la potencia nominal del motor, a la que típicamente opera la maquinaria. Esto es que el motor sólo ocasionalmente es exigido hasta su potencia máxima (potencia nominal) y en general está operando a una fracción de dicha potencia. El valor promedio de esta fracción es el factor de carga. Se entiende que el consumo de energía total del parque expresado en $[kW-h]$ es igual a la población total (N) multiplicada por la potencia media de uso ($Pot \cdot FC$), multiplicado a su vez por las horas de uso de cada unidad o nivel de actividad (NA), de donde se desprende que el factor de carga es la fracción de la energía consumida por la población de maquinaria respecto de su uso a plena carga, como se indica en la siguiente expresión,

$$W = \sum_{sub} N_{sub} \cdot NA_{sub} \cdot Pot_{sub} \cdot FC_{sub}$$

Ecuación 3

donde el subíndice sub designa a la flota perteneciente al subsegmento sub , que cuenta con idénticos valores de nivel de actividad, rango de potencia y factor de carga.

El factor de carga es un parámetro sumamente variable ya que depende del ciclo de trabajo real de la maquinaria, cuestión que a su vez depende del operador y del tipo de trabajo a desarrollar. La EPA entrega valores para FC según tipo de maquinaria, para las condiciones de uso de Estados Unidos. En la **Tabla 8**, se presentan dichos valores, homologados a los tipos de maquinaria considerados en la presente Guía.

Tabla 8 Factor de carga.

Tipo de maquinaria	Factor de Carga
Asfaltadora	0.59
Barredoras	0.43
Bulldozer	0.59
Camiones Fuera de Carretera	0.59
Cargador de troncos	0.59
Cargador Frontal	0.59
Cosechadora Agricultura	0.59
Dumper	0.21
Excavadoras	0.59
Grúa Horquilla	0.59
Grúa horquilla todo terreno	0.59
Grúa telescópica	0.43
Manipulador	0.43
Minicargadoras	0.21
Miniexcavadoras	0.21
Motoniveladoras	0.59
Otro Equipo Agrícola	0.59
Otro equipo de construcción	0.59
Otro Equipo Para Minería Subterránea	0.21
Perforador	0.43
Plataforma telescópica	0.21
Quitanieve	0.34
Retroexcavadora	0.21
Rodillos	0.59
Tractores no agrícolas	0.21
Tractores agrícolas y forestal	0.59
Zanjadoras	0.59

Fuente: Elaboración propia a partir de [EPA2008]

EJEMPLO 1: PASO 4

El Factor de Carga se incorpora a cada subsegmento conforme con la Tabla 8, y según el tipo de maquinaria (*Etíp*). Coincidentemente ambos tipos de equipo presentan el mismo valor para *FC*:

<i>sub</i>	<i>Etíp</i>	<i>Rpot</i> [kW]	<i>Año</i>	<i>Edad</i> [años]	<i>N_{sub}</i>	<i>Pot_{sub}</i>	<i>Eniv</i>	<i>FE_{sub,mp}</i> [g/kW-hr]	<i>NA</i> [hr/año]	<i>FC_{sub}</i>
1	Excavadora	130 ≤ kW < 225	2012	4	47	136,4	Tier 3	0,2012	1092	0,59
2	Excavadora	130 ≤ kW < 225	2009	7	25	145,3	Tier 2	0,1770	1092	0,59
3	Excavadora	75 ≤ kW < 130	2009	7	12	122,7	Tier 2	0,2414	1092	0,59
4	Motoniveladora	130 ≤ kW < 225	2012	4	50	184,3	Tier 3	0,2012	962	0,59
5	Motoniveladora	75 ≤ kW < 130	2012	4	38	89,5	Tier 3	0,2950	962	0,59

6. FACTOR DE DETERIORO

El deterioro es el incremento de las emisiones del motor que se produce con el uso y se representa con un factor ($FD_{sub,i}$), que corrige el factor de emisiones de hora cero del motor ($FE_{sub,i}$), correspondientes al subsegmento *sub* y al contaminante *i*.

