

**DESARROLLO DE INVENTARIOS DE EMISIONES
DE GASES EFECTO INVERNADERO, UNA
HERRAMIENTA DE APOYO EN LA AGENDA LOCAL
DE CAMBIO CLIMÁTICO: CASO SAN JOSÉ**

**GREENHOUSE GAS EMISSIONS INVENTORIES AS A
TOOL THAT SUPPORTS THE CLIMATE CHANGE LOCAL
AGENDA: SAN JOSE EXPERIENCE**

*Jorge Herrera-Murillo*¹

*José Félix Rojas-Marín*²

*Andrea Quirós-Fallas*³

*Carolina Balma-Montero*⁴

*Deivis Anchía-Leitón*⁵

Universidad Nacional de Costa Rica, Costa Rica

-
- 1 Académico y coordinador del Laboratorio de Análisis Ambiental, Universidad Nacional de Costa Rica (UNA). Email: jorge.herrera.murillo@una.cr
 - 2 Académico e investigador del Laboratorio de Análisis Ambiental, Universidad Nacional de Costa Rica (UNA). Email: jose.rojas.marin@una.cr
 - 3 Estudiante de Licenciatura en Química Industrial, Universidad Nacional de Costa Rica (UNA). Email: andreaqf.10@gmail.com
 - 4 Asistente de investigación del Laboratorio de Análisis Ambiental, Universidad Nacional de Costa Rica (UNA). Email: balmame@outlook.es
 - 5 Asistente de investigación del Laboratorio de Análisis Ambiental, Universidad Nacional de Costa Rica (UNA). Email: deivis.anchia.leiton@una.cr

Fecha de recepción: 11 de julio de 2016

Fecha de aceptación: 07 de octubre de 2016

RESUMEN

Aplicando un enfoque metodológico adaptado de las guías del IPCC y el protocolo GHG para ciudades, se elaboró un inventario de emisiones de gases efecto invernadero para el cantón de San José, lo que representa un insumo base para orientar la agenda local en materia de cambio climático. Durante el año 2011 se generaron en total 820 295 toneladas de CO₂ equivalente. En orden de importancia, las fuentes móviles aportaron un 84,7% de las emisiones, seguidas del consumo de electricidad en el sector residencial y general (7,7%) y las fuentes fijas del sector industrial (1,4%). Las emisiones de tipo directo contribuyeron a un 90,9% del inventario mientras que las indirectas (alcance 2) representan el 9,1%. En promedio cada vivienda del cantón genera alrededor de 0,41 Ton de CO₂ eq/año sin embargo, este indicador varía desde 0,66 Ton de CO₂ eq/año en la Uruca hasta 0,33 Ton de CO₂ eq/año en Hatillo.

Palabras clave: cambio climático, gases efecto invernadero, inventarios de emisiones, San José.

ABSTRACT

San José greenhouse gas emissions were estimated applying a methodological approach adapted from the IPCC guidelines and the GHG protocol for cities such as basic input to guide the local agenda on climate change. In total during the year 2011, 820 295 tons of equivalent CO₂ were generated. In order of importance, mobile sources accounted for 84.7 % of emissions, followed by electricity consumption in the residential sector as a whole (7.7%) and fixed sources of industrial sector (1.4%). Direct emissions contributed to 90.9 % of the inventory while indirect (Scope 2 and 3) represent 9.1%. On average, each home generates about 0.41 tons CO₂ eq / year; however, this indicator ranges from 0.66 tons of CO₂ eq / year in Uruca to 0.33 tons of CO₂ eq / year in Hatillo.

Keywords: Climate Change, greenhouse gases, emission inventories, San José.

Introducción

El clima a escala mundial ha evolucionado desde siempre y lo ha hecho de forma natural, sin embargo, los niveles de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera han aumentado rápidamente desde la era industrial como producto de la actividad humana. Esto ha generado una nueva fuente capaz de impulsar el cambio climático, el cual trae consigo repercusiones significativas sobre la estructura y función del medio ambiente, la sociedad y la economía de las naciones (Peters y Hertwich, 2008).

Según datos reportados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por su siglas en inglés), las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) eran de 391 ppmv, 1 803 ppbv y 324 ppbv, respectivamente durante el año 2011, excediendo los valores preindustriales en aproximadamente 40%, 150% y 20%, respectivamente. El forzamiento radiativo provocado por las emisiones de gases de efecto invernadero mezclados (CO₂, CH₄, N₂O y halocarbonos) de 2011, en relación con el año 1750, es de 3,00 W m⁻² (IPCC, 2013). Lo anterior demuestra que, si no se realizan esfuerzos por

estabilizar las emisiones de GEI, las temperaturas globales van a incrementar entre 1,8°C y 4°C en el año 2100 (Wang y Wang, 2015).

Si bien es cierto los países en vías de desarrollo representan sólo un 10% de las emisiones en comparación con las que se producen a nivel mundial, son los más propensos a sufrir los impactos negativos que consigo puede traer el cambio climático, ya que la falta de recursos y su capacidad de reacción los convierte en territorios especialmente vulnerables ante situaciones adversas provocadas por este fenómeno (IPCC, 2013). Con el fin de anticiparse a este tipo de escenarios, resulta de vital importancia la generación y establecimiento de una serie de medidas que permitan mitigar las emisiones netas de carbono, utilizando como base el desarrollo de inventarios de emisiones de GEI, los cuales faciliten no solo la identificación y contabilización del aporte de principales fuentes emisoras de un espacio geográfico, sino determinar el potencial real de su reducción.

Por otra parte, los estudios para la evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero permiten georreferenciar, diagnosticar, clasificar y cuantificar las fuentes que contribuyen en mayor proporción a la generación de emisiones en un área, y de esta forma realizar un seguimiento espacial y temporal de los niveles emitidos (Moss et al., 2008; Wiedmann, 2009).

Como parte de la Estrategia Nacional de Cambio Climático y la Iniciativa Paz con la naturaleza, la presidencia de la República de Costa Rica lanzó el compromiso internacional de convertirse en un país carbono neutral para el año 2021. El concepto de la carbono neutralidad es aún más amplio que la contabilización de las emisiones, ya que involucra las estrategias de reducción de GEI. Para alcanzar dicha meta a nivel país, una vez que a la cantidad emitida se sustraiga de la reducida, la restante debe ser eliminada a través de programas de educación y concientización ambiental, bonos de carbono, entre otros, y con esto llevar las emisiones de carbono a cero (MINAE, 2009).

El Ministerio de Ambiente y Energía ha creado directrices como el Acuerdo-36-2012-MINAET, en donde se oficializa el Programa País Carbono Neutralidad, estableciendo los lineamientos bajo los cuales se deben elaborar los inventarios de GEI. En una primera instancia el programa se ha enfocado en incorporar organizaciones del sector industrial y comercial, sin embargo la iniciativa ha despertado el interés de los gobiernos locales a nivel nacional, quienes lejos de buscar una certificación institucional han tratado de participar bajo un enfoque de ordenamiento territorial y crecimiento urbano.

Para lograr una contabilización de las emisiones de GEI a nivel local, se deben primeramente definir los límites o condición frontera del inventario, donde se incluya entre otros: el área geográfica a ser incluida, el lapso de tiempo, los tipos de gases y las fuentes de emisión a ser cubiertas, las cuales pueden ser clasificadas en 6 grandes categorías: energía estacionaria, transporte, residuos, procesos industriales, agricultura y otras emisiones que ocurren fuera de los límites territoriales del inventario como resultado de la actividad del cantón (WRI, 2014).

El presente artículo sistematiza la experiencia desarrollada durante la elaboración del inventario de emisiones de gases efecto invernadero en el cantón de San José. La cual generó para la Municipalidad de San José una herramienta que le permite y facilita el proceso de toma de decisiones, y el desarrollo de estrategias eficientes en materia de mitigación al cambio climático.

