



Programa Clima y Aire limpio
en Ciudades de América Latina

INVENTARIO DE EMISIONES MAQUINARIA MÓVIL NO DE CARRETERA

 Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Agencia Suiza para el Desarrollo
y la Cooperación COSUDE


swisscontact

Aliosha Reinoso D.
Consultor CALAC+
aliosha.reinoso@geasur.cl



EJEMPLO: PASO 2 (de la parte 1)

sub	Rubro	Etip	Rpot [kW]	Año	Edad [años]	N _{sub}	Pot _{sub}	Eniv	FE _{0sub,mp} [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

$$E_{[sub,i]} = [N_{[sub]} \cdot NA_{[sub]} \cdot \overline{Pot}_{[sub]} \cdot FC_{[sub]} \cdot (FE_{0[sub,i]} \cdot FAT_{[sub,i]} \cdot FD_{[sub,i]} - SMP_{[sub,i]})]$$

**NIVEL DE
ACTIVIDAD**





NIVEL DE ACTIVIDAD

Tipo de maquinaria	NA [Hrs/año]
Asfaltadora	821
Barredoras	1220
Bulldozer	899
Camiones Fuera de Carretera	1641
Cargador de troncos	1276
Cargador Frontal	761
Excavadoras	1092
Motoniveladoras	962

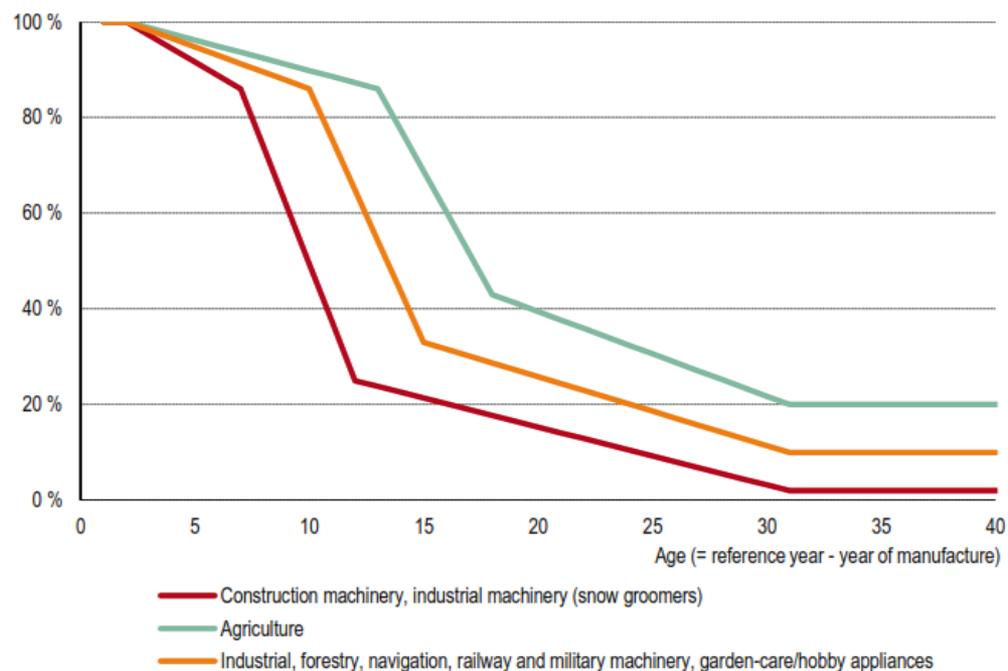
Fuente: [NR2008]





NIVEL DE ACTIVIDAD

- Reducción anual de horas de operación de una máquina según su edad



Fuente: [FOEN2015]



EJEMPLO: PASO 3

sub	Etip	Rpot [kW]	Año	Edad [años]	N _{sub}	Pot _{sub}	Eniv	FE _{sub,mp} [g/kW-hr]	NA [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	Motonivelador a	130 ≤ kW < 225	2012	4	50	184,3	Tier 3	0,2012	962
5	Motonivelador a	75 ≤ kW < 130	2012	4	38	89,5	Tier 3	0,2950	962

$$E_{[sub,i]} = [N_{[sub]} \cdot NA_{[sub]} \cdot \overline{Pot}_{[sub]} \cdot FC_{[sub]} \cdot (FE_{0[sub,i]} \cdot FAT_{[sub,i]} \cdot FD_{[sub,i]} - SMP_{[sub,i]})]$$

