

Instituto Meteorológico Nacional
Proyecto Desarrollo del Primer Informe Bienal de Transparencia (BTR)

Consultoría

**Desarrollo de escenarios de proyección de emisiones
de gases de efecto invernadero en Costa Rica**

UNDP-CRI-00099

**Producto 4.
Informe Final Escenarios de Mitigación**

Francisco Javier Sancho

Tabla de contenido

Tabla de contenido	2
1 Introducción	11
1.1 Resumen ejecutivo	12
2 Contexto de la Política Nacional de Descarbonización	17
2.1 Emisiones de Gases de Efecto Invernadero.....	18
3 Análisis de factores condicionantes de las emisiones de GEI	20
3.1 Población	20
3.2 Viviendas	21
3.3 Producto Interno Bruto	22
3.4 Manejo de Residuos	24
3.5 Sector Transporte.....	25
3.6 Sector Eléctrico	29
3.7 Procesos Industriales y uso de productos	30
3.8 Sector Agropecuario	31
3.9 Sector Forestal	40
4 Escenario de Referencia de las Emisiones Sectoriales.....	49
4.1 Sector de Residuos	49
4.1.1 Residuos Sólidos	49
4.1.2 Aguas residuales	61
4.2 Sector energía	70
4.2.1 Subsector transporte	70
4.2.2 Subsector eléctrico	86
4.3 Sector Procesos Industriales y Uso de Productos	93
4.4 Sector Agropecuario	96
4.5 Sector Forestal	105
4.6 Escenario de Referencia de Emisiones Nacionales	113
5 Análisis de Medidas de Mitigación por Sector	117
5.1 Sector Residuos Sólidos	117
5.2 Sector energía	121
5.2.1 Subsector Transporte.....	121
5.3 Diésel consumido por transporte de trenes.....	131

5.4	Reducción de emisiones	143
5.4.1	Resultados para el escenario de mitigación	145
5.4.2	Subsector Eléctrico	147
5.5	Sector de Procesos Industriales y Uso Productos	148
5.6	Sector Agropecuario	150
5.6.1	Producción ganadera baja en emisiones	150
5.6.2	Reducción de un 15% en el Uso de los Fertilizantes Nitrogenados	154
5.7	Sector Forestal	155
5.8	Potencial de Mitigación con las medidas identificadas.....	160
6	<i>Bibliografía.....</i>	164

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1 Emisiones Totales de GEI 2021.....	19
Cuadro 2 PIB per cápita para Países de la OCDE en US\$ a Precios Corrientes, 2023	22
Cuadro 3 Tipo de cambio proyectado 2024-2050	23
Cuadro 4 Composición de la Generación Eléctrica (2021).....	29
Cuadro 5 Superficie nacional por tipo de Uso de la tierra - Periodo 2008-2013 (hectáreas).....	41
Cuadro 6 Desglose de la Pérdida Bosque Maduro del Periodo 2008-2013 (hectáreas).....	45
Cuadro 7 Origen de la Regeneración Bosques Secundario del periodo 2008-2013 (hectáreas)	46
Cuadro 8 Generación de Residuos Sólidos per cápita (2017-2018).....	49
Cuadro 9 Tasa de Generación Per Cápita de Residuos Sólidos.....	50
Cuadro 10 Disposición de Residuos Sólidos Ordinarios en Costa Rica (ton/año).....	51
Cuadro 11 Porcentaje por destino de residuos sólidos ordinarios no recolectados	51
Cuadro 12 Composición de los Residuos Sólidos.....	51
Cuadro 13 Porcentaje de residuos valorizables.....	52
Cuadro 14 Porcentaje de residuos valorizables 2017-2021.....	52
Cuadro 15 Generación de residuos sólidos en hogares y otras fuentes.....	53
Cuadro 16 Lugares de Disposición de Residuos sólidos.....	53
Cuadro 17 Generación de Residuos sólidos en el Escenario de Referencia (TM).....	53
Cuadro 18 Parámetros de la Calculadora IPCC para Metano	54
Cuadro 19 Factor de Corrección de Metano (MCF)	55
Cuadro 20 Emisiones de Metano en sitios de disposición de residuos	55
Cuadro 21 Factores de emisión de metano y óxido nitroso por tratamiento biológico de residuos	56
Cuadro 22 Emisiones de metano y óxido nitroso por tratamiento biológico de residuos	57
Cuadro 23 Fracción de humedad, carbono, carbono fósil y factor de oxidación en los diferentes tipos de residuos sólidos ordinarios	58
Cuadro 24 Factores de emisión de metano y óxido nitroso por quema abierta de residuos	59
Cuadro 25 Emisiones de metano y óxido nitroso por tratamiento de residuos.....	59
Cuadro 26 Emisiones de CO ₂ equivalente en residuos sólidos.....	60
Cuadro 27 Parámetros para los tipos de tratamiento de aguas residuales.....	62
Cuadro 28 Emisiones de GEI procedentes de las aguas residuales domésticas (ton CH ₄ y N ₂ O)	63
Cuadro 29 Parámetros para la estimación de emisiones del tratamiento de aguas industriales	65
Cuadro 30 Datos de actividad para las emisiones de las aguas residuales industriales.....	65
Cuadro 31 Emisiones Totales de Referencia por Aguas Residuales (ton CH ₄)	67
Cuadro 32 Emisiones de CO ₂ equivalente en aguas residuales	67
Cuadro 33 Emisiones de CO ₂ equivalente en sector residuos	69
Cuadro 34 Rendimiento según tipo de vehículo y combustible	78
Cuadro 35 Rendimiento promedio de la flota vehicular de automóviles.....	78
Cuadro 36 Recorrido según tipo de vehículo.....	78
Cuadro 37 Consumo de energía según tipo de transporte.....	81
Cuadro 38 Factores de Emisión de Hidrocarburos.....	84
Cuadro 39 Emisión en sector energía por tipo de GEI (Toneladas)	85
Cuadro 40 Escenarios de demanda de energía y potencia en el PEG 2022-2040	88
Cuadro 41 Proyectos del Plan Nacional de Expansión Eléctrica de Referencia (2022-2040)	90