Para el presente modelo de emisiones el factor de deterioro se representa como sigue, conforme [MOVES2014b]:

$$FD_{sub,i} = 1 + A_{sub,i} \cdot (\text{Factor Edad}_{sub})^b; \text{ Si Factor Edad}_{sub} \leq 1$$

Ecuación 4

$$FD_{sub,i} = 1 + A_{sub,i}; \text{ Si Factor Edad}_{sub} > 1$$

Ecuación 5

Dónde:

$A_{sub,i}$: Para cada contaminante *i* es una constante definida para todos los equipos que pertenecen al subsegmento con idéntico estándar de emisiones *Eniv*. En términos porcentuales ($A \cdot 100$), esta constante representa el porcentaje máximo de incremento de las emisiones por deterioro, al cumplirse la vida media del motor.

b : Constante, para vehículos diésel se considera deterioro lineal en el tiempo de uso, por lo que $b=1$.

Factor Edad_{sub} : Fracción de la vida media en la que se encuentran todas las unidades que pertenecen al mismo subsegmento. Se calcula como el cociente entre las

horas acumuladas en operación del motor a carga completa (potencia nominal) y la vida media⁶ del motor.

$$\text{Factor Edad}_{sub} = \frac{(\text{Edad} \cdot \text{NA}_{sub} \cdot \text{FC}_{sub})}{\text{Vida Media}_{sub}}$$

Ecuación 6

El Factor Edad es la fracción de horas de uso equivalentes a plena carga, acumuladas por el subsegmento de equipos con la misma edad, nivel anual de actividad y factor de carga, dividido por la vida media correspondiente.

La EPA cuenta con valores para los factores *A* y *Vida Media*, que dependen del contaminante *i* y del estándar de emisiones *Eniv*, para el primero, y del rango de potencia del motor *Rpot*, para el segundo. Se presentan los valores dichos factores en la

Tabla 9 y Tabla 10.

Tabla 9 Valores del coeficiente A

Contaminante	Tier 0	Tier 1	Tier 2	Tier 3+
HC	0.047	0.036	0.034	0.027
CO	0.185	0.101	0.101	0.151
NOx	0.024	0.024	0.009	0.008
MP	0.473	0.473	0.473	0.473

Fuente: [MOVES2014b]

Tabla 10 Vida media según potencia de motor diésel

Potencia (kW)	Vida Media (Hrs)
>19 - 37	2.500
>37 - 75	4.667
>75 - 130	4.667
>130 - 225	4.667
>225 - 450	7.000
>450 - 560	7.000
> 560	7.000

Fuente: [EPA2008]

⁶ La Vida Media se entiende como el periodo de tiempo en horas de uso a plena carga del motor (factor de carga=1 o 100%), para el cual el 50% de la maquinaria es chatarra. Para mayor información ver "GUÍA METODOLÓGICA PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL INVENTARIO DE MAQUINARIA MOVIL NO DE CARRETERA".

EJEMPLO 1: PASO 5

Para calcular el Factor de Deterioro (FD), conforme con la Ecuación 4, debemos previamente calcular el factor A (Tabla 9) y el *Factor Edad* (Ecuación 6). A su vez, para calcular el *Factor Edad*, debemos asignar el valor de *Vida Media* según la Tabla 10, todo lo cual se muestra a continuación:

sub	R_{pot} [kW]	$Edad$ [años]	N_{sub}	Pot_{sub}	$Eniv$	$FE_{sub,mp}$ [g/kW-hr]	NA [hr/año]	FC_{sub}	$A_{sub,mp}$	$Vida$ $Media$ [hr]	$Factor$ $Edad$	$FD_{sub,mp}$
1	$130 \leq kW < 225$	4	47	136,4	Tier 3	0,2012	1092	0,59	0,473	4.667	0,552	1,261
2	$130 \leq kW < 225$	7	25	145,3	Tier 2	0,1770	1092	0,59	0,473	4.667	0,966	1,457
3	$75 \leq kW < 130$	7	12	122,7	Tier 2	0,2414	1092	0,59	0,473	4.667	0,966	1,457
4	$130 \leq kW < 225$	4	50	184,3	Tier 3	0,2012	962	0,59	0,473	4.667	0,486	1,230
5	$75 \leq kW < 130$	4	38	89,5	Tier 3	0,2950	962	0,59	0,473	4.667	0,486	1,230

Considerando que para todos los casos $Factor\ Edad < 1$, se consideró la Ecuación 4, para el cálculo de FD_{sub}