FACTOR DE CARGA



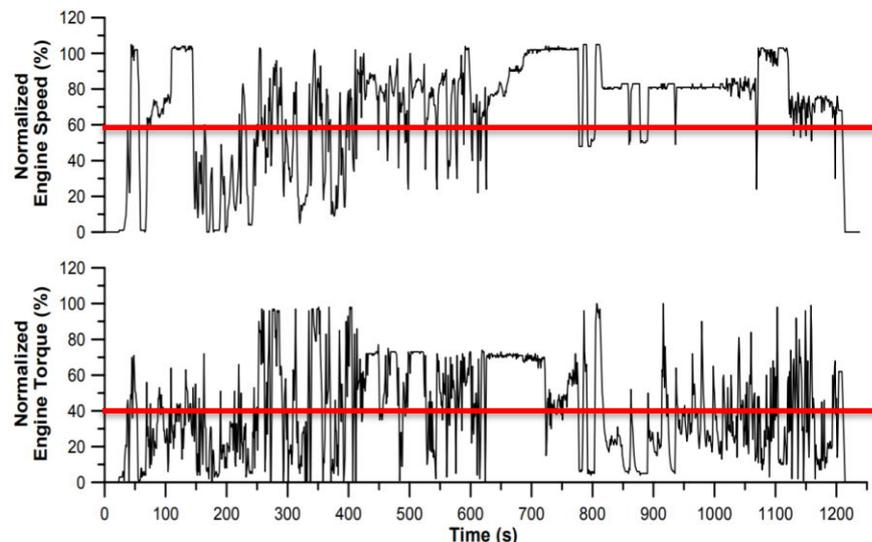


FACTOR DE CARGA

- El **FC** del motor, es la fracción entre la potencia promedio de operación del motor y la potencia nominal.

B-type mode number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Torque	100	75	50	25	10	100	75	50	25	10	0
Speed	rated speed				intermediate speed						low idle
Off-road vehicles											
Type C1	0.15	0.15	0.15		0.1	0.1	0.1	0.1			0.15
Type C2				0.06		0.02	0.05	0.32	0.30	0.10	0.15

- C1: Equipos industriales propulsados con motor diésel (equipos de construcción, tractores, forestales, etc). LF = 0.48
- C2: Vehículos fuera de ruta con motor gasolina > 20kW (Ej. Grúa Horquilla).



NRTC



FACTOR DE CARGA

- El Factor de Carga depende del tipo de maquinaria (E_{tip}), según tabla especificada por el modelo no de carretera de la EPA (NONROAD Model)

Tipo de maquinaria	Factor de Carga
Asfaltadora	0.59
Barredoras	0.43
Bulldozer	0.59
Miniexcavadoras	0.21
Excavadora	0.59
Motoniveladora	0.59

Fuente: [NR2008]





FACTOR DE CARGA: EFECTOS ADICIONALES

- ISO 8178-C1 tiene $FC_{ISO}=0.48$.
- En el caso de motores Diésel MMFR el FE_0 y BSFC están referidos a la condición de ensayo ISO 8178-C1.
- En condiciones reales el FC puede diferir de $FC_{ISO}=0.48$.
- Ya que FE y BSFC dependen de la condición de carga del motor, se podría considerar una corrección de éstos según la desviación al FC_{ISO}
- El inventario “Non-road energy consumption and pollutant emissions”, preparado para FOEN-Suiza, considera un factor de corrección para consumo de combustible.

$$CF_1 = 2.0095 - 2.1981 * \Delta_{LF} + 1.886 * LF_{LF}^2$$



PREGUNTA



EJEMPLO: PASO 4

sub	Etip	Rpot [kW]	Año	Edad [años]	N _{sub}	Pot _{sub}	Eniv	FE _{sub,mp} [g/kW-hr]	NA [hr/año]	FC _{sub}
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

$$E_{[sub,i]} = [N_{[sub]} \cdot NA_{[sub]} \cdot \overline{Pot}_{[sub]} \cdot FC_{[sub]} \cdot (FE_{0[sub,i]} \cdot FAT_{[sub,i]} \cdot FD_{[sub,i]} - SMP_{[sub,i]})]$$