Cuadro 42 Generación eléctrica proyectada en el PEG 2022-2040	93
Cuadro 43 Tipos Gases de efecto invernadero	93
Cuadro 44 Gases de efecto invernadero por actividad industrial y uso de productos.....	95
Cuadro 45 Equivalencia de Gases de efecto invernadero por Potenciales de calentamiento	96
Cuadro 46 Proyección de Área cultivada por principales Cultivos	98
Cuadro 47 Proyección de Área cultivada de otros Productos (Ha).....	98
Cuadro 48 Proyección de Área en Actividades en Fincas agrícolas (Ha)	99
Cuadro 49 Proyección de Área de Pastos (Ha)	101
Cuadro 50 Proyección del Hato ganadero (Cabezas).....	101
Cuadro 51 Factores de Emisión del Sector Agropecuario.....	103
Cuadro 52 Factores de Emisión del Sector Agropecuario.....	104
Cuadro 53 Cambio neto en el Área agropecuaria durante el Periodo 2014-2050 (ha)	106
Cuadro 54 Uso del Suelo en Parques Nacionales y Reservas Biológicas	108
Cuadro 55 Proyección del Cambio neto anual para los Tipos de Cobertura boscosa en función de los Cambios en el Área de las principales actividades agropecuarias en Costa Rica	109
Cuadro 56 Proyección de Emisiones de Referencia para el Sector Forestal (Ton CO ₂)	111
Cuadro 57 Emisión sectorial y total neta en escenario de referencia	114
Cuadro 58 Escenario de Referencia de emisiones por sector y totales netas 2021-2050.....	116
Cuadro 59 Sistemas de Tratamiento de los Residuos Sólidos	117
Cuadro 60 Porcentaje de Reciclaje del Material Recolectado	118
Cuadro 61 Porcentaje de Compostaje	118
Cuadro 62 Parámetros de Tratamiento de Residuos en Escenarios de Referencia y de Mitigación.....	119
Cuadro 63 Tasas de Eficiencia de Captación.....	119
Cuadro 64 Residuos Sólidos: Contenido de Carbono por Fracción de Residuo.....	120
Cuadro 65 Valor calórico de las Fracciones de Residuos (MJ/Kg de Residuos húmedo).....	120
Cuadro 66 Escenario: Potencial Reducción de Emisiones del Sector Residuos en el 2030	121
Cuadro 67 Demanda actual de Pasajeros registrados por INCOFER (2019-2023).....	126
Cuadro 68 Estimación de Demanda Anual sin proyecto y con proyecto (2021-2050)	127
Cuadro 69 Estimación de Ahorro total por sustitución vehicular del TRP (en Terajulios).....	128
Cuadro 70 Estimación de contenedores transportado por el TELCA.....	130
Cuadro 71 Estimación de kilómetros y ahorro por combustibles del TELCA.....	130
Cuadro 72 Estimación de kilómetros y ahorro por combustibles del TELCA.....	131
Cuadro 73 Situación del Sistema Metropolitano de Autobuses.....	132
Cuadro 74 Situación esperada con la Modernización del Sistema Metropolitano de Autobuses	133
Cuadro 75 Recorrido Promedio de los Pasajeros por Sector.....	133
Cuadro 76 Parámetros de la composición de la flota actual y flota con la modernización.....	134
Cuadro 77 Reducción potencial de Emisiones de GEI por Reducción de Unidades y Viajes (miles de toneladas de CO ₂)	135
Cuadro 78 Reducción potencial de Emisiones de GEI por Reducción de Uso de Vehículos privados (miles de toneladas de CO ₂)	136
Cuadro 79 Reducción potencial de Emisiones de GEI por efecto descongestión (miles de toneladas de CO ₂)	136
Cuadro 80 Composición de la flota vehicular eléctrica 2010-2024	140
Cuadro 81 Flota de vehículos eléctricos según crecimiento esperado.....	143

Cuadro 82 Factores por Tipo de Vehículo.....	145
Cuadro 83 Factores de Emisión de Hidrocarburos	146
Cuadro 84 Mitigación esperada por generación 100% renovables (ton CO ₂ equivalente)	148
Cuadro 85 Emisiones por reducir en uso de productos (ton CO ₂ equivalente).....	149
Cuadro 86 Medidas de Manejo de la Alimentación y la Finca.....	151
Cuadro 87 Parámetros del Programa de Reducción de Fertilizantes	155
Cuadro 88 Opciones de REDD+ Considerados en el ER-PIN y Área Estimada.....	156
Cuadro 89 Reducción de Emisiones Estimadas de las Acciones Forestales.....	159
Cuadro 90 Escenario de emisiones de GEI con medidas de mitigación por sector y total neto 2021-2050	160

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Escenario Nacional de Referencia: Emisiones Totales al 2050	13
Figura 2. Abatimiento de emisiones totales y meta NDC	15
Figura 3. Abatimiento de emisiones totales, Meta NDC y ruta de descarbonización	16

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distribución sectorial de emisiones	12
Tabla 2. Emisión sectorial y total neta en escenario de referencia	14
Tabla 3. Emisión sectorial con medidas de mitigación	14

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Sistema de Tren Metropolitano actual	123
Ilustración 2. Sistema de Transporte rápido de Pasajeros alternativo	124
Ilustración 3. Sistema TRP de la GAM	125
Ilustración 4. Líneas y estaciones del Sistema TRP de la GAM	126
Ilustración 5. Trazado proyecto TELCA	129

