



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Inventario de emisiones fuera de ruta por construcción de edificaciones en el área urbana de la ciudad de Bogotá

Jesús Alexander Ubaque Orjuela

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental
Ciudad, Colombia

2018

Inventario de emisiones fuera de ruta por construcción de edificaciones en el área urbana de la ciudad de Bogotá

Jesús Alexander Ubaque Orjuela

Trabajo final presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Ambiental

Director:
Ph.D., Luis Carlos Belalcázar Cerón

Línea de Investigación:
Nuevas Tecnologías y Diseños
Grupo de Investigación:
Calidad del Aire

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental
Ciudad, Colombia

2018

A mi madre, por su amor incondicional, enseñanzas y apoyo en cada etapa de mi vida. A Neyla Ubaque de Garzón por ser un faro y un ejemplo de vida a seguir.

A Esperanza Caro Restrepo, por mostrarme el camino hacia mi pasión profesional y entender que hay todo un mundo por explorar.

A mi familia y amigos por su respaldo incondicional.

Gracias

Agradecimientos

Quiero agradecer a todos mis nuevos amigos ingenieros Diana Rojas, Diana Muñoz, Gissela Ramírez y Alejandro Fraga, que me acompañaron en cada una de las etapas de esta Maestría, quienes me orientaron y animaron para culminar y no desistir.

A los docentes del Departamento de Ingeniería Química y Ambiental que además de brindarme nuevas herramientas para fortalecer mi trabajo en el campo ambiental, reforzaron y resaltaron la importancia de los valores profesionales para trabajar por el bien común de este país.

Y desde luego, al Ingeniero Luis Carlos Belalcázar, mi director, por su paciencia y apoyo incondicional, sin su conocimiento, experticia y guía no fuese posible lograr este trabajo de grado.

Muchas gracias.

Resumen

Los contaminantes atmosféricos pueden provenir de actividades antropogénicas o naturales, para cuantificarlos se construyen inventarios con el uso de factores de emisión asociados a una actividad específica, agrupándolos generalmente en fuentes puntuales, de área, móviles, móviles fuera de ruta y naturales.

Este proyecto cuantificó las emisiones de los contaminantes HC, NOx, CO, PM, SO₂ y CO₂ provenientes de fuentes móviles fuera de ruta asociados a la actividad de la construcción de edificaciones en Bogotá para el año 2017, haciendo uso de la metodología (US- EPA, 2010) y la herramienta Emisiones Fuera de Ruta por Construcción (EFRC), creada en este proyecto final de maestría, lo que permitió obtener factores de emisión específicos para cada tipo de maquinaria de construcción.

Hasta donde se conoce, este es el primer trabajo de este tipo realizado en Colombia, la recopilación de la información se hizo a través de encuestas aplicadas en 15 obras activas durante el año 2017, las cuales se encontraban en las etapas de descapote, excavación y cimentación, para los usos no residencial (oficinas, bodegas, comercio) y residencial de los diferentes estratos socioeconómicos. Los datos de cada encuesta fueron ingresados a la herramienta de cálculo EFRC, evaluándose las variables que más influyen en las emisiones y diferentes estrategias de mitigación.

Los resultados obtenidos mostraron que la maquinaria más usada y que más emite es de tipo excavadora/retroexcavadora, minicargadores y grúas con una participación de 70% del total de la flota y una emisión superior al 79%. Simultáneamente se realizaron comparaciones entre las emisiones de los diferentes proyectos y se evaluaron estrategias de mitigación. Se encontró que con reconversión tecnológica es posible disminuir las emisiones de los contaminantes HC, NOx, CO, PM en más de un 60%, con cambio de combustible es posible disminuir las emisiones de CO₂ y SO₂ en 10 y 70%, respectivamente.

Finalmente, se sugiere realizar mediciones en sitio para cada uno de los tipos de maquinaria y ampliar la muestra de obras, para robustecer la base de datos que permita cuantificar las emisiones totales disminuyendo la incertidumbre.

Palabras clave: Calidad del aire, emisiones, fuentes móviles fuera de ruta, construcción de edificaciones, factores de emisión.

Abstract

Atmospheric pollutants can come from anthropogenic or natural activities. To quantify them, inventories are constructed with the use of emission factors that are associated with a specific activity. They are grouped generally into point sources, area, mobile, non-route and natural sources.

This project quantified the emissions of HC, NO_x, CO, PM, SO₂ and CO₂ contaminants from off-road mobile sources associated with the construction of buildings in Bogotá for 2017, using the methodology (US- EPA, 2010) and the tool Off-Route Emissions by Construction (EFRC) in its Spanish acronym, created in this final master project, which provides specific emission factors for each type of construction machinery.

As far as is known, this is the first work of its kind carried out in Colombia. The information was collected through surveys applied to 15 active works during the year 2017, which were in the stages of stripping, excavation and foundation for non-residential uses (offices, warehouses, commerce) and residential uses across socioeconomic strata. The data of each survey was entered into the EFRC, evaluating the variables that most influence the emissions and offers different mitigation strategies.

The results obtained showed that the most commonly used machinery are the excavator / backhoe type, skid steer loaders and cranes, with a 70% share of the total fleet and an emission of more than 79%. Simultaneously, comparisons were made between the emissions of the different projects and mitigation strategies were evaluated. It was found that with technological reconversion it is possible to reduce emissions of HC, NO_x, CO, PM contaminants by more than 60 percent. With fuel change it is possible to reduce CO₂ and SO₂ emissions by 10% and 70%, respectively.

Finally, the suggestion is to carry out on-site measurements for each type of machinery and to expand the sample of works, to strengthen the database that allows quantifying total emissions, and to reduce uncertainty.

Keywords: Air quality, emissions, non-route mobile sources, construction of buildings, emission factors.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XV
Lista de Símbolos y abreviaturas	XVI
Introducción	19
1. Marco teórico	22
1.1 Emisiones atmosféricas	22
1.1.1 Contaminantes criterio	22
1.1.2 Fuentes de emisión	24
1.2 Inventarios de emisiones	25
1.3 Emisiones fuera de ruta	27
1.3.1 Maquinaria fuera de ruta y equipos de construcción	27
1.3.2 Ejemplos de inventarios fuera de ruta	29
1.4 Cálculo emisiones fuera de ruta	35
1.4.1 Metodología. Agencia ambiental europea. EEA	35
1.4.2 Metodología. Agencia de protección ambiental US- EPA	37
1.5 Generalidades del sector constructor	38
2. Metodología	40
2.1 Recopilación de información sobre maquinaria en obras de construcción.....	40
2.2 Cálculo de factores de emisión FE	43
2.2.1 Factores de emisión	43
2.3 Herramienta para el cálculo de emisiones EFRC	47
3. Resultados y discusión de resultados	53
3.1 Análisis de resultado de encuestas – maquinaria	53
3.2 Comparación de los factores de emisión obtenidos	57
3.3 Emisiones por tipo de maquinaria	58
3.4 Emisiones por obras	59
3.5 Estrategias preliminares de mitigación de emisiones.....	62
3.5.1 Análisis por tipo de tecnología.....	63
3.5.2 Análisis variación de características de combustible	65
3.5.3 Análisis variación del Factor de Deterioro	68
4. Conclusiones y recomendaciones	69

4.1	Conclusiones	69
4.2	Recomendaciones.....	71
A.	Anexo. Tablas para Factores de Emisión Estado Cero, Factor de Ajuste Transitorio y Factor de Deterioro Relativo	73
B.	Anexo. Muestra de cálculo	77
C.	Anexo. Detalle de la maquinaria reportada y factores de emisión.....	85
D.	Anexo. Plantillas de recolección de datos	88
E.	Anexo. Emisiones totales por obra	98
5.	Bibliografía	105

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1- 1: Tipos de emisiones atmosféricas (México, 2018)	22
Figura 1- 2 Proporción por fuentes de emisión Canadá. (Canada, 2016).	29
Figura 1- 3 Maquinaria de Construcción. Dinamarca 1985-2004 (ENVIRONMENTAL, 2006).....	30
Figura 1- 4 Variación de las emisiones de NOx y CO, 1985-2004, (ENVIRONMENTAL, 2006).....	31
Figura 1- 5 Distribución de las emisiones Estado de California por tipo de fuente. (CARB, 2018).....	32
Figura 1- 6 Porcentaje de participación de la maquinaria agrícola y de construcción en las emisiones de la ciudad de San Francisco, 2011, (DISTRICT, 2014).	32
Figura 1- 7. Participación en la emisión de PM ₁₀ por fuentes en CDMX (México, 2018)..	33
Figura 1- 8 Aporte de contaminantes fuera de ruta, ZMVM, (México, 2018).....	33
Figura 1- 9 Emisiones de maquinaria agrícola y de construcción ZMVM, (México, 2018)	34
Figura 1- 10. Contribución de cada fuente de emisión por contaminante 2014. (SDA, 2017).....	34
Figura 1- 11. Mapa de selección de ruta cálculo, (EEA, 2013).....	36
Figura 1- 12 Mapa de Actividad Constructora, Fuente Coordinada Urbana CU 2017	39
Figura 2 - 1. Universo de obras en la ciudad de Bogotá y estratificación de los proyectos residenciales (1207 proyectos). Fuente (CU ® 2017).....	41
Figura 2 - 2. Usos y estratificación de las obras en etapa de excavación y cimentación (201) Fuente (CU ® 2017).	41
Figura 2 - 3. Ficha de recopilación de datos de maquinaria de construcción.....	42
Figura 2 - 4. Usos y estratificación de 15 obras que reportaron información de maquinaria	42
Figura 2 - 5. Ubicación de 15 obras que reportaron información de maquinaria.....	43
Figura 2 - 6. Front de la herramienta con ejemplos de los datos de entrada.	48
Figura 2 - 7. Ejemplo de resultados de factores de Emisión Cero-Horas.....	48
Figura 2 - 8. Ejemplo de resultados de FAT.	49
Figura 2 - 9. Ejemplo de resultados de FD.	49
Figura 2 - 10. Ejemplo de resultados de S _{PMadj}	50
Figura 2 - 11. Ejemplo de Factores de Emisión.....	50
Figura 2 - 12 Ejemplos de Factores de Emisión para CO ₂ y SO ₂	51
Figura 2 - 13. Imagen de emisiones totales de contaminantes	51
Figura 2 - 14 Ejemplo de emisiones totales por maquinaria y por obra.....	52

Figura 3 - 1. Distribución de la flota de maquinaria de construcción por tamaño de motor.	54
Figura 3 - 2 Distribución de la flota de maquinaria de construcción por edad.	55
Figura 3 - 3. Tipo de tecnología de la maquinaria más usada en las 15 obras.	56
Figura 3 - 4. Emisiones de PM y CO ₂ , residencial estrato 2.	60
Figura 3 - 5. Emisiones de PM y CO ₂ , residencial estrato 3.	61
Figura 3 - 6. Emisiones de PM y CO ₂ , residencial estrato 4.	61
Figura 3 - 7 Emisiones de PM y CO ₂ , proyectos no residenciales.	62
Figura 3 - 8 Emisiones escenario base vs TIER IV.	63
Figura 3 - 9. Variación de emisiones por cambio a tecnología TIER IV. En excavadoras/retroexcavadoras.	64
Figura 3 - 10 Variación de emisiones por cambio a tecnología TIER IV. En grúas.	64
Figura 3 - 11 variación de emisiones por cambio a tecnología TIER IV. Minicargadores	65
Figura 3 - 12. Variación de combustible Diesel vs Biodiesel.	66
Figura 3 - 13 Variación de emisiones de CO ₂ por tipo de maquinaria.	66
Figura 3 - 14. Variación del contenido de Azufre en el combustible.	67
Figura 3 - 15. Variación de emisiones de SO ₂ por tipo de maquinaria.	67
Figura 3 - 16 Variación Factor de Deterioro.	68

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1- 1 Emisiones % fuera de ruta por sector. (ENVIRONMENTAL, 2006)	31
Tabla 1- 2: Clasificación de la maquinaria fuera de ruta (EEA, 2013).	35
Tabla 3 - 1. Caracterización de la flota de maquinaria de construcción reportada en las 15 obras.	53
Tabla 3 - 2. Tecnología de la maquinaria de construcción.	55
Tabla 3 - 3. Comparativo de Factores de Emisión, fuente el autor.....	57
Tabla 3 - 4. Emisiones por tipo de maquinaria.	59
Tabla 3 - 5 Proyectos y emisiones totales.	59
Tabla A- 1: Factores de emisión estado cero (US- EPA, 2010).	73
Tabla A- 2. Factor de Ajuste Transitorio (US- EPA, 2010).	75
Tabla A- 3. Factor de Deterioro Relativo (US- EPA, 2010).	75
Tabla A- 4. Factores de Carga.	76
Tabla B- 1. Características del equipo de construcción para muestra de cálculo.....	77
TABLA D- 1. Planilla usada para la recolección de datos.....	88
TABLA D- 2. Datos de maquinaria, proyecto 1	89
TABLA D- 3. Datos de maquinaria, proyecto 2.	89
TABLA D- 4. Datos de maquinaria, proyecto 3.	90
TABLA D- 5. Datos de maquinaria, proyecto 4.	90
TABLA D- 6. Datos de maquinaria, proyecto 5.	91
TABLA D- 7. Datos de maquinaria, proyecto 6.	91
TABLA D- 8. Datos de maquinaria, proyecto 7.	92
TABLA D- 9. Datos de maquinaria, proyecto 8.	92
TABLA D- 10. Datos de maquinaria, proyecto 9.	93
TABLA D- 11. Datos de maquinaria, proyecto 10.	93
TABLA D- 12. Datos de maquinaria, proyecto 11.	94
TABLA D- 13. Datos de maquinaria, proyecto 12.	94
TABLA D- 14. Datos de maquinaria, proyecto 13.	95
TABLA D- 15. Datos de maquinaria, proyecto 14.	96
TABLA D- 16. Datos de maquinaria, proyecto 15.	97

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término
g	gramos
HP	Potencia (Horse Power)
ha	Hectárea
hr	Hora
kg	kilogramos
kWh	kilo vatio- hora
t	Toneladas

Abreviaturas

Abreviatura	Término
BSFC	Consumo Específico de Combustible ajustado
Eq	Equivalente
FAT	Factor de Ajuste Transitorio
FD	Factor de Deterioro
FE	Factor de Emisión
FEss	Factor de Emisión Estático
GEI	Gas De Efecto Invernadero
PM	Material Particulado

S _{PM}	Ajuste de azufre para PM
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México
EFRC	Emisiones Fuera de Ruta Construcción

Fórmulas químicas

Fórmulas	Término
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
HC	Hidrocarburo
NO ₂	Dióxido de Nitrógeno
O ₃	Ozono
SO ₂	Dióxido de azufre

Introducción

Las múltiples actividades relacionadas con la construcción de edificaciones representan el 36% del consumo mundial de energía y el 39% de las emisiones relacionadas con el consumo de energía, con una emisión promedio anual de 11 GtCO_{2eq} (UN, 2018). De este total, el 72% corresponde a emisiones de edificaciones residenciales y no residenciales por acondicionamiento de aire (calentamiento-enfriamiento), iluminación, preparación de alimentos, calentamiento de agua y otros usos. Mientras que, el 28% emisiones son resultado de la fabricación de materiales como cemento, acero, vidrio, entre otros.

Si bien, el uso de las edificaciones y la manufactura de materiales son claves en las emisiones del sector constructor, el proceso de obra también ha tomado un papel relevante. De acuerdo con (UN, 2017), para el año 2016 el acumulado de metros cuadrados construidos en el mundo ascendió a 235 billones de m², y aunque han disminuido las emisiones en la operación y uso de los edificios, estas han aumentado en la etapa de construcción, pasando de 3.1 GtCO_{2eq} en el 2010 a 3.7 GtCO_{2eq} en el 2016, es decir, se han venido incrementando las emisiones en un 1% cada año, situación que podría mantenerse constante teniendo en cuenta las previsiones sobre el incremento de 2.3% en los m² construidos cada año.

En Colombia se construyen cerca de 25 millones de m², cuyo encadenamiento representa cerca del 13.5% del PIB del país (CAMACOL, 2018), lo que convierte al sector en un motor de la economía. Por esto ha sido priorizado por el Ministerio de Vivienda y Desarrollo Territorial en la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono, generando políticas y estrategias de construcción sostenible aplicables a cada una de las etapas de construcción de la edificación (Minvivienda, 2014). Sin embargo, actualmente los esfuerzos se han orientado a la disminución de consumo de agua y energía durante la etapa de uso y operación, sin abordar a profundidad la cuantificación y control de emisiones durante la construcción y deconstrucción de edificaciones.

En el orden local, ciudades como Bogotá, a través del Plan Decenal de Descontaminación del Aire PDDAB, incluyó en el Inventario de Emisiones del año 2014 las emisiones difusas y puntuales de Material Particulado (PM), por demolición, transporte, mezclas y almacenamiento de materiales en la construcción, (SDA, 2017). Sin embargo, aún no se han cuantificado las emisiones de tubo de escape provenientes de la maquinaria de obra.

Por lo anterior, el trabajo de maestría tiene como objetivo general:

Realizar el inventario de emisiones de contaminantes primarios fuera de ruta por construcción de edificaciones en el área urbana de la ciudad de Bogotá, para establecer la línea base sobre la cual se puedan implementar estrategias de mitigación y control.

Los objetivos específicos que se plantearon son:

- 1) Identificar y evaluar las metodologías disponibles de cuantificación de emisiones fuera de ruta por construcción de edificaciones para seleccionar la metodología que mejor se adapte a las condiciones locales
- 2) Implementar la metodología seleccionada para estimar las emisiones fuera de ruta por construcción de edificaciones que se generan en el área urbana de la ciudad de Bogotá.
- 3) Identificar y proponer de manera preliminar estrategias de mitigación para las emisiones fuera de ruta por construcción de edificaciones con base en los resultados obtenidos.

Para lograr el objetivo, en primera medida se realizó una búsqueda bibliográfica, identificando y evaluando las metodologías disponibles de cuantificación de emisiones fuera de ruta por construcción de edificaciones, para seleccionar la metodología que mejor se adaptará a las condiciones locales.

En este sentido es importante resaltar los aportes de la Agencia de Protección Ambiental, (EPA, por sus siglas en inglés), por ser un referente para trabajos en el campo de la calidad del aire, fijando las bases para cuantificación de emisiones para las diferentes fuentes emisoras, y a su vez han sido el insumo para el construcción de inventario de emisiones consultados en este proyecto, de países como Canadá y Dinamarca, estado de California y ciudades como México D.F., San Francisco y Bogotá D.C.

Como resultado del análisis, se seleccionó la metodología EPA, por ser la más utilizada en estudios previos y la que brindaba mayor información para generar los Factores de Emisión para cada uno de los tipos de maquinaria utilizados en la construcción de edificaciones. Para implementar la metodología fue necesario recopilar información de obras que se encontraban en la etapa de descapote, excavación y cimentación, en el periodo correspondiente al año 2017. Esto se realizó con base en encuestas diligencias por el personal de obra de los diferentes proyectos, quienes suministraron datos sobre tipo de maquinaria, potencia de motor, edad, tipo de tecnología entre otras.

Paralelamente, con base en las ecuaciones de la metodología EPA, dentro del marco de este proyecto final de maestría, se construyó la herramienta Emisiones Fuera de Ruta por Construcción (EFRC) para facilitar la cuantificación de emisiones, de tal forma que el usuario pueda ingresar los datos de maquinaria y obtener la emisión total para los contaminantes HC, CO, NOx, PM, CO₂ y SO₂. Con el uso de la herramienta se construyeron escenarios para mitigar las emisiones, modificando datos de entrada como

el tipo de tecnología y generando recomendaciones para futuros estudios con base en las limitaciones y oportunidades identificadas durante el trabajo de grado.

Si bien los estudios previos muestran que las emisiones fuera de ruta por construcción de edificaciones representan menos del 1% de las emisiones, es un segmento en el cual se pueden implementar buenas prácticas para mantenimiento y reemplazo de la flota de maquinaria, aportando a la disminución de emisiones de la ciudad.

1.Marco teórico

1.1 Emisiones atmosféricas

Las actividades antrópicas asociadas principalmente con la industria han generado alteración en los ciclos naturales del aire, el agua y el suelo, debido en gran medida a la variación en la concentración de sustancias como CO₂, CH₄, SO₂, NO_x, CO y CFC_s. el conjunto de estas emisiones ha hecho que la fuerza radiativa del planeta se incrementara en un 43% entre los años 2005 y 2011, situándose en 2.29 w/m². (IPCC , 2013). Los contaminantes atmosféricos generalmente se agrupan en Gases Efecto Invernadero, Contaminantes Criterio y Compuestos Tóxicos. En las ciudades los estudios de calidad del aire se enfocan principalmente en los contaminantes criterio. Ver Figura (1-1)

Figura 1- 1: Tipos de emisiones atmosféricas (México, 2018)



1.1.1 Contaminantes criterio

Durante las últimas décadas parte de los esfuerzos se han encaminado a establecer la relación de los contaminantes con los efectos negativos sobre la salud humana, principalmente en los grupos sensibles, jóvenes y adultos mayores. (Taylor & McMillan, 2013). Contaminantes como PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, SO₂, O₃, CO, son denominados criterio, por impactar la salud humana, se les atribuye cerca del 1.2% de las muertes anuales mundiales, (Yu, Wang, Ciren, & Zhu, 2016) y 3.7 millones de muertes prematuras (WHO, 2016). Estudios disponibles actualmente que proveen más información sobre la relación entre contaminación del aire y salud, en las que se integran especialidades como

fisiología, epidemiología y toxicología, que permiten realizar valoraciones integrales. Gracias a esto se han detectado un amplio rango de efectos negativos, entre los que se incluyen, muertes, reducción de la calidad de vida y cambios irreversibles en las funciones fisiológicas. (WHO, 2016)

MATERIAL PARTICULADO (PM).

Es la masa de partículas con tamaños inferiores a 10 μ (gruesas) y 2.5 μ (finas). Las primeras se forman principalmente por procesos mecánicos como obras de construcción, resuspensión y polvo de caminos, mientras que las menores a 2.5 μ , provienen principalmente de la combustión. Estas se componen en su mayoría por sulfatos, nitratos, amoníaco, cloruro de sodio, polvo, compuestos orgánicos volátiles, back carbón y metales traza. (US-EPA, 2018)

Estudios controlados muestran que los efectos negativos están asociados a respuestas inflamatorias y aumento de las enfermedades de las vías respiratorias mediante la hiperreactividad o deterioro de los mecanismos de defensa pulmonar, haciéndolos más susceptibles a infecciones microbianas. El PM también genera riesgos asociados a enfermedades cerebrovasculares, trombosis o infarto de miocardio por alteraciones en las propiedades de coagulación, así como la progresión de arterioesclerosis, cáncer respiratorio (Díaz Lobato & Mayoralas, 2012) entre otros.

DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO₂)

El dióxido de nitrógeno es un gas traza que se caracteriza por la absorción de la radiación solar visible que causa disminución de la visibilidad, contribuye al cambio climático al ser precursor de gases de efecto invernadero. En conjunto con el óxido nítrico se convierte en un regulador de la capacidad oxidativa de la troposfera e incide directamente en la concentración de ozono troposférico. Altas concentraciones de este contaminante generan alteraciones en los mecanismos de la función respiratoria, edemas y enfisemas pulmonares, así como vulnerabilidad a infecciones bacterianas y virales. (Yu, Wang, Ciren, & Zhu, 2016)

DIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂)

El dióxido de azufre es derivado de la combustión de azufre contenido en los combustibles fósiles. En los centros urbanos es emitido por la combustión vehicular, calentamiento doméstico y generación de energía (US-EPA, 2018). En concentraciones superiores a 26.8 mg/m³ (10ppm) genera daño en el tejido epitelial de las vías respiratorias, hiperplasia e hipertrofia en las glándulas mucosas (WHO, 2005).

MONÓXIDO DE CARBONO (CO).

Este gas es emitido durante la combustión incompleta del carbón contenido en el combustible, que no tiene color, olor y no causa irritación por lo que no es detectable por el olfato humano (US-EPA, 2018). El CO tiene alta afinidad con la hemoglobina, casi 240

veces más que el oxígeno, lo que sugiere el incremento de los niveles de carboxihemoglobina. Entre los síntomas por exposición al CO se encuentran dolor de cabeza, vomito, fatiga, angina (dolor de pecho), infecciones recurrentes, depresión, ansiedad, irritabilidad con signos como dificultad de coordinación de los movimientos, alteración del a conciencia, insuficiencia respiratoria, taquicardia, isquemia miocárdica, infartos, edema celebrar, etcétera. (Sykes & Walker, 2016).

1.1.2 Fuentes de emisión

Los contaminantes atmosféricos pueden provenir de emisiones ya sea por actividades antropogénicas como la quema de combustibles para generación energética, transporte, industria, vivienda, agricultura, tratamiento de residuos, etcétera, o fuentes naturales como erupciones volcánicas, polvo del viento, sal de mar, compuestos orgánicos volátiles de las plantas, entre otros. (Agency E. E., 2017)

Las emisiones antropogénicas se agrupan generalmente en cinco categorías:

Fuentes puntuales

Corresponden a las emisiones con ubicación fija y estacionaria, incluyen actividades industriales y comerciales principalmente (EPA , 2018), como la industria alimentaria, de bebidas, prendas de vestir, madera, impresión, minerales no metálicos, maquinaria y transporte, generación transmisión y distribución de energía eléctrica, minería, almacenamiento de combustibles, entre otras. (México, 2018).

Fuentes de área

Son aquellas fuentes que emiten menos de 10 toneladas/año de un solo contaminante o menos de 25 toneladas/año de contaminantes (EPA , 2018). Dependiendo del inventario de emisiones incluye las emisiones de desechos urbanos, usos comercial y doméstico de solventes, almacenamiento de combustible, construcción, agricultura, ganadería, entre otras (México, 2018).

Fuentes móviles

Estas se refieren a las emisiones de vehículos livianos y pesados que circulan por carretera, con fuente de combustible diésel, gasolina y otros, dependiendo del inventario de emisiones este también puede incluir emisiones de equipos que no circulan por carretera. (EPA , 2018), entre los más representativos se encuentran, autobuses, vehículos de pasajeros, taxis, tracto camiones, vehículos de carga mayores de 3.8 toneladas, motocicletas, vehículos de transporte público, entre otros (México, 2018).

Fuentes móviles fuera de ruta

Estas incluyen equipos de construcción, jardinería, agroindustria, apoyo en tierra para mantenimiento de aeronaves, locomotoras, embarcaciones, maquinaria de trabajo industrial, entre otros. (EPA , 2018).

Fuentes naturales

Relacionadas principalmente por las emisiones naturales de la vegetación y suelos (México, 2018).

1.2 Inventarios de emisiones

Un inventario de emisiones es una base de datos, listado por fuente, que incluye uno o varios contaminantes específicos descargados en la atmosfera, en un área definida, en un periodo de tiempo, típicamente un año (Taylor & McMillan, 2013). Son usados para identificar los principales emisores de contaminantes por una actividad o sector, estableciendo tendencias y valorando la eficacia de los esfuerzos encaminados al manejo de fuentes emisoras, predecir emisiones de acuerdo al crecimiento económico de una región, proveer datos de entrada para modelaciones que puedan estimar los impactos de los contaminantes sobre el ambiente, entre otros (Taylor & McMillan, 2013).

La (EEA, 2016) ha establecido algunos principios para la elaboración de inventarios de emisiones, estos son:

- **Transparencia:** Claridad sobre la metodología implementada para la elaboración de los inventarios.
- **Precisión:** Reducir en lo posible las incertidumbres, principalmente en los datos de entrada utilizados para la elaboración de los inventarios
- **Exhaustividad:** Incluir las fuentes relevantes de emisiones para la región y país donde se elabora.
- **Consistencia:** debe ser el suficientemente sólido en cada uno de sus componentes para ser comparable con los diferentes años sobre los cuales se realiza el inventario
- **Comparabilidad:** Permitir la comparación de los datos contenidos con inventarios de otras regiones.