7. FACTOR DE AJUSTE TRANSITORIO

Como dicho anteriormente los factores de emisión y el consumo específico de combustible (BSFC), para motores de maquinaria No de Carretera, se obtienen a partir de las pruebas de estado estacionario durante el proceso de certificación de emisiones. Sin embargo, la operación de estado estacionario no siempre es representativa de las condiciones de operación real de la maquinaria. Las diferencias se deben a la carga, la velocidad y demandas transitorias del motor. La EPA aplica "factores de ajuste transitorio" (*FAT*), a los factores de emisión de estado estacionario antes descritos (FE_i). El *FAT* se aplica a los factores de emisiones de los estándares de emisión *Tier 0*, *Tier 1*, *Tier 2* y *Tier 3*. Para *Tier 4*, los factores de emisiones de certificación ya incluyen la medición bajo un ciclo transitorio (Non Road Transient Cycle, NRTC), por lo que para este caso se aplica un *FAT* de 1. Los factores de ajuste por operación transitoria pueden ser mayores o menores que 1.

Dado que el *FAT* depende de la condición de operación del motor y de la tecnología de este, la EPA entrega valores de este factor por tipo de maquinaria (*Etíp*), estándar de emisiones (*Nemi*) y contaminante *i* como se puede ver en la **Tabla 11**.

Tabla 11 Factor de Ajuste Transitorio por tipología

Tipología	HC	CO	NOx		MP		BSFC
	T0-T3	T0-T3	T0-T2	T3	T0-T2	T3	T0-T3
Asfaltadora	1.05	1.53	0.95	1.04	1.23	1.47	1.01
Barredoras / Depuradores	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Bulldozer ⁽¹⁾	1.05	1.53	0.95	1.04	1.23	1.47	1.01
Camiones Fuera de Carretera	1.05	1.53	0.95	1.04	1.23	1.47	1.01
Cargador de Troncos ⁽²⁾	1.05	1.53	0.95	1.04	1.23	1.47	1.01
Cargador Frontal ⁽³⁾	1.05	1.53	0.95	1.04	1.23	1.47	1.01
Cosechadora ⁽⁴⁾	1.05	1.53	0.95	1.04	1.23	1.47	1.01
Dumper	2.29	2.57	1.10	1.21	1.97	2.37	1.18
Excavadoras	1.05	1.53	0.95	1.04	1.23	1.47	1.01
Grúa Horquilla	1.05	1.53	0.95	1.04	1.23	1.47	1.01
Grúa Horquilla Todo Terreno ⁽⁵⁾	1.05	1.53	0.95	1.04	1.23	1.47	1.01
Grúas Telescopicas	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Manipulador ⁽⁶⁾	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Mini-cargadoras ⁽⁷⁾	2.29	2.57	1.1	1.21	1.97	2.37	1.18
Mini-excavadora ⁽⁷⁾	2.29	2.57	1.1	1.21	1.97	2.37	1.18
Motoniveladoras	1.05	1.53	0.95	1.04	1.23	1.47	1.01
Otro Equipo Agrícola	1.05	1.53	0.95	1.04	1.23	1.47	1.01
Otro equipo de construcción	1.05	1.53	0.95	1.04	1.23	1.47	1.01
Otro Equipo Para Minería Subterránea	2.29	2.57	1.10	1.21	1.97	2.37	1.18
Perforadora / Taladro	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Plataforma Telescópica ⁽⁸⁾	2.29	2.57	1.10	1.21	1.97	2.37	1.18
Quitanieve ⁽⁹⁾	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Retroexcavadora ⁽¹⁰⁾	1.05	1.53	0.95	1.04	1.23	1.47	1.01
Rodillos	1.05	1.53	0.95	1.04	1.23	1.47	1.01
Tractor no agrícola ⁽¹⁰⁾	1.05	1.53	0.95	1.04	1.23	1.47	1.01
Tractores agrícolas	1.05	1.53	0.95	1.04	1.23	1.47	1.01
Zanjadora ⁽¹¹⁾	1.05	1.53	0.95	1.04	1.23	1.47	1.01

Notas: T0=Sin Norma; T0-T3=Tier0 hasta Tier3; T0-T2: Sin Norma hasta Tier2, etc. (1) Homologado con el término "Rubber Tire Dozers". (2) Homologado con el término "Logging Equip Fell/Bunch/Skidder". (3) Homologado con el término "Rubber Tire Loaders". (4) Homologado con el término "Swather". (5) Homologado con el término "Rough Terrain Forklifts". (6) Homologado con el término "Other General Industrial Equipment". (7) Homologado con el término "Skid Steer Loaders". (8) Homologado con el término "Aerial Lifts". (9) Homologado con el término "Snowmobiles". (10) Homologado con el término "Tractors/Loaders/Backhoes". (11) Homologado con el término "Trenchers".