Metodología

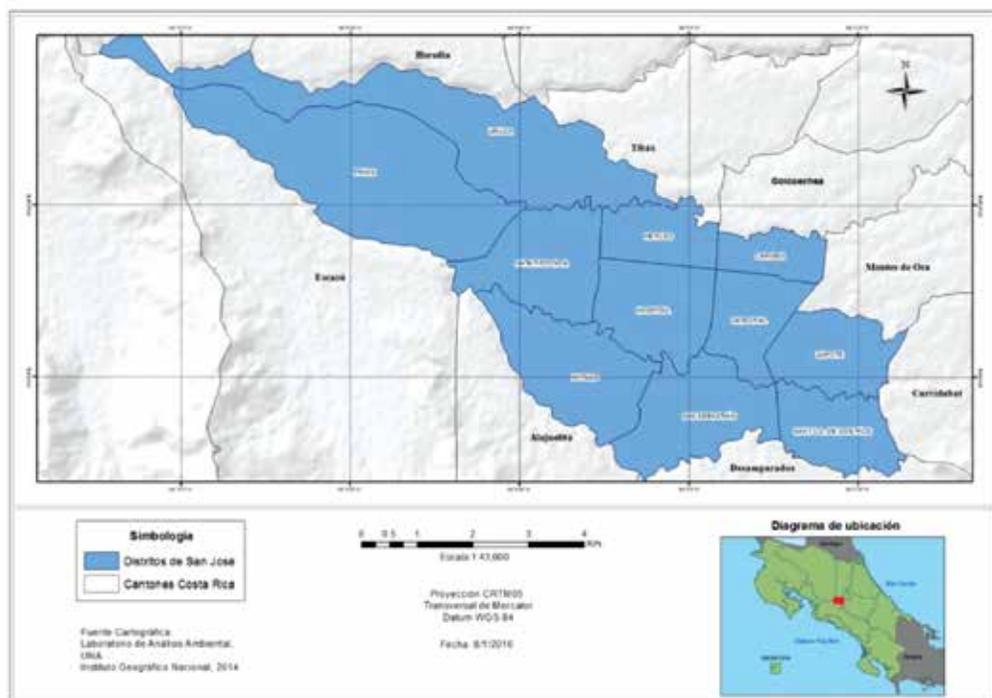
Descripción del área de estudio

El área de estudio se encuentra delimitada geográficamente por los límites políticos del cantón de San José, el cual está conformado por 11 distritos: Carmen, Merced, Hospital, Catedral, Zapote, San Francisco de Dos Ríos, La Uruca, Mata Redonda, Pavas, Hatillo y San Sebastián (figura 1).

El cantón cuenta con una superficie de 44,62 km², representando tan sólo un 0,09% del territorio nacional sin embargo, a pesar de su relativo escaso tamaño concentra el 7,7% de la población del país, siendo en la actualidad uno de los cantones con más habitantes en el territorio nacional. De acuerdo con el Observatorio Municipal, el 90% de su área se encuentra urbanizado, conformado principalmente por un 24,65% de zonas residenciales, 7,75% de áreas mixtas residencia-comercio, 12,23% de comercios y servicios, 9,77% de industria y comercio, 11,10% de uso institucional, 6,72% de zonas verdes y 19,9% de vialidades. El porcentaje restante lo conforman espacios no urbanizables cercanos a los ríos (MSJ, 2011).

Las principales actividades económicas desarrolladas por el cantón se dividen en cuatro grandes categorías: los comercios, talleres (mecánica, ebanistería), servicios (gasolineras, tiendas, centros de fotocopiado, entre otros) y el sector industrial.

Figura 1. Ubicación geográfica, Área de estudio, 2016.



Fuente: Elaboración propia (2017).

Definición de las condiciones del inventario

Se procedió a determinar la condición frontera del inventario de emisiones, según lo establecido en el cuadro 1.

Cuadro 1. Descripción de las características del inventario desarrollado en el cantón de San José.

Condición	San José
Alcance espacial	Límites político-administrativos del cantón
Resolución espacial	Distrito
Año Base	2011
Resolución Temporal	Anual
Gases a considerar	Dióxido de carbono (CO ₂), metano (CH ₄), óxido nitroso (N ₂ O), Perfluorocarbonos (PFC), Hidrofluorocarbonos (HFC) y hexafluoruro de azufre (SF ₆)

Fuente: Elaboración Propia

Estimación de las emisiones por categoría de fuente

Las fuentes correspondientes al alcance 1 incluyen emisiones de GEI localizadas dentro de los límites del cantón mientras que en el alcance 2 se contabilizan aquellas que ocurren fuera del territorio municipal como consecuencia del consumo cantonal de energía eléctrica, generación de vapor o calor. Por último, el alcance 3 se refiere a otras emisiones que ocurren fuera del cantón como parte de las actividades desarrolladas en él.

Alcance 1

Aguas Residuales

Para el cálculo de las emisiones generadas por el tratamiento de aguas residuales se realizó una subdivisión en tres categorías: residenciales, comerciales e industriales. Para el análisis de esta fuente se utilizó como información base el número de viviendas existentes por distrito y el tipo de disposición de las aguas residuales reportada en la Encuesta Nacional de Hogares del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC). Para el segmento comercial, se empleó la base de datos de patentes mientras que en el caso industrial, se analizaron los reportes operacionales de aguas residuales presentados ante el Ministerio de Salud. La metodología de cálculo de las emisiones se muestra en el cuadro 2.

Emisiones por uso de equipos que contienen refrigerantes

Se seleccionó una muestra representativa (5%) de los comercios e industrias existentes en el cantón, para lo cual se tomó como punto de partida la base de datos de patentes del municipio, la cual se dividió en 28 categorías distintas dependiendo de los patrones de uso de refrigerantes y se distribuyó de acuerdo al número de distritos. A cada uno de los establecimientos seleccionados se les aplicó una encuesta de campo con el fin de obtener información acerca del uso de equipos de refrigeración y aires acondicionados. En el cuadro 3, se presenta una descripción detallada de la metodología utilizada.

Extintores

A partir de las encuestas aplicadas en el sector comercial e industrial, se determinó la cantidad de estos que cuentan con extintores que utilizan

como agente químico CO_2 , el cálculo de sus emisiones se efectúa mediante la siguiente fórmula:

$$E_{CO_2, eq} = DA \times PCG \quad (7)$$

Fuente: Elaboración Propia

Dónde:

DA=Datos de actividad correspondiente al peso de cada uno de los extintores, kg.

PCG= Potencial de Calentamiento Global asociado.

Para efectos del cálculo de las emisiones se asumió que la carga del extintor se utilizaba totalmente durante el año base del inventario.

Cuadro 2. Metodología empleada para la estimación de las emisiones de GEI generadas por el tratamiento de aguas residuales.

Subcategoría	Datos de actividad	Metodología de cálculo
Residencial	-Cantidad de viviendas por distrito según la disposición de las aguas residuales (tanque séptico, letrinas, alcantarillado, vertido a ríos) (INEC) -Ocupación promedio de viviendas por distrito (INEC) -Valores de MCF por defecto para las aguas residuales domesticas del IPCC (Anexo 1). -Dato de Capacidad máxima de producción de CH_4 (B_o) por defecto para las aguas residuales domésticas del IPCC (Anexo 2) -Valor de DBO per cápita del IPCC (Anexo 3), utilizando la categoría "Asia, Oriente Medio, América Latina".	Para la estimación de dichas emisiones se utilizaron las siguientes fórmulas: $Kg\ DBO/año = P \times DBO_5 \times 0,001 \times 365$ (1) Fuente: IPCC, 2006. Donde: P= población que utiliza el sistema de disposición, hab. DBO_5 = DBO per cápita específica para cada región, kg DBO/hab*día. $Emis\ de\ CH_4 = Kg\ DBO/año \times MCF \times B_o$ (2) Fuente: IPCC, 2006. Dónde: MCF= Factor de corrección del metano. B_o = Capacidad máxima de producción de CH_4 .