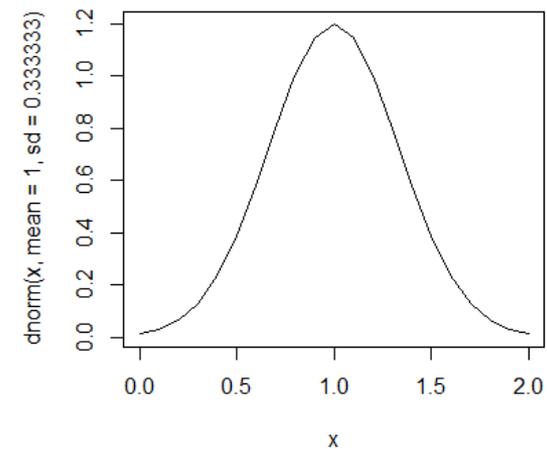
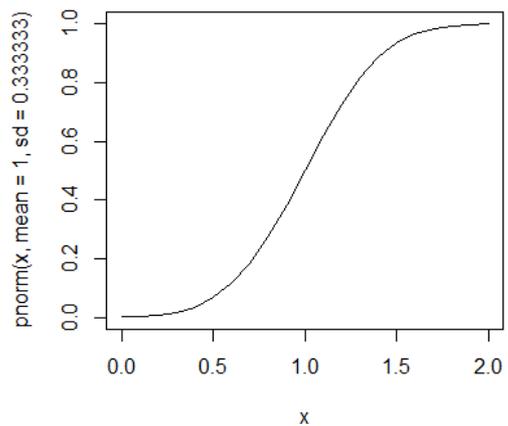
**FACTOR DE
DETERIORO**





VIDA MEDIA, VIDA ÚTIL Y FACTOR EDAD

- La **vida** de un motor es aleatoria según una distribución normal, que la EPA y los fabricantes han construido con el motor operando a plena carga (caso más desfavorable).
- La **vida media** del motor es la esperanza o la media de dicha distribución, que representa para una población de x motores, las horas a las que el 50% de la población se chatarreará (en condiciones de operación a plena carga).





VIDA MEDIA, VIDA ÚTIL Y FACTOR EDAD

- La **vida útil** es el valor de vida media expresado en años (corregido por NA).
- Como la vida media ha sido calculada en condiciones de plena carga es necesario corregir por la carga real de operación del motor (carga promedio), esto se hace corrigiendo por FC

$$Vida\ útil = \frac{vida\ media\ [hrs]}{NA \left[\frac{hrs}{año} \right] \cdot factor\ de\ carga}$$

$$Factor\ Edad = \frac{Edad}{Vida\ Útil}$$

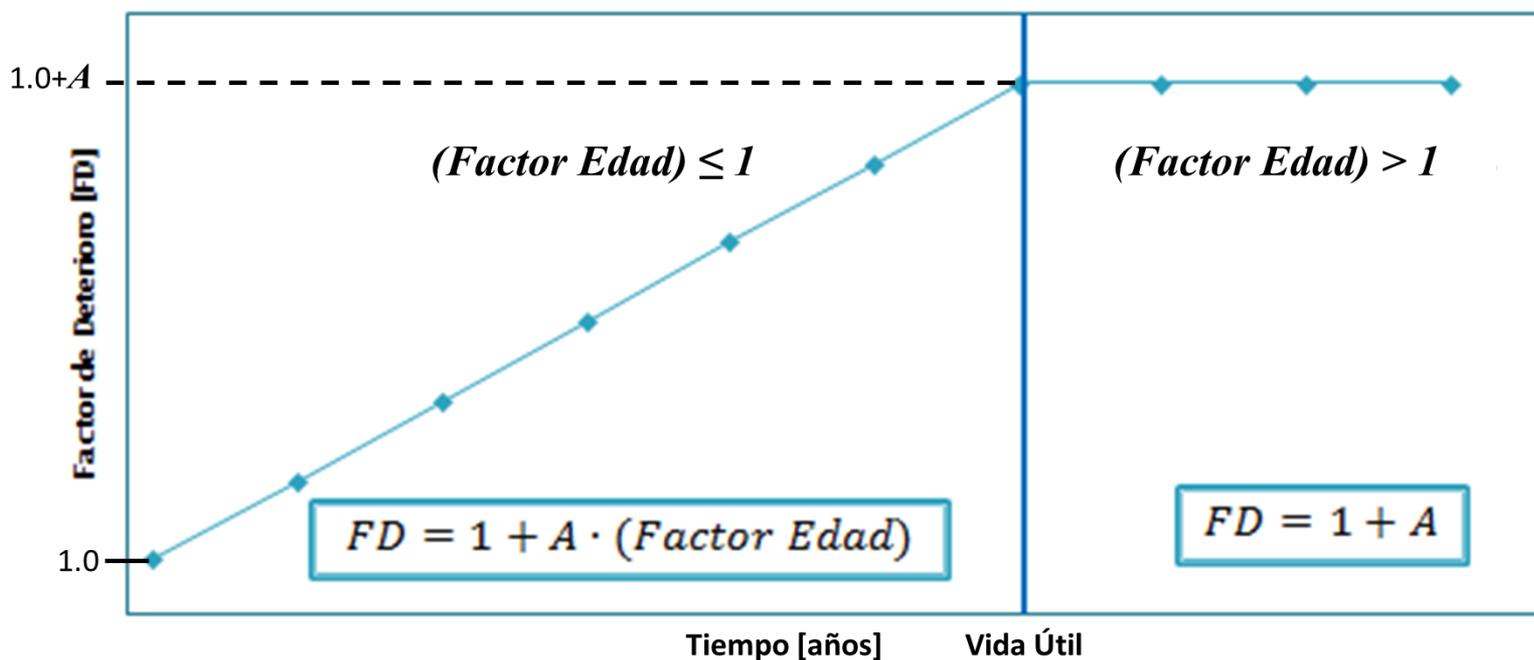
- Vida Media

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: [NR2008]