Fuente: Elaboración propia a partir de [MOVES2014b]

EJEMPLO 1: PASO 6

Para calcular el Factor de Ajuste Transitorio (*FAT*) para el Material Particulado (*MP*), debemos considerar los valores de la **Tabla 11**, según *Etip* y *Eniv*, como se muestra a continuación:

<i>sub</i>	<i>Etip</i>	<i>N_{sub}</i>	<i>Pot_{sub}</i>	<i>Eniv</i>	<i>FE_{sub,mp}</i> [g/kW-hr]	<i>NA</i> [hr/año]	<i>FC_{sub}</i>	<i>FD_{sub,mp}</i>	<i>FAT_{sub,mp}</i>
1	Excavadora	47	136,4	Tier 3	0,2012	1092	0,59	1,261	1,47
2	Excavadora	25	145,3	Tier 2	0,1770	1092	0,59	1,457	1,23
3	Excavadora	12	122,7	Tier 2	0,2414	1092	0,59	1,457	1,23
4	Motoniveladora	50	184,3	Tier 3	0,2012	962	0,59	1,230	1,47
5	Motoniveladora	38	89,5	Tier 3	0,2950	962	0,59	1,230	1,47

8. AJUSTE POR AZUFRE EN EL COMBUSTIBLE

Este factor aditivo ajusta el valor de FE_i para el contaminante MP, por la variación del contenido de azufre en el combustible comercial que los equipos usan durante su operación en terreno respecto del contenido de azufre del combustible de certificación que se utiliza para obtener los valores de FE_i de los equipos nuevos. El azufre contribuye en la medición de la masa del MP ya que una fracción ($soxcnv$), del azufre consumido como parte del combustible en el motor se transforma en MP, bajo la forma de sulfatos, que pesan 7 lo que al azufre⁷. De esta forma la expresión para el ajuste por contenido de azufre (SMP), tiene la siguiente forma:

$$SMP = BSFC \cdot FAT \cdot 7.0 \cdot soxcnv \cdot 0.01 \cdot (soxbas - soxdsl)$$

Ecuación 7

Dónde:

$BSFC$: Consumo específico de Combustible al Freno, [g/kW-hr]

FAT : Factor de ajuste transitorio para el consumo específico BSFC

7.0 : Gramos de sulfato de MP / gramos de azufre en MP

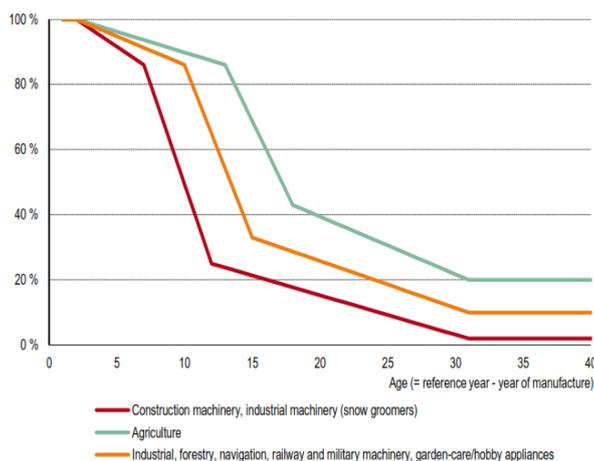
$Soxcnv$ ⁸ : Gramos de Azufre en MP/gramos de Azufre en combustible Consumido.

0.01 : Conversión de porcentaje a fracción

$Soxbas$ ⁹ : Contenido de azufre usado en el combustible de Certificación [%].

$Soxdsl$ ¹⁰ : Contenido de Azufre en el Combustible de Evaluación [%].

Figura 1 Reducción anual de horas de operación de una máquina según su edad.



Fuente: [FOEN 2015]

⁷ [MOVES 2014B], Capítulo 8: Sulfur Adjustment for PM Emissions.