Subcategoría	Datos de actividad	Metodología de cálculo
Comercial	<p>-Cantidad de comercios existentes según la base de datos del Departamento de Patentes</p> <p>-Para San José, se asumió que en promedio todos los comercios tenían al menos un servicio sanitario que dispone sus aguas en un tanque séptico y alcantarillado, respectivamente.</p> <p>- Se realizó una encuesta vía telefónica por medio de la cual se determinó la cantidad de visitantes promedio que frecuentan los establecimientos por día.</p> <p>-Valores de MCF por defecto para las aguas residuales domesticas del IPCC (Anexo 1).</p> <p>-Dato de Capacidad máxima de producción de CH₄ (Bo) por defecto para las aguas residuales domésticas del IPCC (Anexo 2)</p> <p>-Valor de DBO per cápita del IPCC (Anexo 3), utilizando la categoría "Asia, Oriente Medio, América Latina".</p>	<p>Para la estimación de dichas emisiones se utilizaron las siguientes fórmulas:</p> <p>$Kg\ DBO/año = V \times DBO_5 \times 0,001 \times 312$ (3)</p> <p>Fuente: IPCC, 2006.</p> <p>Donde: V= cantidad de visitantes del comercio por año, hab. DBO₅= DBO per cápita específica para cada región, kg DBO/hab*día. 312 = cantidad promedio de días laborados por año</p> <p>$Emis\ de\ CH_4 = Kg\ DBO/año \times MCF \times B_o$ (4)</p> <p>Fuente: IPCC, 2006.</p> <p>Dónde: MCF= Factor de corrección del metano. B_o = Capacidad máxima de producción de CH₄.</p>
Industriales	<p>-Datos de caudal y demanda bioquímica de oxígeno obtenidos de los reportes operacionales presentados por los entes generadores al Ministerio de Salud.</p> <p>-Valores de MCF por defecto para las aguas residuales industriales" del IPCC (Anexo 4).</p> <p>-Dato de capacidad máxima de producción de CH₄ (Bo) por defecto para las aguas residuales del IPCC (Anexo 2)</p>	<p>$Kg\ DBO/semestre = \left(\frac{DBO \times Q \times 1000}{1000\ 000}\right) \times d$ (5)</p> <p>Fuente: IPCC, 2006.</p> <p>Donde: DBO= Demanda bioquímica de oxígeno, mg/L. Q= Caudal promedio, m³/d. d= Cantidad de días (trim/sem): Calculo de los días con respecto al periodo de entrega de los Reportes Operacionales.</p> <p>$CH_4 = Kg\ DBO/año \times MCF \times B_o$ (6)</p> <p>Fuente: IPCC, 2006.</p> <p>Donde: MCF= Factor de corrección del metano. B_o = Capacidad máxima de producción de CH₄.</p>

Fuente: Elaboración propia (2017).

Cuadro 3. Metodología utilizada para la estimación de las emisiones de GEI generadas por el uso de sustitutos fluorados para sustancias que agotan la capa de ozono en equipos refrigerantes y aires acondicionados en el sector comercial.

Equipo	Información obtenida de la encuesta	Metodología de cálculo
Aires Acondicionados	<ul style="list-style-type: none"> -Cantidad de aires acondicionados instalados y sustituidos durante el año base. -Número y frecuencia de recargas de refrigerante realizadas durante el año base. -Existencia de procedimientos de recuperación de refrigerantes. -Tipo de refrigerante -Masa de carga de refrigerante contenida en los equipos. -Recargas realizadas en el periodo - Mezclas de CFC y HCFC en aires acondicionados y refrigeración” del IPCC - Estimaciones para la carga, vida útil y factores de emisión en los sistemas de refrigeración y aire acondicionado” del IPCC (Anexo 8) 	$Masa_{ref} = \frac{\% \text{ Composición}_{refrigerante}}{100} \times Carga R \quad (8)$ <p>Fuente: IPCC, 2006.</p> <p>Donde: Composición refrigerante= Porcentaje respectivo de cada refrigerante, %. Carga R= masa del refrigerante contenido en el equipo, kg.</p> $ECO_2eq = Masa_{ref} \times FE \times PCG_{ref} \quad (9)$ <p>Fuente: IPCC, 2006.</p> <p>Donde: Masa_{refrigerante} = Masa de cada componente del refrigerante emitido, Kg. FE= Factor de emisión establecido para aire acondicionado, equipos de refrigeración y congeladores, respectivamente. PCG =Potencial de calentamiento global asociado a cada contaminante.</p>
Refrigeradoras	<ul style="list-style-type: none"> -Tipo de refrigerante -Masa de carga de refrigerante utilizada -Recargas realizadas en el periodo - Mezclas de CFC y HCFC en refrigeración comercial mediana y grande del IPCC - Estimaciones para la carga, vida útil y factores de emisión en refrigeración comercial mediana y grande del IPCC 	
Congeladores	<ul style="list-style-type: none"> -Tipo de refrigerante -Masa de carga de refrigerante utilizada -Recargas realizadas en el periodo - Mezclas de CFC y HCFC en congeladores del IPCC. - Estimaciones para la carga, vida útil y factores de emisión en congeladores del IPCC. 	

Fuente: Elaboración Propia (2017).

Consumo de combustible en residencias, comercios y sector público.

La estimación de las emisiones generadas por estas fuentes se estimó utilizando como insumo el Balance Energético correspondiente al año base del inventario así como los datos de la Encuesta Nacional de Hogares del INEC. Los detalles de la metodología se indican en el cuadro 4.

Cuadro 4. Metodología utilizada para la estimación de las emisiones de GEI generadas por consumo de combustible en residencias, comercios y sector público.

Sector	Información obtenida	Metodología de cálculo
Residencial	-Cantidad de viviendas existentes por distrito que utilizan un tipo específico de combustible (INEC) -Cantidad de viviendas existentes a nivel nacional que utilizan un tipo específico de combustible (INEC) -Consumo nacional por tipo de combustible para el sector residencial (Dirección Sectorial Energía)	$Comb. consumido = Comb\ cons\ C.R \times \frac{viviendas\ por\ distrito}{viviendas\ totales} \quad (10)$ Fuente: IPCC, 2006. $Emisiones\ comb.\ consumido = Consumo\ (Kg\ o\ L) \times FE$ Fuente: IPCC, 2006. Donde: FE= Factor de emisión nacionales (IMN) e internacionales (IPCC), según corresponda.
Comercial	-Cantidad de comercios existentes por distrito. -Cantidad de comercios existentes a nivel nacional (INEC). -Consumo nacional por tipo de combustible para el sector comercial (Dirección Sectorial Energía)	$Comb. consumido = Comb\ cons\ C.R \times \frac{Comercios\ por\ distrito}{Comercios\ totales} \quad (11)$ Fuente: IPCC, 2006. $Emisiones\ comb.\ consumido = Consumo \times FE \quad (12)$ Fuente: IPCC, 2006. Donde: FE= Factor de emisión nacionales (IMN) e internacionales (IPCC), según corresponda.
Instituciones Públicas	-Cantidad de empleados que laboran en instituciones públicas en el cantón (INEC) -Cantidad de empleados públicos a nivel nacional (INEC). -Consumo nacional por tipo de combustible para el sector público (Dirección Sectorial Energía)	$Comb. consumido = Comb\ cons\ C.R \times \frac{Empleados\ públicos\ por\ cantón}{Empleados\ públicos\ totales} \quad (13)$ Fuente: IPCC, 2006. $Emisiones\ comb.\ consumido = Consumo\ (Kg\ o\ L) \times FE \quad (14)$ Fuente: IPCC, 2006. Donde: FE= Factor de emisión nacionales (IMN) e internacionales (IPCC), según corresponda.