FACTOR DE DETERIORO



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

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



FACTOR DE DETERIORO

- Coeficiente A Fuente: [MOVES2014b]

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]



EJEMPLO: PASO 5

sub	Rpot [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 ≤ kW < 225	4	47	136,4	Tier 3	0,2012	1092	0,59	0,473	4.667	0,552	1,261
2	130 ≤ kW < 225	7	25	145,3	Tier 2	0,1770	1092	0,59	0,473	4.667	0,966	1,457
3	75 ≤ kW < 130	7	12	122,7	Tier 2	0.2414	1092	0,59	0,473	4.667	0,966	1,457
4	130 ≤ kW < 225	4	50	184,3	Tier 3	0,2012	962	0,59	0,473	4.667	0,486	1,230
5	75 ≤ kW < 130	4	38	89,5	Tier 3	0,2950	962	0,59	0,473	4.667	0,486	1,230

$$Vida\ útil = \frac{vida\ media\ [hrs]}{NA \left[\frac{hrs}{año} \right] \cdot factor\ de\ carga}$$

$$Vida\ Util = \frac{4.667[hr]}{1.092 \left[\frac{hr}{año} \right] * 0,59} = 7,24[años]$$

$$Factor\ Edad = \frac{4 [años]}{7,24[años]} = 0,552$$

$$FD = 1 + 0,473 * 0,552 = 1,261$$



PREGUNTA



EJEMPLO: PASO 5

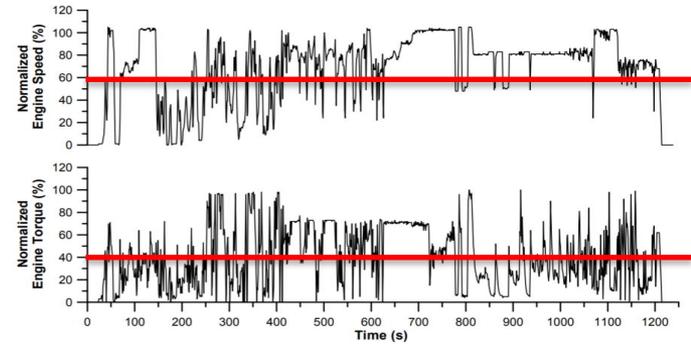
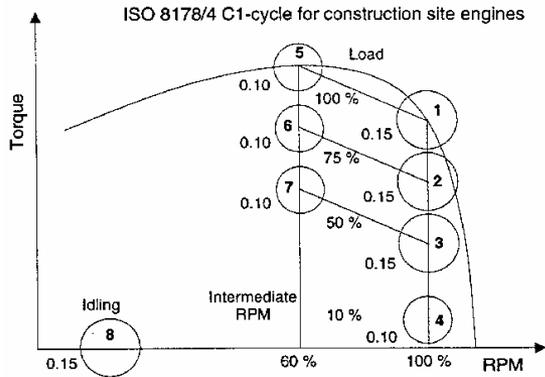
sub	Rpot [kW]	Edad [años]	N _{sub}	Pot _{sub}	Eniv	FE _{sub,mp} [g/kW-hr]	NA [hr/año]	FC _{sub}	A _{sub,mp}	Vida Media [hr]	Factor Edad	FD _{sub,mp}
1	130 ≤ kW < 225	4	47	136,4	Tier 3	0,2012	1092	0,59	0,473	4.667	0,552	1,261
2	130 ≤ kW < 225	7	25	145,3	Tier 2	0,1770	1092	0,59	0,473	4.667	0,966	1,457
3	75 ≤ kW < 130	7	12	122,7	Tier 2	0.2414	1092	0,59	0,473	4.667	0,966	1,457
4	130 ≤ kW < 225	4	50	184,3	Tier 3	0,2012	962	0,59	0,473	4.667	0,486	1,230
5	75 ≤ kW < 130	4	38	89,5	Tier 3	0,2950	962	0,59	0,473	4.667	0,486	1,230

$$E_{[sub,i]} = [N_{[sub]} \cdot NA_{[sub]} \cdot \overline{Pot}_{[sub]} \cdot FC_{[sub]} \cdot (FE_{0[sub,i]} \cdot \text{FAT}_{[sub,i]} \cdot FD_{[sub,i]} - SMP_{[sub,i]})]$$