La característica y el enfoque de los inventarios dependen de su propósito, por ejemplo, los inventarios de sustancias causantes del deterioro de la capa de ozono o la cuantificación de contaminante criterio, relacionados con la calidad del aire de centros urbanos, sobre los que se centra este trabajo.

Uno de los medios sugeridos para el cumplimiento de las metas de calidad del aire, es el desarrollo de un Plan de Gestión con base en los datos arrojados por el inventario. Este

incluye las estrategias y especificaciones de lo que se quiere, ¿cómo se puede lograr?; ¿quiénes son los responsables?, es decir, una acción coordinada entre el sector productivo, la industria, el gobierno y el sector público (Taylor & McMillan, 2013).

FACTORES DE EMISIÓN

De acuerdo con (EPA , 2018) un Factor de Emisión FE es un valor que relaciona la cantidad de contaminante liberado a la atmósfera con una actividad asociada con la generación y liberación del contaminante. Pueden ser obtenidos de mediciones directas, bases de datos, censos, etcétera, y son expresados en términos de peso, volumen, distancia o duración de la actividad que emite el contaminante (EPA , 2018).

Los FE son usados para estimar las emisiones de una actividad con la siguiente ecuación.

Ecuación (1 - 1)

$$E = A \times FE \times [1 - (RE/100)]$$

Dónde:

E = Emisión estimada

A = Tasa de actividad

FE = Factor de Emisión

Re = Reducción global de emisiones lograda por los controles %

ESTÁNDAR PARA REGULACIÓN DE EMISIONES

Con el propósito de controlar las emisiones de contaminantes de equipos fuera de ruta, la EPA ha adoptado estándares de emisión para los motores. Dependiendo del tipo de tecnología implementada se clasifican en niveles (Tier). (EPA, 2017)

- Tier 1. Adoptado en el año 1994, contiene los estándares para control de emisiones de equipos de más de 50 HP.
- Tier 2. Adoptado en el año 1998, contiene adicionalmente información sobre equipos marinos por encima de 30 litros por cilindro y equipos recreacionales de más de 50HP.
- Tier 3 Adoptado en el año 1998 con modificación en el 2007. Esta reglamentación incluye correcciones técnicas para motores diésel y asistencia técnica para producción de equipos de tecnología Tier 3.
- Tier 4. Esta regulación fue adoptada en el año 2004, incluye estándares para todos los tamaños de motor diésel fuera de carretera y contenido de azufre en el combustible.

1.3 Emisiones fuera de ruta

Como su nombre lo indica, son las emisiones asociadas a vehículos motores de combustión que no circulan en vías públicas, la clasificación de este tipo de emisiones difiere dependiendo del inventario, (ICCT, 2016). La EPA los agrupa en:

- Equipos para Agricultura
- Equipos de apoyo aeroportuario
- Equipos comerciales
- Equipos de construcción
- Equipos industriales
- Equipos de jardinería
- Equipos de carga
- Equipos de actividades petroleras
- Equipos de minería.

1.3.1 Maquinaria fuera de ruta y equipos de construcción

Este tipo de vehículos especiales son generalmente utilizados en actividades relacionadas con agricultura, industria y de construcción, por sus características tienen restringida su circulación en carretera, siendo transportados por vehículos especiales o cama bajas, entre los más representativos asociados a la construcción encuentran las vibrocompactadoras, excavadoras, retroexcavadoras, grúas, piloteadoras y minicargadores, cuya principal fuente energética es el combustible diésel. (INECC, 2014).

La actividad de la construcción de edificaciones genera emisiones ya sea por el movimiento de tierras y materiales (partículas suspendidas o polvo), o por la combustión de los motores de la maquinaria durante la excavación, perforación y movimientos de tierras, principalmente. A continuación, se encuentra una breve descripción del tipo de maquinaria diésel más utilizada para la construcción de edificaciones. El detalle del tipo de maquinaria reportada en este trabajo se puede encontrar en el Anexo C.

VIBROCOMPACTADORAS

Este tipo de maquinaria cuenta con rodillos que, mediante proceso de vibración, permite compactar el suelo para lograr alta resistencia del terreno.

MINIEXCAVADORAS Y EXCAVADORAS

Se utilizan para el movimiento, cargue de tierra y extracción de material de suelo. Su denominación depende del tamaño del motor que puede ir de 13 HP a más de 600 HP. El sistema de desplazamiento es de oruga (cadena) o ruedas, teniendo la posibilidad de intercambiar accesorios como cucharas, martillos, pulverizadoras, trituradoras, pinzas, etcétera., dependiendo de la necesidad de la actividad.

GRÚAS

Esta maquinaria puede ser móvil o fija, utilizadas para el transporte de material y actividades de perforación, la fuente energética puede ser diésel o electricidad. La potencia del motor oscila entre los 130 y 670 HP, dependiendo del modelo.

MOTONIVELADORAS Y RASPADORAS

Son utilizadas para nivelación de superficies y movimiento de tierras, se desplazan sobre ruedas, cuenta con una cuchilla central graduable que raspa el terreno, la potencia del motor oscila entre 50 y 938 HP.

CAMIONES Y VOLQUETAS

Estos generalmente son usados en las canteras para el transporte de grandes volúmenes de material, cuentan con restricción para su movilización en carreteras, estando catalogados como vehículos pesados. La potencia del motor oscila entre los 350 y 670 HP.

BULDÓCERES

Utilizados principalmente para demolición y movimiento de tierra, se desplazan sobre orugas (cadenas) la potencia del motor puede superar los 330 HP.

TRACTORES

Se utilizan para el transporte en general, la potencia del motor va desde los 33 HP hasta 200 HP.

CARGADORES Y MINICARGADORES

Estos pueden movilizarse sobre orugas o ruedas, la función principal es el transporte de material de excavación, aunque cuentan con accesorios o dispositivos intercambiables como cucharas, taladros, cortadores, pinzas, etcétera. Los minicargadores tienen una potencia de motor entre 20 y 55 HP, mientras que los medianos pueden tener motores de hasta 335 HP.

RETROEXCAVADORAS

Son una combinación entre excavadoras hidráulicas y cargadores, pudiendo desplazarse sobre orugas o ruedas, se componen de brazos articulados y baldes de excavación. Cuentan con motores entre los 13 y 174 HP.

BOMBAS

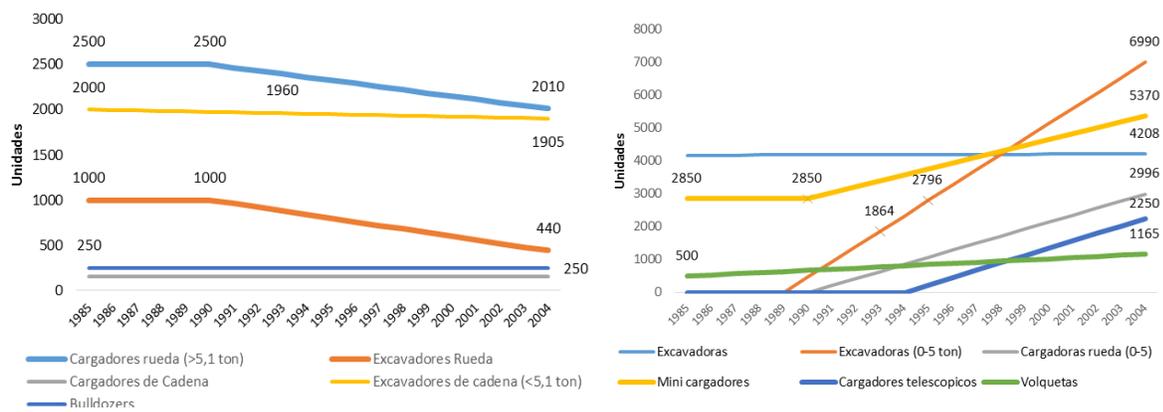
Este equipo se utiliza para el bombeo de hormigón, la fuente energética puede ser diésel o eléctrico. La potencia del motor puede ser desde 0,6 hasta 94 HP.

INVENTARIO DINAMARCA

Para Dinamarca, las emisiones fuera de ruta integran actividades de la maquinaria para agricultura y aprovechamiento forestal, construcción de edificaciones, industria manufacturera y mantenimiento de jardines. Los inventarios entre los años 1985 y 2004 cuantifican los contaminantes SO₂, NO_x, NMVOC, CH₄, CO, N₂O, NH₃, y TSP. Para su elaboración se tomó información sobre factores de emisión de NO_x, CO, y TSP del Inventario de Emisiones de Alemania del año 2004, de N₂O, NH₃ de (EEA, 2013), y para el caso de NMVOC, CH₄ de (EPA, 1991).

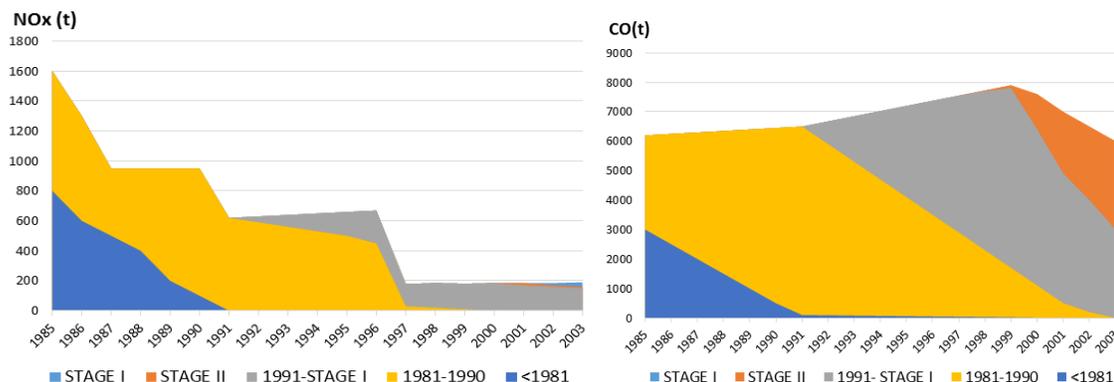
La información sobre flota de vehículos para la construcción proviene de organizaciones de distribuidores de maquinaria, fábricas de motores, gremios, institutos de investigación y expertos en los diferentes campos de actividad, (Winther & Nielsen, 2006). Los análisis incluyen información como el número, capacidad, tecnología y tipo de equipos utilizados para la construcción, en un periodo de 20 años. Ver Figura 1-3.

Figura 1- 3 Maquinaria de Construcción. Dinamarca 1985-2004 (ENVIRONMENTAL, 2006)



En el periodo comprendido entre los años 1985 y 2004 se evidencian variaciones en las emisiones que se atribuyen a la evolución tecnológica y las legislaciones para fabricación de motores. Algunos ejemplos de esta variación se pueden observar en la Figura 1-4.

Figura 1- 4 Variación de las emisiones de NOx y CO, 1985-2004, (ENVIRONMENTAL, 2006).



Las emisiones fuera de ruta en el inventario de Dinamarca para el año 2004, están agrupadas en los sectores de agricultura, aprovechamiento forestal e industrial, de esta última hacen parte las actividades construcción de edificaciones, mantenimiento de aeronaves y otros equipos de carga. Ver tabla 1-1.

Tabla 1- 1 Emisiones % fuera de ruta por sector. (ENVIRONMENTAL, 2006)

SECTOR	Tipo de combustible	FC %	SO2 [%]	NO2 [%]	NM VOC [%]	CH4 [%]	CO [%]	CO2 [%]	N2O [%]	NH3 [%]	TSP [%]
Agricultura	Diesel	44%	53%	51%	11%	5%	5%	44%	48%	50%	46%
Forestal	Diesel	1%	1%	1%	0%	0%	0%	1%	1%	0%	0%
Industria	Diesel	37%	44%	40%	10%	5%	4%	37%	40%	50%	48%
Subtotal		81%	98%	92%	21%	11%	9%	82%	90%	100%	95%
Agricultura	Gasolina	1%	0%	0%	3%	10%	6%	1%	0%	0%	0%
Forestal	Gasolina	0%	0%	0%	4%	1%	1%	0%	0%	0%	0%
Industria	Gasolina	1%	0%	0%	2%	4%	2%	1%	0%	0%	0%
Doméstico	Gasolina	13%	2%	1%	69%	72%	83%	13%	6%	0%	4%
subtotal		15%	2%	2%	78%	87%	91%	15%	6%	0%	5%
Industria	LPG	3%	0%	6%	1%	2%	0%	3%	5%	0%	0%
GRAN TOTAL		100%									

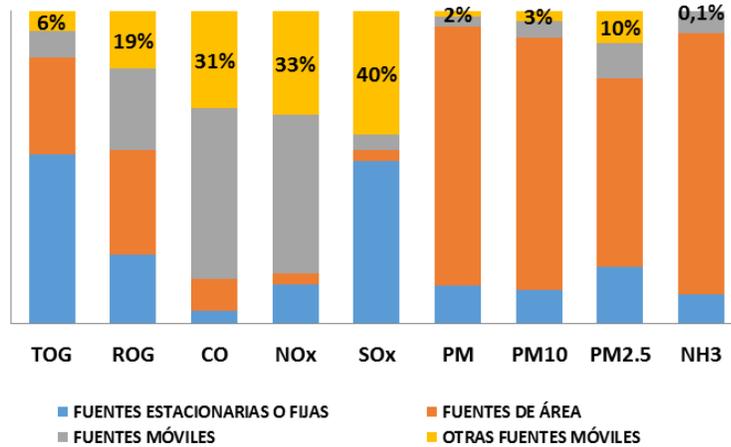
INVENTARIO CALIFORNIA

El estado de California a través de la Junta de Recursos del Aire (CARB) por sus siglas en inglés, cuenta con un sistema de reporte en línea denominado (DOORS) para equipos que funcionan con combustible Diesel y Gasolina. La actualización de esta base de datos se logra gracias a los informes periódicos presentados por los propietarios de la maquinaria, la información proveniente Equipment Data Associates (EDA), Eastern Research Group (ERG), la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos y demás actores representativos de las actividades asociadas a las emisiones fuera de ruta. (CARB, 2018)

Los datos recopilados se generan reportes periódicos sobre el consumo de combustible y emisiones de PM, SOx, CO, NOx y CO₂, para fuentes fijas, móviles, de área y otras fuentes móviles. Esta última incluye la maquinaria agrícola y de construcción, que

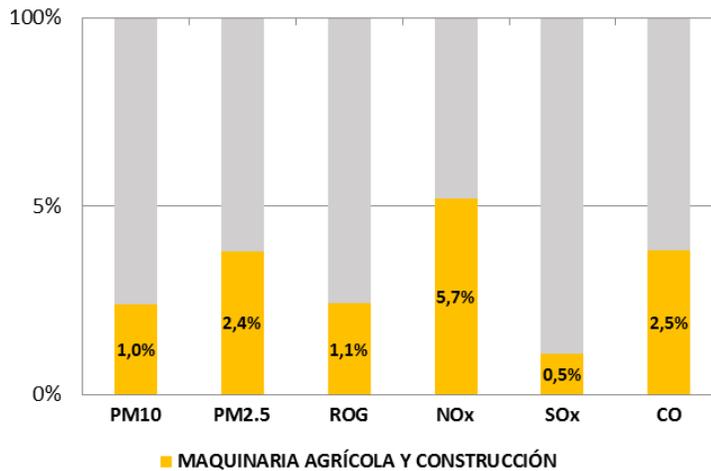
representa aportes significativos en contaminantes como ROG, CO, NOx, y SOx, con una participación del 19, 31, 33 y 40%, ver Figura 1-5

Figura 1- 5 Distribución de las emisiones Estado de California por tipo de fuente. (CARB, 2018)



De acuerdo con (DISTRICT, 2014) Solamente en la ciudad de San Francisco se emiten 1327 ton/día de CO, de los cuales la maquinaria agrícola y de construcción aportan cerca del 2.5%. Un ejemplo de los aportes de esta maquinaria a la emisión de otros contaminantes puede observarse en la figura 1-6.

Figura 1- 6 Porcentaje de participación de la maquinaria agrícola y de construcción en las emisiones de la ciudad de San Francisco, 2011, (DISTRICT, 2014).



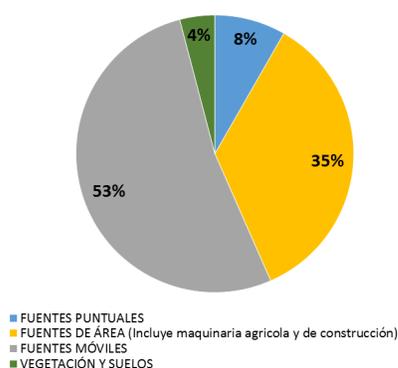
INVENTARIO MÉXICO

El inventario del año 2016 cuantifica las emisiones de contaminantes criterio, compuestos tóxicos y Gases de Efecto Invernadero, basándose para esto las metodologías descritas en los Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México EPA, el IPCC y CARB. El área de estudio cubre 7,700 km² correspondientes a la Zona Metropolitana del

Valle de México ZMVM, que cuenta con 5.7 millones de vehículos, 2300 industrias, 3000 comercios y 6 millones de viviendas (México, 2018) .

La cuantificación de emisiones está agrupada en fuentes puntuales, móviles, naturales y de área, esta última incluye la categoría móvil fuera de ruta, que se compone de locomotoras, operación de aeronaves, terminales de buses, y maquinaria agrícola y de construcción. Los resultados muestran que las fuentes móviles en la CDMX aportan el 53% del PM_{10} , el 86% del CO, y 86% de NOx , mientras que las fuentes de área aportan la mayor cantidad de SO_2 con 63%. (México, 2018)

Figura 1- 7. Participación en la emisión de PM_{10} por fuentes en CDMX (México, 2018).



Las Fuentes de Área generan las mayores emisiones de PM_{10} , $PM_{2.5}$, COT, COV y NH_3 en la ZMVM, ver Figura 1-8. Por su parte la subcategoría agrícola y de construcción que hacen parte de las fuentes de área aportan menos del 1% del total de las emisiones, ver Figura (1-9).

Figura 1- 8 Aporte de contaminantes fuera de ruta, ZMVM, (México, 2018)

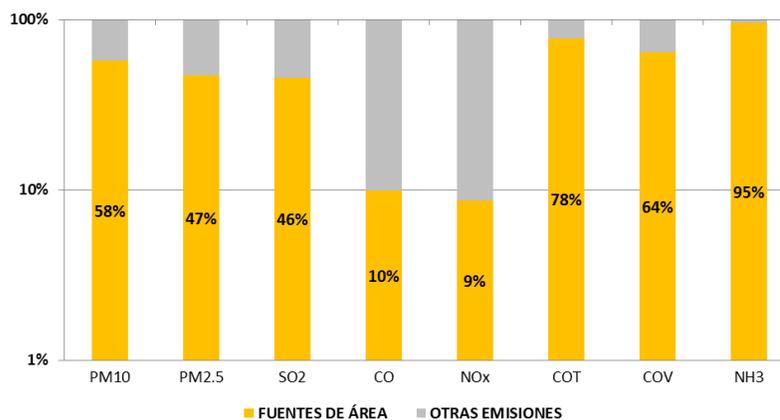
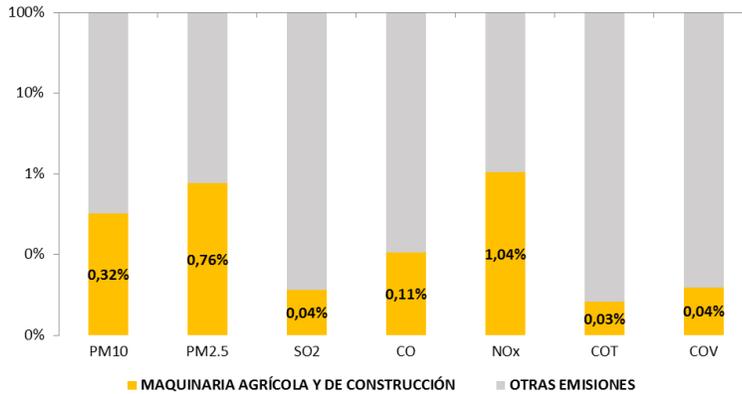


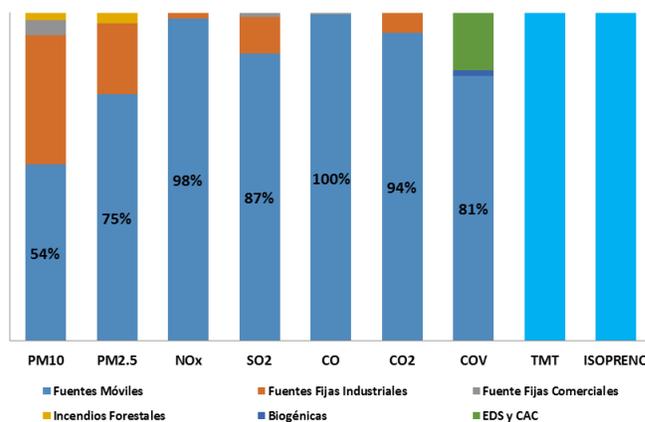
Figura 1- 9 Emisiones de maquinaria agrícola y de construcción ZMVM, (México, 2018)



INVENTARIO BOGOTÁ

Bogotá al igual que otros grandes centros urbanos, presenta deterioro en la condiciones de calidad del aire, producida principalmente por la combustión de vehículos e industrias, es por eso que para el año 2017, la Secretaría Distrital de Ambiente definió la estrategia para actualizar el Plan Decenal de Descontaminación del Aire de Bogotá, incluyendo las fuentes móviles, Fuentes Fijas (industrial y comerciales), incendios forestales, Biogénicas, Estaciones De Servicio EDS y Centros de Almacenamiento de Combustible CAC, donde se evidencia que la mayor fuente de emisión para contaminantes PM, NOx, SO₂, CO₂ y COV, son las fuentes móviles, seguidos de las fuentes fijas industriales, ver Figura (1-10).

Figura 1- 10. Contribución de cada fuente de emisión por contaminante 2014. (SDA, 2017)



Adicionalmente se cuantifica el Material Particulado Susceptible de Resuspensión MPSR, en donde la construcción de edificaciones genera un aporte de 2.9% de PM₁₀ y 9.9% de PM_{2.5}, sin embargo, no se incluye las emisiones provenientes los motores de la maquinaria de construcción, para contaminantes como NOx, CO, HC, CO₂ y SO₂.

1.4 Cálculo emisiones fuera de ruta

Entre las metodologías disponibles para la cuantificación de Emisiones Fuera de Ruta por actividades de construcción de edificaciones, se encuentran las desarrolladas por la Agencia Ambiental Europea (EEA, 2013) y la Agencia de Protección Ambiental US - EPA 1991, actualizada por (US- EPA, 2010). Estas presentan diferentes opciones de cuantificación, cuya elección depende principalmente de disponibilidad de datos sobre maquinaria y condiciones de actividad en los procesos constructivos.

1.4.1 Metodología. Agencia ambiental europea. EEA

Contenida en la guía (EEA, 2013), esta metodología Incluye información sobre métodos y fuentes para la preparación de inventarios de emisiones en línea con las directrices (IPCC). Una de las particularidades de esta guía es la adaptación de la Nomenclatura de Reporte (NFR, por sus siglas en inglés) a la utilizada por el (IPCC), esto con el objetivo de dar continuidad y coherencia entre los diferentes reportes.

De esta forma se agrupa la emisión de contaminantes en las áreas de energía, procesos industriales y uso de productos, agricultura, residuos y otros. En el segmento de energía se incluyen las emisiones fuera de ruta por actividad constructiva, específicamente en la categoría maquinaria fuentes móviles fuera de ruta. Aunque en principio estas deberían ser fuentes móviles debido al desplazamiento de la maquinaria, se consideran de área o fuera de ruta porque permanecen en el mismo sitio por largos periodos, generando movimientos en pequeños radios, ver Tabla 1-2.

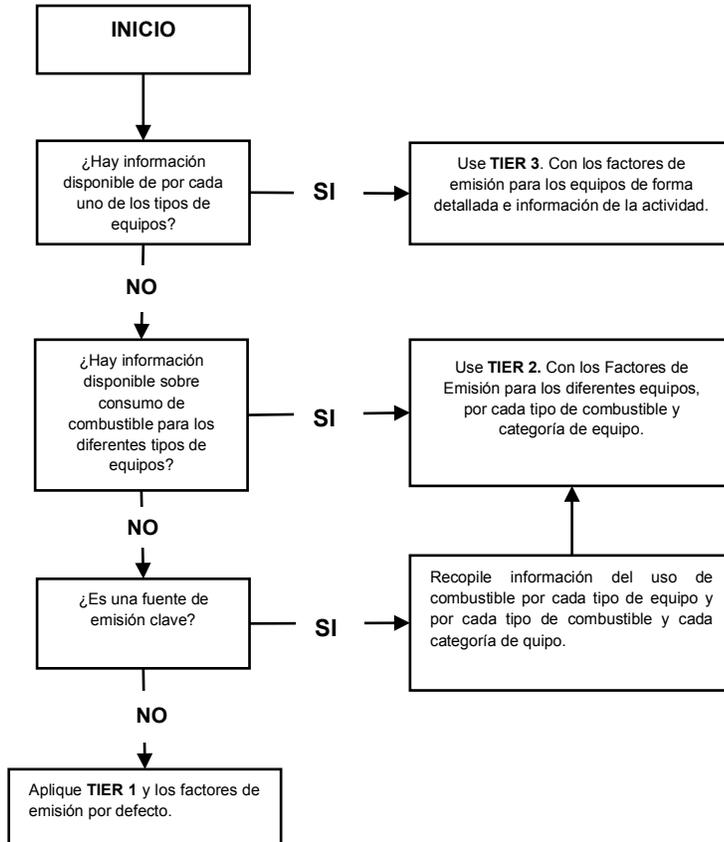
Tabla 1- 2: Clasificación de la maquinaria fuera de ruta (EEA, 2013).

CÓDIGO NFR	USOS DE LA MAQUINARIA
1.A.2.F ii	Maquinaria móvil terrestre para construcción y manufactura
1.A.4.a.ii	Maquinaria móvil institucional y comercial
1. A.4.b. ii	Maquinaria móvil para áreas residenciales, domésticas y jardinería.
1.A.4.c ii	Maquinaria móvil agricultura y silvicultura
1.A.5.b	Maquinaria móvil militar.

Los contaminantes que se calculan con esta metodología son SO₂, NO_x, PM, CO, CO₂ y SO₂ y Compuestos Orgánicos Volátiles sin metano (NMVOCs), cuya masa (gramos) depende del tipo de combustible, el tipo de motor y características de los equipos. La guía (EEA, 2013) recomienda reducir al máximo las suposiciones, para lo cual incluye tres niveles de cálculo denominados TIERs, cuya selección depende del acceso a la

información con la que se cuente para realizar el inventario de emisiones. La Figura 1-10 contiene los pasos a seguir para seleccionar el método más adecuado de cuantificación.

Figura 1- 11. Mapa de selección de ruta cálculo, (EEA, 2013).



El nivel TIER 1 cuantifica las emisiones con base en el total combustible utilizado por la maquinaria para construcción y el factor de emisión asociado a cada combustible en g/t, el nivel TIER 2 tiene en cuenta adicionalmente para el cálculo, información sobre la tecnología de motor y año de fabricación. Para esto la (EEA, 2013) cuenta con una base de datos con factores de emisión obtenidos a través de estudios específicos en la región, convenios con asociaciones de fabricantes y distribuidores.

El nivel TIER 3 es considerado el más completo y preciso, porque desagrega y caracteriza los equipos incluyendo información específica sobre condiciones de operación y tamaño de motores. Se basa en el método de Non Road And Engine And Vehicle Emission Study (EPA, 1991). Ver ecuación (1- 2).