Fuente: Elaboración propia (2017).

Gestión del ganado y el estiércol

Se utilizó la metodología establecida por el IPCC (2006) en su capítulo de Agricultura. Para la obtención de las emisiones por la fermentación entérica, se multiplica la población animal, obtenida del Censo Agrícola del INEC, por el factor de emisión correspondiente, de la siguiente manera:

$$\mathbf{Emisiones\ Fermentación\ entérica = DA \times FE \times PCG} \quad (15)$$

Donde:

DA= población animal por subcategoría, cabezas.

FE= Factor de emisión, kg CH₄ cabeza⁻¹año⁻¹.

PCG= Potencial de Calentamiento Global del metano

Se utilizaron los factores de emisión correspondiente a países en desarrollo.

La generación de emisiones producto de la gestión del estiércol se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$\mathbf{Gestión\ del\ estiércol}_{CH_4} = DA \times FE \times MCF \times PCG \quad (16)$$

Donde:

DA= población animal por subcategoría, cabezas.

FE= Factor de emisión, kg CH₄ cabeza⁻¹año⁻¹.

MCF=Factor de corrección de metano.

PCG= Potencial de Calentamiento Global.

El factor de emisión establecido por el IPCC depende de la temperatura del lugar por lo que se consultó al IMN para obtener la temperatura promedio para el cantón. Además, el dato de Factor de Corrección del Metano (MCF) fue obtenido del manual de IPCC (2006). Con respecto a las emisiones de óxido nitroso a partir de la gestión del estiércol se utilizaron los siguientes valores por defecto del IPPC (2006): datos de excreción de nitrógeno, sistemas de gestión de estiércol y la masa típica por animal. La fórmula se aplicó de la siguiente manera:

$$N_{EX(T)} = N_{índice(T)} \times \frac{TAM}{1000} \times 365 \quad (17)$$

Donde:

$N_{ex(T)}$ = excreción anual de N para la categoría de ganado T,
kg N animal⁻¹ año⁻¹

$N_{indice(T)}$ = tasa de excreción de N por defecto, kg N (1000 kg
masa animal)⁻¹ día⁻¹

$TAM_{(T)}$ = masa animal típica para la categoría de ganado T,
kg animal⁻¹

Posteriormente, el dato de excreción anual de N se multiplica por un factor de emisión dependiendo de la categoría del animal, tomando en cuenta el potencial de Calentamiento Global. Además por el número de cabezas de dicha categoría para obtener las toneladas de CO₂ eq correspondientes de cada una.

Hornos y calderas

Se utilizó la base de datos de Reportes Operacionales del Ministerio de Salud para extraer la cantidad de hornos y calderas que operan en el cantón. Las emisiones se calcularon multiplicando el dato de caudal de los gases emitidos por la concentración de los GEI presentes en los mismos.

Flota vehicular

Las emisiones provenientes de esta fuente fueron determinadas para: automóviles, taxis, autobuses, motocicletas, carga liviana y carga pesada. Para esto se calculó la cantidad de vehículos para el cantón con la siguiente ecuación:

$$Cantidad\ de\ veh\ic\ulos_E = Cantidad\ de\ veh\ic\ulos_{FG} \times \frac{Consumo\ de\ combustible_G}{Consumo\ de\ combustible_{CR}} \quad (18)$$

Donde:

Cantidad de vehículos_G = número de vehículos en el cantón

Cantidad de vehículos_{CR} = número de vehículos Costa Rica.

Consumo de combustible_G = consumo de combustible en el cantón (L).

Consumo de combustible_{CR} = consumo de combustible en Costa Rica (L).

Posteriormente se multiplicó por los kilómetros recorridos promedio para el cantón dependiendo del tipo de combustible y vehículo, tomado de la Encuesta de recorridos de la Dirección Sectorial Energía. Los factores de emisión asociados a cada contaminante fueron extraídos del Registro de emisiones de Gases de Efecto Invernadero del Distrito Federal (2012).

$$\text{Toneladas de CO}_2\text{eq.} = \text{Cantidad de vehículos}_{SI} \times KR \times FE \times PCG \quad (19)$$

Donde:

KR= kilómetros recorridos (km).

FE= factor de emisión asociado a cada contaminante (g/km).

Las fuentes móviles generan mayoritariamente emisiones de dióxido de carbono derivado del proceso de combustión. Para el caso del metano y el óxido nitroso, se tomaron en cuenta aquéllas que se generan cuando el vehículo está en marcha y las que se originan cuando se enciende el motor en frío, asumiendo que esto ocurre en promedio unas tres veces al día.

Transporte no Convencional

Para el caso del transporte ferroviario y el transporte aéreo se solicitó la información referente al consumo de combustible utilizado al Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER) y a la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE), responsable de la distribución de combustible en el Aeropuerto Tobías Bolaños. Una vez obtenidos los datos se trasladan a Terajulios (TJ) y se multiplicaron por el factor de emisión del IPCC para ferrocarriles y transporte aéreo.

Residuos sólidos

Con el fin de estimar las emisiones procedentes de la descomposición de los residuos sólidos se toman los datos de la cantidad de viviendas por distrito, el promedio de ocupantes por vivienda, el porcentaje de personas que dan tratamiento biológico a sus residuos según datos del censo (INEC 2011) y la tasa de generación nacional del año 2011.

Así mismo los valores del contenido de carbono orgánico degradable de los residuos húmedos por defecto y el MCF se tomaron de la categoría de “Sitios semiaeróbicos gestionados de eliminación de desechos sólidos”

del anexo 6 de la metodología del IPCC. El cálculo de dichas emisiones se obtiene de las siguientes fórmulas:

$$DDOC_m = W \times DOC \times DOC_f \times MCF \quad (20)$$

Fuente: IPCC, 2006.

Donde:

W=Masa de los desechos depositados, kg.

DOC= Carbono orgánico degradable durante el año de deposición, C/kg.

DOC_f=Fracción de DDOC_m que puede descomponerse (fracción).

MCF= Factor de corrección de CH₄ para la descomposición aeróbica durante el año de deposición (fracción).

$$L_o = DDOC_m \times F \times \frac{16}{12} \quad (21)$$

Fuente: IPCC, 2006.

Dónde:

L_o= Potencial de generación de CH₄, kg CH₄

DDOC_m = Masa del DOC disuelto depositado, kg.

F= Fracción de CH₄ en el gas de vertedero generado.

16/12= Cociente de pesos moleculares, CH₄/C.

$$Emisiones\ de\ CO_2\ eq.\ al\ año = \frac{L_o \times PCG}{1000} \quad (22)$$

Fuente: IPCC, 2006.

Donde:

L_o= Potencial de generación de CH₄, kg CH₄.

PCG= Potencial de calentamiento global correspondiente al metano.

Alcance 2

Energía

Para el cálculo de emisiones por esta fuente, se solicitó a la Compañía Nacional de Fuerza y Luz, los datos de consumo mensual de electricidad para las siguientes categorías sector industrial, comercial, residencial, alumbrado público y el sector público. Es importante mencionar que dicha institución manifestó que la red no cuenta con transformadores que contengan SF₆ o mixtos (SF₆-Aceite dieléctrico), por lo tanto estas no son contempladas en el presente inventario. El cálculo de las emisiones para el sector energía se realizó de la siguiente manera:

$$\text{Emisiones CO}_2 \text{ eq. al año} = DA \times FE \quad (23)$$

Fuente: IPCC, 2006.

Dónde:

DA=Dato de actividad (kWh/mes)

FE= Factor de emisión (kg CO₂ e/KWH), tomado del IMN (2014).

Estimación de la incertidumbre

Para la estimación de incertidumbre se utilizó el método de propagación de error para combinar las dispersiones planteadas para Factor de Entrada/Emisión y Actividad (determinadas como mínimo y máximo). Se asumió una distribución normal logarítmica para establecer la distribución de probabilidad. Las estimaciones siguen en buena medida las directrices propuestas por IPCC, 2000 y Pulles et al., 2006.