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Proyección de Población según Censo del 2012	21
Gráfico 2 Histórico y Proyección de Viviendas al 2050.....	21
Gráfico 3 Histórico y Proyección del Producto Interno Bruto real (1991=100).....	23
Gráfico 4 Residuos municipales y Número de Viviendas.....	24
Gráfico 5 Residuos generados y Población	25
Gráfico 6 Residuos Sólidos y PIB per cápita	25
Gráfico 7 Flota Vehicular total y PIB real	26
Gráfico 8 Flota de Transporte público y PIB real	26

Gráfico 9 Flota de Vehículos de Carga y PIB real	27
Gráfico 10 Flota de Vehículos particulares y ventas de gasolinas	27
Gráfico 11 Flota de Vehículos particulares y volumen total de gasolinas	28
Gráfico 12 Flota de Vehículos de carga pesada y volumen total de diésel.....	28
Gráfico 13 Flota de Vehículos de autobuses y volumen total de diésel	28
Gráfico 14 Demanda eléctrica y tasa de crecimiento 1976-2021.....	30
Gráfico 15 Demanda Eléctrica y PIB real 1997-2021	30
Gráfico 16 Emisiones de HFC por fuente en CO ₂ equivalente (Gg).....	31
Gráfico 17 Producción bovina y porcina y PIB	32
Gráfico 18 Producción bovina y porcina y población.....	32
Gráfico 19 Consumo per cápita de Carne de Res.....	33
Gráfico 20 Producción de Leche y PIB real	33
Gráfico 21 Producción de Leche y población.....	34
Gráfico 22 Distribución de Área de Siembra agrícola (2022).....	34
Gráfico 23 Producción de Café y PIB real.....	35
Gráfico 24 Área de siembra y valor agregado de la producción de Café.....	35
Gráfico 25 Producción de Arroz y PIB real	36
Gráfico 26 Área de siembra y valor agregado de la producción de Arroz	36
Gráfico 27 Producción de Caña de Azúcar y PIB per cápita	37
Gráfico 28 Área de siembra y valor agregado de la producción de Caña de Azúcar	37
Gráfico 29 Producción de Banano y PIB real.....	38
Gráfico 30 Área de siembra y valor agregado de la producción de Banano.....	38
Gráfico 31 Producción de Palma de Aceite y PIB real.....	39
Gráfico 32 Área de siembra y valor agregado de la producción de Palma de Aceite.....	39
Gráfico 33 Producción de Piña y PIB real.....	40
Gráfico 34 Área de siembra y valor agregado de la producción de Piña	40
Gráfico 35 Distribución por tipo de Uso de la tierra - Periodo 2008-2013 (hectáreas).....	41
Gráfico 36 Área sembrada por producto agrícola - Periodo 1990-2022 (hectáreas)	44
Gráfico 37 Destino y Origen de la Pérdida y Ganancia de Área Agropecuaria (2008-2013)	46
Gráfico 38 Área plantada y cosechada de plantaciones forestales (1990-2020)	47
Gráfico 39 Volumen cosechado de bosques naturales (2008-2013)	47
Gráfico 40 Destino y Origen de la Pérdida y Ganancia de Área Agropecuaria (2008-2013)	48
Gráfico 41 Emisiones totales de CO ₂ del Sector Residuos Sólidos.....	61
Gráfico 42 Estimación de Generación de carga BOD en aguas residuales domésticas al 2050	63
Gráfico 43 Estimación de Emisiones de CO ₂ equivalente en aguas residuales.....	68
Gráfico 44 Estimación de Emisiones de CO ₂ equivalente en aguas residuales.....	69
Gráfico 45 Costa Rica: Consumo energético total 2011-2020 (Terajulios)	70
Gráfico 46 Costa Rica: Consumo energético total 2021 (Terajulios)	70
Gráfico 47 Composición de las Emisiones del Sector Transporte 2021 (Gg de CO ₂)	71
Gráfico 48 Composición del Parque Vehicular 2021.....	72
Gráfico 49 Composición del Parque Vehicular por tipo de combustible 2021	72
Gráfico 50 Evolución del Parque Vehicular.....	73
Gráfico 51 Vehículos privado y comercial por persona	73
Gráfico 52 Población por Vehículo en Países de la OCDE (2022).....	74