1.4.2 Metodología. Agencia de protección ambiental US- EPA

En este método, la actividad de construcción está incluida dentro de la categoría (otro equipo móvil que no circula por carreteras) que está compuesta por vehículos recreativos, equipos para construcción, industria, jardinería, agrícola, comercial ligero, explotación forestal y servicios aeroportuarios, de motores operados con combustible diésel y gasolina. (Corporation, 1997). Como lo expresan en (EEA, 2013), este es el método más completo para calcular la masa total de contaminantes.

Ecuación (1 - 2)

$$\text{Emisiones}_p = N_e \times HR_e \times HP_e \times FC_e \times FE_p$$

Dónde:

Emisiones_p = Emisiones de contaminante (p) expresado en g/año ó kg/año

N_e = Número de equipos tipo (e).

HR_e = Horas anuales de uso del equipo tipo (e).

HP_e = Potencia nominal promedio para el equipo tipo (e).

FC_e = Factor de Carga típico para el equipo tipo (e).

FE_{p,e} = Factor de Emisión para el contaminante tipo (p) y el equipo tipo (e), expresado en (g/HP-hr). Los factores de emisión son obtenidos mediante la metodología contenida en (US-EPA, 2010).

FACTORES DE EMISIÓN

(EPA, 1991) al igual que (EEA, 2013) cuenta con una base de datos de Factores de Emisiones para las diferentes potencias de motor e información básica sobre la actividad de la maquinaria. Sin embargo, en el reporte NR-009, (US- EPA, 2010) explica el método para la obtención los Factores de Emisión de Hidrocarburos HC, Monóxido de Carbono CO, Óxidos de Nitrógeno NOx, Material Particulado PM, Dióxido de Carbono CO₂, y Dióxidos de Azufre SO₂, logrando un mayor grado de precisión, dado que incluye términos como:

- FE_{ss}. Factor de Emisión de la maquinaria con cero horas de uso, es decir la emisión que genera un motor en las pruebas de fábrica, de acuerdo con el modelo, los caballos de fuerza, el tipo de tecnológica y año de fabricación. Ver tabla A-1 en Anexo A.

- FAT. Factor de Ajuste Transitorio, que hace referencia a la realidad de operación de los equipos teniendo en cuenta la carga, velocidad y otras demandas sobre los motores. ver tabla A-2 en Anexo A.
- FD. Factor de Deterioro de la maquinaria, asociado a la edad y horas acumuladas de trabajo
- operación de la maquinaria Este varía de acuerdo con el tipo de tecnología y la edad del motor.
- S_{PMadj} . contenido de azufre en el combustible usado por la maquinaria objeto de estudio.

1.5 Generalidades del sector constructor

El sector de la construcción de edificaciones representa cerca del 3.5% del PIB de Colombia, cerca de 65 billones de pesos al año (SENA, 2015). Se ubica en el puesto 14 de los 25 sectores productivos del país, demandando insumos y enlazando 27 de los 60 sectores de la economía, es decir que en conjunto la participación de toda la actividad aporta un 13.5% del PIB.

El encadenamiento de la actividad está compuesto empresas dedicadas a la construcción y proveeduría de insumos, apoyada por equipos de consultoría de estudios técnicos, análisis financieros y soporte jurídico, cuya articulación genera oferta de productos inmobiliarios con destino residencial y no residencial, la cual es absorbida en mayor media por la región Bogotá –Cundinamarca, y los departamentos de Antioquia, Valle, Atlántico y Santander. (SENA, 2015)

Bogotá y Cundinamarca presentan cerca del 30% del total de producción de bienes inmuebles, un 5.5% del PIB de la región. Solamente en Bogotá se inician en promedio 2.8 millones de m² de proyectos con destino residencial. Sin embargo, para el año 2017 este valor ascendió a 3.6 millones de m², unas 39 mil unidades de vivienda, de las cuales aproximadamente 54% pertenecían al segmento Vivienda de Interés Social VIS – Vivienda de Interés Prioritario VIP, y 53% a NO VIS. Para destinos No Residencial que incluyen los usos de oficinas, bodegas, industria, comercio y otros el área construida representó 3 millones de m². (CAMACOL B&C, 2017).

Es importante tener en cuenta que los proyectos de vivienda VIP tienen un tope de 70 Salarios Mínimos Mensuales Legales Vigentes SMMLV, VIS menor a 135 SMMLV y NO VIS superior a 135 SMMLV (Artículo 90 ley 1753/2015), esto y el precio del suelo, son factores que inciden en la localización del tipo de vivienda y la actividad de la construcción en la ciudad, Ver Figura 1-12.

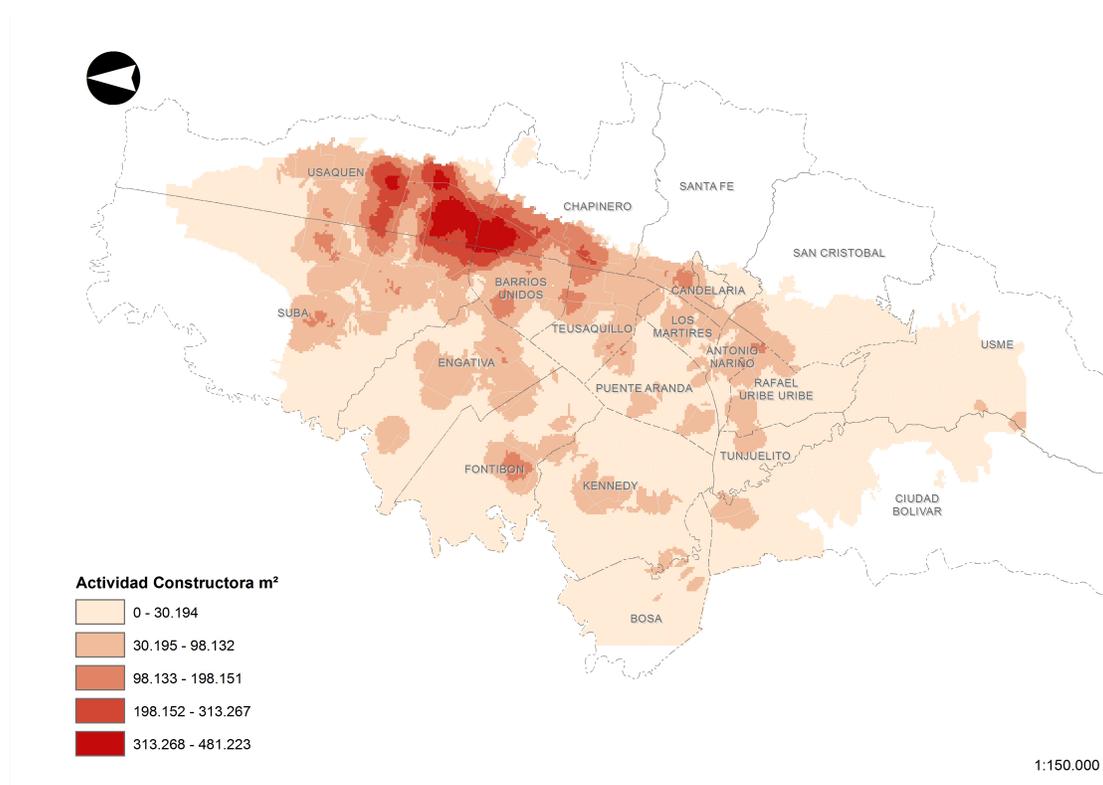
PROCESO DE CONSTRUCCIÓN

Las obras de construcción proyectos edificatorios incluyen las etapas preliminares, cimentación, estructura, obra negra y acabados, con una duración para una ciudad como Bogotá cercana a los 18 meses, de los cuales en promedio 5 meses son destinados a las

actividades preliminares y cimentación, aunque este tiempo varía significativamente dependiendo del tamaño del proyecto y el sistema constructivo.

Durante el año 2017 se registraron más de 1200 obras en Bogotá, presentando la mayor actividad las localidades de suba y Usaquén, ver Figura 1-12. Entre los sistemas constructivos más utilizados en proyectos de vivienda en Bogotá para el año 2017, se encuentran el sistema industrializado (SI), mampostería confinada (MC) y mampostería estructural (ME), con una participación de 49, 48 y 3% respectivamente. De acuerdo con (CAMACOL B&C, 2017), en los estratos 1, 2 y 3 predomina el sistema industrializado, en el estrato 4 (SI) y pórticos en concreto (PC), mientras que en los estratos 5 y 6 (PC).

Figura 1- 12. Mapa de Actividad Constructora, Fuente Coordinada Urbana CU 2017.



2. Metodología

De acuerdo con lo establecido en el Capítulo 1, la metodología (EPA, 1991), es la más usada para cuantificar las emisiones fuera de ruta por maquinaria de construcción de edificaciones. Para cumplir con los requerimientos de la metodología se establecen tres etapas:

- Recopilación de información sobre maquinaria en las obras de construcción, relacionadas con tipo de maquinaria, potencia de motor, horas de trabajo, edad , etc.
- Cálculo de factores de emisión (FE) y comparación de resultados con otras fuentes de estudio y metodologías
- Estimación de emisiones totales

Paralelamente, y con base en (US- EPA, 2010), se desarrolló una herramienta en Excel dentro del marco de este trabajo final de maestría para cuantificar las emisiones por equipo y por obra, con el objeto de facilitar los cálculos, contar con una base de datos y evaluar escenarios que permitan reducir las emisiones en las obras.

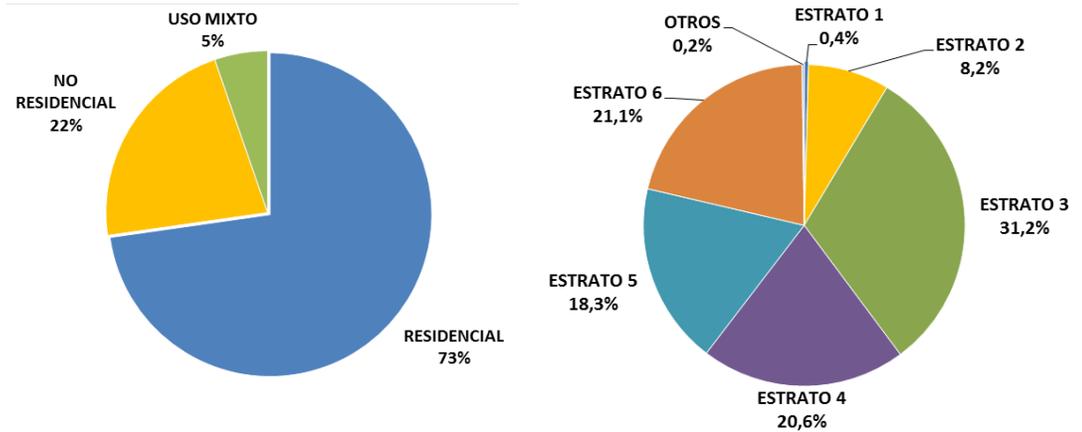
2.1 Recopilación de información sobre maquinaria en obras de construcción

Esta etapa consiste en consecución de información sobre número y características de los equipos de construcción utilizados en las obras, con el objeto de contar con datos de entrada para el modelo como lo son el tipo de equipo, modelo, año de fabricación y potencia del motor, tipo de combustible y horas de trabajo en la obra. Para esto, con base en la información suministrada por la herramienta Coordinada Urbana CU®, desarrollada por el gremio de la construcción para generar un seguimiento de la actividad en el territorio, se seleccionan las obras de construcción en el perímetro urbano de la ciudad de Bogotá para el año 2017.

Durante este periodo se encontraban activos 1.207 proyectos de edificaciones, lo que significa que se estaban llevando a cabo procesos constructivos con etapas como alistamiento u obras preliminares, excavación, cimentación, conformación de la estructura portante, obra gris, acabados, terminado y entrega. El conjunto de obras incluye proyectos con destino Residencial, no Residencial (oficinas, bodegas y centros

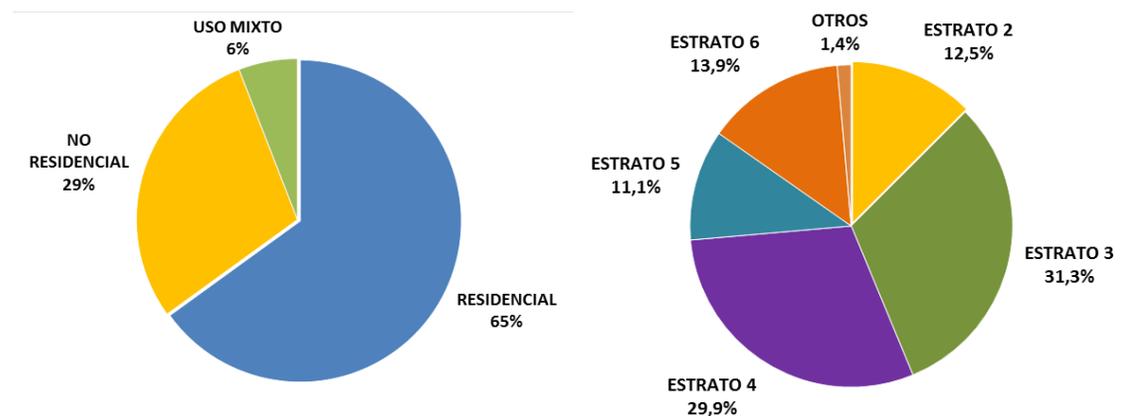
comerciales) y mixto (vivienda y comercio), en los diferentes estratos sociales, ver Figura (2-1).

Figura 2 - 1. Universo de obras en la ciudad de Bogotá y estratificación de los proyectos residenciales (1207 proyectos). Fuente (CU ® 2017).



Del total de proyectos activos, se seleccionan aquellos que se encuentran en las etapas preliminares, excavación y cimentación, que es donde se utiliza la maquinaria pesada (diésel). Quedando un total de 201 obras que representan un 17% del total de la actividad, ver figura (2-2).

Figura 2 - 2. Usos y estratificación de las obras en etapa de excavación y cimentación (201) Fuente (CU ® 2017).



Sobre los 201 proyectos que se encontraban en etapa de excavación y cimentación, se contactaron a los directores y residentes de obra, para diligenciar la plantilla con los datos de operación y características de la maquinaria de construcción, ver Figura (2-3).

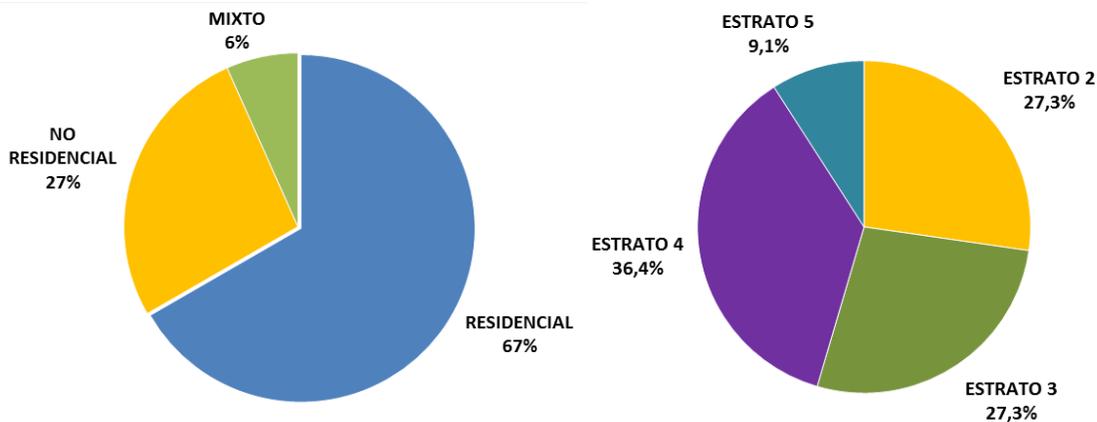
Figura 2 - 3. Ficha de recopilación de datos de maquinaria de construcción.

COMPañÍA CONTRATISTA	MARCA DEL EQUIPO (Ejemplo, CAT)	Modelo del equipo. (ejemplo, 320L)	TIPO DE EQUIPO (ejemplo, Excavadora)	AÑO DE FABRICACIÓN DEL MOTOR	CABALLOS DE FUERZA DEL MOTOR (Hp)	HORAS TOTALES DE TRABAJO DEL EQUIPO	COMBUSTIBLE (EJEMPLO, DIESEL)

Fuente, el autor.

Se intentaron diferentes aproximaciones en procura de conseguir la información de la mayor cantidad de obras posible, al final se logró obtener información de 15 obras, ver Figura (2-4). Al comparar la distribución porcentual de las obras que respondieron la encuesta (Figura (2.4) con el total de obras se observa que tienen una distribución porcentual muy similar.

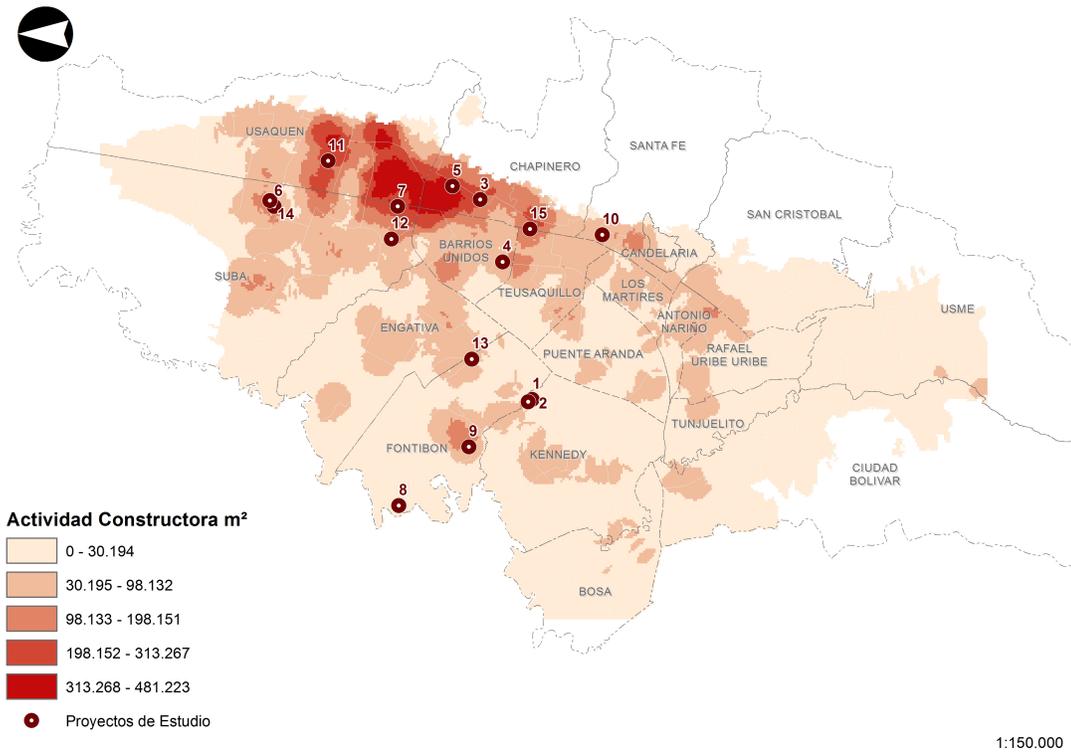
Figura 2 - 4. Usos y estratificación de 15 obras que reportaron información de maquinaria.



Fuente, el autor.

Como se observa en la Figura (2-5), los proyectos están ubicados en zonas de alta y baja actividad constructiva en la ciudad.

Figura 2 - 5. Ubicación de 15 obras que reportaron información de maquinaria.



Fuente, el autor.

2.2 Cálculo de factores de emisión FE

Una vez consolidada la información de maquinaria de construcción para las 15 obras, se procede a estimar los Factores de Emisión para los contaminantes HC, CO, NO_x, PM, SO₂ Y CO₂ con base en el método (US- EPA, 2010). En el Anexo D, se encuentra el detalle de los datos de entrada referentes a tipo de maquinaria, horas de trabajo, potencia del motor y año de fabricación, para cada una de las obras.

2.2.1 Factores de emisión

Para la obtención de los FE de **HC, CO y NO_x** se utiliza la siguiente ecuación.

Ecuación (2 - 1)

$$FE_{(HC.CO \text{ y } NO_x)} = FE_{SS} \times FAT \times FD$$

Dónde:

FE = Factor de emisión final. Incluyendo los ajustes por funcionamiento y deterioro del motor. El cual se expresa en (g/HP-hr). Donde (g) es la masa el contaminante. (HP) son los caballos de fuerza de la maquinaria y (hr) la unidad de tiempo en horas.

FE_{ss} = Factor de Emisión de la maquinaria con (ss) cero horas de uso. Se expresa en (g/HP-hr). Este factor es el resultado de relacionar modelo, potencia, tipo de tecnológica y año de fabricación de la maquinaria. Ver tabla A-1 en Anexo A.

FAT = Factor de Ajuste Transitorio (sin unidad de medida). Varía de acuerdo con las características del equipo, ver tabla A-2 en Anexo A. Este término se incluye dentro de la ecuación con el propósito de representar la realidad de operación de los equipos teniendo en cuenta la carga, velocidad y otras demandas sobre los motores.

FD = Factor de Deterioro de la maquinaria (sin unidad de medida). Este varía de acuerdo con el tipo de tecnología y la edad del motor, para esto se usa la Ecuación (2-2).

Ecuación (2 - 2)

$$FD=1+A \times (\text{factor de edad})$$

Dónde:

A = Factor de Deterioro Relativo. Este depende del tipo de tecnología y varía por tipo de contaminante, ver Tabla A-3 en Anexo A.

Factor de edad = Es calculado con base en las horas acumuladas de trabajo, el factor de carga al que es sometida la maquinaria y su vida útil ver Ecuación (2-3)

Ecuación (2 - 3)

$$\text{Factor de Edad} = \frac{(\text{horas acumuladas} \times \text{factor de carga})}{\text{vida útil total en horas}}$$

Las horas acumuladas se calculan con base en las horas de trabajo al año de la maquinaria y la edad de la maquinaria, de acuerdo con la siguiente ecuación.

Ecuación (2 - 4)

$$\text{Horas acumuladas} = \text{edad} \times \text{actividad}$$

Dónde:

Edad = edad de la maquinaria en años

Actividad = horas de trabajo al año (horas/año).

Para obtener el Factor de Emisión de **Material Particulado PM** se agrega un término **S_{PM(adj)}**, que hacer referencia al contenido de azufre en el combustible, ver Ecuación(2-5).

Ecuación (2 - 5)

$$FE_{(PM)} = FE_{SS} \times FAT \times FD \times S_{PMadj}$$

Dónde:

FE_{ss} = Factor de emisión de la maquinaria con cero horas de uso. Se expresa en (g/hp-hr). Ver tabla A-1 en Anexo A.

FAT = Factor de Ajuste Transitorio (sin unidad de medida). Varía de acuerdo con las características del equipo, ver tabla A-2 en Anexo A. Este término se incluye dentro de la ecuación con el propósito de representar la realidad de operación de los equipos teniendo en cuenta la carga, velocidad y otras demandas sobre los motores. Para tecnologías Tier IV el FAT = 1.

FD = Factor de Deterioro de la maquinaria (sin unidad de medida). Este varía de acuerdo con el tipo de tecnología y la edad del motor, ver Ecuación (2-2).

S_{PMadj} = Ajuste de Factor de Emisión de PM con base en la variación de contenido de azufre en el combustible. El cálculo de **$S_{PM(adj)}$** para corregir la emisión de PM se realiza con base en la Ecuación (2-6)

Ecuación (2 - 6)

$$S_{pmadj} = BSFC \times 453.6 \times 7.0 \times soxcnv \times 0.01 \times (soxbas - soxdsl)$$

Dónde:

S_{PMadj} = Ajuste de azufre para PM en (g/HP-hr).

BSFC = Consumo específico de combustible ajustado en (lb-combustible/HP-hr). Para determinar este valor se utiliza la Ecuación (2-7).

453.6 = Conversión de libras a gramos.

7.0 = gramos de sulfato de PM/gramos de azufre en PM.

Soxcnv = a 0,022247

0.01 = conversión de porcentaje a fracción.

Soxbas = el valor por defecto es 0.33 peso porcentual de motores diésel.

Soxdsl = episodic fuel sulfur weight percent (Peso específico porcentual de azufre en combustible)

Ecuación (2 - 7)

$$BSFC = FE (BSFC)_{ss} \times FAT$$

Dónde:

FE (BSFC)_{ss} = Brake specific fuel consumption BSFC o consumo específico de combustible CEC, es la medida de la eficiencia de combustible de cualquier fuerza motriz que quema combustible para producir rotación. Ver Tabla A-1 en Anexo A.

FAT = Factor de Ajuste Transitorio (sin unidad de medida). Varía de acuerdo con las características del equipo, ver tabla A-2 en Anexo A. Este término se incluye dentro de la ecuación con el propósito de representar la realidad de operación de los equipos teniendo en cuenta la carga, velocidad y otras demandas sobre los motores. Para tecnologías Tier IV el FAT = 1.

Para obtener el **Factor de Emisión de CO₂** se utiliza la Ecuación (2-8)

Ecuación (2 - 8)

$$FE_{(CO_2)} = (BSFC \times 453.6 - HC) \times 0.87 \left(\frac{44}{12} \right)$$

Dónde:

FE_{CO2} = Factor de emisión del contaminante dado en g/HP-hr.

BSFC = Consumo específico de combustible en lb/HP-hr. El valor de este término se obtiene de la Ecuación (2-7).

453.6 = Factor de conversión de libras a gramos.

HC = Factor de Emisión de hidrocarburos en g/HP-hr. Ver Ecuación (2-1)

0.87 = Fracción de masa de carbón del diésel. (Constante)

44/12 = es la tasa de masa CO₂/ la masa de Carbón. (Constante)

Para obtener el **Factor de Emisión de SO₂** se utiliza la Ecuación (2-9)

Ecuación (2 - 9)

$$FE_{(SO_2)} = (BSFC \times 453.6 \times (1 - soxcnv) - HC) \times 0.01 \times soxdsl \times 2$$

Dónde:

FE_{SO_2} = Factor de emisión del contaminante en g/HP-hr

BSFC = Consumo específico de combustible en lb/HP-hr. El valor de este término se obtiene de la Ecuación (2-7).

453.6 = Factor de conversión de libras a gramos.

soxcnv = Fracción de azufre convertido directamente a PM. Equivalente a 0.022247.

HC = Factor de Emisión de hidrocarburos en g/HP-hr. Obtenido de la Ecuación (2-1).

0.01 = Factor de conversión de peso porcentual a peso fracción

soxdsi = Peso específico porcentual de azufre en combustible.

2 = Gramos de SO_2 formados de un gramo de azufre.

Para mayor comprensión del procedimiento, el Anexo B se cuenta con una muestra de cálculo detalla con cada una de las ecuaciones involucradas en la cuantificación de emisiones por maquinaria.

2.3 Herramienta para el cálculo de emisiones EFRC

Dada la complejidad de la búsqueda manual de los datos de entrada para la cuantificación de cada uno de los Factores de Emisión, el cálculo de emisiones por cada equipo y por ende el de cada obra, se diseñó una herramienta de Emisiones Fuera de Ruta para Construcción(EFRC) con base en el software Excel, que contiene las ecuaciones de la metodología EPA y cada una de las tablas,

De esta manera el usuario cuenta un formulario donde solamente debe incluir la información de las planillas de recolección con los datos de caballos de fuerza, potencia del motor, año de fabricación y horas de trabajo por cada uno de los equipos obteniendo las emisiones por cada uno de los equipos y para la obra. Ver figura (2-6).

Figura 2 - 6. Formulario de la herramienta con ejemplos de los datos de entrada.



OBRA

Nombre?