Resultados

Tal como se puede observar en el cuadro 6, las emisiones totales de GEI para el cantón de San José registradas durante el año 2011 corresponden a 820 295 toneladas de CO₂ equivalente. Las principales fuentes de emisión en orden de importancia provienen de las fuentes móviles (84,7%), el consumo de electricidad en el sector residencial y general (7,7%) y las fuentes fijas del sector industrial (1,4%). Las emisiones de tipo directo contribuyen a un 90,9% del inventario mientras que las indirectas (alcance 2) representan el 9,1%. De acuerdo con los datos de población reportados

por el INEC, en el cantón de San José, habitan 325 155 personas, lo que implica una tasa neta de emisión de 2,52 Ton CO₂ e/año, la cual resulta inferior al valor reportado para otras urbes como la Ciudad de México, 3,47 Ton CO₂ e/año (SEDEMA, 2013).

Cuadro 6. Emisiones de GEI generadas en el cantón de San José durante el año 2011.

Alcance	Fuente	Emisiones (Ton CO ₂ eq)
1	Tratamiento de aguas residuales en sector residencial	4 386
	Tratamiento de aguas residuales en sector comercial	1 682
	Tratamiento de aguas residuales en sector industrial	4 725
	Uso de refrigerantes en sistemas de refrigeración	448,9
	Uso de refrigerantes en sistemas de congelación	358,2
	Uso de refrigerantes en sistemas de aire acondicionado	541,0
	Extintores	80,3
	Transporte Ferroviario	2 166
	Transporte aéreo Aeropuerto Tobías Bolaños	10 722
	Uso de combustibles en el sector residencial	9 873
	Uso de combustibles en el sector comercial	3 294
	Uso de combustible en el sector público	1 123
	Agricultura	88,7
	Fuentes móviles	694 922
	Fuentes Fijas del sector industrial (calderas y hornos)	11 505
Residuos Sólidos	720,3	
2	Consumo de electricidad en el sector residencial	20 815
	Consumo de electricidad en el sector general	42 323
	Consumo de electricidad en el sector industrial	9 270
	Consumo electricidad por alumbrado público	1 252
	Total	820 295
	Incertidumbre	
	Límite Inferior	680 845
	Límite Superior	926 933

Fuente: Elaboración Propia (2017).

En el cuadro 7 se muestran las emisiones generadas por las fuentes móviles en las carreteras de San José, por GEI y tipo de vehículo, en el 2011. Las unidades que operan con gasolina como combustible generan un 59,3% de las emisiones totales atribuibles a las fuentes móviles. Si se determina la contribución por categoría de vehículo, se puede observar que

los automóviles livianos son los mayores emisores con un 48%, seguidos de los carga liviana con un 23% (Gráfico 1).

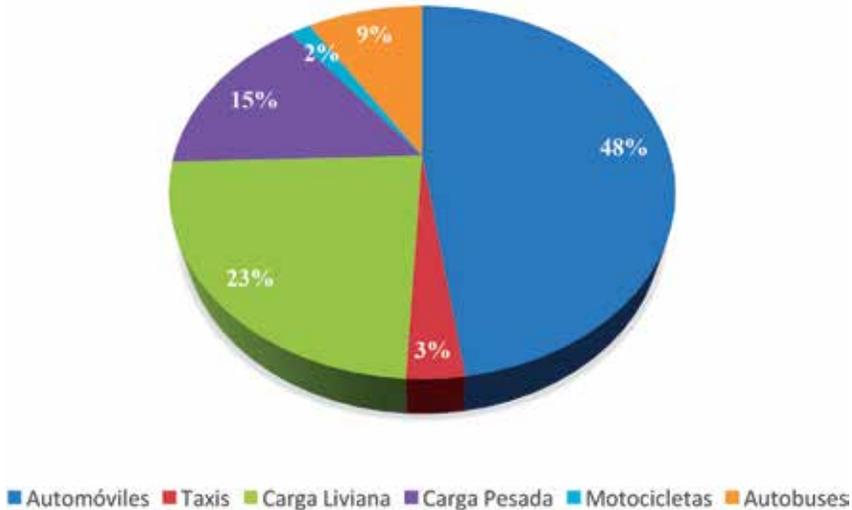
Cuadro 7. Emisiones de GEI generadas por las fuentes móviles que circulan en carretera en San José, 2011.

Categoría	Emisiones (Ton/año)							
	CO ₂		CH ₄		N ₂ O		CO ₂ equiv	
	Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel
Automóviles	302 983	20 619	73,58	0,098	25,24	0,098	312 353	20 652
Taxis	17 071	3 617	2,98	0,019	2,03	0,019	15 277	3 623
Carga Liviana	68 335	94 505	16,49	0,16	4,72	0,16	70 143	94 557
Carga Pesada	1 003	103 359	0,14	0,32	0,09	0,24	1 032,3	103 349
Motocicletas	11 085	5,10	11,88	0,0055	0,89	0,0004	11 610	5,35
Autobuses	545,9	61 625	0,063	0,169	0,050	0,127	562,72	61 668
Total	401 022	283 730	105,12	0,765	33,02	0,639	410 978	283 944

Fuente: Elaboración propia (2017).

Un factor que es importante de considerar es la influencia que tiene la edad promedio del vehículo sobre las emisiones de GEI. Por ejemplo, un automóvil particular gasolina modelo del año emite en promedio 171,7 g de CO₂ por km recorrido en comparación con uno de 15 años que genera 212,4 g de CO₂ por km. Tal como se puede observar en el gráfico 2, una característica particular de la flota vehicular del cantón es la alta antigüedad promedio de sus unidades, por ejemplo para el caso de los automóviles particulares un 72,8% posee más de 10 años de edad.

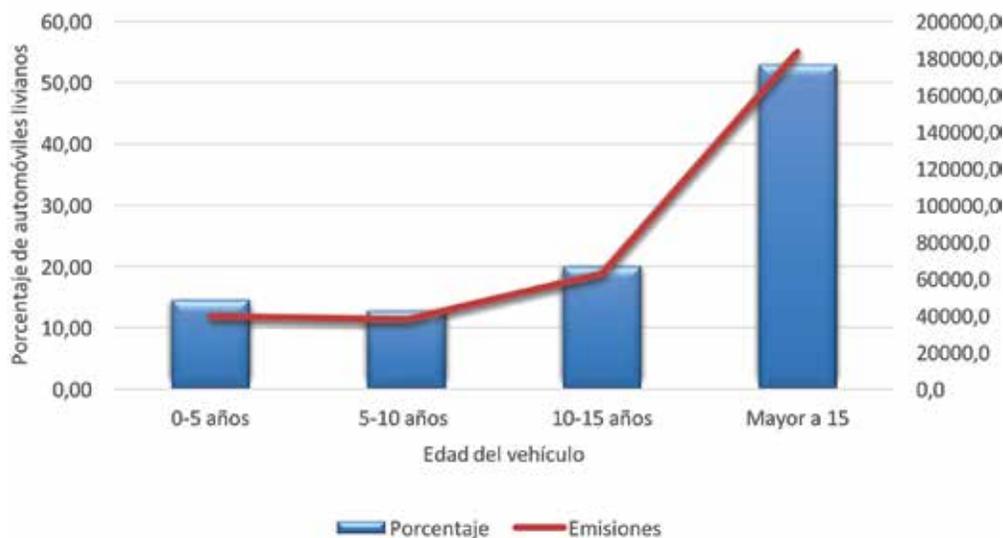
Gráfico 1. Distribución de las emisiones de GEI por categoría de vehículo para las fuentes móviles del cantón de San José



Fuente: Elaboración propia.