Gráfico 53 Relación histórica y proyección de vehículos por persona (1990-2050).....	75
Gráfico 54 Proyección del Parque Vehicular al 2050	75
Gráfico 55 Composición del parque vehicular al 2050	76
Gráfico 56 Intensidad de uso de combustibles histórica y proyectada	77
Gráfico 57 Composición de la antigüedad de la flota vehicular	77
Gráfico 58 Proyección de consumo de energía del parque vehicular	79
Gráfico 59 Composición del consumo del parque vehicular del 2050 (Terajulios)	79
Gráfico 60 Proyección del Consumo de Energía por Modo de Transporte	80
Gráfico 61 Proyección del consumo de energía en sector industria	82
Gráfico 62 Proyección del consumo de energía en sector institucional y agrícola	82
Gráfico 63 Proyección del consumo de energía en sector producción de energía	83
Gráfico 64 Proyección del consumo total de energía.....	83
Gráfico 65 Proyección del consumo total de energía por fuente.....	84
Gráfico 66 Escenario de Referencia por Uso de Hidrocarburos	86
Gráfico 67 Capacidad Instalada por fuente 2021 (MW)	87
Gráfico 68 Generación de electricidad 2021 (GWh).....	87
Gráfico 69 Escenarios de Expansión de la Demanda Eléctrica, 2014-2035	89
Gráfico 70 Consumo de energía por producción eléctrica	92
Gráfico 71 Capacidad Eléctrica por tipo de fuentes en escenario de referencia.....	92
Gráfico 72 Emisiones de CO ₂ equivalente para el sector PIUP	96
Gráfico 73 Histórico del área sembrada por producto	97
Gráfico 74 Línea de Referencia de Área cultivada	99
Gráfico 75 Escenario de Referencia de uso de suelo en pasturas	101
Gráfico 76 Línea de referencia del hato vacuno	102
Gráfico 77 Línea de referencia del otro ganado	102
Gráfico 78 Línea de Referencia de Emisiones del Sector Agropecuario	105
Gráfico 79 Cambio Neto en el Área Agropecuaria Durante el Periodo 2022-2050 (ha).....	107
Gráfico 80 Distribución del Área de Pérdida o Ganancia según Destino u Origen para las principales Actividades agropecuarias en Costa Rica (2008-2013).....	108
Gráfico 81 Tasas de Deforestación de Bosque Maduro en Costa Rica para los Tipos de Bosque identificados (BHT, BHP y BST y Bosque Maduro)	110
Gráfico 82 Tasas de Deforestación de Bosques Nuevos según Edad media del Cohorte.....	110
Gráfico 83 Cobertura de Bosques nuevos en Costa Rica para el Periodo 2014-2050	111
Gráfico 84 Estimación del Cambio de Existencias de Carbono forestal a partir de la Proyección de Cobertura boscosa	112
Gráfico 85 Escenario Nacional de Referencia: Emisiones Totales al 2050	113
Gráfico 86 Emisiones Totales según Tasas alternativas de Crecimiento del PIB	114
Gráfico 87 Emisiones totales en el 2030 a tasas alternativas de crecimiento del PIB.....	115
Gráfico 88 Emisiones totales en el 2050 a tasas alternativas de crecimiento del PIB.....	115
Gráfico 89 Opciones de Mitigación de Residuos Sólidos bajo Escenario de mitigación.....	121
Gráfico 90 Proyección del Parque Vehicular en Escenario de Referencia	137
Gráfico 91 Evolución de la flota de transporte eléctrico 2010-2024.....	139
Gráfico 92 Proyección de la flota de transporte eléctrico	140
Gráfico 93 Transición hacia flota de vehículos eléctricos según tendencia.....	141

Gráfico 94 Flota de vehículos eléctricos y flota total 2010-2050	142
Gráfico 95 Transición hacia flota de vehículos eléctricos según políticas al 2035	142
Gráfico 96 Reducción de emisiones de GEI por escenario de flota eléctrica	144
Gráfico 97 Escenario 2: Proyección de Flota de Transporte	144
Gráfico 98 Escenario de mitigación por medidas en transporte	146
Gráfico 99 Composición de la reducción en emisiones proyectada para el 2030	147
Gráfico 100 Emisiones estimadas a partir del PEG 2022-2040	147
Gráfico 101 Porcentaje de Generación con Fuentes Renovables para Escenarios de Referencia y Mitigación	149
Gráfico 102 Escenarios de Pastos Mejorados	153
Gráfico 103 Escenarios de Carga Animal	153
Gráfico 104 Hato Ganadero por Escenario	154
Gráfico 105 Impacto de Medidas Agropecuarias en Escenario de mitigación	155
Gráfico 106 Secuestro de Carbono de Sistemas Pastoriles	158
Gráfico 107 Emisiones del Sector Forestal en Escenario de Referencia y con las Medidas	160
Gráfico 108 Abatimiento de emisiones totales y meta NDC	162
Gráfico 109 Abatimiento de emisiones totales, Meta NDC y ruta de descarbonización.....	163

LISTA DE ACRÓNIMOS

AFOLU	Agriculture, Forestry and Other Land Use (Agricultura, Silvicultura y otros usos del Suelo)
A y A	Instituto Nacional de Acueductos y Alcantarillados
BUR	Biannual Update Report (Reporte de Actualización Bianual)
BCCR	Banco Central de Costa Rica
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático
CN	Carbono Neutralidad
DCC	Dirección de Cambio Climático
ENCC	Estrategia Nacional de Cambio Climático
FONAFIFO	Fondo Nacional de Financiamiento Forestal
GEI	Gas de Efecto Invernadero
ICE	Instituto Costarricense de Electricidad
IMN	Instituto Meteorológico Nacional
INCOFER	Instituto Costarricense de Ferrocarriles
NDC	INationally Determined Contribution (Contribución Nacionalmente Determinada)
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos
INTA	Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático
MDC	Mercado Doméstico de Carbono
MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía
MINSA	Ministerio de Salud
MOPT	Ministerio de Obras Públicas y Transporte
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
PIB	Producto Interno Bruto
REDD	Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation
SEPSA	Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria
UCC	Unidades Costarricenses de Compensación

1 Introducción

Este reporte complementa el producto 4 de la consultoría Desarrollo de escenarios de proyección de emisiones de gases de efecto invernadero en Costa Rica, proyecto que desarrolla el Instituto Meteorológico Nacional en el marco del Proyecto Desarrollo del Primer Informe Bienal de Transparencia (BTR).

La consultoría cuenta con el apoyo del proyecto NDC Support Programme-Fomento de Capacidades LECB II – de la unidad de Naturaleza Clima y Energía del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) Costa Rica.

El objetivo general de la consultoría es desarrollar escenarios de proyección de emisiones de gases de efecto invernadero en Costa Rica (línea base) basados en los escenarios de crecimiento de la economía integrando los cambios y las variables que el país ha tenido durante la última década para un horizonte de tiempo de corto, mediano y largo plazo (2050), de acuerdo con los compromisos adquiridos en el contexto del Acuerdo de París.