Número de equipos	<input type="text" value="1"/>	Número de equipos	<input type="text" value="1"/>
Tipo de Equipo	<input type="text" value="Tractor"/>	Tipo de Equipo	<input type="text" value="Excavadora"/>
Número de horas de uso al año	<input type="text" value="400"/>	Número de horas de uso	<input type="text" value="400"/>
Marca del equipo	<input type="text"/>	Marca del equipo	<input type="text"/>
Modelo del equipo	<input type="text"/>	Modelo del equipo	<input type="text"/>
Marca del equipo	<input type="text"/>	Marca del equipo	<input type="text"/>
Potencia del motor	<input type="text" value="40"/>	Potencia del motor	<input type="text" value="500"/>
Año de Fabricación	<input type="text" value="2007"/>	Año de Fabricación	<input type="text" value="2005"/>
Tecnología	<input type="text" value="TIER2"/>	Tecnología	<input type="text" value="TIER4"/>

A continuación, se encuentran algunos ejemplos de la herramienta EFRC, en los que el usuario puede realizar seguimiento a cada una de las etapas de la metodología, y verificar los resultados parciales y totales que se obtienen.

- SELECCIÓN AUTOMÁTICA DEL (FE_{ss}) FACTOR DE EMISIÓN CERO HORAS DE USO.

Existen más de 300 FE_{ss} de los cuales la herramienta selecciona el más acorde con la característica de la maquinaria, ver Figura 2-7.

Figura 2 - 7. Ejemplo de resultados de factores de Emisión Cero-Horas.

TIPO DE EQUIPO	HR	(HP)	AÑO DE FABRICACIÓN	TECNOLOGÍA	FE _{ss} (g/hp-hr)				
					#Ess	HC	CO	NOX	PM
Minicargador	1892	84	2014	TIER3	6	0,184	2,366	3	0,2
Vibrocompactador	1200	130	2000	TIER2	7	0,338	0,867	4,1	0,18
Minicargador	1892	75	2010	TIER3	6	0,184	2,366	3	0,2
Vibrocompactador	72	110	2001	TIER2	7	0,338	0,867	4,1	0,18
Minicargador	240	80	1999	TIER2	6	0,367	2,366	4,7	0,24
Bomba	1344	100	2016	TIER4	7	0,131	0,087	2,5	0,0092
Bomba	980	100	2016	TIER4	7	0,131	0,087	2,5	0,0092
Bomba	1008	100	2016	TIER4	7	0,131	0,087	2,5	0,0092
Bomba	980	100	2016	TIER4	7	0,131	0,087	2,5	0,0092
Bomba	1344	100	2016	TIER4	7	0,131	0,087	2,5	0,0092

Fuente: el autor.

- SELECCIÓN AUTOMÁTICA DEL (FAT) FACTOR DE AJUSTE TRANSITORIO

En la tabla A-2 en Anexo A, se encuentran más de 120 valores de FAT para los contaminantes HC, CO, NOx, PM y BSFC. Para el caso específico del HC este es requerido para calcular las emisiones de CO₂ y SO₂, ver Figura (2-8).

Figura 2 - 8. Ejemplo de resultados de FAT.

# EQ.	TIPO DE EQUIPO	TECNOLOGÍA	FAT				
			HC	CO	NOX	PM	CEC (BSFC)
1	Minicargador	TIER3	1,05	1,53	1,53	1,47	1,01
1	Vibrocompactador	TIER2	1	1	1	1	1
1	Minicargador	TIER3	1,05	1,53	1,53	1,47	1,01
1	Vibrocompactador	TIER2	1	1	1	1	1
1	Minicargador	TIER2	1,05	1,53	1,53	1,47	1,01
1	Bomba	TIER4	1	1	1	1	1
1	Bomba	TIER4	1	1	1	1	1
1	Bomba	TIER4	1	1	1	1	1
1	Bomba	TIER4	1	1	1	1	1
1	Bomba	TIER4	1	1	1	1	1

Fuente: el autor.

- CÁLCULO AUTOMÁTICO DEL (FD) FACTOR DE DETERIORO

El FD hace referencia al deterioro que sufre la maquina por los años de operación, se calcula utilizando la Ecuación (2-2). Para esto se utilizan como datos de entrada las horas de operación al año, el tipo de tecnología, las horas acumuladas de operación que ha tenido el equipo desde su fabricación. Ver Figura (2-9).

Figura 2 - 9. Ejemplo de resultados de FD.

TIPO DE EQUIPO	HORAS DE TRABAJO (AÑO)	AÑO DE FABRICACIÓN	EDAD (2017)	TECNOL .	(FD) FACTOR DE DETERIORO			
					FD HC	FD CO	FD NOX	FD PM
Minicargador	1892	2014	3	TIER3	1	1	1	1
Vibrocompactador	1200	2000	17	TIER2	1	1	1	1
Minicargador	1892	2010	7	TIER3	1	1	1	1
Vibrocompactador	72	2001	16	TIER2	1	1	1	1
Minicargador	240	1999	18	TIER2	1	1	1	1
Bomba	1344	2016	1	TIER4	1	1	1	1
Bomba	980	2016	1	TIER4	1	1	1	1
Bomba	1008	2016	1	TIER4	1	1	1	1
Bomba	980	2016	1	TIER4	1	1	1	1
Bomba	1344	2016	1	TIER4	1	1	1	1

Fuente: el autor.

- CÁLCULO AUTOMÁTICO DEL AJUSTE DE FACTOR DE PM

Para calcular el Factor de Emisión de PM, es necesario que previamente se obtenga el valor de S_{PMadj} , para esto la herramienta EFRC incluye la Ecuación (2-6). En la figura (2-10) se puede observar los datos obtenidos.

Figura 2 - 10. Ejemplo de resultados de S_{PMadj} .

# EQ.	TIPO DE EQUIPO	HORAS DE TRABAJO AL (AÑO)	(HP)	FACTOR DE CARGA	AÑO DE FABRICACIÓN	EDAD (AL 2017)	TECNOLOGÍA	S_{PM} (g/hp-hr)
1	Minicargador	1892	84	0,45	2014	3	TIER3	0,10
1	Vibrocompactador	1200	130	0,4	2000	17	TIER2	0,08
1	Minicargador	1892	75	0,45	2010	7	TIER3	0,10
1	Vibrocompactador	72	110	0,4	2001	16	TIER2	0,08
1	Minicargador	240	80	0,45	1999	18	TIER2	0,10
1	Bomba	1344	100	0,5	2016	1	TIER4	0,08
1	Bomba	980	100	0,5	2016	1	TIER4	0,08
1	Bomba	1008	100	0,5	2016	1	TIER4	0,08
1	Bomba	980	100	0,5	2016	1	TIER4	0,08
1	Bomba	1344	100	0,5	2016	1	TIER4	0,08

Fuente: el autor.

- OBTENCIÓN AUTOMÁTICA DE FACTORES DE EMISIÓN PARA CO, HC, NOx y PM

La herramienta **EFRC**, integra los diferentes valores de F_{Ess} , F_{AT} , F_{D} y S_{PMadj} , en las ecuaciones (2-1) (2-5), con las cuales se obtienen los Factores de Emisión para CO, HC, NOx y PM por cada maquinaria de construcción. Un ejemplo de los resultados obtenidos con la herramienta **EFRC** se pueden observar en la Figura (2-11).

Figura 2 - 11. Ejemplo de Factores de Emisión.

TIPO DE EQUIPO	(HP)	FACTOR DE CARGA	AÑO DE FABRICACIÓN	EDAD (AL 2017)	TECNOLOGÍA	FE (g/hp-hr)			
						HC	CO	NOX	FE PM
Minicargador	84	0,45	2014	3	TIER3	0,19	3,6	4,6	0,20
Vibrocompactador	130	0,4	2000	17	TIER2	0,34	0,9	4,1	0,10
Minicargador	75	0,45	2010	7	TIER3	0,19	3,7	4,6	0,21
Vibrocompactador	110	0,4	2001	16	TIER2	0,34	0,9	4,1	0,10
Minicargador	80	0,45	1999	18	TIER2	0,39	3,6	7,2	0,26
Bomba	100	0,5	2016	1	TIER4	0,13	0,09	2,5	0,08
Bomba	100	0,5	2016	1	TIER4	0,13	0,09	2,5	0,08
Bomba	100	0,5	2016	1	TIER4	0,13	0,09	2,5	0,08
Bomba	100	0,5	2016	1	TIER4	0,13	0,09	2,5	0,08
Bomba	100	0,5	2016	1	TIER4	0,13	0,09	2,5	0,08

Fuente: el autor.

- CÁLCULO AUTOMÁTICO DE FACTORES DE EMISIÓN PARA CO₂ Y SO₂

La herramienta **EFRC** calcula los factores de emisión de CO₂ y SO₂ integrando las ecuaciones (2-8) y (2-9), enlazando automáticamente el valor del Factor de Emisión de HC de la ecuación (2-1), y términos como la relación entre masa de CO₂ - masa de Carbón y la fracción de Azufre S convertido en PM para el caso del SO₂. Figura (2-12).

Figura 2 - 12 Ejemplos de Factores de Emisión para CO₂ y SO₂.

TIPO DE EQUIPO	(HP)	FACTOR DE CARGA	AÑO DE FABRICACIÓN	EDAD (AL 2017)	TECNOLOGÍA	FE (g/hp-hr)	
						CO ₂	SO ₂
Minicargador	84	0,45	2014	3	TIER3	596	0,018
Vibrocompactador	130	0,4	2000	17	TIER2	530	0,016
Minicargador	75	0,45	2010	7	TIER3	596	0,018
Vibrocompactador	110	0,4	2001	16	TIER2	530	0,016
Minicargador	80	0,45	1999	18	TIER2	595	0,018
Bomba	100	0,5	2016	1	TIER4	531	0,016
Bomba	100	0,5	2016	1	TIER4	531	0,016
Bomba	100	0,5	2016	1	TIER4	531	0,016
Bomba	100	0,5	2016	1	TIER4	531	0,016
Bomba	100	0,5	2016	1	TIER4	531	0,016

-- CÁLCULO DE EMISIONES TOTALES

Calculados los factores de emisión para los diferentes contaminantes se procede a realizar el cálculo de las emisiones totales por equipo para las diferentes obras. Esto con base en la Ecuación (1-2), haciendo uso de los datos de entrada relacionados con Horas de Trabajo (HR), Potencia del Motor (HP), Factor de Carga (FC) y Factor de Emisión (FE). Un ejemplo de las emisiones totales obtenidas por la herramienta EFRC para grupo de equipos se pueden observar en la Figura (2-13).

Figura 2 - 13. Imagen de emisiones totales de contaminantes

TIPO DE EQUIPO	DATOS DE ENTRADA			FACTOR DE EMISIÓN (g/hp-hr)						EMISIONES TOTALES (kg)					
	HR	HP	FC	HC	CO	NOX	PM	CO2	SO2	HC	CO	NOX	PM	CO2	SO2
Minicargador	1892	84	0,45	0,19	3,64	4,59	0,204	596	0,0183	13,80	259,9	328,34	14,55	42600	1,31
Vibrocompactador	1200	130	0,4	0,34	0,87	4,10	0,104	530	0,0162	21,18	54,60	256,06	6,48	33069	1,01
Minicargador	1892	75	0,45	0,19	3,66	4,59	0,209	596	0,0183	12,33	233,5	293,26	13,34	38036	1,17
Vibrocompactador	72	110	0,4	0,34	0,87	4,10	0,096	530	0,0162	1,07	2,75	12,99	0,30	1679	0,05
Minicargador	240	80	0,45	0,39	3,63	7,19	0,262	595	0,0182	3,33	31,34	62,14	2,26	5141	0,16
Bomba	1344	100	0,5	0,13	0,09	2,50	0,075	531	0,0163	8,83	5,85	168,01	5,04	35658	1,09
Bomba	980	100	0,5	0,13	0,09	2,50	0,075	531	0,0163	6,44	4,27	122,51	3,68	26001	0,80
Bomba	1008	100	0,5	0,13	0,09	2,50	0,075	531	0,0163	6,62	4,39	126,01	3,78	26743	0,82
Bomba	980	100	0,5	0,13	0,09	2,50	0,075	531	0,0163	6,44	4,27	122,51	3,68	26001	0,80
Bomba	1344	100	0,5	0,13	0,09	2,50	0,075	531	0,0163	8,83	5,85	168,01	5,04	35658	1,09

Fuente: el autor.

Finalmente, el usuario puede consultar en el formulario las emisiones totales para contaminantes de cada una de las maquinas, así como las emisiones totales de la obra, Ver (Figura 2-14)

Figura 2 - 14 Ejemplo de emisiones totales por maquinaria y por obra.

Año de Fabricación	<input type="text" value="2007"/>	Año de Fabricación	<input type="text" value="2005"/>	Año de Fabricación	<input type="text" value="2017"/>
Tecnología	<input type="text" value="TIER2"/>	Tecnología	<input type="text" value="TIER4"/>	Tecnología	<input type="text" value="TIER3"/>

MAQUINARIA 1	
Emisiones	(E) GRAMOS
HC	4090
CO	25250
NOX	77777
PM	573
CO2	4445415
SO2	136

MAQUINARIA 2	
Emisiones	(E) GRAMOS
HC	19732
CO	11321
NOX	375125
PM	119
CO2	79593379
SO2	2440

MAQUINARIA 3	
Emisiones	Total
HC	15136
CO	69159
NOX	231300
PM	1272
CO2	22510387
SO2	690

TOTAL OBRA	
Emisiones	(E) GRAMOS
HC	335744
CO	1867581
NOX	5516454
PM	43495470
CO2	435385120
SO2	23049

Fuente: el autor.

Para mayor comprensión del procedimiento, el Anexo B cuenta con una muestra de cálculo detalla con cada una de las ecuaciones involucradas en la cuantificación de emisiones por maquinaria. Adicionalmente el Anexo E contiene información de las emisiones totales para cada tipo de maquinaria.

La herramienta puede ser descargada en el siguiente enlace:

<https://drive.google.com/file/d/1CoLusjqyIUvA4BUVEMmNXnBbB7AIW0HY/view?usp=sharing>

correo electrónico. alexanderubaque@gmail.com

3.Resultados y discusión de resultados

En este capítulo se muestran las emisiones generadas para los contaminantes HC, CO, NOx, PM, CO₂ y SO₂, por cada una de las 15 obras de construcción, que reportaron información por medio de encuestas. Esto con base en la metodología (EPA, 1991), que de acuerdo con la literatura es la más usada, siendo referencia para la cuantificación de emisiones en múltiples inventarios, y la herramienta EFRC desarrollada en este trabajo de grado.

En la primera parte se encuentran los resultados obtenidos en las encuestas, analizando las características de la maquinaria reportada, seguidamente se realiza una comparación de los Factores de Emisión para diferentes potencias de motor teniendo como referencia estudios de CARB y México. En la segunda parte se realiza la caracterización de emisiones por cada tipo de maquinaria, para cada obra y un consolidado de emisiones totales. Finalmente se generan propuestas de mitigación de emisiones sobre el conjunto de equipos que más emiten contaminantes.

3.1 Análisis de resultado de encuestas – maquinaria

En conjunto, las 15 obras analizadas, reportaron 103 equipos de construcción que utilizan combustible diésel. Entre los más utilizados de acuerdo con la Tabla (3-1) se encuentran las excavadoras, retroexcavadoras, minicargadores y grúas.

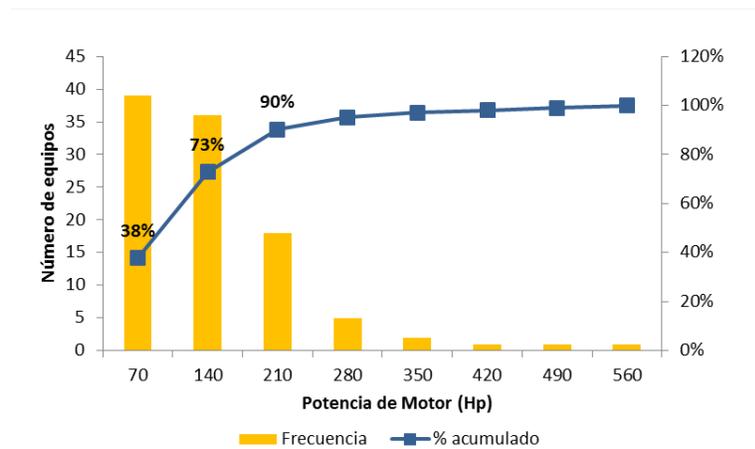
Tabla 3 - 1. Caracterización de la flota de maquinaria de construcción reportada en las 15 obras.

MAQUINARIA	UNIDADES	%
EXCAVADORAS/ RETROEXCAVADORAS	40	39%
MINICARGADORES	17	17%
GRÚAS	14	14%
BOMBAS	9	9%
COMPRESORES	9	9%
VIBROCOMPACTADORAS	5	5%
PILOTEADORAS	4	4%
TRACTORES	2	2%
VOLQUETAS	2	2%
MOTONIVELADORAS	1	1%
TOTAL	103	100%

De acuerdo con las encuestas, la flota de maquinaria para la construcción está compuesta principalmente por maquinaria pequeña (<70 HP), y maquinaria mediana (140-210), el primer grupo lo componen en su mayoría minicargadores retroexcavadoras, mientras que el segundo grupo motobombas, excavadoras y algunas grúas. El uso principal de los equipos pequeños es el movimiento de tierra de excavación, mientras que en los equipos medianos el uso varía entre el fundido de concreto para cimentación, perforación y el transporte de material.

En menor medida las obras reportaron maquinaria con potencia superior a los 210 HP, como los son las piloteadoras y grúas utilizadas para perforación, fundido de cimentación, hincar piezas prefabricadas, elevar y desplazar elementos de obra de gran peso, ver Figura (3-1)

Figura 3 - 1. Distribución de la flota de maquinaria de construcción por tamaño de motor.

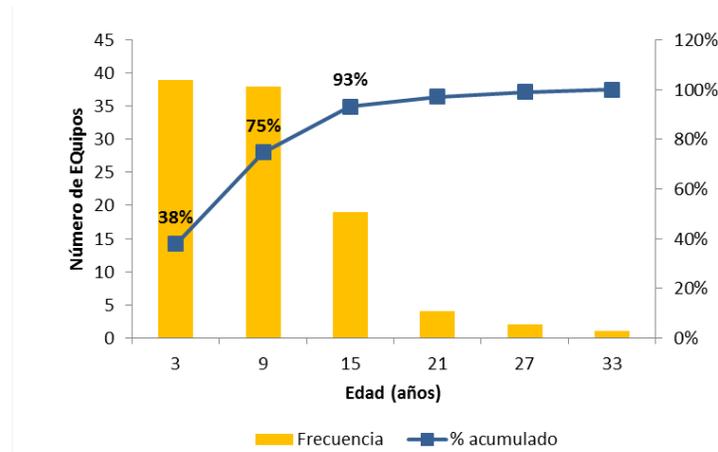


Fuente, el autor.

En relación con la edad, las encuestas muestran que el 77% de los equipos tienen una edad menor a 10 años, lo que se podría considerar como maquinaria relativamente nueva, teniendo en cuenta que (ENVIRONMENTAL, 2006) establece 10 años como el tiempo de vida útil de este tipo de maquinaria, debido al esfuerzo al que es sometida durante la construcción de edificaciones, ver figura (3-2)

Entre el conjunto de maquinaria más usada, ver tabla (3-1), las grúas son las más antiguas, en donde el 57% de los equipos se encuentra en un rango entre los 11 y 31 años de fabricación, y las excavadoras/retroexcavadoras, donde el 50% cuenta con edades entre 11 y 22 años. Caso contrario ocurre con los minicargadores en donde solamente el 11% superan los 11 años y motobombas donde ningún equipo supera los 10 años de uso, ver figura (3-2).

Figura 3 - 2 Distribución de la flota de maquinaria de construcción por edad.



Fuente, el autor.

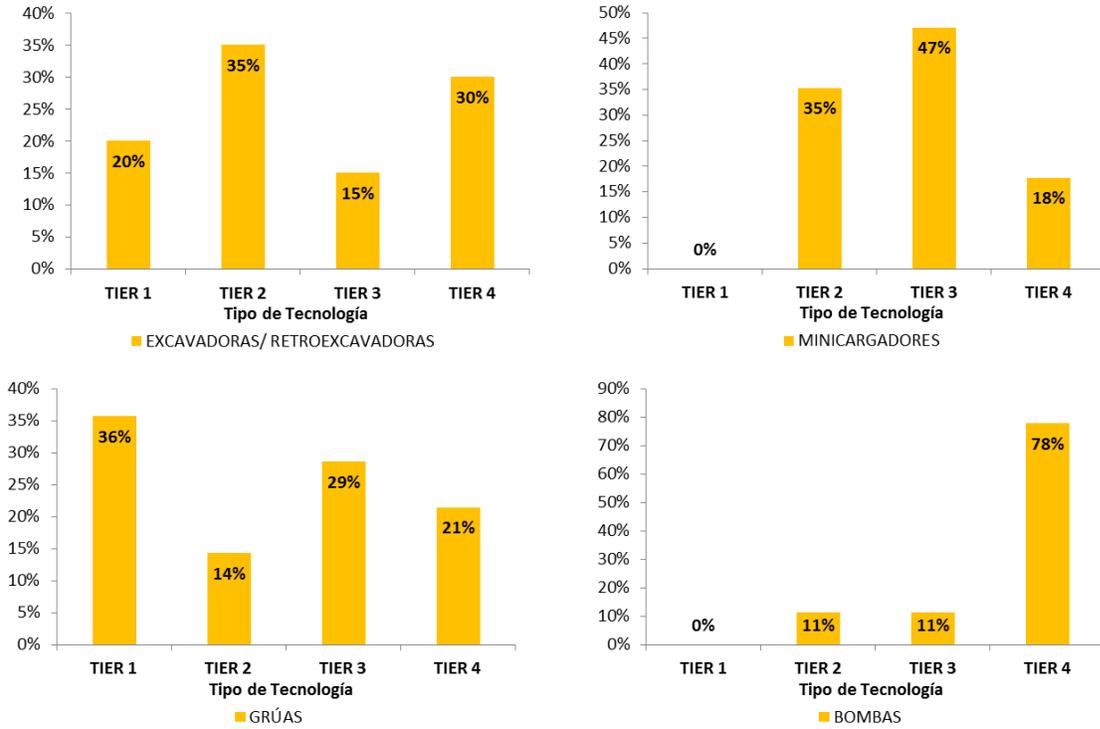
Existe una alta relación entre la edad de la maquinaria y el tipo de tecnología, dado que generalmente, de la edad de fabricación del motor depende el tipo de tecnología implementada para cumplir con la regulación de emisiones (EPA, 2017). De acuerdo con la Tabla (3-2), la tecnología más usada en los equipos de construcción es la tecnología TIER 4 y TIER 2, seguido de TIER 3 y en menor medida TIER 1. Es decir, equipos relativamente nuevos, concordando con lo contenido en la Figura (3-2) donde el mayor porcentaje de la maquinaria no supera los 10 años de antigüedad.

Tabla 3 - 2. Tecnología de la maquinaria de construcción.

MAQUINARIA	UNIDADES	TIER 1	TIER 2	TIER 3	TIER 4	TOTAL
EXCAVADORAS/ RETROEXCAVADORAS	40	20%	35%	15%	30%	100%
MINICARGADORES	17	0%	35%	47%	18%	100%
GRÚAS	14	36%	14%	29%	21%	100%
BOMBAS	9	0%	11%	11%	78%	100%
COMPRESORES	9	11%	44%	0%	44%	100%
VIBROCOMPACTADORAS	5	0%	40%	20%	40%	100%
PILOTEADORAS	4	25%	0%	25%	50%	100%
TRACTORES	2	0%	50%	0%	50%	100%
VOLQUETAS	2	50%	0%	0%	50%	100%
MOTONIVELADORAS	1	0%	0%	0%	100%	100%
TOTAL DE MAQUINARIA	103	16%	29%	20%	35%	100%

Fuente, el autor

Figura 3 - 3. Tipo de tecnología de la maquinaria más usada en las 15 obras.



Fuente, el autor

La caracterización del tipo de tecnología de la maquinaria más usada, figura (3-3), muestra que los equipos con la flota más antigua son las retroexcavadoras y las grúas, donde el mayor porcentaje corresponde a TIER 1 y TIER 2, es decir que su fabricación se sitúa entre los años 1994 y 1998. Este tipo de equipos presenta principalmente desgaste en los accesorios (cucharones, plumas, brazos, pivotes, entre otros), para lo cual los manuales de mantenimiento recomiendan realizar mantenimientos preventivos con el fin de alargar su vida útil.

La revista (CONSTRUDATA, 2012), establece varios riesgos asociados a la vida útil y edad de la maquinaria, entre los cuales se encuentra el tiempo de inoperancia por reparaciones de los equipos. Para evitar este riesgo, recomienda que para condiciones severas de operación, al cual generalmente son sometidos los minicargadores, dada su versatilidad y fácil manejo, el tiempo de vida útil no supere las 8 mil horas. Lo anterior puede ser uno de los motivos por el cual estos equipos son en su mayoría TIER 3 y TIER 4 con fecha de fabricación 2007 o posterior.

Las bombas son los equipos que hacen parte de la fase más crítica de la obra, correspondiente al fundido de la cimentación o estructura, es donde el concreto fluido es vertido en la formaleta, por eso cualquier interrupción de este proceso impacta negativamente en la elasticidad, la resistencia final del concreto y por ende del

comportamiento y calidad final del sistema estructural de las edificaciones. Este se puede considerar el principal motivo por el cual la tecnología de las Bombas es TIER 4 donde el 50% de los equipos no supera 1 año de fabricación, ver figura (3-3).

3.2 Comparación de los factores de emisión obtenidos

Los Factores de Emisión FE obtenidos con base en las ecuaciones del Capítulo 2 y la herramienta EFRC, se compararon con estudios de referencia elaborados por el Departamento de Recursos del Aire de California (CARB, 2010), que cuenta con factores de emisión por rangos de motor (ejemplo 50, 120, 250...) y el Departamento Nacional de Ecología y Cambio Climático de México (INECC, 2014), que realizó un estudio de caracterización de un conjunto de maquinarias de construcción en condiciones reales de operación. Esto puede observarse en la (tabla 3-3).

Tabla 3 - 3. Comparativo de Factores de Emisión, fuente el autor.

CONTAMINANTE	FE (CARB 2010)			FE (MÉXICO 2014)			FE (EFRC 2018) MÉTODO EPA -NS10				
	(HP)	MODELO	FE (g/HP-hr)	TIPO DE EQUIPO	(HP)	MODELO	FE (g/HP-hr)	TIPO DE EQUIPO	(HP)	MODELO	FE (g/HP-hr)
HC	50	2012	0,6	N/A	N/A	N/A	N/A	MINICARGADOR	58	2012	0,2
CO			6				N/A				3
NOx			6				N/A				3
PM			0,3				N/A				0,1
CO2	120	2007	N/A	Retroexcavadora WB-146 IMAN	96	2007	281	RETROEXC AVADORA HITACHI 120-6	81	2007	595
HC			0,5				N/A				0,4
CO			4,1				1,2				3,6
NOx			6				3				7
PM			0,45				23				0,26
CO2	250	2006	N/A	GRÚA LS 138H5	287	2008	N/A	GRÚA SOILMEC SC-50 HD	270	2011	N/A
HC			0,4				N/A				0,1
CO			1,2				N/A				0,08
NOx			5,6				0,63				2,5
PM			0,18				N/A				0,07
CO2	120	2004	N/A	TRACTOR NEW HOLLAND TS6020	110	2004	190	TRACTOR NEWHOLLAND	75	2007	693
HC			0,8				N/A				0,8
CO			4,3				0,3				6,1
NOx			6,9				1,5				12
PM			0,7				49				0,5

En la tabla (3-3) se muestra que:

- En el caso del minicargador, los FE del método EPA-EFRC son entre 50 y 66% menores para los contaminantes HC, CO, NOx y PM, que los establecidos en el documento de referencia de la CARB. No fue posible comparar con México dado que dentro de la maquinaria analizada en este estudio no se encontró alguna con características similares a EPA-EFRC y CARB.