FACTOR AJUSTE TRANSITORIO



FACTOR DE AJUSTE TRANSITORIO



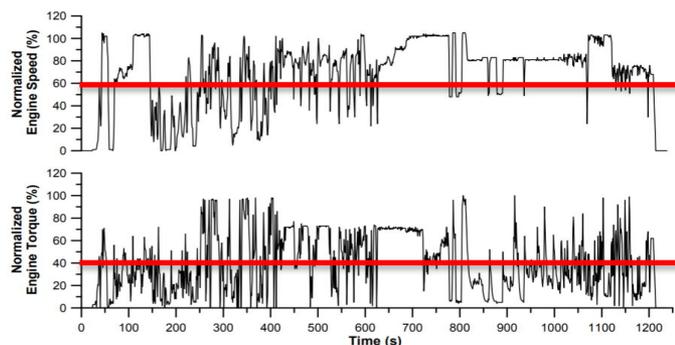


FACTOR DE AJUSTE TRANSITORIO

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
Excavadora	1.05	1.53	0.95	1.04	1.23	1.47	1.01
Motoniveladora	1.05	1.53	0.95	1.04	1.23	1.47	1.01

Fuente: [MOVES2014b]

- Para Tier 4 FAT = 1 (FE_0 se midió en ciclo transitorio NRTC).





PREGUNTA



EJEMPLO: PASO 6

sub	Etip	N _{sub}	Pot _{sub}	Eniv	FE _{sub,mp} [g/kW-hr]	NA [hr/año]	FC _{sub}	FD _{sub,mp}	FAT _{sub,mp}
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

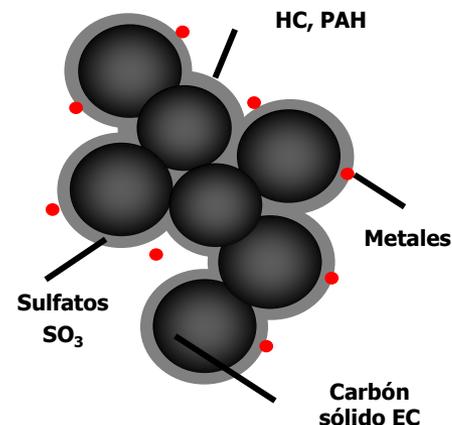
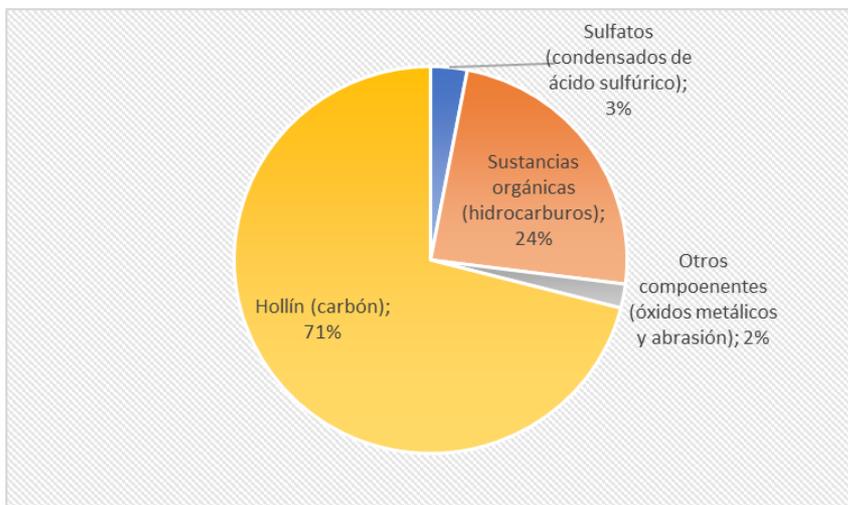
$$E_{[sub,i]} = [N_{[sub]} \cdot NA_{[sub]} \cdot \overline{Pot}_{[sub]} \cdot FC_{[sub]} \cdot (FE_{0[sub,i]} \cdot FAT_{[sub,i]} \cdot FD_{[sub,i]} - SMP_{[sub,i]})]$$