Los objetivos específicos de la consultoría son:

1. Realizar un análisis de los factores condicionantes o drivers del comportamiento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en los diversos sectores de interés del estudio.
2. Establecer la compatibilidad de los inventarios de GEI elaborados por el IMN con los modelos sectoriales desarrollados para los escenarios.
3. Realizar un proceso consultivo y de validación con las partes interesadas y actores clave en la formulación de los modelos y escenarios de emisiones GEI sectoriales.
4. Generar modelos sectoriales de estimación de emisiones de GEI en hojas cálculo Excel para cada uno de los sectores IPCC y establecer escenarios de la proyección de las emisiones de GEI a corto, mediano y largo plazo, y en condiciones de crecimiento de variables socioeconómicas bajo, moderado y alto.

Este reporte constituye el informe final de la construcción de los escenarios de mitigación de emisiones sectoriales y las emisiones nacionales proyectadas hasta el 2050. El análisis se realiza por sectores, buscándose una consistencia con las metodologías de los Inventarios de Gases de Efecto Invernadero (INGEI).

Además, en los anexos se ofrecen los materiales con los que se basó el proceso consultivo del proyecto.

1.1 Resumen ejecutivo

Costa Rica forma parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), reconociendo el cambio climático como una preocupación global causada por actividades humanas que intensifican el efecto invernadero.

El país ratificó el Acuerdo de París mediante la Ley 39945, reconociendo su vulnerabilidad climática y la necesidad de una respuesta progresiva basada en evidencia científica, con lo que el país se comprometió a limitar sus emisiones netas de gases de efecto invernadero (GEI) a un máximo de 9,11 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂e) en 2030, con un presupuesto total de 106,53 millones de toneladas para 2021–2030. Las metas están definidas en sus Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC).

En 2018, Costa Rica presentó el Plan Nacional de Descarbonización 2018–2050, con el objetivo de alcanzar una economía carbono neutral en 2050. El plan contempla dos etapas: i) Etapa inicial (2018–2022): implementación temprana, y ii) Etapa de inflexión (2023–2030): transformación estructural hacia la reducción de emisiones. Sin embargo, persisten barreras para avanzar en la segunda. El sector transporte es la principal fuente de emisiones, seguido por agricultura, residuos y procesos industriales.

Al 2024, se observa un rezago en la creación de condiciones habilitantes para lograr una inflexión en el patrón de emisiones. Lo que requiere replantear los enfoques de implementación para evitar incumplimientos en las metas de la NDC al 2030.

El MINAE, a través del Instituto Meteorológico Nacional (IMN), presentó el Inventario Nacional de Emisiones y Absorciones de GEI 2021 (INGEI 2021), basado en las directrices del IPCC, el inventario analiza cuatro sectores: Energía, Procesos Industriales y Uso de Productos (IPPU), Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (AFOLU), Residuos. A su vez, el INGEI 2021 incluye cinco gases de efecto invernadero directo: CO₂, CH₄, N₂O, HFC, SF₆. También se reportan gases indirectos: CO, COVNM, NO_x, SO_x y carbono negro (BC).

Las emisiones netas de emisiones de GEI en 2021 son de 12.632,50 Gg de CO₂e y la tabla 1 muestra la distribución sectorial de emisiones.

Tabla 1. Distribución sectorial de emisiones

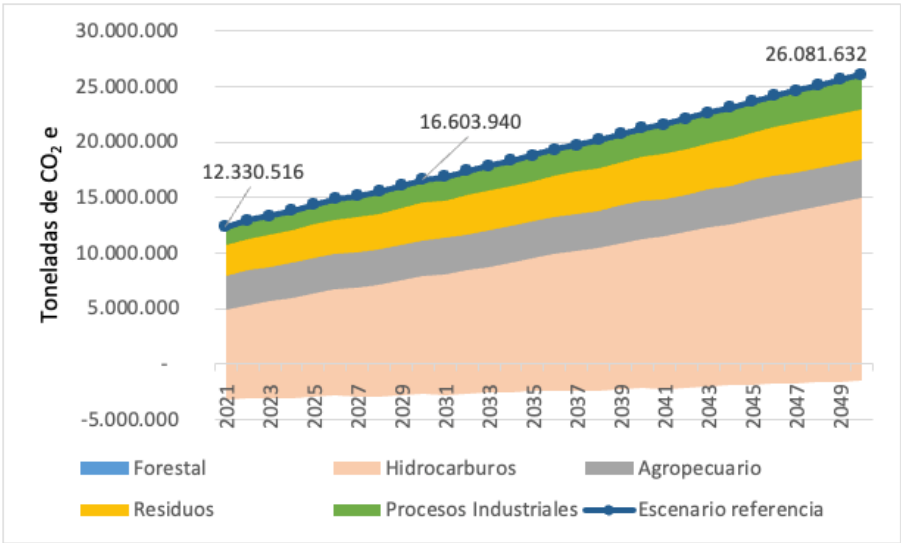
Sector	% de emisiones netas	Detalles principales
Energía	50%	Principal fuente de GEI
Agricultura	21.8%	Fermentación entérica del ganado
Silvicultura	-21.8%	Secuestro de carbono por bosques
Residuos	17%	Metano de rellenos sanitarios y aguas residuales
Industria	11.2%	Principalmente por producción de cemento

Fuente: elaboración propia

Para el escenario de referencia nacional de las emisiones se procede a hacer una agregación de los escenarios de referencia sectoriales. La Figura 1 muestra los resultados de la suma de las emisiones proyectadas por sector. Para la proyección de las emisiones de gases de efecto invernadero del país, el escenario contempla del año 2021 al 2050. Se parte de una economía que registrará una tasa de crecimiento promedio del 4,0% real. El crecimiento de la población es acorde con las proyecciones del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) con una tasa anual promedio del 0,7%. Las emisiones totales netas están representadas por la línea negra discontinua, que incluye el efecto de la ligera reducción que permite el sector forestal en el escenario de referencia.