-
- En la retroexcavadora, los FE de CO₂ de EPA- EFRC difieren un 53% con los FE de México. En el caso del PM, el FE reportado por México es significativamente alto, con 23 g/HP-hr;
 - Para la grúa el FE de NOx presenta variaciones entre los tres métodos con un rango entre 0.63 g/HP-hr y 5.6 g/HP-hr;
 - Para el tractor analizado en el estudio de México, el FE de PM es 49 g/HP-hr, significativamente más alto si se compara con CARB y EFRC-EPA.

Como resultado de la comparación, se posible observar que, aunque existen similitudes entre los Factores de Emisión, estos varían en todos los estudios, este comportamiento se ha observado en otras fuentes, siendo común en el estudio de las emisiones y la calidad del aire. Se requiere robustecer la base de datos para generar análisis más precisos en torno a las emisiones, especialmente en relación con PM.

Los equipos comparados pertenecen a la maquinaria que más genera emisiones de acuerdo con la tabla (3-4), otros tipos de equipos no fueron comparados, debido a la carencia de información en la fuente de referencia.

3.3 Emisiones por tipo de maquinaria

En las 15 obras que reportaron información, se identificaron 10 tipos de maquinaria de construcción, cuya fuente energética es el combustible diésel, para cada tipo se obtuvieron Factores de Emisión basados en la metodología EPA y la herramienta EFRC que pueden ser consultados en el Anexo C.

La Tabla (3-4) contiene los resultados de las emisiones por cada contaminante para los diferentes grupos de equipos. En esta se observa que las excavadoras/retroexcavadoras, grúas y minicargadores, generan las mayores emisiones por para cada uno de los contaminantes. Esto se debe principalmente a la antigüedad de los equipos y al tipo de tecnología, como lo demuestra la figura (3-3).

Tabla 3 - 4. Emisiones por tipo de maquinaria.

MAQUINARIA	HC (%)	CO (%)	NOx (%)	PM (%)	CO2 (%)	SO2 (%)
EXCAVADORAS/ RETROEXCAVADORAS	37%	46%	42%	46%	31%	31%
GRÚAS	26%	13%	21%	15%	26%	26%
MINICARGADORES	8%	19%	9%	10%	8%	8%
BOMBAS	8%	8%	8%	7%	11%	11%
COMPRESORES	4%	6%	3%	4%	4%	4%
VIBROCOMPACTADORAS	5%	1%	4%	4%	6%	6%
PILOTEADORAS	4%	1%	3%	5%	5%	5%
TRACTORES	2%	2%	1%	1%	1%	1%
VOLQUETAS	8%	3%	9%	8%	7%	7%
MOTONIVELADORAS	0%	0%	0%	0%	1%	1%
TOTAL (%)	100%	100%	100%	100%	100%	100%
TOTAL EMISIONES (kg)	1.505	7.897	27.140	942	3.426.624	105

Fuente, el autor.

3.4 Emisiones por obras

Los proyectos que reportaron información cuentan con predios con tamaños que oscilan entre los 998 m² y 40,000 m², de los cuales el 47% corresponde a predios con áreas menores a los 8.000 m², 27% a predios entre 8,000 y 16,000 m², 13 % a predios entre 16,000 y 24,000 m² y 13% a predios entre 32,000 y 40,000 m². En la tabla (3-5) se observan las emisiones totales por tipo de contaminante y características de los proyectos.

Tabla 3 - 5 Proyectos y emisiones totales.

Nº	ÁREA (m ²)	ESTRATO	USO	NÚMERO DE EQUIPOS	HORAS ACUMULADAS	POTENCIA PROMEDIO (hp)	HC (kg)	CO (kg)	NOx (kg)	PM (kg)	CO2 (kg)	SO2 (kg)
1	21000	2	RESIDENCIAL	3	4048	67	30	328	463	17	71627	2
2	40000	N/A	NO RESIDENCIAL	10	10952	98	89	607	1660	58	270585	8
3	2205	N/A	NO RESIDENCIAL	4	8284	281	295	1009	4198	93	672630	21
4	7168	4	RESIDENCIAL	6	4624	210	104	278	2059	70	245415	8
5	998	N/A	NO RESIDENCIAL	6	3366	74	34	304	652	25	58205	2
6	9685	4	RESIDENCIAL	5	2520	99	54	237	863	34	76878	2
7	1872	3	RESIDENCIAL	8	7139	87	48	401	944	33	144533	4
8	34000	2	RESIDENCIAL	5	8852	150	134	1024	2502	137	380028	12
9	8950	2	RESIDENCIAL	3	1920	203	106	336	2116	65	117152	4
10	19800	3	MIXTO	5	7680	109	215	1276	4870	151	339091	10
11	2358	4	RESIDENCIAL	5	7898	57	65	600	916	34	148115	5
12	7626	5	RESIDENCIAL	4	1191	61	14	101	201	7	22331	1
13	10621	N/A	NO RESIDENCIAL	18	8978	104	94	342	1717	58	239758	7
14	10478	4	RESIDENCIAL	14	17856	93	141	765	2531	89	364786	11
15	4137	3	RESIDENCIAL	7	6720	158	83	289	1448	70	275491	8
TOTAL				103	102.028		1.505	7.897	27.140	941	3.426.624	105

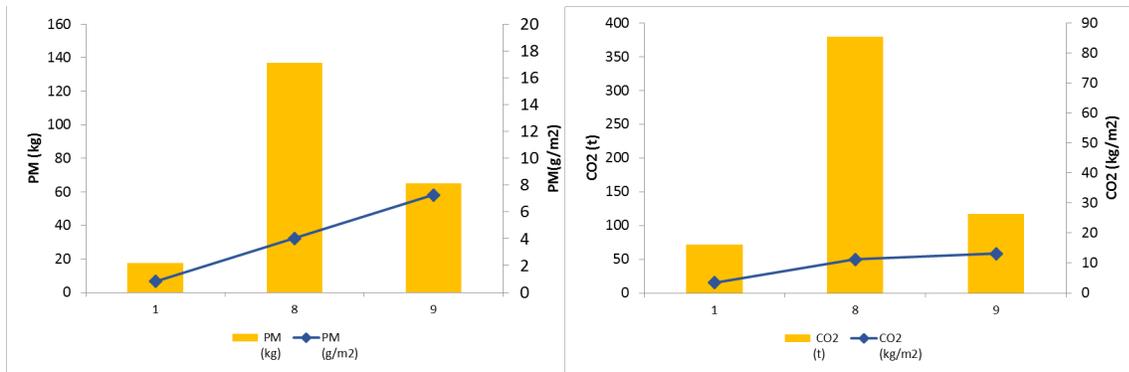
Fuente, el autor.

Son varios los factores que deben tenerse en cuenta en estudios de prefactibilidad y factibilidad para dar viabilidad a la construcción de un proyecto edificatorio, entre las más representativas se encuentran:

- Uso del suelo, que define si el proyecto es con destino residencial o no residencial (oficinas, bodegas, comercio).
- Precio del suelo, es quizás es el factor que más incide en los proyectos de construcción, a mejores cualidades como cercanía a centros de actividad económica y constructiva, condiciones de la malla vial, espacio público, etcétera, mayor será su precio según el avalúo comercial, ver figura (2-5). Esta condición, obliga a que los proyectos estrato 1 y 2 se ubiquen en la periferia de la ciudad.
- Metros cuadrados construibles y vendibles, a mayor precio del suelo y menor precio de venta, se necesitará construir más área.

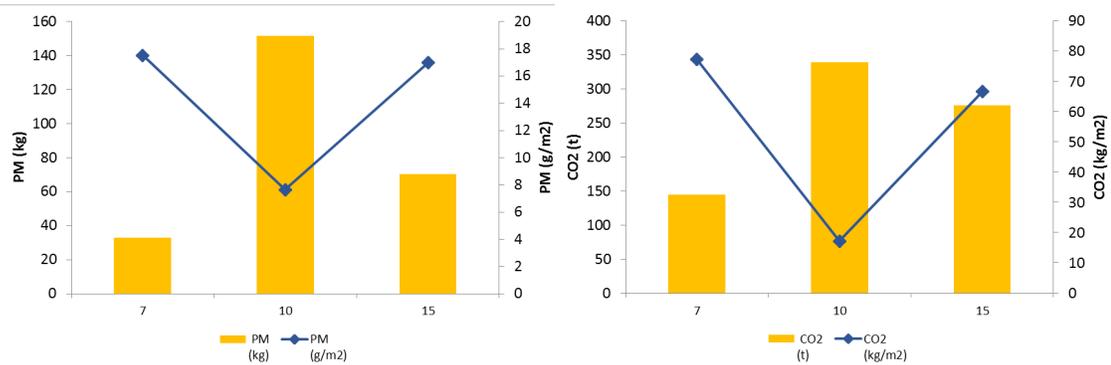
Con las condiciones anteriormente descritas se analizaron los resultados de emisiones para PM y CO₂, en cada uno de los proyectos para los diferentes usos y estratos de los 15 proyectos reportados.

Figura 3 - 4. Emisiones de PM y CO₂, residencial estrato 2.



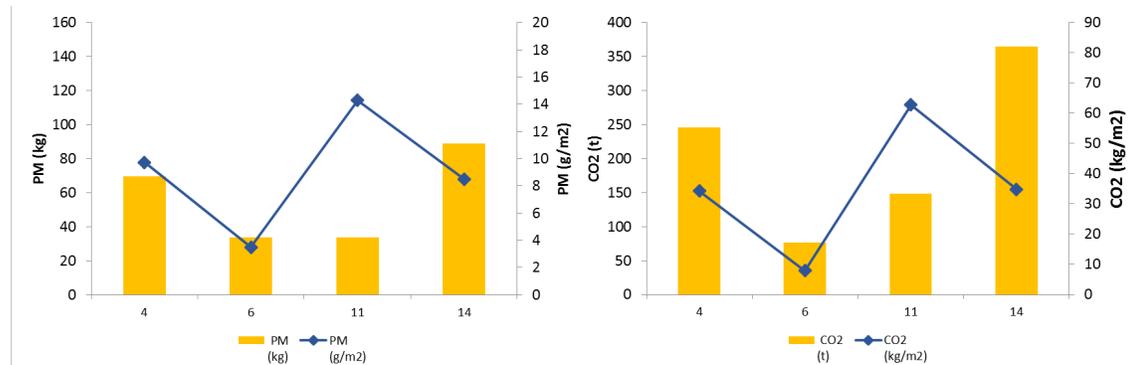
Fuente, el autor.

El proyecto 8 presenta las mayores emisiones de PM y CO₂, esto podría deberse a que cuenta con la mayor área de predio con 34,000 m² y más horas de operación de maquinaria, con 8852 hr. Sin embargo, el proyecto 9 con un área de predio de 8950 m², presenta las mayores emisiones por metro cuadrado, esto se debe principalmente a que el promedio de potencia de los motores utilizados es de 203 HP, se hace suponer que se requiere generar más excavaciones en el terreno para obtener más área construida, dado que se encuentran en una zona con mayor actividad económica, ver figura (2-5).

Figura 3 - 5. Emisiones de PM y CO₂, residencial estrato 3.

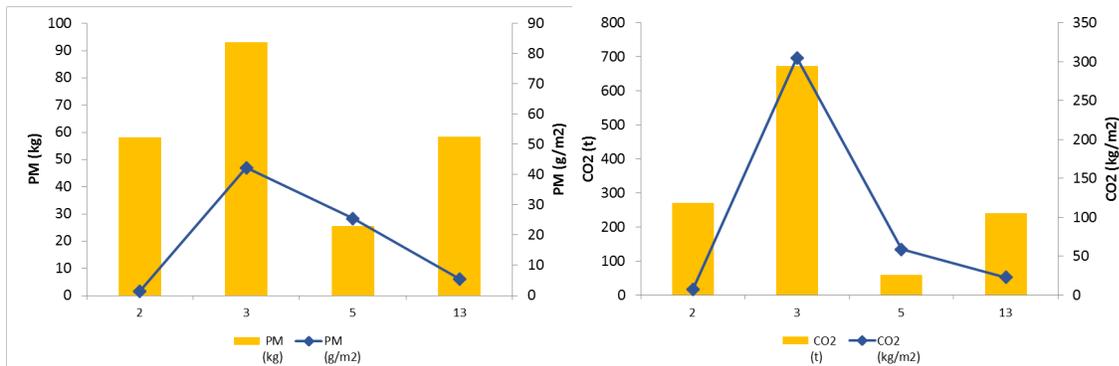
Fuente, el autor.

De los proyectos reportados en estrato 3, el proyecto 10 generó las mayores emisiones de PM y CO₂, esta cuenta con un área de 19,800 m², significativamente mayor a los proyectos 7 y 5, ver Tabla (3-5). Sin embargo, los proyectos 7 y 15 generaron mayores emisiones por m², lo que podría deberse a la ubicación en zona de alta actividad económica y el área reducida del lote, 1,872 y 4,137 m² respectivamente, ver figura (2-5). Lo anterior sugiere que se requiere mayor área construida y mayor excavación para lograr cierre financiero.

Figura 3 - 6. Emisiones de PM y CO₂, residencial estrato 4.

Fuente, el autor.

Los proyectos ubicados en estrato 4, ver figura (3-6), presentan comportamientos similares a los proyectos de uso residencial anteriormente analizados. El proyecto 14 que cuenta con un área de 10,478 m², generó las mayores emisiones de PM y CO₂, en este se reportaron 14 equipos con potencia promedio de 93 HP, Sin embargo, las mayores emisiones por metro cuadrado provinieron del proyecto 11 con 2,358 m², ubicado en Usaquén, una de las zonas de actividad comercial y de construcción más altas de la ciudad, ver figura (2-5).

Figura 3 - 7 Emisiones de PM y CO₂, proyectos no residenciales.

Fuente, el autor.

De los proyectos no residenciales reportados, el proyecto 3 presenta las mayores emisiones totales y por metro cuadrado de PM y CO₂, esto puede deberse principalmente a que la maquinaria utilizada tiene un promedio más alto de potencia con 281 HP y uno de los predios con menor área con 2,205 m². Esto contrasta con el proyecto 2 con un área de 40,000 m², cuya emisión por metro cuadro es la más baja con respecto a los demás proyectos.

En los proyectos no residenciales las condiciones de construcción varían significativamente, dado que el sistema constructivo y las características de la cimentación, responden a un diseño en particular. Por lo cual, para determinar relaciones entre emisiones, requeriría además de la ubicación del proyecto, el área del predio y el número de equipos, un seguimiento en sitio al proceso constructivo para disminuir la incertidumbre.

En proyectos residenciales, como se menciona en el Capítulo 1 de este trabajo, los sistemas constructivos más utilizados son mampostería confinada (MC) y mampostería estructural (ME). Por experiencia del autor, generalmente a mayor área de predio se requiere menos excavación, sin embargo, las condiciones varían dependiendo del precio del terreno y la dinámica del mercado, por lo cual intuir una relación directa emisiones/m², es un factor orientador más no puede considerarse como un parámetro constante. Por lo cual se sugiere en posteriores trabajos ampliar la muestra de cálculo.

3.5 Estrategias preliminares de mitigación de emisiones

En la Tabla (3-1) se observa que la maquinaria más usada en construcción de edificaciones son las excavadoras/retroexcavadoras, minicargadores y grúas, que a su vez aportan las mayores emisiones, ver Tabla (3-4). Con este grupo de equipos, se utilizó la herramienta **EFRC** desarrollada en este trabajo con base en la metodología EPA, modificándose términos como Factor de Deterioro, edad, potencia de motor, tecnología, tipo de combustible, entre otros, para establecer cuál es la variable que más influye en la

emisión de contaminantes de la maquinaria y proponer estrategias preliminares de mitigación de emisiones.

Como resultado, se concluyó que el modelo no es sensible a la variación en el Factor de Deterioro y la edad de la maquinaria. Sin embargo, se obtuvieron variaciones significativas con el cambio de la tecnología, potencia del motor y características del combustible.

3.5.1 Análisis por tipo de tecnología

La Figura (3-8) contiene una muestra en la que se utilizó como línea base una retroexcavadora de 150 HP, fabricada en el año 1997 de tecnología TIER-I y se reemplazó por una con una de tecnología TIER-IV, lográndose una significativa disminución en los Factores de Emisión y en las emisiones totales de los contaminantes HC, CO, NO_x y PM. Sin embargo, las emisiones de CO₂ y SO₂ se mantuvieron constantes.

Figura 3 - 8 Emisiones escenario base vs TIER IV.

	DATOS DE ENTRADA					FACTOR DE EMISIÓN (g/hp-hr)						EMISIONES TOTALES (kg)					
	TIPO DE EQUIPO	HR	HP	MOD	TEGN	HC	CO	NOX	PM	CO2	SO2	HC	CO	NOX	PM	CO2	SO2
B	Retroexcavadora	480	150	1997	TIER1	0,36	1,33	8,66	0,34	535	0,02	13	48	312	12	19268	0,6
P	Retroexcavadora	480	150	2012	TIER4	0,13	0,09	2,50	0,08	536	0,02	5	3	90	3	19294	0,6
	DISMINUCIÓN DE LAS EMISIONES %					-63%	-93%	-71%	-78%	0%	0%	-63%	-93%	-71%	-78%	0%	0%

B= Línea base con información obtenida de las encuestas; P= Propuesta de mejoramiento de tecnología; HR= Horas de trabajo de la maquinaria con base en las encuestas; HP= Potencia del motor; MOD= Modelo de la maquinaria; TEGN= Tipo de tecnología.

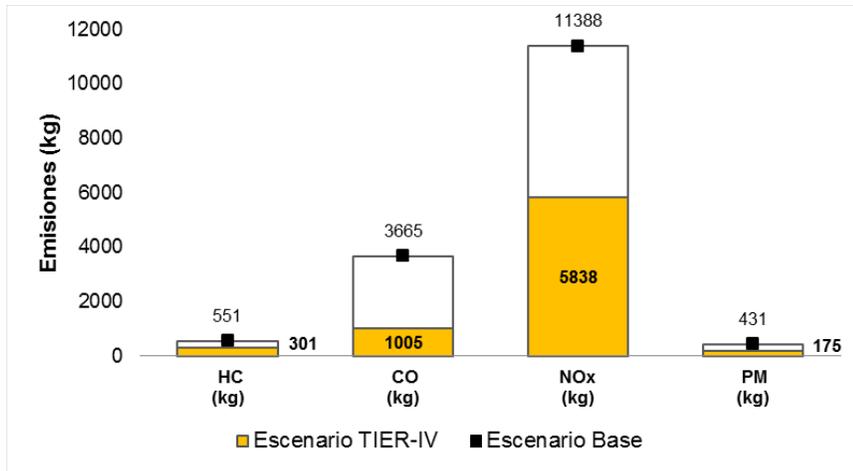
Fuente, el autor

Con base en el resultado de la muestra, se implementó la estrategia de mitigación por cambio de tecnología al grupo de maquinarias que más generan emisiones en las obras como son retroexcavadoras, grúas y minicargadores, obteniéndose los siguientes resultados.

EXCAVADORAS/RETROEXCAVADORAS

En la Tabla (3-2) se observa que, de las 40 excavadoras y retroexcavadoras reportadas, solamente el 30% cuentan con tecnología TIER 4 y edades inferiores a 5 años, el restante 70% pertenecen a tecnologías TIER I, II y III. En el escenario donde se modificara la tecnología de todas las 40 retroexcavadoras y retroexcavadoras a TIER IV, se lograría disminuir las emisiones de HC en 45%, CO en 73%, NO_x en 49% y PM en 59%. Ver Figura (3-9).

Figura 3 - 9. Variación de emisiones por cambio a tecnología TIER IV. En excavadoras/retroexcavadoras.

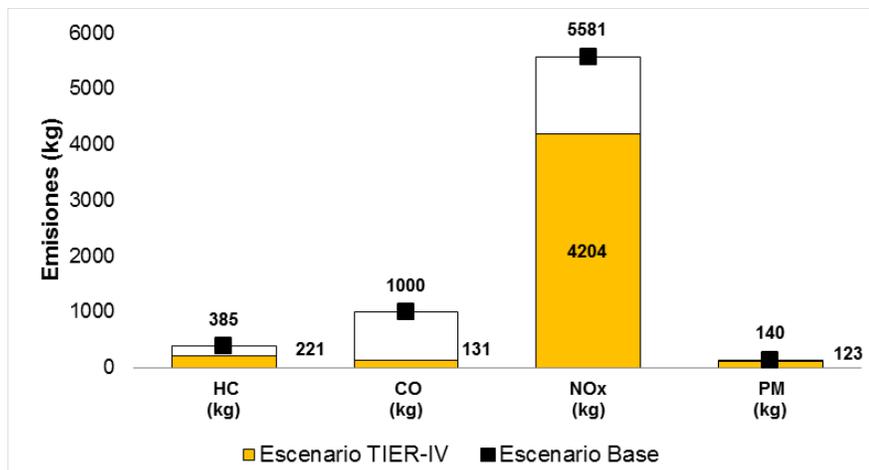


Fuente, el autor

GRÚAS

De acuerdo con la Tabla (3-2), el 36% de equipos reportados son de tecnología TIER 1 con edades superiores a los 15 años. En el escenario donde se convirtieran todas las grúas a tecnología TIER IV, se lograría una disminución del 43% en HC, 87% en CO, 25 % en NOx y 12% en PM, ver Figura 3-10.

Figura 3 - 10 Variación de emisiones por cambio a tecnología TIER IV. En grúas.

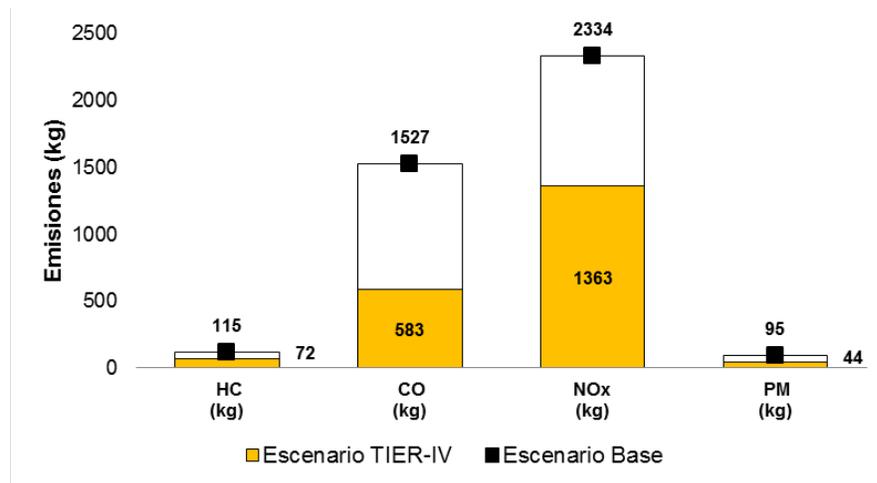


Fuente, el autor

MINICARGADORES

En la Tabla (3-2) se observa que el 35% de esta maquinaria es tecnología TIER II, 47% TIER III y 18% TIER IV. En el escenario donde se reemplazaran todos los equipos por tecnología TIER IV se lograría una disminución en las emisiones de HC en 38%, CO en 62%, NOx en 42 % y PM en 54%, ver Figura (3-11).

Figura 3 - 11 variación de emisiones por cambio a tecnología TIER IV. Minicargadores



Fuente, el autor

3.5.2 Análisis variación de características de combustible

Las emisiones de CO₂ y SO₂ no presentaron variaciones con el cambio de tecnología, dado que para el cálculo del Factor de Emisión de acuerdo con las ecuaciones (2-8) y (2-9), la variación en el tipo de tecnología no influye, por esto se procedió a realizar variación en la masa de Carbono y contenido de Azufre.

DIESEL VS BIODIESEL

De acuerdo con la Ecuación (2-8) el porcentaje de carbono por masa en el combustible diésel es 87%, para calcular la influencia de la variación del carbono, se realizó una muestra tomando como línea base una retroexcavadora de 150 HP, fabricada en el año 1997 de tecnología TIER-I y se reemplazó el combustible por Biodiesel, que cuenta con un porcentaje de carbono por masa de 78%, lográndose una disminución Factores de Emisión y en la emisión total CO₂, ver Figura (3-12).

Figura 3 - 12. Variación de combustible Diesel vs Biodiesel

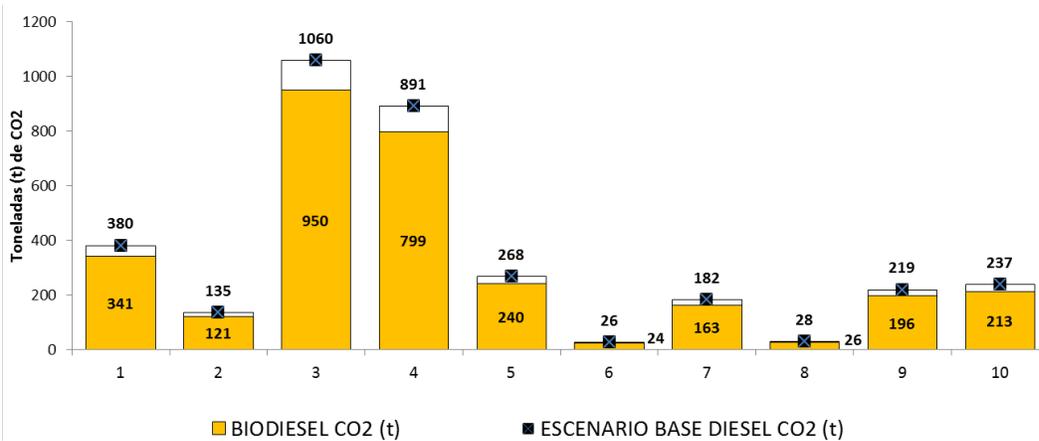
DATOS DE ENTRADA					FACTOR DE EMISIÓN (g/hp-hr)	EMISIONES TOTALES (kg)	
TIPO DE EQUIPO	HR	HP	MOD	TEGN	CO2	CO2	
B	Retroexcavadora	480	150	1997	TIER1	535	19268
P	Retroexcavadora	480	150	1997	TIER1	480	17275
DISMINUCIÓN DE LAS EMISIONES %					-10%	-10%	

B= línea base con información obtenida de las encuestas; P= Propuesta de cambio de combustible a Biodiesel; HR= Horas de trabajo de la maquinaria con base en las encuestas; HP= Potencia del motor; MOD= Modelo de la maquinaria; TEGN= Tipo de tecnología.

Fuente, el autor

Posteriormente se aplicó la variación en el tipo de combustible a Biodiesel para toda la maquinaria de construcción reportada en las encuestas, obteniéndose una disminución en las emisiones de CO₂ del 10% en toda la maquinaria reportada, pasando de 3427 (t) a 3072 (t). Ver figura (3-13). Sin embargo, no disminuyeron las emisiones de otros contaminantes como CO, NOx, CO y PM.

Figura 3 - 13 Variación de emisiones de CO₂ por tipo de maquinaria



1= Bombas; 2= Compresores; 3= Excavadoras/retroexcavadoras; 4=Grúas; 5=Minicargadores; 6= Motoniveladoras; 7= Piloteadoras; 8= Tractores; 9= Vibrocompactadoras; 10=Volquetas

Fuente, el autor

De acuerdo con (Buitrago Tello , 2014) la producción actual de biodiesel en Colombia presenta una reducción del 82% de las emisiones de GEI en comparación con el diésel fósil. Dado que la variación en las emisiones de CO₂ en la maquinaria de construcción por uso de biodiesel es poco significativa con respecto a la línea base, se sugiere en futuras investigaciones realizar un análisis de ciclo de vida como el realizado por Buitrago, incluyendo medidas costo-efectivas para la etapa de construcción.

VARIACIÓN DE CONTENIDO DE AZUFRE EN EL COMBUSTIBLE

De acuerdo con (Ecopetrol, 2018), el contenido de azufre en el combustible diesel es 50ppm, este valor se incluyó en la ecuación (2-9) del Capítulo 2 para cuantificar el SO_2 , obteniendo como resultado las emisiones de la Tabla (3-5). Para determinar si es viable como estrategia de mitigación de emisiones variar el contenido de Azufre, se realizó una muestra de cálculo con ayuda de la herramienta EFRC, disminuyendo el contenido de este elemento a 15 ppm con base en los estándares (EPA, 2007). En este escenario se utilizó una retroexcavadora de 150 HP, fabricada en el año 1997 de tecnología TIER-I, lográndose una disminución de 70% en los Factores de Emisión y en la emisión total de SO_2 . Ver Figura (3-14).