**AJUSTE POR
AZUFRE**





EMISIONES DIÉSEL: IMPACTO DEL AZUFRE



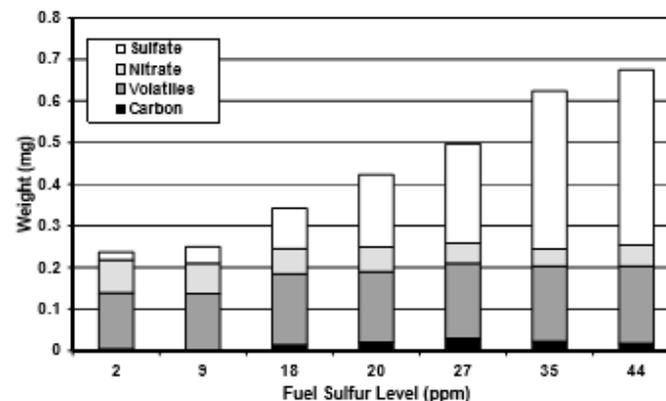
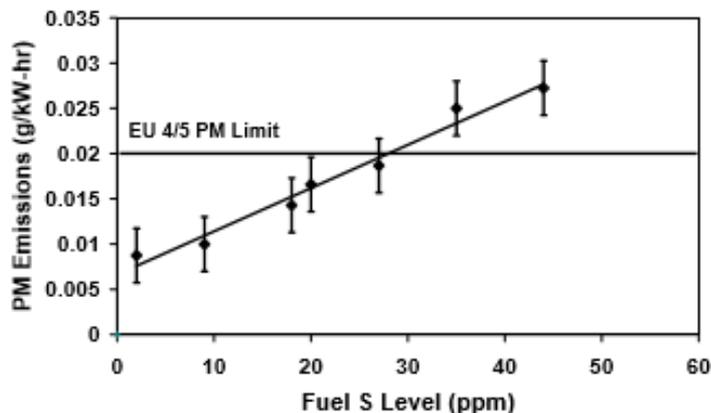
Hollín: Pequeñas partículas de carbón sólido (20-30 nm) que se forman en el proceso de combustión y que luego se aglomeran en partículas de mayor tamaño (~100 nm). Forma parte de la fracción insoluble del MP.

Volátiles: Sustancias en fase líquida producto de la condensación de hidrocarburos no quemados (parte de la fracción orgánica soluble) y sulfatos producidos a partir del contenido de azufre del combustible (parte de la fracción soluble en agua).

Cenizas y otros: Partículas sólidas formadas por óxidos de metal (cenizas), provenientes del lubricante u otros aditivos del combustible, y por las partículas de abrasión del motor (pistones). Al igual que el hollín forman parte de la fracción insoluble.



EMISIONES DIÉSEL: IMPACTO DEL AZUFRE

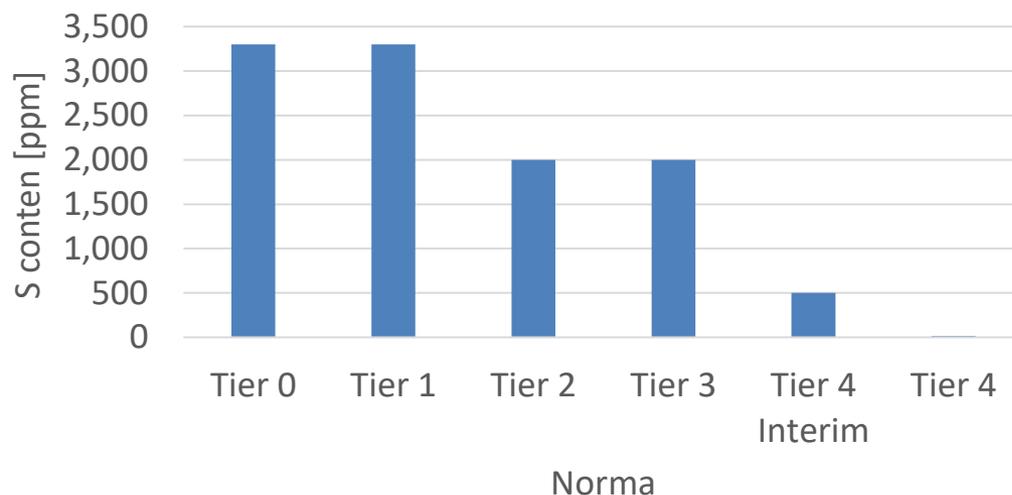


- Impacto del azufre en el combustible en MP durante ciclo ESC (con sistema CRT)
- $S \rightarrow SO_2 \rightarrow SO_3$



EMISIONES DIÉSEL: IMPACTO DEL AZUFRE

Contenido de azufre en el combustible de prueba



Norma	Soxbas [ppm]
Tier 0	3,300
Tier 1	3300
Tier 2	2000
Tier 3	2000
Tier 4 Interim	500
Tier 4	15

- El combustible para el ensayo del motor (combustible de prueba), no necesariamente cumple las mismas especificaciones del combustible comercial.
- Cada regulación (o incluso cada país), puede tener su propia especificación para el combustible de prueba.
- Lo ideal es conocer la especificación en el origen de la certificación, de lo contrario se pueden tomar valores por defecto recomendados por la EPA.