⁸ $Soxcnv = 0.02247$ (Tier 0 a Tier 4A); $Soxcnv = 0.3$ (Tier 4). [MOVES2014b]

⁹ $Soxbas = 0.33\%$ (Tier 0 a Tier 1); $Soxbas = 0.2\%$ (Tier 2 a Tier 3); $Soxbas = 0.05$ (Tier 4 Interim); $Soxbas = 0.0015$ (Tier 4). [MOVES2014b] 4.1 Default Certification Sulfur Level.

¹⁰ Ejemplo, para Chile $Soxdsl = 0.0015$ (Región Metropolitana); $Soxdsl = 0.005$ (otras regiones)

EJEMPLO 1: PASO 7

Para el caso del ejemplo, se considera que el combustible de certificación tiene un contenido de azufre de 2000 ppm ($Sox_{bas}=0,2\%$), para las certificaciones Tier 2 y Tier 3. Mientras que para el diésel comercial utilizado en la operación de la flota el contenido de azufre es de 15 ppm ($Sox_{dsl}=0,0015\%$). A su vez, para tecnologías Tier 2 y Tier 3, como las del ejemplo, el valor de Sox_{cnv} , es de 0,02247 (ver nota 8). Considerando los valores de $BSFC$ de la Tabla 4, conforme con el rango de potencia (R_{pot}) y el estándar de emisiones ($Eniv$), y el factor de ajuste transitorio de la Tabla 11 (por E_{tip} y $Eniv$ de cada subsegmento), es posible calcular SMP de la Ecuación 7, como sigue:

<i>sub</i>	<i>Etip</i>	N_{sub}	R_{pot} [kW]	$Eniv$	$BSFC$ [g/kW]	FAT_{BSFC}	$SMP_{sub,mp}$
1	Excavadora	47	$130 \leq kW < 225$	Tier 3	221	1,01	0,070
2	Excavadora	25	$130 \leq kW < 225$	Tier 2	221	1,01	0,070
3	Excavadora	12	$75 \leq kW < 130$	Tier 2	221	1,01	0,070
4	Motoniveladora	50	$130 \leq kW < 225$	Tier 3	221	1,01	0,070
5	Motoniveladora	38	$75 \leq kW < 130$	Tier 3	221	1,01	0,070

EJEMPLO 1: PASO 8

Con el cálculo de SMP en el PASO 7 del ejemplo, hemos completado la determinación de todas las variables de la Ecuación 1, que permiten el cálculo de las emisiones para cada subsegmento desde $sub=1$ a 5. En la Tabla que sigue completaremos dicho cálculo combinando todos los resultados de los pasos anteriores del ejemplo para cada subsegmento, calculando $E_{sub,mp}$ y la suma para $sub=1$ a 5:

<i>sub</i>	N_{sub}	Pot_{sub}	$FE_{sub,mp}$ [g/kW-hr]	NA [hr/año]	FC_{sub}	$FD_{sub,mp}$	$FAT_{sub,mp}$	$SMP_{sub,mp}$	$E_{sub,mp}$ [g/año]	$E_{sub,mp}$ [g/año]
1	47	136,4	0,2012	1092	0,59	1,261	1,47	0,070	1.252.605	1,253
2	25	145,3	0,1770	1092	0,59	1,457	1,23	0,070	579.308	0,579
3	12	122,7	0,2414	1092	0,59	1,457	1,23	0,070	344.308	0,344
4	50	184,3	0,2012	962	0,59	1,230	1,47	0,070	1.538.639	1,539
5	38	89,5	0,2950	962	0,59	1,230	1,47	0,070	895.177	0,895
									TOTAL	4,610

La expresión de las emisiones en Toneladas es producto de un arreglo de unidades multiplicando los gramos por 10^{-6} .

9. PROYECCIÓN DE LA POBLACIÓN DE MAQUINARIA NO DE CARRETERA

Conforme la metodología presentada hasta aquí, para poder proyectar el inventario de las emisiones futuras de la maquinaria No de Carretera, es necesario, de acuerdo con la Ecuación 1, proyectar el nivel de actividad y los factores de emisión correspondientes. En cuanto a la proyección de los factores de emisión futuros, estos dependerán de los futuros estándares de emisión que defina la legislación en cada país. Por tanto, esta componente de la proyección corresponde a los gobiernos. Dado lo anterior queda pendiente la proyección del nivel de actividad, para el que se utiliza como indicador directamente el crecimiento de la población de la maquinaria asumiendo que los niveles de actividad por tipo de maquinaria, definidos en la Tabla 7, son constantes en el tiempo.