Figura 3 - 14. Variación del contenido de Azufre en el combustible.

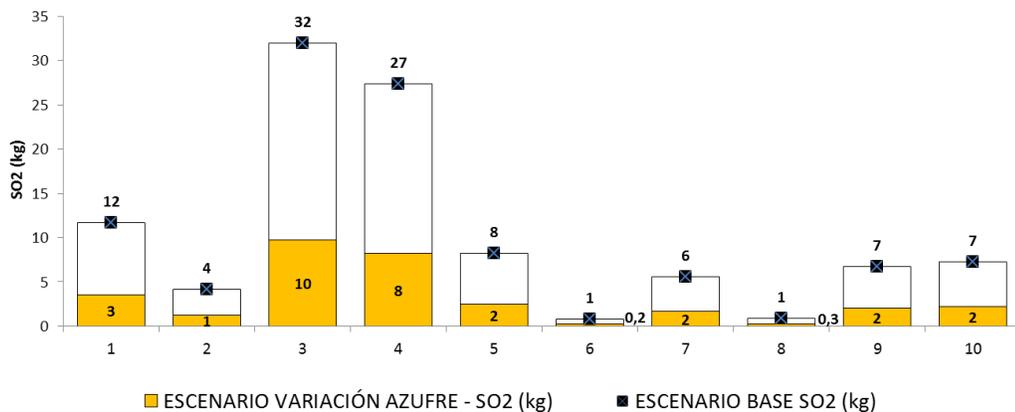
	DATOS DE ENTRADA					FACTOR DE EMISIÓN (g/hp-hr) SO_2	EMISIONES TOTALES (kg) SO_2
	TIPO DE EQUIPO	HR	HP	MOD	TEGN		
B	Retroexcavadora	480	150	1997	TIER1	0.016	0.6
P	Retroexcavadora	480	150	1997	TIER1	0.005	0.18
DISMINUCIÓN DE LAS EMISIONES %						-70%	-70%

B= línea base con información obtenida de las encuestas; P= Propuesta de disminución contenido azufre; HR= Horas de trabajo de la maquinaria con base en las encuestas; HP= Potencia del motor; MOD= Modelo de la maquinaria; TEGN= Tipo de tecnología

Fuente, el autor

Posteriormente, se aplicó la variación contenido de azufre a toda la maquinaria de construcción reportada en las encuestas, obteniéndose una disminución significativa de SO_2 , pasando de 105 kg a 31 kg de SO_2 como se observa en la figura (3-15).

Figura 3 - 15. Variación de emisiones de SO_2 por tipo de maquinaria



1= Bombas; 2= Compresores; 3= Excavadoras/retroexcavadoras; 4=Grúas; 5=Minicargadores; 6= Motoniveladoras; 7= Piloteadoras; 8= Tractores; 9= Vibrocompactadoras; 10=Volquetas

Fuente, el autor

La disminución de contenido de azufre en el combustible no representó variación en las emisiones de Material Particulado PM, u otros contaminantes, ratificando lo expresado en (US- EPA, 2010), y la ecuación (2-5) del Capítulo 2, que aunque incluye el factor de ajuste de PM por el contenido de Azufre en el combustible, expresa que la variación de contaminantes PM, CO, HC y NOx, dependen principalmente del tipo de tecnología del motor.

3.5.3 Análisis variación del Factor de Deterioro

El Factor de Deterioro FD, es un término incluido en la ecuación (2-1) y (2-5), para obtener los factores de emisión de los contaminantes HC, CO, NOx y PM, este hace referencia al desgaste que sufre la maquinaria por los años de uso. Para determinar el grado sensibilidad y la pertinencia como estrategia de mitigación, se construyó con ayuda de la herramienta ERF, un escenario alternativo para una excavadora con una potencia de motor 29 HP, TIER IV, modelo 2013, en la cual se modificó la edad a 10 años. El resultado no mostró variación en el Factor de Emisión ni en las emisiones totales, ver figura (3-16).

Figura 3 - 16 Variación Factor de Deterioro.

DATOS DE ENTRADA				FACTOR DE DETERIORO				FACTOR DE EMISIÓN (g/hp-hr)						EMISIONES TOTALES (kg)						
	EQUIPO	HR	HP	EDAD	HC	CO	NOx	PM	HC	CO	NOX	PM	CO ₂	SO ₂	HC	CO	NOx	PM	CO ₂	SO ₂
B	Excavadora	960	29	4	1	1	1	1	0,3	1,5	4,7	0,1	595	0,018	5	26	79	2	9945	0,3
P	Excavadora	960	29	10	1	1	1	1	0,3	1,5	4,7	0,1	595	0,018	5	26	79	2	9945	0,3

B=línea base con información obtenida de las encuestas; P= Propuesta variación Factor de Deterioro; HR= Horas de trabajo de la maquinaria con base en las encuestas; HP= Potencia del motor;

Fuente, el autor

Con la muestra de cálculo observa que el factor de deterioro no representa por si solo una estrategia para la mitigación de emisiones, por lo cual se debe relacionar con el tipo de tecnología del motor, el cual es la principal estrategia para lograr mitigar las emisiones de la maquinaria de construcción.

4. Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo con la bibliografía consultada y hasta donde se tiene conocimiento, este es el primer trabajo que evalúa en la ciudad de Bogotá y en Colombia, las emisiones de contaminantes HC, CO, NO_x, PM, CO₂ y SO₂, provenientes de la combustión los motores de la maquinaria usada para construcción de edificaciones, siendo referencia más cercana la región de la Ciudad de México y su inventario de emisiones del año 2016. Adicionalmente y como valor agregado, se construyó la herramienta EFRC con base en las ecuaciones suministradas por el modelo (US- EPA, 2010) que es el más utilizado como referencia para inventarios de emisiones por ser el más completo y detallado. Este trabajo final de maestría permite llegar a las siguientes conclusiones y recomendaciones:

4.1 Conclusiones

Al comparar las metodologías contenidas en el trabajo de grado, se evidenció que la metodología EPA con ayuda de la herramienta EFRC, es apropiada para obtener datos de entrada en el modelo sobre las obras de construcción de edificaciones, esto en relación con las características y condiciones de operación de la maquinaria, como son tipo de equipo, edad, potencia de motor y horas de operación, siendo posible calcular los factores de emisión específicos para cada equipo y emisiones para cada una de las obras.

Al implementar la metodología EPA-EFRC se evidenció que los mayores aportes de emisiones en las obras provienen de retroexcavadoras/excavadoras y minicargadores, con tamaños de motor inferiores a 210 HP, los cuales son empleados en las etapas de excavación, cimentación y estructura, ya sea para el movimiento de tierras ó transporte de material. El 75% de estos equipos tiene una edad entre 1 y 9 años, siendo inferior a los 10 años de vida útil sugeridos por la (CARB, 2010). Lo anterior evidencia una alta rotación de equipos debido a los grandes esfuerzos al que son sometidos, para cumplir con la programación de obra, especialmente en las actividades más sensibles como son el fundido de concreto.

Los análisis efectuados con la metodología EPA y la herramienta EFRC mostraron que los parámetros que más influyen las emisiones de los equipos de construcción son la

edad de la tecnología y el tipo de combustible. Por lo que implementando tecnologías más modernas y combustibles más limpios se lograrían disminuir las emisiones de los equipos de construcción entre 10 y 70% con relación al escenario actual.

La comparación entre los Factores de Emisión obtenidos con la metodología EPA-EFRC contra los estudios reportados por CARB y México muestran variaciones para cada contaminante, especialmente en el PM. Esto puede deberse principalmente a que el modelo EPA-EFRC cuenta con información más específica de la maquinaria como son edad, tecnología, tipo de actividad y potencia de motor, mientras que, los Factores de Emisión suministrados por CARB solamente cuentan con referencias a la potencia del motor, y el estudio de México cuyos FE son obtenidos de una muestra limitada de maquinaria. Este comportamiento es común en el estudio de las emisiones y calidad del aire.

Los resultados obtenidos con la herramienta EFRC mostraron que, los equipos con mayor emisión de contaminantes son las Retroexcavadoras/excavadoras, grúas, minicargadores y bombas, con una participación superior al 79% del total de emisiones. Este grupo de equipos cuenta con tamaños de motor entre 40 y 210 HP, con tecnologías Tier 2 a Tier 4, siendo las horas de trabajo el parámetro que más incide en las emisiones.

El análisis comparativo entre las 15 obras reportadas mostró que los proyectos residenciales de estrato 3 y 4 emiten más PM y CO₂ por m² en comparación con el estrato 2. Esto sugiere que, este tipo de proyectos requiere más horas de trabajo de la maquinaria, para construir cimentaciones más robustas, lograr más área vendible y de esta manera alcanzar el cierre financiero de los proyectos.

Los proyectos no residenciales (oficinas, comercio y bodegas) mostraron variaciones significativas en las emisiones de PM y CO₂ por m², alcanzando 50 g/m² de PM y 300 kg/m² CO₂, cifra muy superior a lo reportado en el proyecto residencial que más emitió, con 18 g/m² de PM y 0 kg/m² CO₂. Esto puede deberse principalmente a la gran diferencia que existe entre las áreas de cada predio, área construida, tipo de sistema constructivo y horas de operación de los equipos en obra.

La construcción de escenarios de mitigación de emisiones con ayuda de la herramienta ERFC evidenció que, mediante el uso de tecnologías de motor más modernas se podrían disminuir las emisiones de CO, HC, NO_x y PM en más de un 60%, sin embargo, esta estrategia no permite disminuir las emisiones de CO₂ y SO₂.

La estrategia preliminar de reemplazar el diésel fósil por biodiesel en la maquinaria lograría una disminución de las emisiones de CO₂ en un 10%, por lo que se sugiere llevar a cabo posteriores investigaciones que incluyan análisis de ciclo de vida y estudios de costo beneficio para determinar si la medida es viable, considerando los posibles efectos toxicológicos sobre la salud humana en el uso de biocombustibles y en combustibles fósiles, dado que diversos reportes sugieren efectos negativos cardiopulmonares. (Madden, 2016).

La herramienta ERFC mostró que, al variar el contenido de Azufre del combustible de 50 ppm a 15 ppm, se lograría una disminución de las emisiones de SO₂ en hasta un 70%. Adicionalmente se evidenció que el PM no varía significativamente, dado que como lo menciona la literatura, el tipo de tecnología de motor influencia directamente las emisiones de este contaminante.

4.2 Recomendaciones

Al ser este, uno de los primeros trabajos desarrollados en la región para cuantificar emisiones de la maquinaria de construcción de edificaciones, y el primero que cuenta con información sobre obras reportadas por el gremio de la construcción, existió una marcada limitación de acceso a la información, por lo que se sugiere realizar alianzas en futuros trabajos con entidades públicas, universidades y otros actores para acceder a recursos que permitan realizar encuestas en un mayor número de obras, con lo cual se podría generar correlaciones y extrapolar la información a un inventario que abarque el universo de proyectos de la ciudad., disminuyendo la incertidumbre de las emisiones obtenidas con la herramienta EFRC.

Actualmente, existe un alto desconocimiento de las condiciones de operación y características de la maquinaria por parte de los profesionales de obra. Por lo que se sugiere que, en futuros trabajos se seleccionen proyectos que se encuentren en etapa de planeación, preferiblemente aquellos que estén proceso de certificación ambiental LEED, EDGE, BREEAM, HQE etcétera, para realizar un seguimiento detallado a cada una de las etapas del proyecto. Con esto se podría lograr una mayor certeza sobre los datos de entrada requeridos para el modelo EPA y la herramienta EFRC.

Como lo demuestra la literatura, la maquinaria de construcción en una región puede representar menos del 1% de las emisiones totales. Sin embargo, como parte de los compromisos de la COP21, los Planes de Acción Sectorial constituidos por el país, las políticas ambientales de calidad del aire y disminución de los impactos sobre la salud de la población, se sugiere construir protocolos para la gestión, control y mantenimiento de los equipos de construcción, para promover las condiciones óptimas en su operación, dado que actualmente la Resolución 3500/05 del Ministerio de Transporte, en su Artículo 17 excluye a la maquinaria de construcción del control de emisiones.

A. Anexo. Tablas para Factores de Emisión Estado Cero, Factor de Ajuste Transitorio y Factor de Deterioro Relativo

Tabla A- 1: Factores de emisión estado cero (US- EPA, 2010).

POTENCIA NOMINAL (HP)	MODELO AÑOS	TIPO DE TECNOLOGÍA	BSFC (lb/HP-hr)	FACTORES DE EMISIÓN ESTADO CERO (g/HP-hr)			
				HC	CO	NOx	PM
0<11	Pre -1988	BASE	0,408	1,5	5	10	1
	1988-1999	TIER 0		1,5	5	10	1
	2000-2001	TIER 1		0,7628	4,1127	5,2298	0,44
	2005	TIER 2		0,5508	4,1127	4,3	0,5
	2008-2012	TIER 4A		0,5508	4,1127	4,3	0,28
	2013+	TIER 4B		0,5508	4,1127	4,3	0,28
11<16	Pre -1988	BASE	0,408	1,7	5	8,5	0,9
	1988-1999	TIER 0		1,7	5	8,5	0,9
	2000-2001	TIER 1		0,438	2,161	4,4399	0,2665
	2005	TIER 2		0,438	2,161	4,4399	0,2665
	2008-2012	TIER 4A		0,438	2,161	4,4399	0,28
	2013+	TIER 4B		0,438	2,161	4,4399	0,28
16<25	Pre -1988	BASE	0,408	1,7	5	8,5	0,9
	1988-1999	TIER 0		1,7	5	8,5	0,9
	2000-2001	TIER 1		0,438	2,161	4,4399	0,2665
	2005	TIER 2		0,438	2,161	4,4399	0,2665
	2008-2012	TIER 4A		0,438	2,161	4,4399	0,28
	2013+	TIER 4B		0,438	2,161	4,4399	0,28
25<50	Pre -1988	BASE	0,408	1,8	5	6,9	0,8
	1988-1999	TIER 0		1,8	5	6,9	0,8
	1999-2003	TIER 1		0,2789	1,5323	4,7279	0,3389
	2004-2007	TIER 2		0,2789	1,5323	4,7279	0,3389
	2008-2012	TIER 4A		0,2789	1,5323	4,7279	0,2
	2013+	TIER 4		0,1314	0,153	3	0,0184
50<75	Pre -1988	BASE	0,408				
	1988-1997	TIER 0		0,99	3,49	6,9	0,722
	1998-2003	TIER 1		0,5213	2,3655	5,5988	0,473
	2004-2007	TIER 2		0,3672	2,3655	4,7	0,24
	2010-2011	TIER 4A		0,1314	0,237	3	0,0184
	20012+	TIER 4		0,1836	2,3655	3	0,2

POTENCIA NOMINAL (HP)	MODELO AÑOS	TIPO DE TECNOLOGÍA	BSFC (lb/HP-hr)	FACTORES DE EMISIÓN (g/HP-hr)			
				HC	CO	NOx	PM
75<100	Pre-1988	BASE	0,408				
	1988-1997	TIER 0		0,99	3,49	6,9	0,722
	1998-2003	TIER 1		0,5213	2,3655	5,5988	0,473
	2004-2007	TIER 2		0,3672	2,3655	4,7	0,24
	2008-2009	TIER 3B		0,1836	2,3655	3	0,2
	2012-2013	TIER 4		0,1314	0,237	3	0,0092
	2014+	TIER 4N		0,1314	0,237	0,276	0,0092
100<175	Pre-1988	BASE	0,367				
	1988-1996	TIER 0		0,68	2,7	8,38	0,402
	1997-2002	TIER 1		0,3384	0,8667	5,6523	0,2799
	2003-2006	TIER 2		0,3384	0,8667	4,1	0,18
	2007-2008	TIER 3		0,1836	0,8667	2,5	0,22
	2014	TIER 4		0,1314	0,087	2,5	0,0092
	2012-2013	TIER 4N		0,1314	0,087	0,276402	0,0092
175<300	Pre-1988	BASE	0,367				
	1988-1996	TIER 0		0,68	2,7	8,38	0,402
	1997-2002	TIER 1		0,3085	0,7475	5,5772	0,2521
	2003-2006	TIER 2		0,3085	0,7475	4	0,1316
	2007-2011	TIER 3		0,1836	0,7475	2,5	0,15
	2011-2013	TIER 4		0,1314	0,075	2,5	0,0092
	2014+	TIER 4N		0,1314	0,075	0,276	0,0092
300<600	Pre-1988	BASE	0,367				
	1988-1995	TIER 0		0,68	2,7	8,38	0,402
	1996-2002	TIER 1		0,2025	1,306	6,0153	0,2008
	2001-2005	TIER 2		0,1669	0,8425	4,3351	0,1316
	2006-2010	TIER 3		0,1669	0,8425	2,5	0,15
	2011-2013	TIER 4		0,1314	0,084	2,5	0,0092
	2014+	TIER 4N		0,1314	0,084	0,276	0,0092
600<750	Pre-1988	BASE	0,367				
	1988-1995	TIER 0		0,68	2,7	8,38	0,402
	199-2001	TIER 1		0,1473	1,3272	5,8215	0,2201
	2002-2005	TIER 2		0,1669	1,3272	4,1	0,1316
	2006-2010	TIER 3		0,1669	1,3272	2,5	0,15
	2011-2013	TIER 4		0,1314	0,133	2,5	0,0092
	2014+	TIER 4N		0,1314	0,133	0,276	0,0092
750< excepto grupo eléctrico	Pre-1998	BASE	0,367				
	1988-1995	TIER 0		0,68	2,7	8,38	0,4202
	1996-2001	TIER 1		0,2861	0,7642	6,1525	0,1934
	2002-2005	TIER 2		0,1669	0,7642	4,1	0,1316
	2011-2014	TIER 4		0,2815	0,7642	2,392	0,069
	2015+	TIER 4N		0,1314	0,076	2,392	0,0276

Tabla A- 2. Factor de Ajuste Transitorio (US- EPA, 2010).

FACTOR DE AJUSTE TRANSITORIO							
TIPO DE EQUIPO	HC	CO	NOx		PM		BSFC
TIPO DE TECNOLOGÍA	BASE-T3	BASE-T3	BASE, TO-T2	TIER 3	BASE,TO-T2	TIER 3	BASE-T3
PAVIMENTADORAS	1,05	1,53	0,95	1,04	1,23	1,47	1,01
COMPACTADORAS	1	1	1	1	1	1	1
VIBROCOMPACTADORAS	1,05	1,53	0,95	1,04	1,23	1,47	1,01
RASPADORES	1,05	1,53	0,95	1,04	1,23	1,47	1,01
EQUIPOS DE CONSTRUCCIÓN ZANJADORAS	1,05	1,53	0,95	1,04	1,23	1,47	1,01
EQUIPOS DE CONSTRUCCIÓN PERFORADORAS	1	1	1	1	1	1	1
EXCAVADORAS	1,05	1,53	0,95	1,04	1,23	1,47	1,01
EQUIPOS DE CONSTRUCCIÓN DE HORMIGÓN	1,05	1,53	0,95	1,04	1,23	1,47	1,01
EQUIPOS DE CONSTRUCCIÓN MEZCLADORES DE CEMENTO Y MORTERO	1	1	1	1	1	1	1
GRÚAS	1	1	1	1	1	1	1
CAMIONES FUERA DE RUTA	1,05	1,53	0,95	1,04	1,23	1,47	1,01
CARGADORES Y MINICARGADORES	1,05	1,53	0,95	1,04	1,23	1,47	1,01
RETROEXCAVADORAS	2,29	2,57	1,1	1,21	1,97	2,37	1,18
BULLDOZER	1,05	1,53	0,95	1,04	1,23	1,47	1,01
TRACTORES	1,05	1,53	0,95	1,04	1,23	1,47	1,01
VOLQUETAS	2,29	2,57	1,1	1,21	1,97	2,37	1,18
OTROS EQUIPOS DE CONSTRUCCIÓN	1,05	1,53	0,95	1,04	1,23	1,47	1,01
BOMBAS/COMPRESORES	1	1	1	1	1	1	1

Nota, para tecnologías Tier 4, el FAT es 1.

Tabla A- 3.Factor de Deterioro Relativo (US- EPA, 2010).

FACTOR DE DETERIORO RELATIVO (A) (% INCREMENTO/VIDA ÚTIL)				
CONTAMINANTE	BASE/TIER 0	TIER I	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
PM	0,473	0,473	0,473	0,473

Tabla A- 4. Factores de Carga.

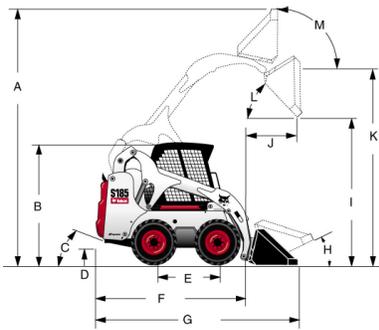
TIPOS DE EQUIPO	FACTOR DE CARGA
Bomba	0,5
Compresor	0,5
Excavadora	0,6
Excavadoras y cargadoras	0,45
grúa	0,5
Minicargador	0,45
Miniexcavadoras	0,5
Piloteadora	0,4
Motoniveladora	0,4
Retroexcavadora	0,5
Retroexcavadora de oruga y pala	0,5
Tractor	0,4
Vibrocompactador	0,4
Volqueta	0,4

Factores de carga adicionales pueden ser consultados en (ENVIRONMENTAL, 2006)

B. Anexo. Muestra de cálculo

Con el objeto de validar los resultados de los cálculos arrojados por la herramienta de cuantificación de emisiones de maquinaria en obras de construcción **EFRC**, se seleccionó un equipo de maquinaria pesada con las características contenidas Tabla B-1.

Tabla B- 1. Características del equipo de construcción para muestra de cálculo.

<p style="text-align: center;">PROYECTO 1</p> <p style="text-align: center;">MINICARGADOR</p>	<p style="text-align: center;">ESPECIFICACIONES</p>	
	<p>MARCA</p>	<p>BOBCAT</p>
	<p>MODELO</p>	<p>S185</p>
	<p>CABALLOS DE FUERZA</p>	<p>58 HP</p>
	<p>FACTOR DE CARGA</p>	<p>0.45</p>
	<p>AÑO DE FABRICACIÓN</p>	<p>2012</p>
	<p>TECNOLOGÍA</p>	<p>TIER IV</p>
	<p>COMBUSTIBLE</p>	<p>DIESEL</p>

Los modelos desarrollados tanto por EPA como por EME/EU requieren como datos de entrada los Factores de Deterioro (FD) y Factores de Ajuste Transitorio (FA), para determinar los Factores de Emisión (FE) y la masa total de contaminante emitido HC, NOx, SO₂, PM₁₀, CO y CO₂. Para esto, datos como la potencia del motor (HP), el año de fabricación, la edad del motor y las horas totales de trabajo al año (HR) son tomados de las fichas de recopilación de información contenidas en el Anexo D.

- **PASO 1**

Para el cálculo de emisiones se utiliza la Ecuación (1-2) y el conjunto de ecuaciones del subcapítulo 2.2.

Ecuación (1-2)

$$\text{Emisiones}_p = N_e \times HR_e \times HP_e \times FC_e \times FE_p$$

Dónde:

Emisiones_p = Emisiones de contaminante (p) expresado en kg/año ó g/año.

N_e = Numero de equipos tipo (e). El dato sobre número de equipos de trabajo proviene de la planilla de recolección de información diligenciada en cada una de las obras de construcción. En este caso es uno (1) correspondiente al equipo minicargador Bobcat S185.

HR_e = Horas anuales de uso del equipo tipo (e). La información sobre las hojas de trabajo es suministrada por la plantilla de obra, para el minicargador se reportó 2112 horas de trabajo.

HP_e = Potencia nominal promedio para el equipo tipo (e). Este dato está contenido en la ficha técnica del equipo minicargador, que de acuerdo con la referencia S185 es 58 HP.

FC_e = Factor de Carga típico para el equipo tipo (e). De acuerdo (ENVIRONMENTAL, 2006) el factor de carga para minicargador es 0.45, Ver tabla A- 4, Anexo A.

$FE_{p,e}$ = Factor de Emisión para el contaminante tipo (p) y el equipo tipo (e), expresado en (g/HP-hr). Para determinar el FE de HC, CO y NOx del minicargador se utiliza la **Ecuación (2-1)**, para PM la **Ecuación (2-5)**, para CO₂ la **Ecuación (2-8)** y para SO₂ la **Ecuación (2-9)**.

• PASO 2. CÁLCULO DE FACTOR DE EMISIÓN DE HC, CO y NOx

Ecuación (2-1)

$$FE_{(HC.CO \text{ y } NOx)} = FE_{SS} \times FAT \times FD$$

Dónde:

FE = Factor de emisión final. Incluyendo los ajustes por funcionamiento y deterioro del motor, el cual se expresa en (g/HP-hr).

FE_{SS} = Factor de emisión de la maquinaria con cero horas de uso. Se expresa en (g/HP-hr). Este factor se basa en el modelo y caballos de fuerza del motor, tipo de tecnológica y año de fabricación. Para minicargador los FE_{SS} se seleccionan teniendo en cuenta que el modelo del equipo es 2012, los caballos de fuerza son 58 HP y la tecnología es Tier IV, Ver Tabla A-1 Anexo A, con lo cual se obtiene:

$$FE_{SS (HC)} = 0.184 \text{ g/HP-hr}$$

$$FE_{SS (CO)} = 2.336 \text{ g/HP-hr}$$

$$FE_{SS (NOx)} = 3 \text{ g/HP-hr}$$

FAT = Factor de ajuste transitorio varía de acuerdo con el tipo de tecnología, teniendo en cuenta que el minicargador es Tier IV, el FAT es igual a 1 para HC, CO y NOx y PM. Ver Tabla A-3 Anexo A.

FD = Factor de Deterioro de la maquinaria. Está asociado al tipo de tecnología y la edad del motor. Para obtenerlo se utiliza la Ecuación (2-2).

Ecuación (2-2)

$$FD=1+ A \times (\text{Factor de edad})$$

Dónde:

A = Factor de deterioro relativo. Teniendo en cuenta que la tecnología del minicargador es Tier IV, el (A) equivale a 0.027 HC, 0.151 CO, 0.008 NOx y 0.473 PM, de acuerdo con lo contenido en la Tabla A-3 del Anexo A.

Factor de Edad = Es calculado con base en las horas acumuladas de trabajo, el factor de carga de maquinaria y la vida útil, para obtener el Factor de Edad se usa la Ecuación (2-3)

Ecuación (2-3)

$$\text{Factor de Edad} = \frac{(\text{horas acumuladas} \times \text{factor de carga})}{\text{vida útil total, en horas}}$$

Dónde:

Horas Acumuladas = Se asume un total de 10560 horas, teniendo en cuenta la antigüedad del equipo (5 años) y las hojas estimadas de trabajo al año son 2112 hr.

Factor de Carga = 0.45 para minicargador de acuerdo con la tabla A-4 Anexo A.

Vida útil = 86,400 horas, equivalente a 10 años.

Se obtiene:

$$\text{Factor de Edad} = \frac{(10560 \times 0.45)}{86400} = 0.055$$

Con el Factor de Edad se retoma la Ecuación (2-2) para obtener el Factor de Deterioro.

Ecuación (2-2)

$$FD_{HC} = 1 + 0.027 \times (0.055)^1 = 1.001485$$

$$FD_{CO} = 1 + 0.151 \times (0.055)^1 = 1.008305$$

$$FD_{NOx} = 1 + 0.008 \times (0.055)^1 = 1.00044$$

$$FD_{PM} = 1 + 0.473 \cdot (0.055)^1 = 1.02015$$

Obtenidos los datos de FE_{ss}, FAT y FD se usa la Ecuación (2-1) y se reemplazan los términos para obtener el Factor de Emisión de HC, CO y NO_x.