AJUSTE POR AZUFRE

- Ajusta el valor del MP por efectos del mayor o menor azufre en el combustible comercial respecto del de certificación

$$SMP = BSFC \cdot FAT \cdot 7,0 \cdot soxcnv \cdot 0,01 \cdot (soxbas - soxdsl)$$

- Soxbas* : Contenido de azufre usado en el combustible de Certificación [%] en masa.
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).
- Soxdsl* : Contenido de Azufre en el Combustible de Evaluación [%] en masa.
- 0.01 : Conversión Porcentaje a Fracción
- BSFC* : Consumo específico de Combustible al Freno, [g/kW-hr].
- FAT* : Factor de ajuste transitorio.
- Soxcnv* : Gramos de Azufre en MP/gramos de Azufre en combustible Consumido.
(Soxcnv = 0.02247 (Tier 0 a Tier 4A); Soxcnv = 0.3 (Tier 4))
- 7,0 : Gramos de sulfato de MP / gramos de azufre en MP



EJEMPLO: PASO 7

sub	Etip	N _{sub}	Rpot [kW]	Eniv	BSFC [g/kW-hr]	FAT _{BSFC}	SMP _{sub,mp}
1	Excavadora	47	130 ≤ kW < 225	Tier 3	221	1,01	0,070
2	Excavadora	25	130 ≤ kW < 225	Tier 2	221	1,01	0,070
3	Excavadora	12	75 ≤ kW < 130	Tier 2	221	1,01	0,070
4	Motoniveladora	50	130 ≤ kW < 225	Tier 3	221	1,01	0,070
5	Motoniveladora	38	75 ≤ kW < 130	Tier 3	221	1,01	0,070

- Para el caso del ejemplo, combustible de certificación 2000 ppmS (Sox_{bas}=0,2%), correspondiente a las certificaciones Tier 2 y Tier 3.
- Para el diésel comercial utilizado en la operación, 15 ppm (Sox_{dsl}=0,0015%).
- Para tecnologías Tier 2 y Tier 3, el valor de Sox_{cnv}, es de 0,02247 (ver nota 8).
- BSFC conforme con el rango de potencia (Rpot) y el estándar de emisiones (Eniv)
- FAT por Etip y Eniv de cada subsegmento.

$$SMP = 221 \left[\frac{g}{kW - hr} \right] * 1,01 * 7,0 * 0,02247 * 0,01 * (0,2 - 0,0015) = 0,07 \left[\frac{g}{kW - hr} \right]$$



EJEMPLO: PASO 8

sub	N _{sub}	NA [hr/año]	Pot _{sub}	FC _{sub}	FE _{sub,mp} [g/kW-hr]	FAT _{sub,mp}	FD _{sub,mp}	SMP _{sub,mp}	E _{sub,mp} [g/año]	E _{sub,mp} [Ton/año]
1	47	1092	136,4	0,59	0,2012	1,47	1,261	0,070	1.252.605	1,253
2	25	1092	145,3	0,59	0,1770	1,23	1,457	0,070	579.308	0,579
3	12	1092	122,7	0,59	0.2414	1,23	1,457	0,070	344.308	0,344
4	50	962	184,3	0,59	0,2012	1,47	1,230	0,070	1.538.639	1,539
5	38	962	89,5	0,59	0,2950	1,47	1,230	0,070	895.177	0,895
TOTAL									4,610	

$$[N_{[sub]} \cdot NA_{[sub]} \cdot \overline{Pot}_{[sub]} \cdot FC_{[sub]} \cdot (FE_{0[sub,i]} \cdot FAT_{[sub,i]} \cdot FD_{[sub,i]} - SMP_{[sub,i]})] = E_{[sub,i]}$$

↑
 E_{tip}

↑

↑
 E_{tip}

↑
 E_{niv}
 R_{pot}

↑
 E_{tip}

↑
 E_{niv}
 R_{pot}
 E_{dad}

↑
 E_{niv}
 R_{pot}



PROYECCIÓN DEL INVENTARIO



PROYECCIÓN DE LA FLOTA

- Conforme la metodología presentada, para proyectar el inventario es necesario proyectar la flota.
- 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.
- Dado lo anterior queda pendiente la proyección de la población de la maquinaria asumiendo que los niveles de actividad por tipo de maquinaria, son constantes en el tiempo.
- Para las proyecciones del crecimiento de la población, la metodología EPA ha optado por las tendencias del mercado basándose en el crecimiento histórico.