Para las proyecciones del crecimiento de la población, la metodología EPA¹¹ ha optado por las tendencias del mercado basándose en el crecimiento histórico de la población de los equipos No de Carretera.

EJEMPLO 2.

Para el caso de este ejemplo, se cuenta con datos históricos de las importaciones y se utiliza la proyección de las importaciones como indicador del crecimiento del nivel de actividad (considerando que toda la maquinaria importada es vendida en ese año, dados los costos de mantener stock). A manera de ejemplo, en la Tabla 12, se presenta la cantidad de máquinas importadas por año desde el 2002 al 2013, según el rubro de destino.

Tabla 12 Cantidad de maquinarias importadas por año y rubro

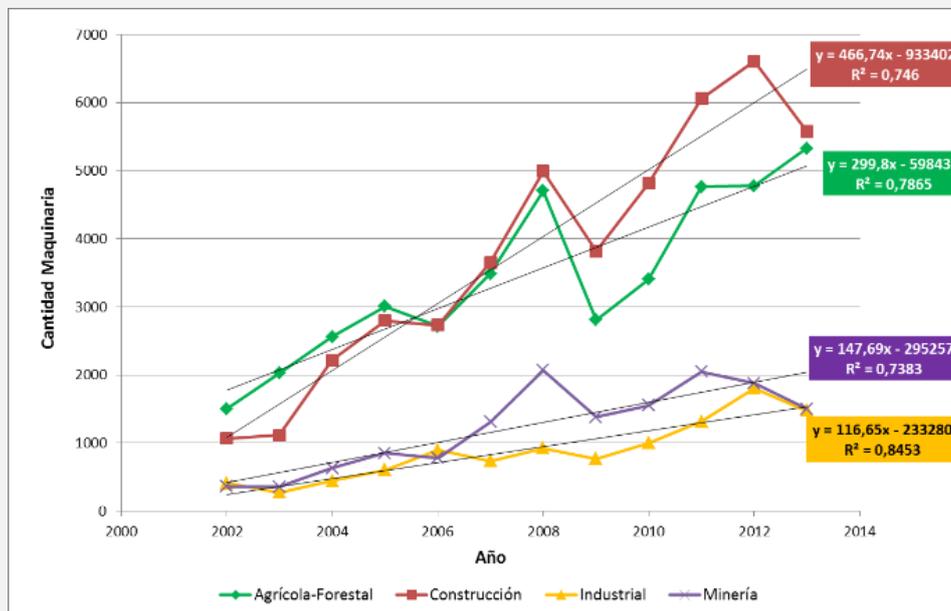
Año importación	Agrícola-Forestal	Construcción	Industrial	Minería
2002	1.501	1.070	414	362
2003	2.026	1.118	275	356
2004	2.559	2.217	448	633
2005	3.008	2.799	603	854
2006	2.715	2.732	895	784
2007	3.488	3.650	735	1.312
2008	4.706	4.987	923	2.071
2009	2.825	3.863	1.412	515
2010	3.406	4.812	1001	1.553
2011	4.762	6.057	1.316	2.050
2012	4.776	6.602	1.808	1.880
2013	5.327	5.580	1.476	1.504

Conforme la metodología [EPA 2002], para proyectar la población futura a partir de los datos históricos se utiliza una regresión lineal. Para tener un panorama y ver si existe tendencia en

¹¹ Non-Road Growth Engine Estimations, Report No. NR-008, 2002. [EPA 2002]

el crecimiento, se muestran en los datos con regresión lineal, para observar el ajuste de los datos.

Figura 2 Cantidad de maquinaria según rubro y año de importación. Con regresión lineal.



A partir de las regresiones lineales ajustadas obtenidas, se realiza la proyección de las máquinas para los diferentes rubros en un horizonte de 10 años, es decir, un crecimiento del parque desde el 2014 al 2025 (ver resultados en **Tabla 13**).

Tabla 13 Proyección de ventas de maquinarias No de Carretera, según rubro.