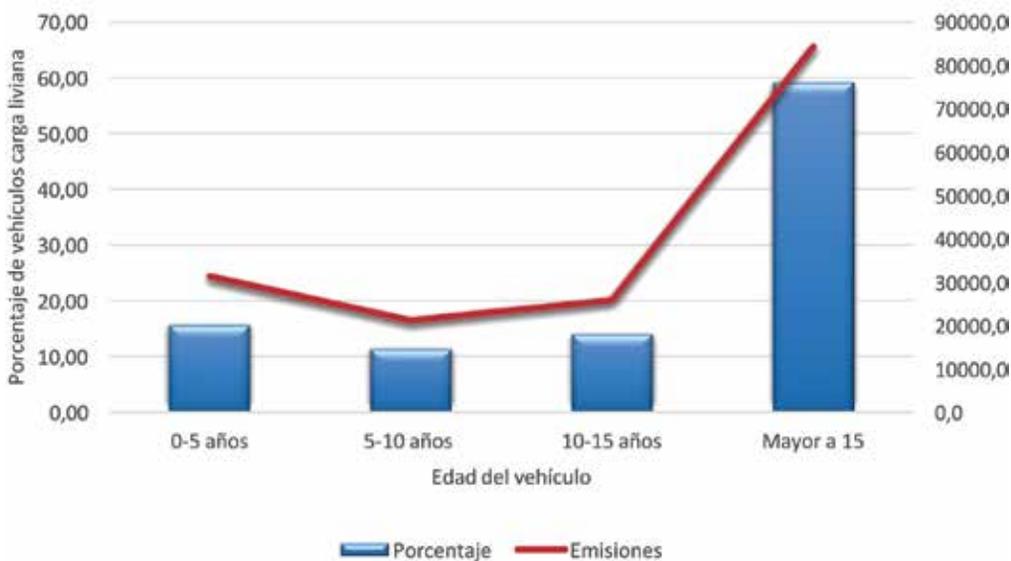
Para este mismo segmento, el 60% de las emisiones totales de CO₂ (183 301 Ton/año) son producidas por los automóviles con más de 15 años. Una situación similar se presenta con los carga liviana (Gráfico 3), donde el 59% de las unidades posee más de 15 años siendo responsables de la emisión de 84 355 de CO₂ Ton/año. La normativa internacional para vehículos nuevos exige una durabilidad de al menos 80 000 km, lo que en promedio equivale a 5 años de uso del vehículo con el mantenimiento recomendado. Después de este periodo el fabricante no garantiza el cumplimiento de los niveles de emisión y el rendimiento del combustible declarado.

Gráfico 2. Aporte a las emisiones de GEI generadas por automóviles según su edad.



Fuente: Elaboración propia (2017).

Gráfico 3. Aporte a las emisiones de GEI generadas por vehículos de carga liviana según su edad.

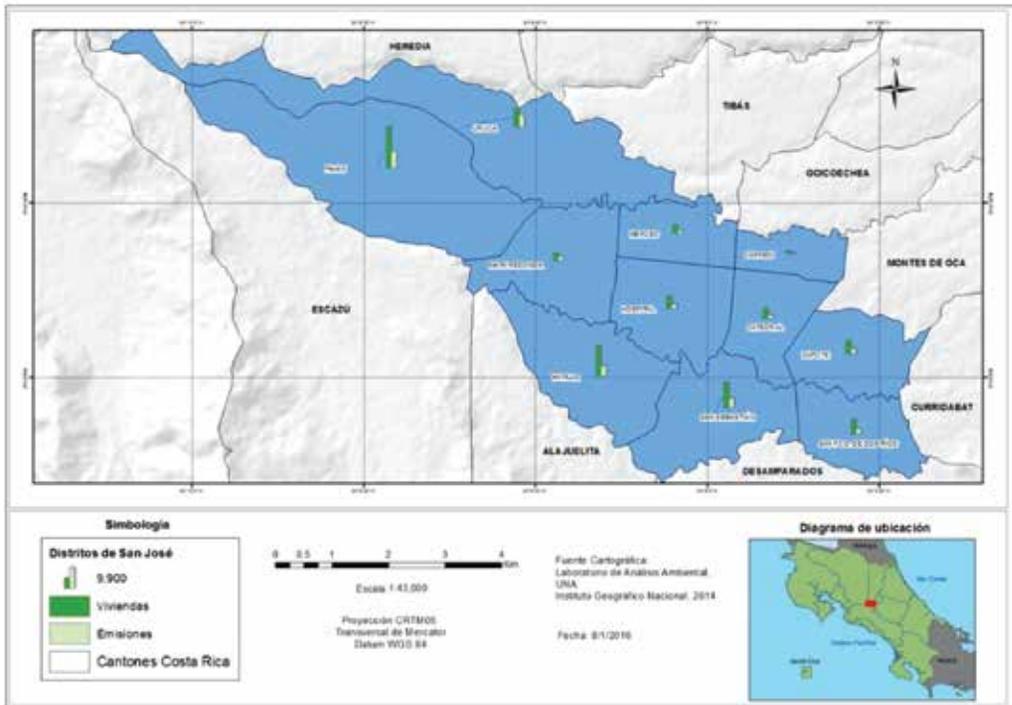


Fuente: Elaboración propia (2017).

Por otra parte, el transporte no convencional se refiere a aquellos medios de transporte que no circulan por carreteras. En cuanto al cantón de San José, se tiene que el transporte ferroviario produjo 2 166 ton CO₂ eq, mientras que el transporte aéreo registró 10 722 ton CO₂ eq.

Otro aspecto importante de resaltar es la contribución que genera el sector residencial del cantón (Cuadro 8), que es responsable de 33 756 Ton de CO₂ eq/año (4,1%) siendo los distritos de Pavas y La Uruca los que concentran la mayor cantidad de las emisiones. En este sector se incluyen las emisiones generadas por consumo eléctrico, demanda de combustibles para cocción de alimentos, generación de aguas residuales y residuos sólidos. En promedio cada vivienda del cantón genera alrededor de 0,41 Ton de CO₂ eq/año sin embargo, este indicador varía desde 0,66 Ton de CO₂ eq/año en la Uruca hasta 0,33 Ton de CO₂ eq/año en Hatillo.

Figura 2. Emisiones de GEI generadas en el sector residencial del cantón de San José, según distrito.



Fuente: Elaboración propia.

La figura 2 muestra un mapa donde se presentan simultáneamente dos variables, la primera es la emisión total de GEI total por distrito, la segunda representa la cantidad de viviendas existentes en cada uno de ellos. En el mapa se evidencia que la producción total de GEI está estrechamente relacionada con la cantidad de viviendas. Obsérvese el caso de Pavas, es el distrito con mayor cantidad de viviendas (19 736), tal como lo muestra la figura, así mismo puede observarse que dicho distrito es el que mayor cantidad de GEI emite, seguido de Uruca, Hatillo y San Sebastián, todos ellos distritos al sur del cantón de San José. Cabe resaltar que en los distritos como Carmen, Merced, Catedral, Hospital y Mata Redonda la emisión de GEI disminuye significativamente y se debe a que es la zona donde se ubica espacialmente el principal casco central comercial del cantón.

Cuadro 8. Emisiones de GEI (Ton/año) generadas en el sector residencial del cantón de San José.