EJEMPLO 1: PASO 1

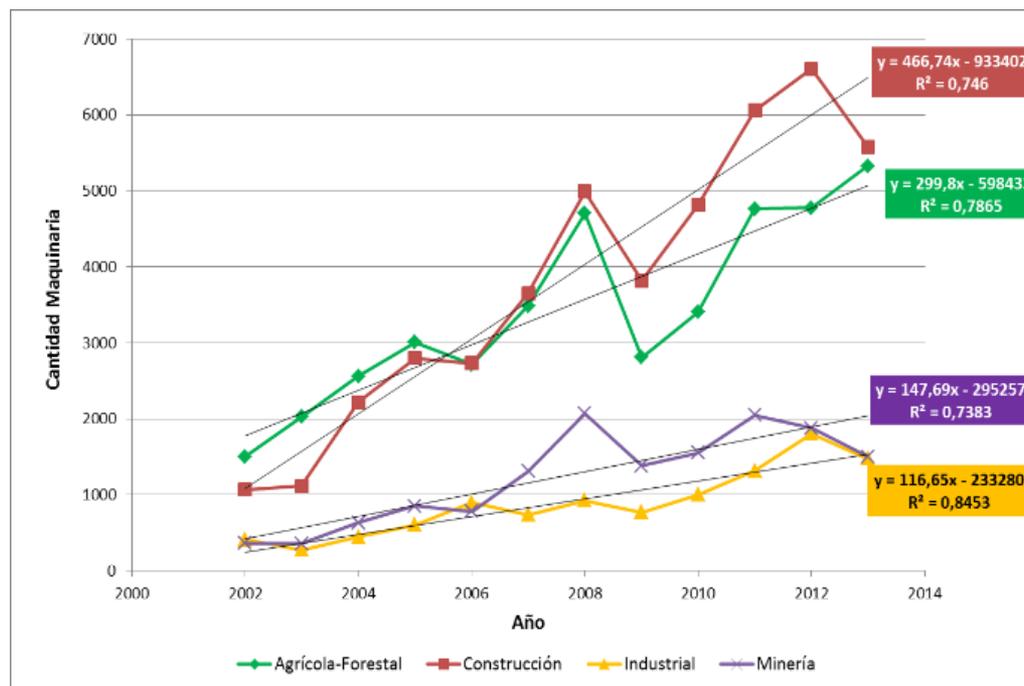
- Se cuenta con datos históricos de las importaciones.
- Se utiliza la proyección de las importaciones como indicador del crecimiento de la flota.
- Se considera que toda la maquinaria importada es vendida el mismo año, dados los costos de mantener stock.

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



EJEMPLO 1: PASO 2

- Conforme la metodología [Nonroad Engine Growth Estimates-EPA420-2002], 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 el crecimiento, se muestran los datos con regresión lineal, para observar el ajuste.





EJEMPLO 1: PASO 3

- 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 (2014 al 2025)

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



EJEMPLO 1: PASO 4

- Los pronósticos presentados en la tabla anterior son distribuidos en cada rubro según su rango de potencia y tipología.
- Para ello se calcula la participación porcentual que tiene cada tipo de maquinaria por rango de potencia en el total de la flota de línea base del rubro correspondiente
- Finalmente se distribuirán las ventas de cada año según la participación porcentual antes señalada.

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%



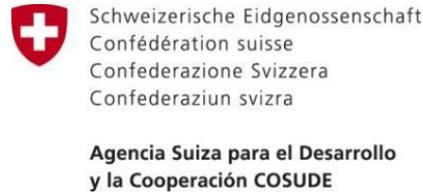
EJEMPLO 1: PASO 5

- 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
$19 \leq kW < 37$	2	14	10	237	4	68	335
$37 \leq kW < 56$	1	38	30	1.193	312	398	1.972
$56 \leq kW < 75$	6	54	203	401	2.830	35	3.529
$75 \leq kW < 130$	48	446	985	2	148	383	2.012
$130 \leq kW < 225$	48	607	330	1	6	16	1.008
$225 \leq kW < 450$	255	229	29	-	-	1	514
$450 \leq kW < 560$	39	-	-	-	-	3	43
Totales	399	1.389	1.588	1.833	3.300	904	9.413



¡MUCHAS GRACIAS POR SU ATENCIÓN!



CALAC+ es un programa de la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación - COSUDE ejecutado por Swisscontact

Contacto CALAC+:

Santiago Morales – Coordinador Regional de Políticas Maquinaria Móvil No de Carretera CALAC+
Santiago.morales@swisscontact.org

Consultor CALAC+:

Aliosha Reinoso D.
aliosha.reinoso@geasur.cl



www.programacalac.com



@CALACplus



@Calacplus