Las emisiones netas en este escenario se prevén aumentando de 12,3 millones de toneladas de CO₂e en el 2021 a 26,08 millones de toneladas para el año 2050, lo que implica un crecimiento en el periodo del 112% en las emisiones totales del país y una tasa de crecimiento promedio anual del 2,4%. Para el año 2030 las emisiones son de alrededor 16,6 millones toneladas de CO₂ equivalente, es decir un 35% por encima de lo previsto en el 2021.

Figura 1. Escenario Nacional de Referencia: Emisiones Totales al 2050



Fuente: elaboración propia

En la tabla 2 se observan las emisiones en años seleccionados, tanto por sector como totales netas.

Tabla 2. Emisión sectorial y total neta en escenario de referencia**(Toneladas CO₂ equivalentes)**

Año	Hidrocarburos	Agropecuario	Residuos	Procesos Industriales	Uso de la tierra	Emisiones netas
2021	8.071.541	3.068.527	2.746.627	1.609.822	-3.166.000	12.330.516
2030	10.555.435	3.246.923	3.353.861	2.071.080	-2.623.360	16.603.940
2035	11.930.070	3.317.547	3.669.538	2.327.180	-2.447.866	18.796.469
2040	13.374.480	3.393.548	3.995.692	2.583.198	-2.097.097	21.249.821
2050	16.397.896	3.483.014	4.565.658	3.095.049	-1.459.985	26.081.632

Fuente: elaboración propia

El conjunto de medidas de reducción y remoción de las emisiones que han sido identificadas y cuantificadas en este análisis preliminar, en la Tabla 2 se ven las emisiones resultantes después de las medidas de mitigación analizadas para años seleccionados.

Tabla 3. Emisión sectorial con medidas de mitigación**(Toneladas CO₂ equivalentes)**

Año	Hidrocarburos	Agropecuario	Residuos	Procesos Industriales	Uso de la tierra	Emisiones netas
2021	8.071.541	3.068.527	2.746.627	1.609.822	-3.166.000	12.330.516
2030	10.555.435	3.246.923	3.353.861	2.071.080	-2.623.360	16.603.940
2035	11.930.070	3.317.547	3.669.538	2.327.180	-2.447.866	18.796.469
2040	13.374.480	3.393.548	3.995.692	2.583.198	-2.097.097	21.249.821
2050	16.397.896	3.483.014	4.565.658	3.095.049	-1.459.985	26.081.632

Fuente: elaboración propia

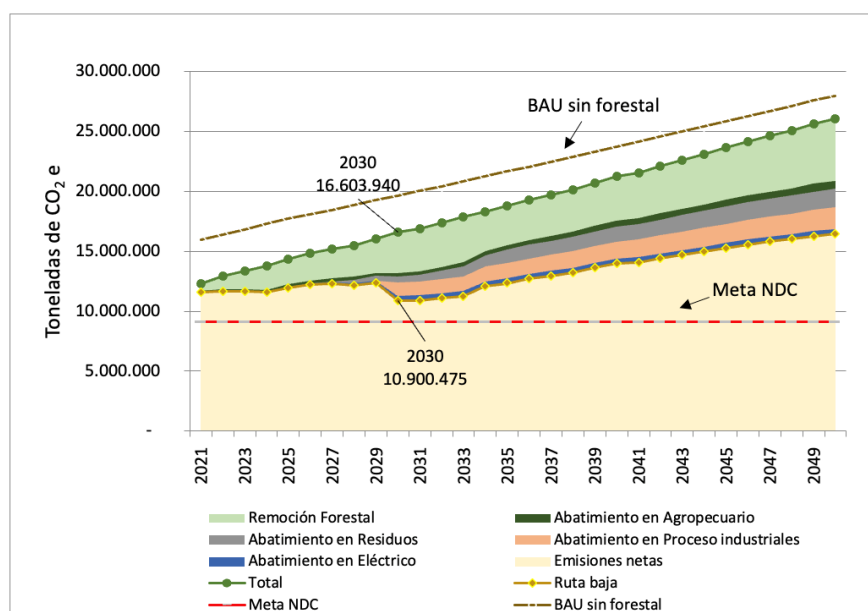
En este momento, el sector forestal sigue siendo el contribuye a plantear una ruta de mitigación mayor hacia el 2030, sin embargo, este sector no está siendo acompañado por otros sectores para lograr los compromisos puestos en la NDC, de emisiones netas en el 2030 de 9,11 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂e). Lo que deja evidente este ejercicio es que la meta de la NDC de las emisiones netas del 2030 no está acompañada de suficientes acciones de descarbonización concretas y en ejecución, como se aprecia en la Figura 2.

Pese a que el proceso de identificación de medidas para modelar ha sido exhaustivo, basado en las acciones que han sido documentadas sobre el alcance que las contribuciones a la NDC, se plantea la necesidad de generar más datos e información para un mejor entendimiento de las medidas hasta ahora consideradas y otras que no se han incorporado al análisis por carecer de definición conceptual de su alcance o de datos que permitan ver su abatimiento potencial o costos asociados.

Este análisis preliminar ha permitido configurar un escenario en el cual el país debe implementar mayores medidas para los compromisos de la NDC. Se puede observar que desde el año 2015,

cuando se presentó la primera NDC, en el país se han venido hablando de impulsar medidas en los sectores transporte, agropecuario y manejo de residuos sólidos, sin que se haya avanzado en la implementación concreta con las medidas, pese a los avances y esfuerzos por crear marcos habilitantes con normativa, políticas y programas, así como algunos avances en el sector agropecuario. El sector forestal no sólo es el que más contribuye con la remoción de emisiones, sino que el programa REDD+ es el que más acciones concretas ha venido desarrollando. La contribución en remociones del sector forestal se aprecia mejor cuando se añade la línea base de emisiones sin el sector forestal, que está representada por la línea café discontinua. Cuando se introduce el sector forestal, la línea base de emisiones se desplaza hacia abajo para alcanzar la línea con puntos verde. Cuando se añade el escenario de abatimiento, el sector forestal se prevé que contribuya con el área verde claro a través de los años.