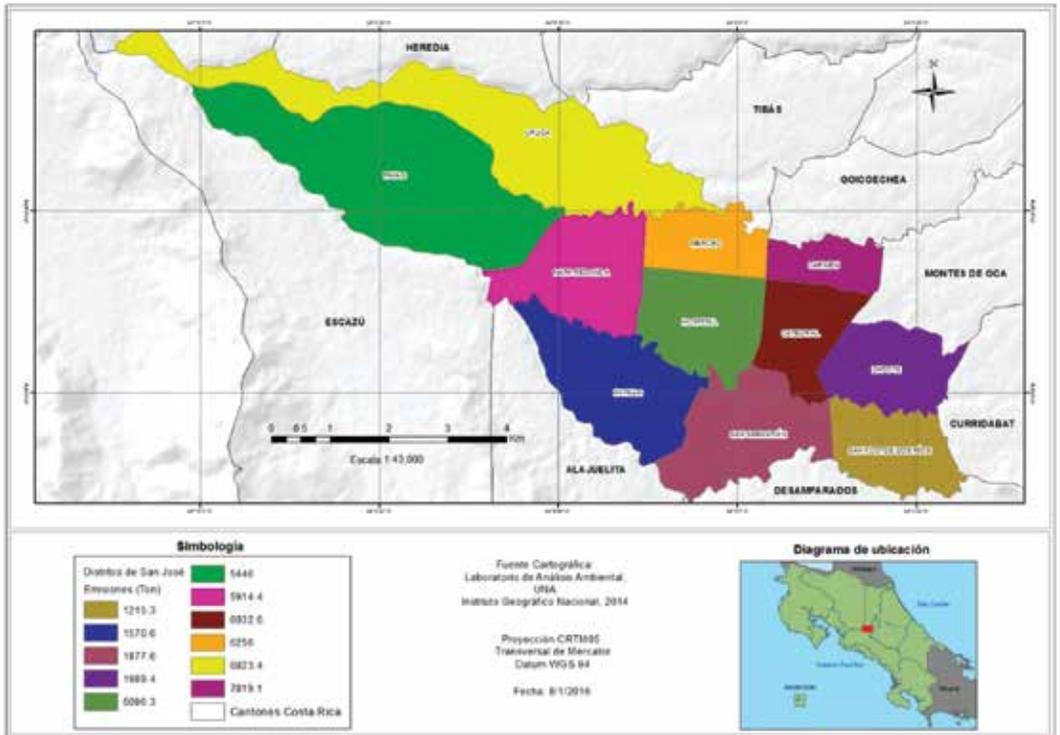
Fuente	Número de viviendas	Consumo eléctrico	Consumo combustibles fósiles	Tratamiento de Aguas Residuales	Generación de Residuos Sólidos
Distrito					
Carmen	1 261	457	85,6	29,0	9,1
Merced	4 047	920	417	171	31,9
Hospital	5 622	1 148	572	238	45,0
Catedral	5 060	1 203	441	102	34,2
Zapote	6 351	1 668	422	263	48,9
San Francisco	6 840	1 864	375	242	50,5
Uruca	8 774	1 634	2 347	1 741	69,9
Mata Redonda	3 321	1 598	265	174	24,2
Pavas	19 736	4 658	2 426	510	198
Hatillo	14 457	3 003	1 346	280	118
San Sebastián	11 904	2 662	1 138	636	90,2
Total	87 373	20 815	9 873	4 386	720

Fuente: Elaboración propia (2017).

El sector comercial del cantón de San José generó un total de 49 997 Ton/año, representando un 6,1% de las emisiones de GEI producidas en el 2011. Dentro de este segmento la principal fuente de emisión (cuadro 9) es el consumo de electricidad (84,7%), seguida del uso de combustibles

(8,5%). El comercio ubicado en los distritos de Uruca, Carmen y Catedral concentra el 41% de las emisiones de GEI.

Figura 3. Emisiones de GEI generadas en el sector comercial del cantón de San José, según distrito.



Fuente: Elaboración propia (2017).

En la figura 2 se logra observar que geográficamente en el sector comercial distritos que emitan mayor cantidad de GEI se encuentran localizados principalmente al norte del cantón de San José (Carmen, Uruca, Merced y Catedral), con 7819, 6823, 6256 y 6032 respectivamente. El uso del suelo que caracteriza dichos distritos es el uso comercial, donde se desarrollan actividades como hotelería, restaurantes, pulperías, carnicerías, bancos, cines, teatros, entre otros.

En el cuadro 9 se muestran que las emisiones generadas por el uso de refrigerantes en sistemas de aire acondicionado, congeladores y

refrigeradoras a nivel comercial representan 1 348 Ton/año. Los HFC son sustancias químicas que sólo contienen hidrógeno, carbono y flúor. Antes de la entrada en vigencia del Protocolo de Montreal, los únicos HFC producidos eran el HFC-152a y el HFC-23. El HFC-134a entró en producción en 1991 y desde entonces se han introducido una variedad de otros HFC, los cuales están siendo utilizados actualmente como sustitutos de las sustancias agotadoras de la capa de ozono (IPCC, 2006). Dentro del sector comercial, los hoteles, moteles y apartamentos son los principales contribuidores con 283,5 ton CO₂ eq.

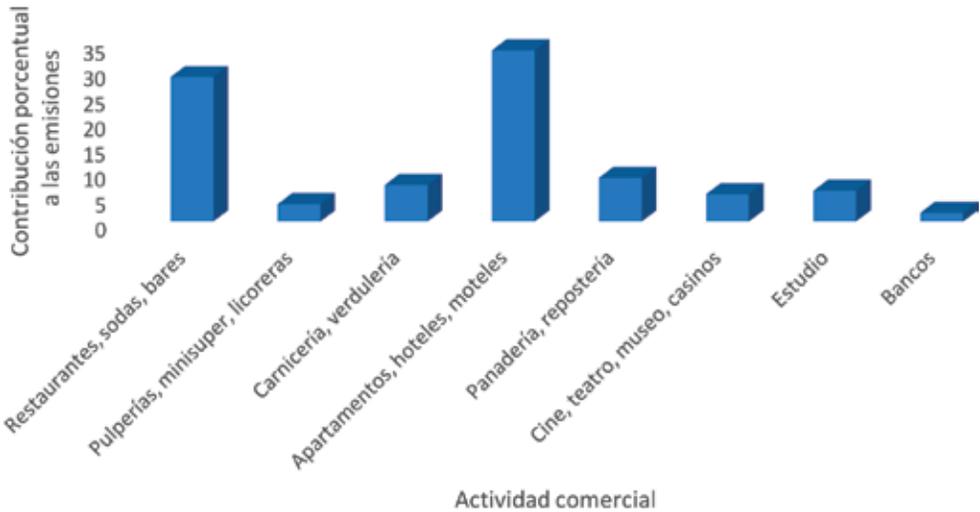
Cuadro 9. Emisiones de GEI (Ton/año) generadas en el sector comercial del cantón de San José

Fuente	Consumo eléctrico	Consumo combustibles fósiles	Tratamiento de Aguas Residuales	Generación de Residuos Sólidos	Extintores	Sistemas que utilizan refrigerantes
Distrito						
Carmen	5095	1851,3	406,3	48,4	7,5	410,6
Catedral	5591	241,8	37,3	50	11,8	100,7
Hatillo	1158	332,8	22,8	5,1	4,2	47,7
Hospital	4786	146,8	5,1	64,1	12,6	81,7
Mata Redonda	5565	68,2	7,0	13	5,5	255,7
Merced	5322	188	512,8	39,5	10,6	183,1
Pavas	4594	667,9	114,4	16,7	7,6	45,4
San Francisco	890	205,1	47,6	12,3	4,9	55,4
San Sebastián	1563	175,1	55,1	11,9	5,3	67,2
La Uruca	6074	214,7	433,4	39,1	5,4	56,8
Zapote	1685	163,3	39,5	8,7	4,9	43,9
Total	42323	4255	1681	308,8	80,3	1348

Fuente: Elaboración Propia (2017).

Las actividades comerciales que más emisiones generan en el cantón son el hospedaje (hoteles, moteles y apartamentos) con 33,8%, la alimentación (restaurantes, sodas, bares) 28,6%, panaderías 8,6% y carnicerías 7,2% (Gráfico 4).