Ecuación (2-1)

$$FE_{(HC)} = 0.184 \text{ g/HP-hr} \times 1 \times 1.001485 = 0.1838 \text{ g/HP-hr}$$

$$FE_{(CO)} = 2.336 \text{ g/HP-hr} \times 1 \times 1.008305 = 2.3851 \text{ g/HP-hr}$$

$$FE_{(NO_x)} = 3 \text{ g/HP-hr} \times 1 \times 1.00044 = 3.001 \text{ g/HP-hr}$$

Con los Factores de Emisión de HC, CO y NO_x, horas de trabajo, caballos de fuerza y el número de equipos se reemplazan los términos en la Ecuación (1-2) para obtener las emisiones totales de contaminantes HC, CO y NO_x.

Ecuación (1-2)

$$E_{HC} = 1 \times 2112 \text{ hr} \times 58 \text{ HP} \times 0.45 \times 0.1838 \text{ g/HP-hr} = 10,135.64 \text{ g/año}$$

$$E_{CO} = 1 \times 2112 \text{ hr} \times 58 \text{ HP} \times 0.45 \times 2.3851 \text{ g/HP-hr} = 131,476.85 \text{ g/año}$$

$$E_{NO_x} = 1 \times 2112 \text{ hr} \times 58 \text{ HP} \times 0.45 \times 3.001 \text{ g/HP-hr} = 165,442.09 \text{ g/año}$$

PASO 3. EMISIÓN MATERIAL PARTICULADO PM

Para determinar la masa de Material Particulado PM, a la ecuación del Factor de Emisión se agrega el término $S_{p_{\text{madj}}}$ con el fin de tener en cuenta la influencia del contenido de azufre del combustible, ver Ecuación (2-5).

Ecuación (2-5)

$$FE_{(PM)} = FE_{SS} \times FAT \times FD \times S_{PM_{\text{adj}}}$$

Dónde:

FE_{ss} = Factor de emisión de la maquinaria con cero horas de uso. Se expresa en (g/HP-hr). Este factor se basa en el modelo y caballos de fuerza del motor, tipo de tecnológica y año de fabricación. Para minicargador los FE_{ss}, se seleccionan teniendo en cuenta que el modelo del

equipo es 2012, los caballos de fuerza son 58 HP y la tecnología es Tier IV, ver tabla A-1 en Anexo A. dando como resultado:

$$FE_{SS (PM)} = 0.2 \text{ g/HP-hr}$$

FAT = Factor de ajuste transitorio varía de acuerdo con el tipo de tecnología, teniendo en cuenta que el minicargador es Tier IV, el **FAT es igual a 1** para HC, CO y NOx y PM. Ver tabla A-2 en Anexo A.

FD = Factor de Deterioro de la maquinaria, Está asociado al tipo de tecnología y la edad del motor. Este corresponde a 1.02015 y se obtiene de la Ecuación (2-2).

S_{PMadj} = Ajuste de Factor de Emisión de PM con base en la variación de contenido de azufre en el combustible. El cálculo de **S_{PM(adj)}** para corregir la emisión de PM se realiza con base en la Ecuación (2-6).

Ecuación (2-6)

$$S_{pmadj} = BSFC \times 453.6 \times 7.0 \times soxcnv \times 0.01 \times (soxbas - soxdsl)$$

Dónde:

S_{pm} = Ajuste de azufre para PM en (g/HP-hr).

BSFC = Consumo específico de combustible ajustado en (lb combustible/HP-hr). Para determinar este valor se utiliza la Ecuación (2-7).

Ecuación (2-7)

$$BSFC = FE (BSFC)_{SS} \times FAT$$

Dónde:

FE (BSFC)_{SS} = Corresponde a 0.408 (lb/HP-hr), cuyo valor es el resultado de 58 HP y el tipo de tecnología del motor, que para el caso del minicargador es Tier IV, Ver Tabla A-1 en Anexo A.

FAT = Factor de ajuste transitorio varía de acuerdo con el tipo de tecnología, teniendo en cuenta que el minicargador es Tier IV, el **FAT es igual a 1** para HC, CO y NOx PM y BSFC ver Tabla A-2 en Anexo A.

Reemplazando términos se obtiene:

$$BSFC = 0.408 \text{ lb/HP-hr} \times 1 = \mathbf{0.408 \text{ lb/HP-hr}}$$

453.6 = Conversión de libras a gramos.

7.0 = gramos de sulfato de PM/gramos de azufre en PM.

Soxcnv = a 0,022247

0.01 = conversión de porcentaje a fracción.

Soxbas= el valor por defecto es 0.33 peso porcentual de motores diésel.

SoxdsI= episodic fuel sulfur weight percent (Peso específico porcentual de azufre en combustible diésel fuera de ruta, para el Diesel de Colombia se asume 50 ppm equivalente a 0.005. Fuente: <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/sala-de-prensa/boletines-de-prensa/Boletines-2014/contenido/Diesel-en-Colombia,-cada-vez-mas-limpio>).

Identificados los valores de los términos se retoma la Ecuación (2-6) y se obtiene el valor S_{pmadj} .

Ecuación (2-6)

$$S_{pm} = 0.408 \text{ lb/HP-hr} \times 453.6 \times 7.0 \times 0.022247 \times 0.01 \times (0.33 - 0.005) = 0.0936 \text{ g/HP-hr}$$

Obtenidos todos los términos se procede a calcular el FE_{PM} con la ecuación (2-5)

Ecuación (2-5)

$$FE_{(PM)} = 0.2 \text{ g/HP-hr} \times 1 \times 1.02015 \times 0.0936 \text{ g/HP-hr} = 0.1115 \text{ g/HP-hr}$$

El Factor de Emisión PM se incluye en la Ecuación (1-2) para calcular la masa total de contaminante.

Ecuación (1-2)

$$E_{PM} = 1 \times 2112 \text{ hr} \times 58 \text{ HP} \times 0.45 \times 0.1115 \text{ g/HP-hr} = 6148.22 \text{ g/año}$$

PASO 4. EMISIÓN DE CO₂

Para obtener el Factor de Emisión de CO₂ se utiliza la Ecuación (2-8)

Ecuación (2-8)

$$CO_2 = (BSFC \times 453.6 - HC) \times 0.87 \left(\frac{44}{12} \right)$$

Dónde:

CO₂ = Factor de emisión del contaminante dado en g/HP-hr.

BSFC = Consumo específico de combustible en lb/HP-hr. El valor de este término se obtiene de la Ecuación (2-7), equivalente a 0.408 lb/HP-hr.

453.6 = Factor de conversión de libras a gramos.

HC = Factor de Emisión de hidrocarburos en g/HP-hr. Obtenido del a Ecuación (2-1), cuyo valor es 0.1838 g/HP-hr.

0.87 = Fracción de masa de carbón del diésel. (Constante)

44/12 = es la taza de masa CO₂/ la masa de Carbón.

Reemplazando los términos en la Ecuación (2-8) se obtiene el factor de Emisión para CO₂

Ecuación (2-8)

$$\text{CO}_2 = (0.408 \text{ lb/HP-hr} \times 453.6 - 0.1838 \text{ g/HP-hr}) \times 0.87(3.666) = 589.78 \text{ g/HP-hr}$$

Con el factor de emisión de CO₂ se reemplaza el término en la Ecuación (1-2)

Ecuación (1-2)

$$E_{\text{CO}_2} = 1 \times 2112 \text{ hr} \times 58 \text{ HP} \times 0.45 \times 589.78 \text{ g/HP-hr} = 32,510,662.65 \text{ g/año}$$

PASO 5. EMISIÓN DE SO₂

Para obtener el Factor de Emisión de SO₂ se utiliza la Ecuación (2-9)

Ecuación (2-9)

$$\text{SO}_2 = (\text{BSFC} \times 453.6 \times (1 - \text{soxcnv}) - \text{HC}) \times 0.01 \times \text{soxdsl} \times 2$$

Donde

SO₂ = Factor de emisión del contaminante en g/HP-hr

BSFC = Consumo específico de combustible en lb/HP-hr. El valor de este término se obtiene de la Ecuación (2-7), equivalente a 0.408 lb/HP-hr.

453.6 = Factor de conversión de libras a gramos.

soxcnv = Fracción de azufre convertido directamente a PM. Equivalente a 0.022247.

HC = Factor de Emisión de hidrocarburos en g/HP-hr. Obtenido del a Ecuación (2-1), cuyo valor es 0.1838 g/HP-hr.

0.01= Factor de conversión de peso porcentual a peso fracción

soxdsI = Peso específico porcentual de azufre en combustible diésel fuera de ruta. Para el Diesel de Colombia se asume 50 ppm equivalente a 0.005. Fuente: <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/sala-de-prensa/boletines-de-prensa/Boletines-2014/contenido/Diesel-en-Colombia,-cada-vez-mas-limpio>.

2 = Gramos de SO₂ formados de un gramo de azufre.

Reemplazando los términos en la Ecuación (2-9) se obtiene el factor de Emisión.

Ecuación (2-9)

$$\text{SO}_2 = (0.408 \text{ lb/HP-hr} \times 453.6 \times (1 - 0.022247) - 0.1838 \text{ g/HP-hr}) \times 0.01 \times 0.005 \times 2 = 0.018077 \text{ g/HP-hr}$$

Con el factor de emisión de SO₂ se reemplaza el término en la Ecuación (1-2).

Ecuación (1-2)

$$E_{\text{SO}_2} = 1 \times 2112 \text{ hr} \times 58 \text{ HP} \times 0.45 \times 0.018077 \text{ g/HP-hr} = 996.44 \text{ g/año}$$

EMISIONES TOTALES

Las emisiones totales de un minicargador S185 de 58 HP, con 2112 horas de trabajo corresponden a:

$$E_{\text{HC}} = 10,135.64 \text{ g/año}$$

$$E_{\text{CO}} = 131,476.85 \text{ g/año}$$

$$E_{\text{NO}_x} = 165,442.09 \text{ g/año}$$

$$E_{\text{CO}_2} = 32,510,662.65 \text{ g/año}$$

$$E_{\text{SO}_2} = 996.44 \text{ g/año}$$

C. Anexo. Detalle de la maquinaria reportada y factores de emisión

TIPO DE EQUIPO	MODELO (EJEMPLOS)	(HP)	FACTOR DE EMISIÓN (g/HP-hr)					
			HC	CO	NOx	PM	CO ₂	SO ₂
BOMBAS 9 equipos reportados de las marcas PUTZMEISTER, SCHWING, CIFA		(68 - 100)	(0.13 - 0.37)	(0.09 - 2.41)	(2.5-4.7)	(0.075 - 0.195)	(530 - 590)	(0.016 - 0.018)
COMPRESORES 9 equipos reportados de las marcas PUTZMEISTER, KAISER, ATLAS CORP, SULLAIR	 http://americas.sullair.com/es/products/compresor-de-aire-portal-750xhh900xh-de-alta-presion	(49-68)	(0,18 - 0,52)	(1,5-2,4)	(3,0-5,6)	(0,107 - 0,389)	(589 - 590)	(0,018 - 0,018)
EXCAVADORAS/RETROEXCAVADORAS 40 equipos reportados de las marcas HITACHI, KOMATSU, CATERPILLAR, LINKBELT, AIRMAN	  https://www.mascus.es/construccion/min-excavadoras---7t/hitachi-zx40u-5a/8javfvdv.html	(29-300)	(0,13 - 0,55)	(0,08 - 3,68)	(2,50 - 8,60)	(0,076 - 0,650)	(535 - 596)	(0,016 - 0,018)

Continúa

TIPO DE EQUIPO	MODELO (EJEMPLOS)	(HP)	FACTOR DE EMISIÓN (g/HP-hr)					
			HC	CO	NOx	PM	CO ₂	SO ₂
GRÚAS 14 equipos reportados de las marcas LINKBELT, SOILMEC, PYH, GROVE,	 http://www.balavto.com/sale-program/soilmec/cranes	(110-540)	(0,13 - 0,34)	(0,08 - 0,88)	(2,50 - 5,68)	(0,06-0,22)	(530 - 531)	(0,016 - 0,016)
MINICARGADORES 17 equipos reportados de las marcas BOBCAT, HITACHI, DYNAPAC, CATERPILLAR, CASE	 https://articulo.mercadolibre.cl/MLC-444122412-manual-de-taller-bobcat-s185-espanol-_JM?quantity=1	(36-84)	(0,18 - 0,39)	(2,4-3,7)	(3,0-7,2)	(0,11-0,41)	(590 - 596)	(0,018 - 0,018)
MOTONIVELADORAS 1 equipo reportado marca VOLVO	 https://www.viarural.com.ar/viarural.com.ar/insumosagropecuarios/agricolas/maquinariavial/volvo/motoniveladoras/motoniveladora-g940.htm	215	0.13	0.07	2.5	0.07	530	0.016
PILOTEADO RAS 4 equipos reportados de las marcas SOILMEC, INTEROC, CASA GRANDE	 http://www.flickrriver.com/photos/erkeimited/6156019984/	(99-442)	(0,13 - 0,52)	(0,08 - 2,37)	(2,50 - 5,60)	(0,07 - 0,61)	(530 - 589)	(0,016 - 0,018)

Continúa

TIPO DE EQUIPO	MODELO (EJEMPLOS)	(HP)	FACTOR DE EMISIÓN (g/HP-hr)					
			HC	CO	NOx	PM	CO ₂	SO ₂
TRACTORES 2 equipos reportados de las marcas NEWHOLLAND, KUBOTA	 https://maquinac.com/productos/tractor-new-holland-tt45/	(21,3-75)	(0,44 - 0,84)	(2,21 - 6,09)	(4,45 - 12,08)	(0,19-0,46)	(694 - 695)	(0,021 - 0,021)
VIBROCOMPACTADORES 5 equipos reportados de las marcas DYNAPAC, CATERPILLAR, KOMATSU, BOMA	 https://dynapac.com/en/products/compaction/ca250-ii	(101-133)	(0,13 - 0,34)	(0,09 - 0,87)	(2,50 - 4,10)	(0,07-0,14)	(530 - 531)	(0,016 - 0,016)
VOLQUETAS 2 equipos reportados de las marcas INTERNACIONAL MACK	 http://www.flickrriver.com/photos/jackbyrneshil/8021642784/	(350-400)	(0,13 - 0,71)	(0,08 - 1,95)	(2,5-14,4)	(0,09-0,43)	(624 - 626)	(0,019 - 0,019)

D. Anexo. Plantillas de recolección de datos

TABLA D- 1. Planilla usada para la recolección de datos

COMPañÍA CONTRATISTA	MARCA DEL EQUIPO (Ejemplo, CAT)	Modelo del equipo. (ejemplo, 320L)	TIPO DE EQUIPO (ejemplo. Excavadora)	AÑO DE FABRICACIÓN DEL MOTOR	CABALLOS DE FUERZA DEL MOTOR (HP)	HORAS TOTALES DE TRABAJO DEL EQUIPO	COMBUSTIBLE (EJEMPLO. DIESEL)

TABLA D- 2. Datos de maquinaria, proyecto 1

Proyecto 1							
# Equipos	Equipo	Horas de trabajo al año	Marca	Modelo del Equipo	Potencia	Modelo	Tecnología del motor
1	Tractor	384	NEWHOLLAND	TT45	75	2007	TIER2
1	Compresor	1552	PUTZMEISER	T40	68	2010	TIER4
1	Minicargador	2112	BOBCAT	S185	58	2012	TIER4

TABLA D- 3. Datos de maquinaria, proyecto 2.

Proyecto 2							
# Equipos	Equipo	Horas de trabajo al año	Marca	Modelo del Equipo	Potencia	Modelo	Tecnología del motor
1	Minicargador	1892	CASE	250	84	2014	TIER3
1	Vibrocompactador	1200	CATERPILLA	PS360	130	2000	TIER2
1	Minicargador	1892	BOBCAT	s650	75	2010	TIER3
1	Vibrocompactador	72	DYNAPAC	CA 250-D	110	2001	TIER2
1	Minicargador	240	DYNAPAC	150	80	1999	TIER2
1	Bomba	1344	CIFA	PC506/309	100	2016	TIER4
1	Bomba	980	CIFA	PC506/309	100	2016	TIER4
1	Bomba	1008	CIFA	PC506/309	100	2016	TIER4
1	Bomba	980	CIFA	PC506/309	100	2016	TIER4
1	Bomba	1344	CIFA	PC506/309	100	2016	TIER4

TABLA D- 4. Datos de maquinaria, proyecto 3.

Proyecto 3							
# Equipos	Equipo	Horas de trabajo al año	Marca	Modelo del Equipo	Potencia	Modelo	Tecnología del motor
1	grúa	2184	LINK-BELT	ATC3275	215	2013	TIER4
1	grúa	2200	SOILMEC	SC-70 HD	540	2004	TIER2
1	grúa	2650	SOILMEC	SC-50 HD	270	2011	TIER3
1	Excavadora	1250	HITACHI	ZX130	98	2008	TIER3

TABLA D- 5. Datos de maquinaria, proyecto 4.

Proyecto 4							
# Equipos	Equipo	Horas de trabajo al año	Marca	Modelo del Equipo	Potencia	Modelo	Tecnología del motor
1	Retroexcavadora	480	KOMATSU DE MARTILLO	PC 200	150	1995	TIER2
1	Retroexcavadora	480	KOMATSU 200 DE VALDE	PC 200	200	2012	TIER4
1	Retroexcavadora	480	COVELCO 210	SK210	300	1995	TIER1
1	Retroexcavadora	480	JHONDIERR 50	J50	60	2006	TIER2
1	Piloteadora	1152	SOILMEC SR70	SR70	442	2012	TIER4
1	grúa	1552	LINKBELT	LB98	110	1995	TIER1

TABLA D- 6. Datos de maquinaria, proyecto 5.

Proyecto 5							
# Equipos	Equipo	Horas de trabajo al año	Marca	Modelo del Equipo	Potencia	Modelo	Tecnología del motor
1	Retroexcavadora	115	HITACHI	120-6	164	2009	TIER3
1	Retroexcavadora	795	HITACHI	75-4	57	2006	TIER2
1	Retroexcavadora	1093	HITACHI	75-5	57	2006	TIER2
1	Minicargador	470	HITACHI	Lx 30-7	36	2005	TIER2
1	Retroexcavadora	413	HITACHI	120-6	81	2007	TIER2
1	Compresor	480	LINEO IN BOX	1441-R	47	2016	TIER4

TABLA D- 7. Datos de maquinaria, proyecto 6.

Proyecto 6							
# Equipos	Equipo	Horas de trabajo al año	Marca	Modelo del Equipo	Potencia	Modelo	Tecnología del motor
1	Excavadora	720	HITACHI	ZX40U	40	2010	TIER4
1	Excavadora	360	HITACHI	EX 120	87	2002	TIER1
1	Excavadora	720	HITACHI	ZAXIS 200-3	158	2006	TIER2
1	Grua	360	AMERICAN	597c	110	1986	TIER1
1	Piloteadora	360	INTEROC	AN 74B	99	1998	TIER1

TABLA D- 8. Datos de maquinaria, proyecto 7.

Proyecto 7							
# Equipos	Equipo	Horas de trabajo al año	Marca	Modelo del Equipo	Potencia	Modelo	Tecnología del motor
1	Retroexcavadora	16	LINKBELT	210	157	2012	TIER4
1	Retroexcavadora	413	LINKBELT	210	157	2012	TIER4
1	Retroexcavadora	1848	JHON DEERE	50D	38	2008	TIER4
1	Retroexcavadora	66	AIRMAN	AX 40-U	33.5	2000	TIER1
1	Retroexcavadora	1320	JHON DEERE	50D	38	2008	TIER4
1	Retroexcavadora	1056	HITACHI	ZX200	147	2012	TIER4
1	Compresor	44	KAISER	57	48.3	2008	TIER4
1	Minicargador	2376	BOBCAT	s650	75	2010	TIER3

TABLA D- 9. Datos de maquinaria, proyecto 8.

Proyecto 8							
# Equipos	Equipo	Horas de trabajo al año	Marca	Modelo del Equipo	Potencia	Modelo	Tecnología del motor
1	Retroexcavadora	1848	JCB	214	80	2003	TIER1
1	Excavadora	1792	HITACHI	ZX130	98	2008	TIER3
1	Excavadora	1600	KOMATZU	PC200	155	2011	TIER3
1	Volqueta	1792	INTERNACIONAL	7600	350	2013	TIER4
1	Compresor	1820	PUTZMEISER	T40	68	2016	TIER4

TABLA D- 10. Datos de maquinaria, proyecto 9.

Proyecto 9							
# Equipos	Equipo	Horas de trabajo al año	Marca	Modelo del Equipo	Potencia	Modelo	Tecnología del motor
1	Excavadora	640	LISHIDE	SC 160-C	115	2014	TIER4
1	Volqueta	800	MACK	DM600S	400	1974	TIER1
1	Retroexcavadora	480	HYUNDAI	H940C	95	2006	TIER2

TABLA D- 11. Datos de maquinaria, proyecto 10.

Proyecto 10							
# Equipos	Equipo	Horas de trabajo al año	Marca	Modelo del Equipo	Potencia	Modelo	Tecnología del motor
1	Compresor	480	SULLAIR	185	60	2002	TIER1
1	Excavadora	2304	HITACHI	350	271	2002	TIER1
1	Excavadora	2304	HITACHI	120	81	2006	TIER2
1	Excavadora	1440	HITACHI	120	81	2004	TIER2
1	Excavadora	1152	HITACHI	ZX60USB-5	53	2004	TIER2

TABLA D- 12. Datos de maquinaria, proyecto 11.

Proyecto 11							
# Equipos	Equipo	Horas de trabajo al año	Marca	Modelo del Equipo	Potencia	Modelo	Tecnología del motor
1	Bomba	1195.6	FORTE	4LD820E-300H	18	2008	TIER4
1	Bomba	3136	SCHWING	sp1000	81	2010	TIER3
1	Bomba	2548	PUTZMEISER	T40	68	2010	TIER2
1	Minicargador	562	BOBCAT	S185	58	2012	TIER4
1	Minicargador	456	BOBCAT	S185	58	2012	TIER4

TABLA D- 13. Datos de maquinaria, proyecto 12.

Proyecto 12							
# Equipos	Equipo	Horas de trabajo al año	Marca	Modelo del Equipo	Potencia	Modelo	Tecnología del motor
1	Compresor	840	PUTZMEISER	T40	68	2013	TIER2
1	Minicargador	232	botcat serie 5303600098 motor n8c4323.		58	2009	TIER2
1	Minicargador	42	botcat serie 5303600098 motor n8c4323.		59	2012	TIER3
1	Minicargador	77	botcat serie 5303600098 motor n8c4323.		60	2012	TIER3

TABLA D- 14. Datos de maquinaria, proyecto 13.

Proyecto 13							
# Equipos	Equipo	Horas de trabajo al año	Marca	Modelo del Equipo	Potencia	Modelo	Tecnología del motor
1	Compresor	2112	KAISER	M57 N° 050	48	2007	TIER2
1	Compresor	288	ATLAS COPCO	185 CFM N°007	49	2008	TIER2
1	Compresor	48	INGERSOLL RAND	185 C21	62	2008	TIER2
1	Grua	144	PYH	R200	136	2004	TIER2
1	Grua	352	LINK BELT	LS108	200	2006	TIER3
1	Retroexcavadora	300	HITACHI	EX 120	84	2012	TIER4
1	Bomba	3456	PUTMEISTER	TK - 70	96	2013	TIER4
1	Excavadora	160	CATERPILLAR	305 CR	42	2003	TIER2
1	Grua	124	GROVE	RT58D	125	2002	TIER1
1	Excavadora	112	LISHIDE	SC210,8	180	2004	TIER2
1	Excavadora	50	AIRMAN	AX40U - 3	38	2002	TIER1
1	Grua	60	LINK BELT	HSP - 8028S	130	1989	TIER1
1	Grua	480	CENTURY	CN 122	128	1991	TIER1
1	Excavadora	300	HITACHI	EX 60 - 5	54	2001	TIER1
1	Excavadora	160	KOMATSU		128	2011	TIER4
1	Grua	160	GROVE		200	2008	TIER3
1	Excavadora	480	HITACHI	EX 200 - 5	132	2006	TIER2
1	Excavadora	192	HITACHI	40 U	35	2002	TIER1

TABLA D- 15. Datos de maquinaria, proyecto 14.

Proyecto 14							
# Equipos	Equipo	Horas de trabajo al año	Marca	Modelo del Equipo	Potencia	Modelo	Tecnología del motor
1	Vibrocompactador	432	Boma	177-D	101	2011	TIER3
1	Minicargador	576	Bobcat	S185	58	2007	TIER2
1	Retroexcavadora	1728	Kobelco	Sk70	54	2004	TIER2
1	Vibrocompactador	5760	Komatsu	JV110AW	133	2012	TIER4
1	Retroexcavadora	576	Link-Belt	210 X2	157	2012	TIER4
1	Motoniveladora	576	Volvo		215	2011	TIER4
1	Vibrocompactador	576	Atas- Dinapac	C3500	102	2016	TIER4
1	Minicargador	576	Caterpillar	232B	61	2008	TIER3
1	Minicargador	864	Case	SR200	68	2015	TIER3
1	Minicargador	720	Bobcat	S185	65	2012	TIER3
1	Retroexcavadora	144	Komatsu	PC228USLC-3	156	2010	TIER3
1	Tractor	3456	Kubota	L4400	21.3	2008	TIER4
1	Minicargador	720	Bobcat	S185	58	2007	TIER2
1	Minicargador	1152	Bobcat	S186	58	2007	TIER2

TABLA D- 16. Datos de maquinaria, proyecto 15.