Año importación	Agrícola-Forestal	Construcción	Industrial	Minería
2014	5.364	6.612	1.653	2.191
2015	5.664	7.079	1.770	2.338
2016	5.964	7.546	1.886	2.486
2017	6.264	8.013	2.003	2.634
2018	6.563	8.479	2.120	2.781
2019	6.863	8.946	2.236	2.929
2020	7.163	9.413	2.353	3.077
2021	7.463	9.880	2.470	3.224
2022	7.763	10.346	2.586	3.372
2023	8.062	10.813	2.703	3.520
2024	8.362	11.280	2.820	3.668
2025	8.662	11.747	2.936	3.815

Los pronósticos presentados en la tabla anterior son distribuidos según su rango de potencia, rubro y tipología. Para ello se calcula la participación que tiene cada maquinaria en la cantidad final obtenida en la línea base y finalmente se distribuirá según su peso en la flota. Para ello usaremos las siguientes tablas de distribución, para el rubro construcción en particular:

Rango Potencia	Bulldozer	Cargador Frontal	Excavadora	Minicargador	Retroexcavadora	Rodillo	Total general
19 ≤ kW < 37	0,02%	0,15%	0,10%	2,52%	0,05%	0,72%	3,56%
37 ≤ kW < 56	0,01%	0,40%	0,32%	12,67%	3,31%	4,23%	20,95%
56 ≤ kW < 75	0,06%	0,58%	2,16%	4,26%	30,07%	0,37%	37,49%
75 ≤ kW < 130	0,51%	4,74%	10,47%	0,02%	1,57%	4,07%	21,38%
130 ≤ kW < 225	0,51%	6,45%	3,51%	0,01%	0,06%	0,17%	10,71%
225 ≤ kW < 450	2,71%	2,44%	0,31%	0,00%	0,00%	0,01%	5,46%
450 ≤ kW < 560	0,42%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,03%	0,45%
Totales	4,24%	14,76%	16,87%	19,47%	35,06%	9,61%	100,00%

Considerando la flota proyectada en el rubro construcción para el año 2020, por 9.413 máquinas importadas en este rubro, se tiene la siguiente distribución de la flota, en cantidades:

Rango Potencia	Bulldozer	Cargador Frontal	Excavadora	Minicargador	Retroexcavadora	Rodillo	Total general
19 ≤ kW < 37	2	14	10	237	4	68	335
37 ≤ kW < 56	1	38	30	1.193	312	398	1.972
56 ≤ kW < 75	6	54	203	401	2.830	35	3.529
75 ≤ kW < 130	48	446	985	2	148	383	2.012
130 ≤ kW < 225	48	607	330	1	6	16	1.008
225 ≤ kW < 450	255	229	29	-	-	1	514
450 ≤ kW < 560	39	-	-	-	-	3	43
Totales	399	1.389	1.588	1.833	3.300	904	9.413

10. BIBLIOGRAFÍA

- [MOVES2014b] “Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Compression-Ignition Engines in MOVES2014b”, EPA420-R-18-009, July 2018.
- [EPA2008] “Median Life, Annual Activity, and Load Factor Values for Nonroad Engine Emissions Modeling”, EPA-420-R-10-016 NR-005d July 2010.
- [EPA 2005-A] “User’s Guide for the Final NONROAD2005 Model”, EPA420-R-05-013 December 2005.
- [EPA 2005-B] “Calculation of Age Distributions in the Nonroad Model: Growth and Scrappage”, EPA420-R-05-018 December 2005 NR-007c.
- [EPA 2005-C] “Geographic Allocation of Nonroad Engine Population Data to the State and County Level”, EPA420-R-05-021 December 2005 NR-014d
- [CORINAIR 2016] “Non-road mobile sources and machinery”, Guidebook 2016.
- [GEASUR 2014] “Análisis técnico-económico de la aplicación de una nueva norma de emisión para motores de maquinaria fuera de ruta a nivel país”, estudio realizado por Geasur el año 2014.
- [Winter and Nielse 2006] “Fuel use and emissions from non-road machinery in Denmark from 1985–2004 – and projections from 2005-2030”, Environmental Project No. 1092 2006 Miljøprojekt.
- [FOEN 2015] “Non-road energy consumption and pollutant emissions”, Bern 2015



Es un Programa de:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

**Agencia Suiza para el Desarrollo
y la Cooperación COSUDE**

Ejecutado por:



calac@swisscontact.org.pe

www.programacalac.com

Facebook: @CALACplus

Twitter: @Calacplus

Prolongación Arenales N°722, Miraflores

Lima 15074 – Perú

Teléfonos: +511 2641707, 2642547

Fax: +511 2643212

www.swisscontact.org