Figura 2. Abatimiento de emisiones totales y meta NDC



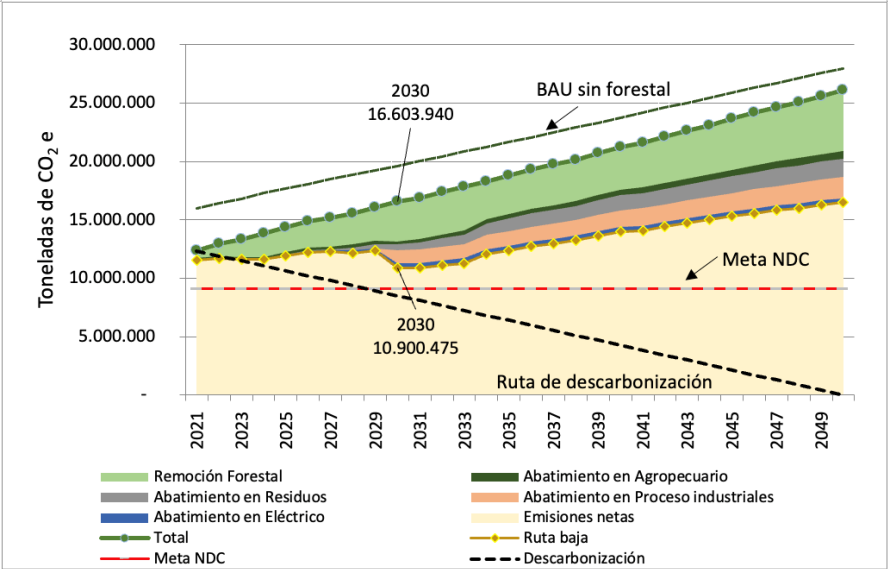
Fuente: elaboración propia

Las emisiones que se estiman para el 2030 serían de 10,9 millones de toneladas de CO₂e, que estarían por encima de los 9,11 millones de toneladas de CO₂e que plantea el compromiso NDC al respecto.

Un escenario aún más desafiante es el relacionado con el Plan Nacional de Descarbonización al 2050. La figura 3 muestra que, si el país quiere seguir en la ruta de descarbonización de la economía para el 2050, el modelo escenario de mitigación no tiene identificadas las medidas necesarias para lograrlo, especialmente en términos de cuantificación, planeación y ejecución, ya que son varias la medidas de tipo aspiracional, esbozadas en políticas y programas de la agenda climática, que aún no se convierten en medidas concretas, con la métrica y el cronograma necesarios para poder configurar su potencial de mitigación.

El trabajo en concretar las acciones de mitigación, así como su ejecución en los años que faltan para el 2030, podría definir para el país las posibilidades reales de cumplimiento de la meta NDC de 9,11 millones de toneladas de CO₂e para ese año.

Figura 3. Abatimiento de emisiones totales, Meta NDC y ruta de descarbonización



Fuente: elaboración propia

2 Contexto de la Política Nacional de Descarbonización

Costa Rica es una de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC) , las cuales reconocen “ que conociendo que los cambios del clima de la Tierra y sus efectos adversos son una preocupación común de toda la humanidad”, y que “preocupadas porque las actividades humanas han ido aumentando sustancialmente las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, y porque ese aumento intensifica el efecto invernadero natural, lo cual da como resultado, en promedio, un calentamiento adicional de la superficie de la atmósfera de la Tierra y puede afectar adversamente a los ecosistemas naturales y a la humanidad”.

La CMCC establece también que “las medidas necesarias para entender el cambio climático y hacerle frente alcanzarán su máxima eficacia en los planos ambiental, social y económico si se basan en las consideraciones pertinentes de orden científico, técnico y económico y se revalúan continuamente a la luz de los nuevos descubrimientos en la materia, reconociendo también que diversas medidas para hacer frente al cambio climático pueden justificarse económicamente por sí mismas y pueden ayudar también a resolver otros problemas ambientales”.

El país ratificó su compromiso con el Acuerdo de París, mediante la Ley 39945, el cual reconoce “la necesidad de una respuesta progresiva y eficaz a la amenaza apremiante del cambio climático, sobre la base de los mejores conocimientos científicos disponibles”. Siendo Costa Rica uno de los países “particularmente vulnerables a los efectos adversos del cambio climático” y a la “relación intrínseca que existe entre las medidas, las respuestas y las repercusiones generadas por el cambio climático y el acceso equitativo al desarrollo sostenible y la erradicación de la pobreza”.

Como parte del Acuerdo de París, Costa Rica adquirió el compromiso de contribuir, con sus Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC por sus siglas en inglés) en las medidas para enfrentar el cambio climático, limitando sus emisiones de GEI. La NDC establece que Costa Rica se compromete a un máximo absoluto de emisiones netas en el 2030 de 9,11 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂e), para un presupuesto máximo absoluto de emisiones netas para el periodo 2021-2030 de 106,53 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂e).

En el año 2018 el país ratificó su papel pionero en la lucha contra el cambio climático al ser uno de los primeros países en emitir una política de largo plazo que plantea la ambiciosa meta de avanzar hacia una economía carbono neutral, al presentar ante la CMNUCC el Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050, con la que Costa Rica aspira a contar con una economía descarbonizada en el año 2050. Las metas de mitigación de las NDC están alineadas con la trayectoria de la estrategia de largo plazo del país presentadas en el Plan Nacional de

Descarbonización, siendo una contribución ambiciosa que contempla la transformación hacia una economía baja en emisiones.