Proyecto 15							
# Equipos	Equipo	Horas de trabajo al año	Marca	Modelo del Equipo	Potencia	Modelo	Tecnología del motor
1	Excavadora	960	LINK BELT	210	157	2011	TIER3
1	Piloteadora	960	CASA GRANDE	B125	160	2012	TIER4
1	Grua	960	LINK BELT	108b	277	2014	TIER4
1	Grua	960	SOILMEC	SC-20	160	2013	TIER4
1	Excavadora	960	HITACHI	ZX 35U-3	28.6	2013	TIER4
1	Piloteadora	960	SOILMEC	SR-30	160	2007	TIER3
1	Grua	960	SOILMEC	QUY 50	160	2007	TIER3

E. Anexo. Emisiones totales por obra

#	CARACTERÍSTICAS DE LA MAQUINARIA								FACTOR DE EMISIÓN (g/HP-hr)						EMISIONES TOTALES (kg)					
	TIPO DE EQUIPO	(HR)	MARCA	MODELO DEL EQUIPO	(HP)	(FC)	MODELO MOTOR	TECN	HC	CO	NOX	PM	CO2	SO2	HC	CO	NOX	PM	CO2	SO2
PROYECTO 1																				
1	Tractor	384	NEWHOLLAND	TT45	75	0,4	2007	TIER2	0,84	6,09	12,08	0,463	694	0,0213	9,69	70,16	139,17	5,33	7994	0,25
1	Compresor	1552	PUTZMEISER	T40	68	0,5	2010	TIER4	0,18	2,39	3,00	0,112	590	0,0181	9,70	126,01	158,38	5,92	31122	0,95
1	Minicargador	2112	BOBCAT	S185	58	0,45	2012	TIER4	0,18	2,39	3,00	0,112	590	0,0181	10,14	131,48	165,44	6,15	32511	1,00
EMISIONES TOTALES															29,53	327,64	463,00	17,4	71627	2,20
PROYECTO 2																				
1	Minicargador	1892	CASE	250	84	0,45	2014	TIER3	0,19	3,64	4,59	0,204	596	0,0183	13,80	259,99	328,34	14,5	42600	1,31
1	Vibrocompactador	1200	CATERPILLA	PS360	130	0,4	2000	TIER2	0,34	0,87	4,10	0,104	530	0,0162	21,18	54,60	256,06	6,48	33069	1,01
1	Minicargador	1892	BOBCAT	s650	75	0,45	2010	TIER3	0,19	3,66	4,59	0,209	596	0,0183	12,33	233,51	293,26	13,3	38036	1,17
1	Vibrocompactador	72	DYNAPAC	CA 250-D	110	0,4	2001	TIER2	0,34	0,87	4,10	0,096	530	0,0162	1,07	2,75	12,99	0,30	1679	0,05
1	Minicargador	240	DYNAPAC	150	80	0,45	1999	TIER2	0,39	3,63	7,19	0,262	595	0,0182	3,33	31,34	62,14	2,26	5141	0,16
1	Bomba	1344	CIFA	PC506/309	100	0,5	2016	TIER4	0,13	0,09	2,50	0,075	531	0,0163	8,83	5,85	168,01	5,04	35658	1,09
1	Bomba	980	CIFA	PC506/309	100	0,5	2016	TIER4	0,13	0,09	2,50	0,075	531	0,0163	6,44	4,27	122,51	3,68	26001	0,80
1	Bomba	1008	CIFA	PC506/309	100	0,5	2016	TIER4	0,13	0,09	2,50	0,075	531	0,0163	6,62	4,39	126,01	3,78	26743	0,82
1	Bomba	980	CIFA	PC506/309	100	0,5	2016	TIER4	0,13	0,09	2,50	0,075	531	0,0163	6,44	4,27	122,51	3,68	26001	0,80
1	Bomba	1344	CIFA	PC506/309	100	0,5	2016	TIER4	0,13	0,09	2,50	0,075	531	0,0163	8,83	5,85	168,01	5,04	35658	1,09
EMISIONES TOTALES															88,89	606,82	1659,8	58,1	270585	8,29

PROYECTO 3																				
1	Grua	2184	LINK-BELT	ATC3275	215	0,5	2013	TIER4	0,13	0,08	2,50	0,075	531	0,016	30,89	17,74	587,19	17,5	124580	3,82
1	Grua	2200	SOILMEC	SC-70 HD	540	0,5	2004	TIER2	0,31	0,76	4,01	0,058	530	0,016	184,28	451,44	2379,5	34,2	314851	9,65
1	Grua	2650	SOILMEC	SC-50 HD	269,5	0,5	2011	TIER3	0,18	0,76	2,50	0,072	530	0,016	65,72	270,63	893,38	25,8	189419	5,81
1	Excavadora	1250	HITACHI	ZX130	98	0,6	2008	TIER3	0,19	3,66	4,59	0,210	596	0,018	14,20	269,15	337,58	15,4	43781	1,34
EMISIONES TOTALES															295,10	1008,9	4197,6	93,0	672630	20,6
PROYECTO 4																				
1	Retroexcavadora	480	KOMATSU DE MARTILLO	PC 200	150	0,5	1995	TIER2	0,36	1,33	6,28	0,187	535	0,016	12,82	48,03	225,95	6,74	19268	0,59
1	Retroexcavadora	480	KOMATSU 200 DE VALDE	PC 200	200	0,5	2012	TIER4	0,13	0,08	2,50	0,076	536	0,016	6,31	3,61	120,01	3,64	25725	0,79
1	Retroexcavadora	480	COVELCO 210	SK210	300	0,5	1995	TIER1	0,32	1,15	8,55	0,296	535	0,016	23,37	82,85	615,29	21,3	38543	1,18
1	Retroexcavadora	480	JHONDIERR 50	J50	60	0,5	2006	TIER2	0,39	3,63	7,19	0,263	595	0,018	5,56	52,28	103,58	3,79	8569	0,26
1	Piloteadora	1152	SOILMEC SR70	SR70	442	0,4	2012	TIER4	0,13	0,08	2,50	0,075	531	0,016	26,78	15,34	509,29	15,2	108074	3,31
1	Grua	1552	LINKBELT	LB98	110	0,5	1995	TIER1	0,34	0,88	5,68	0,222	530	0,016	29,09	75,46	484,77	18,9	45237	1,39
EMISIONES TOTALES															103,93	277,57	2058,8	69,6	245415	7,52
PROYECTO 5																				
1	Retroexcavadora	115	HITACHI	120-6	164	0,5	2009	TIER3	0,19	1,33	3,83	0,239	536	0,016	1,82	12,51	36,07	2,25	5052	0,15
1	Retroexcavadora	795	HITACHI	75-4	57	0,5	2006	TIER2	0,39	3,64	7,19	0,267	595	0,018	8,75	82,42	163,00	6,04	13482	0,41
1	Retroexcavadora	1093	HITACHI	75-5	57	0,5	2006	TIER2	0,39	3,64	7,20	0,270	595	0,018	12,04	113,53	224,14	8,40	18536	0,57
1	Minicargador	470	HITACHI	Lx 30-7	36	0,45	2005	TIER2	0,29	2,35	7,24	0,411	595	0,018	2,23	17,90	55,09	3,13	4533	0,14
1	Retroexcavadora	413	HITACHI	120-6	81	0,5	2007	TIER2	0,39	3,63	7,19	0,262	595	0,018	6,45	60,68	120,31	4,39	9953	0,31
1	Compresor	480	LINEO IN BOX	1441-R	47	0,5	2016	TIER4	0,28	1,53	4,73	0,107	589	0,018	3,15	17,29	53,33	1,20	6649	0,20
EMISIONES TOTALES															34,44	304,35	651,95	25,4	58205	1,78
PROYECTO 6																				
1	Excavadora	720	HITACHI	ZX40U	40	0,6	2010	TIER4	0,28	1,54	4,73	0,109	595	0,018	4,82	26,62	81,72	1,88	10288	0,32
1	Excavadora	360	HITACHI	EX 120	87	0,6	2002	TIER1	0,55	3,63	8,57	0,498	595	0,018	10,30	68,27	161,12	9,35	11172	0,34
1	Excavadora	720	HITACHI	ZAXIS 200-3	158	0,6	2006	TIER2	0,36	1,33	6,28	0,142	535	0,016	24,30	91,01	428,38	9,70	36532	1,12
1	Grua	360	AMERICAN	597c	110	0,5	1986	TIER1	0,34	0,87	5,66	0,204	530	0,016	6,72	17,27	112,09	4,04	10493	0,32
1	Piloteadora	360	INTEROC	AN 74B	99	0,4	1998	TIER1	0,52	2,37	5,60	0,612	589	0,018	7,44	33,83	79,88	8,73	8393	0,26
EMISIONES TOTALES															53,58	237,00	863,19	33,6	76878	2,36

#	CARACTERÍSTICAS DE LA MAQUINARIA								FACTOR DE EMISIÓN (g/HP-hr)						EMISIONES TOTALES (kg)					
	TIPO DE EQUIPO	(HR)	MARCA	MODELO DEL EQUIPO	(HP)	(FC)	MODELO MOTOR	TECN	HC	CO	NOX	PM	CO2	SO2	HC	CO	NOX	PM	CO2	SO2
PROYECTO 7																				
1	Retroexcavadora	16	LINKBELT	210	157	0,5	2012	TIER4	0,13	0,09	2,50	0,076	536	0,016	0,17	0,11	3,14	0,10	673	0,02
1	Retroexcavadora	413	LINKBELT	210	157	0,5	2012	TIER4	0,13	0,09	2,50	0,076	536	0,016	4,26	2,83	81,06	2,46	17375	0,53
1	Retroexcavadora	1848	JHON DEERE	50D	38	0,5	2008	TIER4	0,28	1,55	4,73	0,115	595	0,018	9,82	54,58	166,13	4,02	20905	0,64
1	Retroexcavadora	66	AIRMAN	AX 40-U	33,5	0,5	2000	TIER1	0,29	2,35	7,23	0,405	595	0,018	0,32	2,59	8,00	0,45	658	0,02
1	Retroexcavadora	1320	JHON DEERE	50D	38	0,5	2008	TIER4	0,28	1,55	4,73	0,112	595	0,018	7,01	38,83	118,64	2,81	14932	0,46
1	Retroexcavadora	1056	HITACHI	ZX200	147	0,5	2012	TIER4	0,13	0,09	2,50	0,076	536	0,016	10,21	6,78	194,09	5,88	41597	1,27
1	Compresor	44	KAISER	57	48,3	0,5	2008	TIER4	0,28	1,53	4,73	0,107	589	0,018	0,30	1,63	5,02	0,11	626	0,02
1	Minicargador	2376	BOBCAT	s650	75	0,45	2010	TIER3	0,19	3,67	4,59	0,211	596	0,018	15,50	294,02	368,33	16,9	47766	1,46
EMISIONES TOTALES															47,57	401,38	944,41	32,7	144533	4,43
PROYECTO 8																				
1	Retroexcavadora	1848	JCB	214	80	0,5	2003	TIER1	0,55	3,67	8,60	0,650	595	0,018	40,68	271,58	635,49	48,0	43947	1,35
1	Excavadora	1792	HITACHI	ZX130	98	0,6	2008	TIER3	0,19	3,68	4,59	0,215	596	0,018	20,37	387,80	484,08	22,6	62764	1,92
1	Excavadora	1600	KOMATZU	PC200	155	0,6	2011	TIER3	0,19	1,34	3,83	0,249	536	0,016	28,74	199,30	569,46	36,9	79718	2,44
1	Volqueta	1792	INTERNACIONAL	7600	350	0,4	2013	TIER4	0,13	0,08	2,50	0,090	626	0,019	33,00	18,91	627,37	22,6	157104	4,82
1	Compresor	1820	PUTZMEISER	T40	68	0,5	2016	TIER4	0,18	2,37	3,00	0,107	590	0,018	11,36	146,61	185,66	6,64	36496	1,12
EMISIONES TOTALES															134,15	1024	2502	136	380028	11,6
PROYECTO 9																				
1	Excavadora	640	LISHIDE	SC 160-C	115	0,6	2014	TIER4	0,13	0,09	2,50	0,076	536	0,016	5,80	3,85	110,41	3,35	23667	0,73
1	Volqueta	800	MACK	DM600S	400	0,4	1974	TIER1	0,71	1,95	14,39	0,435	624	0,019	90,95	249,85	1841,6	55,6	79918	2,45
1	Retroexcavadora	480	HYUNDAI	H940C	95	0,5	2006	TIER2	0,39	3,63	7,19	0,263	595	0,018	8,80	82,77	164,00	6,00	13567	0,42
EMISIONES TOTALES															105,55	336,48	2116,1	64,9	117152	3,59
PROYECTO 10																				
1	Compresor	480	SULLAIR	185	60	0,5	2002	TIER1	0,52	2,38	5,60	0,389	589	0,018	7,52	34,21	80,70	5,60	8477	0,26
1	Excavadora	2304	HITACHI	350	271	0,6	2002	TIER1	0,33	1,17	8,58	0,260	535	0,016	122,40	438,84	3215,1	97,4	200544	6,15
1	Excavadora	2304	HITACHI	120	81	0,6	2006	TIER2	0,39	3,68	7,20	0,225	595	0,018	43,43	412,46	806,48	25,2	66629	2,04
1	Excavadora	1440	HITACHI	120	81	0,6	2004	TIER2	0,39	3,67	7,20	0,219	595	0,018	27,10	256,61	503,84	15,3	41643	1,28
1	Excavadora	1152	HITACHI	ZX60USB-5	53	0,6	2004	TIER2	0,39	3,66	7,20	0,215	595	0,018	14,17	133,98	263,68	7,88	21798	0,67

#	CARACTERÍSTICAS DE LA MAQUINARIA								FACTOR DE EMISIÓN (g/HP-hr)						EMISIONES TOTALES (kg)								
	TIPO DE EQUIPO	(HR)	MARCA	MODELO DEL EQUIPO	(HP)	(FC)	MODELO MOTOR	TECN	HC	CO	NOX	PM	CO2	SO2	HC	CO	NOX	PM	CO2	SO2			
EMISIONES TOTALES														214,63	1276	4869	151	339091	10,3				
PROYECTO 11																							
1	Bomba	1195,6	FORTE	4LD820E-300H	18	0,5	2008	TIER4	0,44	2,18	4,44	0,195	589	0,018	4,72	23,47	47,80	2,09	6338	0,19			
1	Bomba	3136	SCHWING	sp1000	81	0,5	2010	TIER3	0,18	2,41	3,00	0,118	590	0,018	23,40	306,20	381,41	15,0	74907	2,30			
1	Bomba	2548	PUTZMEISER	T40	68	0,5	2010	TIER2	0,37	2,39	4,70	0,158	589	0,018	31,92	207,06	407,55	13,6	51043	1,56			
1	Minicargador	562	BOBCAT	S185	58	0,45	2012	TIER4	0,18	2,37	3,00	0,107	596	0,018	2,69	34,77	44,01	1,57	8738	0,27			
1	Minicargador	456	BOBCAT	S185	58	0,45	2012	TIER4	0,18	2,37	3,00	0,107	596	0,018	2,19	28,20	35,71	1,27	7090	0,22			
EMISIONES TOTALES														64,92	599,71	916,48	33,6	148115	4,54				
PROYECTO 12																							
1	Compresor	840	PUTZMEISER	T40	68	0,5	2013	TIER2	0,37	2,37	4,70	0,149	589	0,018	10,49	67,69	134,26	4,24	16827	0,52			
1	Minicargador	232	botcat serie 5303600098		58	0,45	2009	TIER2	0,39	3,62	7,19	0,260	595	0,018	2,34	21,94	43,55	1,57	3603	0,11			
1	Minicargador	42	botcat serie 5303600098		59	0,45	2012	TIER3	0,39	3,62	7,19	0,258	595	0,018	0,43	4,04	8,02	0,29	664	0,02			
1	Minicargador	77	botcat serie 5303600098		60	0,45	2012	TIER3	0,39	3,62	7,19	0,259	595	0,018	0,80	7,53	14,95	0,54	1237	0,04			
EMISIONES TOTALES														14,06	101,19	200,77	6,64	22331	0,68				
PROYECTO 13																							
1	Compresor	2112	KAISER	M57 N° 050	48	0,5	2007	TIER2	0,28	1,55	4,73	0,265	589	0,018	14,20	78,63	239,91	13,4	29879	0,92			
1	Compresor	288	ATLAS COPCO	185 CFM N°007	49	0,5	2008	TIER2	0,28	1,53	4,73	0,248	589	0,018	1,97	10,83	33,36	1,75	4159	0,13			
1	Compresor	48	INGERSOLL RAND	185 C21	62	0,5	2008	TIER2	0,37	2,37	4,70	0,147	589	0,018	0,55	3,52	6,99	0,22	877	0,03			
1	Grua	144	PYH	R200	136	0,5	2004	TIER2	0,34	0,87	4,10	0,097	530	0,016	3,31	8,50	40,15	0,95	5189	0,16			
1	Grua	352	LINK BELT	LS108	200	0,5	2006	TIER3	0,18	0,75	2,50	0,067	530	0,016	6,47	26,40	88,02	2,37	18672	0,57			
1	Retroexcavadora	300	HITACHI	EX 120	84	0,5	2012	TIER4	0,13	0,24	3,00	0,085	596	0,018	1,66	2,99	37,80	1,08	7508	0,23			
1	Bomba	3456	PUTMEISTER	TK - 70	96	0,5	2013	TIER4	0,13	0,24	3,00	0,084	590	0,018	21,84	39,79	497,98	13,9	97865	3,00			
1	Excavadora	160	CATERPILLAR	305 CR	42	0,6	2003	TIER2	0,29	2,35	7,23	0,325	595	0,018	1,18	9,47	29,17	1,31	2400	0,07			
1	Grua	124	GROVE	RT58D	125	0,5	2002	TIER1	0,34	0,87	5,65	0,197	530	0,016	2,62	6,72	43,82	1,53	4107	0,13			
1	Excavadora	112	LISHIDE	SC210,8	180	0,6	2004	TIER2	0,32	1,14	6,12	0,078	535	0,016	3,92	13,85	74,03	0,94	6475	0,20			
1	Excavadora	50	AIRMAN	AX40U - 3	38	0,6	2002	TIER1	0,29	2,35	7,23	0,323	595	0,018	0,33	2,67	8,25	0,37	679	0,02			

#	CARACTERÍSTICAS DE LA MAQUINARIA							FACTOR DE EMISIÓN (g/HP-hr)						EMISIONES TOTALES (kg)						
	TIPO DE EQUIPO	(HR)	MARCA	MODELO EQUIPO	(HP)	(FC)	MODELO MOTOR	TECN	HC	CO	NOX	PM	CO2	SO2	HC	CO	NOX	PM	CO2	SO2
1	Grua	60	LINK BELT	HSP 8028S	130	0,5	1989	TIER1	0,34	0,87	5,65	0,197	530	0,016	1,32	3,38	22,05	0,77	2067	0,06
1	Grua	480	CENTURY	CN 122	128	0,5	1991	TIER1	0,34	0,87	5,66	0,205	530	0,016	10,42	26,82	173,94	6,30	16280	0,50
1	Excavadora	300	HITACHI	EX 60 - 5	54	0,6	2001	TIER1	0,55	3,63	8,57	0,496	595	0,018	5,33	35,30	83,33	4,82	5779	0,18
1	Excavadora	160	KOMATSU		128	0,6	2011	TIER4	0,13	0,09	2,50	0,076	536	0,016	1,61	1,07	30,72	0,93	6586	0,20
1	Grua	160	GROVE		200	0,5	2008	TIER3	0,18	0,75	2,50	0,066	530	0,016	2,94	11,98	40,00	1,06	8487	0,26
1	Excavadora	480	HITACHI	EX 200 - 5	132	0,6	2006	TIER2	0,36	1,33	6,28	0,140	535	0,016	13,52	50,60	238,55	5,33	20347	0,62
1	Excavadora	192	HITACHI	40 U	35	0,6	2002	TIER1	0,29	2,35	7,24	0,326	595	0,018	1,18	9,47	29,18	1,32	2400	0,07
EMISIONES TOTALES														94,38	341,98	1717,2	58,4	239758	7,35	
PROYECTO 14																				
1	Vibrocompactador	432	Boma	177-D	101	0,4	2011	TIER3	0,18	0,87	2,50	0,137	530	0,016	3,21	15,15	43,64	2,39	9258	0,28
1	Minicargador	576	Bobcat	S185	58	0,45	2007	TIER2	0,39	3,63	7,19	0,263	595	0,018	5,80	54,57	108,14	3,96	8946	0,27
1	Retroexcavadora	1728	Kobelco	Sk70	54	0,5	2004	TIER2	0,39	3,67	7,20	0,280	595	0,018	18,07	171,08	335,90	13,0	27762	0,85
1	Vibrocompactador	5760	Komatsu	JV110AW	133	0,4	2012	TIER4	0,13	0,09	2,50	0,074	531	0,016	40,41	27,20	766,90	22,8	162599	4,98
1	Retroexcavadora	576	Link-Belt	210 X2	157	0,5	2012	TIER4	0,13	0,09	2,50	0,076	536	0,016	5,94	3,94	113,06	3,43	24233	0,74
1	Motoniveladora	576	Volvo		215	0,4	2011	TIER4	0,13	0,08	2,50	0,075	531	0,016	6,51	3,72	123,86	3,71	26285	0,81
1	Vibrocompactador	576	Atas- Dinapac	C3500	102	0,4	2016	TIER4	0,13	0,09	2,50	0,075	531	0,016	3,09	2,05	58,75	1,76	12470	0,38
1	Minicargador	576	Caterpilla	232B	61	0,45	2008	TIER3	0,39	3,63	7,19	0,263	595	0,018	6,10	57,46	113,72	4,15	9408	0,29
1	Minicargador	864	Case	SR200	68	0,45	2015	TIER3	0,39	3,62	7,19	0,260	595	0,018	10,20	95,82	190,13	6,87	15732	0,48
1	Minicargador	720	Bobcat	S185	65	0,45	2012	TIER3	0,39	3,63	7,19	0,261	595	0,018	8,12	76,44	151,47	5,50	12532	0,38
1	Retroexcavadora	144	Komatsu	PC228USL C-3	156	0,5	2010	TIER3	0,19	1,33	3,83	0,239	536	0,016	2,17	14,91	42,96	2,69	6017	0,18
1	Tractor	3456	Kubota	L4400	21,3	0,4	2008	TIER4	0,44	2,21	4,45	0,189	695	0,021	12,95	65,01	130,88	5,55	20471	0,63
1	Minicargador	720	Bobcat	S185	58	0,45	2007	TIER2	0,39	3,63	7,19	0,264	595	0,018	7,25	68,27	135,18	4,97	11182	0,34
1	Minicargador	1152	Bobcat	S186	58	0,45	2007	TIER2	0,39	3,64	7,19	0,268	595	0,018	11,62	109,48	216,33	8,06	17891	0,55
EMISIONES TOTALES														141,43	765,09	2530,9	88,9	364786	11,1	
PROYECTO 15																				
1	Excavadora	960	LINK BELT	210	157	0,6	2011	TIER3	0,19	1,33	3,83	0,244	536	0,016	17,45	120,64	346,01	22,1	48448	1,48
1	Piloteadora	960	CASAGRANDE	B125	160	0,4	2012	TIER4	0,13	0,09	2,50	0,075	531	0,016	8,08	5,36	153,63	4,61	32601	1,00
1	Grua	960	LINK BELT	108b	277	0,5	2014	TIER4	0,13	0,08	2,50	0,075	531	0,016	17,48	10,00	332,44	9,97	70552	2,16
1	Grua	960	SOILMEC	SC-20	160	0,5	2013	TIER4	0,13	0,09	2,50	0,075	531	0,016	10,10	6,70	192,03	5,76	40752	1,25

1	Excavadora	960	HITACHI	ZX 35U-3	28,6	0,6	2013	TIER4	0,28	1,54	4,73	0,108	595	0,018	4,60	25,34	77,90	1,78	9808	0,30
1	Piloteadora	960	SOILMEC	SR-30	160	0,4	2007	TIER3	0,18	0,87	2,50	0,246	530	0,016	11,29	53,61	153,65	15,1	32591	1,00
1	Grua	960	SOILMEC	QUY 50	160	0,5	2007	TIER3	0,18	0,87	2,50	0,142	530	0,016	14,12	67,12	192,09	10,8	40739	1,25
EMISIONES TOTALES															83,12	288,78	1447,7	70,1	275491	8,44

5. Bibliografía

Agency, E. E. (2017). *Air pollution sources*. Denmark.

Agency, U. E. (2013). *Recommended Procedures for Development of Emissions Factors and Use of the WebFIRE Database*.

Agency, US- Environmental Protection. (1995). *Compilation of air pollutant emission factors*.

Ambiente, S. D. (2010). *Plan Decenal de Descontaminación del Aire en Bogotá*. Bogotá.

CAMACOL B&C. (2017). *Estudio de oferta y demanda*. Bogotá.

CAMACOL. (2016). *La construcción alrededor del mundo*. Bogotá.

Canada, E. a. (2016). *Air pollutant emission inventory report 1990-2014*. Gatineau.

CARB. (2018). *California Air Resources Board*. Recuperado el 12 de 11 de 2018, de <https://www.arb.ca.gov/ei/emissiondata.htm>

CARB. (16 de DICIEMBRE de 2010). *California Air Resources Board*. Recuperado el 16 de 11 de 2018, de <https://www.arb.ca.gov/regact/2010/offroadlsi10/offroadlsi10.htm>

CEPAL. (2013). *Estudio sobre los inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero en América Latina*. Santiago de Chile .

CONSTRUDATA. (2012). Recuperado el 9 de Diciembre de 2018, de CONSTRUDATA: <http://www.construdata.com/BancoConocimiento/E/equipopropioalquilado/equipopropioalquilado.asp>

Corporation, R. (1997). *Volumen v - desarrollo de inventarios de emisiones*. Sacramento, CA 95827.

Díaz Lobato, S., & Mayoralas, S. (2012). *Air Pollution and Lung Cancer*.

- DISTRICT, A. Q. (2014). *Summary report: Criteria air pollutants*. San Francisco, California 94109.
- Ecopetrol. (12 de 10 de 2018). *Ecopetrol*. Recuperado el 12 de 10 de 2018, de Ecopetrol: https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/productos-y-servicios/productos/combustible-liquido2/informacion-comercial/monitoreo-calidad-de-los-combustibles!/ut/p/z0/04_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfIjo8ziLQIMHd09DQy9DZwt3QwcjTwsQxw9g5x8A4z0C7IdFQH8
- EEA. (2016). *Inventory management, improvement and QA/QC*.
- EEA, E. E. (2013). *EMEP/EEA Air pollutant emission inventory*. EEA TECHNICAL REPORT.
- ENVIRONMENTAL, D. M. (2006). *Fuel use and emissions from non-road machinery in Denmark from 1985–2004 – and projections from 2005-2030*.
- EPA . (13 de 11 de 2018). *United States Environmental Protection Agency*. Recuperado el 13 de 11 de 2018, de <https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/national-emissions-inventory-nei>
- EPA. (1991). *Non road and engine and vehicle emission study*.
- EPA. (1991). *Non road and engine and vehicle emission study*.
- EPA. (30 de 05 de 2007). *United States Environmental Protection Agency*. Recuperado el 10 de 12 de 2018, de United States Environmental Protection Agency: https://archive.epa.gov/epapages/newsroom_archive/comunicadosdeprensa/bce0c7c38dceac98852572eb0062452a.html
- EPA. (16 de agosto de 2017). *United States Environmental Protection Agency*. Recuperado el 02 de 12 de 2018, de United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/regulations-emissions-nonroad-vehicles-and-engines>
- ICCT. (2016). *Non-road emission inventory model methodology*.
- INECC. (2014). *Caracterización de las emisiones de fuentes móviles fuera de carretera con motor diésel en México con y sin filtro de partículas*. México DF: D. R. © Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- IPCC . (2013). *Climate Change 2013 The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (T. Stocker, & D. Qin , Edits.) New York: Cambridge University Press.
- Madden, M. (2016). A paler shade of green? The toxicology of biodiesel emissions: Recent findings from studies with this alternative fuel. *Biochimica et biophysica acta* , 2856–2862.
- México, S. d. (2018). *Inventario de Emisiones de la Ciudad de México 2016*. Ciudad de México: D.R. © 2018.
- Minvivienda. (2014). *Plan de acción sectorial de mitigación para el sector vivienda y desarrollo territorial*. Bogotá.
- SDA. (2017). *Documento técnico de soporte modificación del Decreto 9 de 2011*. Bogotá.
- SENA, C. (2015). *Proyecto de investigación del sector de la construcción de edificaciones en Colombia*. Bogotá.

- Sykes, O., & Walker, E. (2016). The neurotoxicology of carbon monoxide- Historical perspectiva and review . *CORTEX* , 440-448.
- Taylor, E., & McMillan, A. (2013). *Air quality management* . Springer.
- UN. (2018). Global estatus report.
- UN. (2017). *Global status report - Environmental programe*.
- US- EPA, U. S. (2010). *Exhaust and crankcase emission factors for nonroad engine modeling-compression ignition*. EPA-420-R-10-018.
- US-EPA. (14 de Noviembre de 2018). *Environmental Protection Agency*. Recuperado el 3 de Diciembre de 2018, de Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>
- US-EPA. (25 de Octubre de 2018). *Environmental Protection Agency*. Recuperado el 03 de Diciembre de 2018, de Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/carbon-monoxides-impact-indoor-air-quality>
- US-EPA. (28 de Junio de 2018). *United States Environmental Protection Agency*. Recuperado el 3 de Diciembre de 2018, de United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics#what%20is%20so2>
- WHO. (2005). *Air quality guideline*.
- WHO. (2016). *WHO expert consultation: Available evidence for the future update of the WHO Global Air Quality Guidelines (AQGs)*. Bonn.
- Yu, T., Wang, W., Ciren, P., & Zhu, Y. (2016). Assesment of Human Health Impact from Exposure to Multiple Air Pollutan in China on Satellite Observations. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* , 542-553.