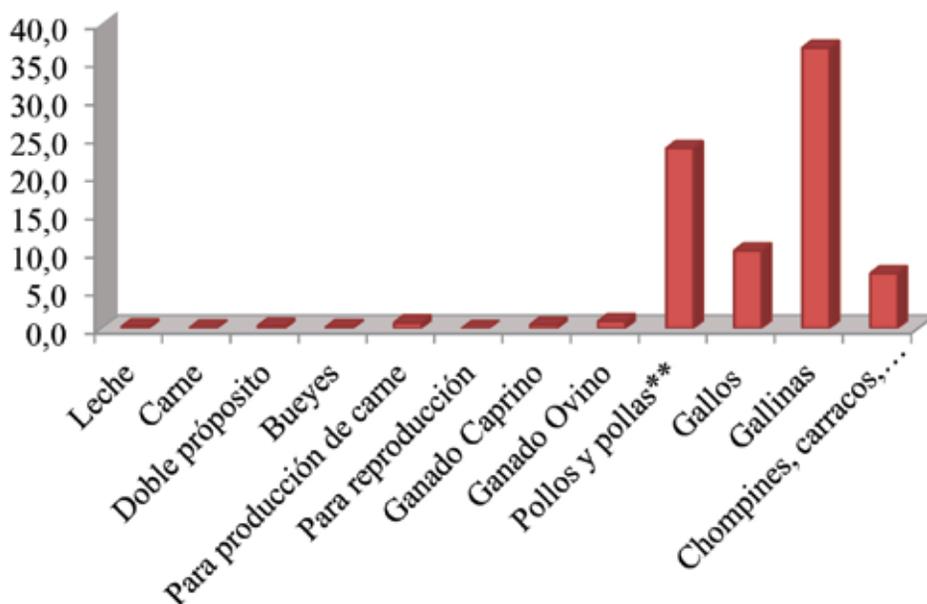
Gráfico 4. Distribución de las emisiones de GEI generadas en el sector comercial del cantón de San José, por tipo de actividad.



Fuente: Elaboración propia (2017).

La cantidad de fincas en el Cantón Central de San José es escasa, y por ende las emisiones por el sector pecuario son relativamente bajas en comparación al resto de categorías. La fermentación entérica se produce por la digestión en los distintos estómagos de los rumiantes, por lo que se genera metano y dióxido de carbono. En general, el ganado vacuno produce más emisiones por fermentación entérica, mientras que la población avícola es mayoritariamente emisora en la gestión de estiércol. En el gráfico 5 puede observarse que la cantidad de emisiones por fermentación entérica alcanza un valor de 3,4 ton CO₂ eq, siendo el ganado vacuno destinado a doble propósito el componente mayoritario. Por otro lado, la gestión de estiércol genera emisiones de 0,89 ton provenientes del metano y 85,4 ton provenientes del N₂O, de las cuales las gallinas son las que elevan esta cantidad con un aporte de 36,5 ton.

Gráfico 5. Toneladas de CO₂ equivalente según el tipo de actividad pecuaria en el cantón central de San José, 2011.



Fuente: Elaboración propia (2017).

Las emisiones de las fuentes fijas se derivan de la combustión para la generación de energía en las industrias, estas van a depender de la calidad de los combustibles utilizados, de la eficiencia de los quemadores, mantenimiento del equipo y de la presencia de equipo de control al final del proceso (filtros, precipitadores y lavadores, entre otros). Los operadores de estas fuentes deben presentar reportes operacionales al Ministerio de Salud, donde se incluye información acerca de la cantidad de combustible utilizado, el horario de operación y la concentración de dióxido de carbono.

Las emisiones generadas por este tipo de fuentes contabilizaron un total de 11 505,5 ton eq de CO₂, las cuales se concentran mayoritariamente en los distritos de Hospital y Mata Redonda (Cuadro 10).

Cuadro 10. Distribución de las emisiones producidas por fuentes fijas en el cantón central de San José, 2011.

Distrito	Emisiones (Ton CO2 eq)
Carmen-Merced-Uruca	2136,5
Hatillo	28,7
Pavas	298,2
Hospital-Mata Redonda	9042,1
Total	11 505,5

Fuente: Elaboración propia (2017).

Conclusiones

En cuanto a la distribución de energía, el sector comercial emite mayor cantidad de emisiones que el sector residencial, y que incluso el sector industrial. En este último, es posible determinar que los distritos que más emisiones generan en este aspecto son La Uruca y Hospital. Además, se observa que las emisiones producto de la generación de energía por alumbrado público son mínimas en comparación a las demás fuentes.

Los refrigerantes son de gran importancia debido a que su potencial de calentamiento global es alto. Los sistemas de refrigeración y congelación emiten mayor cantidad en distritos como Carmen, Merced, Hospital y Catedral, destacados por su gran actividad comercial de consumo inmediato por ejemplo, comidas.

Los combustibles de cocción alternos al uso de la electricidad como GLP y queroseno generan emisiones altas en el sector residencial, en cuanto al sector comercial y público el valor de emisiones es menor y el distrito con aportes mayores al 50% de las emisiones es el distrito Carmen.

El sector agropecuario produce emisiones relativamente bajas en el cantón central de San José, al tener casi nula producción de ganado y escasa cantidad de ganadería avícola distribuida las emisiones no son significativas.

Las fuentes fijas emiten gran cantidad de toneladas de CO₂, sobre todo en los distritos de Hospital-Mata Redonda.

El inventario cantonal determina que el principal reto para la reducción de emisiones se centra en las fuentes móviles, donde se hace vital la renovación de la flota vehicular con la incorporación de estándares de eficiencia energética que permitan el mayor rendimiento posible con la menor generación de emisiones. Adicionalmente, el municipio debe trabajar

con el gobierno central en el desarrollo de una propuesta que permita el fortalecimiento de opciones reales de transporte público, que permitan la movilización masiva de personas cumpliendo con estándares ambientales y desincentivando el uso de vehículos particulares.

Agradecimientos

Los autores reconocen el valioso aporte realizado por la Municipalidad de San José, sin el cual no se podría haber desarrollado el presente estudio.

Referencias

- IPCC. (2000). Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios Nacionales de gases de efecto invernadero. http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/spanish/gpgaum_es.htm
- IPCC (2006). Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases efecto invernadero. Instituto para las estrategias ambientales globales, Francia.
- IPCC (2013). IPCC Fifth Assessment Report: Climate Change, 2013. (AR4). Recuperado de: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml.
- Moss, J., Lambert, C. & Rennie, A. (2008). SME application of LCA-based carbon footprints. *International Journal of Sustainable Engineering*, 1(2), 132–141.
- Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones. (2009). Estrategia Nacional de Cambio Climático.
- Peters, G. & Hertwich, E. (2008). Post-Kyoto greenhouse gas inventories: production versus consumption. *Climatic Change*, 86, 51-66.
- SEDEMA. (2013). Registro de emisiones de gases efecto invernadero del Distrito Federal, 2012. Gobierno del Distrito Federal.
- Pulles, T, Kok, H, Quass, U. (2006) Application of the emission inventory model TEAM: Uncertainties in dioxin emission estimates for central Europe. *Atmospheric Environment* 40, 2321-2332.
- Wang, Z. & Wang, C. (2015) How carbon offsetting scheme impacts the duopoly output in production and abatement: analysis in the context of carbon cap-and-trade. *Journal of Clean Production* 103, 715-723.

Jorge Herrera-Murillo, José Félix Rojas-Marín, Andrea Quirós-Fallas, Carolina Balma-Montero, Deivis Anchía-Leitón. Greenhouse gas emissions inventories as a tool that supports the climate change local agenda: San Jose experience

Wiedmann, T. (2009). A Definition of Carbon Footprint. Durham, UK, ISAUK Research & Consulting.

World Resources Institute. (2014). GHG: Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories.

Municipalidad de San José. (2011). Diagnóstico Cantonal 2011. Observatorio Municipal. San José, Costa Rica.