El país estableció en las NDC presentada en el 2015, que las metas de reducción de emisiones de Costa Rica serán guiadas por el consenso científico nacional, validado por el criterio del Grupo Intergubernamental sobre Cambio Climático. En el Plan Nacional de Descarbonización, el país contempló para el apoyo de las acciones de mitigación para las NDC del 2030, dos etapas de implementación: a) etapa inicial (2018-2022), b) etapa de inflexión (2023-2030).

La situación antes descrita, así como una valoración de los resultados de implementación del Plan Nacional de Descarbonización¹, a los alcances reflejados al 2024, revela que persisten barreras para crear un entorno habilitante que incida en el patrón de emisiones del país, especialmente del sector transporte, donde reside nuestra mayor fuente de emisiones, pero con acciones también pendientes en el sector agropecuario, manejo de residuos y procesos industriales. Esa evaluación realizada de la implementación del Plan Nacional de Descarbonización en el 2021 reporta el cumplimiento de un 61% de las metas para la primera etapa, pero su análisis más profundo revela un importante rezago en crear las condiciones de implementación para la segunda etapa, donde se espera una inflexión hacia la reducción de la huella de carbono del país.

El nivel de implementación de las medidas de descarbonización no ha sido suficiente para generar una inflexión en el patrón de emisiones como para lograr las metas que se ha propuesto en la NDC para el 2030 y que, por lo tanto, el país debe pensar en nuevos enfoques para evitar un rezago importante si las actuales condiciones se mantienen.

2.1 Emisiones de Gases de Efecto Invernadero

El MINAE, por medio del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) presentó el *Inventario Nacional de emisiones por fuentes y absorción por sumideros de Gases de Efecto Invernadero Costa Rica, 2021 (INGEI 2021)*. De acuerdo con la metodología de Inventarios Nacionales basada en las directrices del IPCC, se analizan cuatro sectores: Energía, Procesos Industriales y Uso de Productos (IPPU) y Uso de productos, Agricultura, Silvicultura y otros Usos de la tierra, y Residuos (IMN, 2021).

Este Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (en adelante INGEl) revisa y actualiza ediciones anteriores del mismo, estimándose emisiones que ocurrieron en el país para todos los años analizados de cinco grupos o especies de gases con efecto invernadero directo: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆). En el caso de los perfluorocarbonos (PFC) y del trifluoruro de nitrógeno (NF₃) no se ha hallado evidencia de su emisión en el país. Se incluyen también las emisiones de los siguientes

¹ MINAE (2021). Reporte de avances en la implementación del PLAN NACIONAL DE DESCARBONIZACIÓN al 2021

gases con efecto invernadero indirecto: monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COVNM), óxidos de nitrógeno (NOx), óxidos de azufre (SOX) y carbono negro (BC).

De acuerdo con el capítulo de este BTR, para el año 2021, las emisiones netas fueron de 12.632,50 Gg de dióxido de carbono equivalente excluyendo CO₂ proveniente de biomasa, mientras que las emisiones excluyendo FOLU fueron de 14.477 Gg de CO₂ equivalente.

El inventario de GEI del 2021 muestra que el sector energía es el de mayores emisiones con 50% de las emisiones totales. Además, destaca que la segunda actividad por emisiones es la agricultura, donde la mayor parte de sus emisiones están asociadas a la fermentación entérica del ganado y representa 21,8% del total. Sin embargo, debido al secuestro de carbono por las actividades forestales, que representan -21,8% de las emisiones netas (Cuadro 1). En el sector de residuos se registran 17% de las emisiones netas, las que se producen por el metano que se expelle a la atmósfera en rellenos sanitarios, vertederos y otros botaderos no controlados, así como por la disposición y tratamiento de aguas residuales. El sector industrial es responsable por el 11,2% de las emisiones de las emisiones netas, la mayor parte asociadas a la industria de cemento.

Cuadro 1 Emisiones Totales de GEI 2021

Sector	Gg CO ₂	Porcentaje
Energía	8.076,29	50,0%
IPPU	1.812,93	11,2%
Agricultura	3.520,10	21,8%
UTCUTS (FOLU)	-3.523,17	-21,8%
Residuos	2.747,50	17,0%
Total	12.632,50	100%

Fuente: Elaboración propia con base en datos del IMN-BTR (2024)

3 Análisis de factores condicionantes de las emisiones de GEI

En esta sección se hace un repaso de los principales factores condicionantes que explican el comportamiento de las emisiones de GEI en los diversos sectores estudiados. Estos factores, que generalmente se denominan *drivers* (por sus siglas en inglés), permiten identificar determinantes del comportamiento de las emisiones del pasado, que sirven como base para proyectarlas hacia el futuro. En los drivers se distinguen aquellos que influyen en todos los sectores y en las emisiones totales del país, de aquellos cuyos efectos son particulares a sectores específicos.

Los resultados de este análisis encuentran una alta relación de varios de los aspectos analizados con el Producto Interno Bruto, que en este caso es llevado a cifras reales con base en el 2017, que es la última actualización del Banco Central de Costa Rica (BCCR).

Además, existe una alta relación con el crecimiento de la población, para lo cual se usan los datos del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). Del INEC también se ha considerado el crecimiento del número de viviendas.

Se hace un análisis de estos factores condicionantes para los diferentes sectores considerados. En el caso de transporte se toma en cuenta la relación de la flota vehicular con el consumo de combustibles, lo cual guarda en el fondo una fuerte relación con el crecimiento de la economía expresada por el PIB.

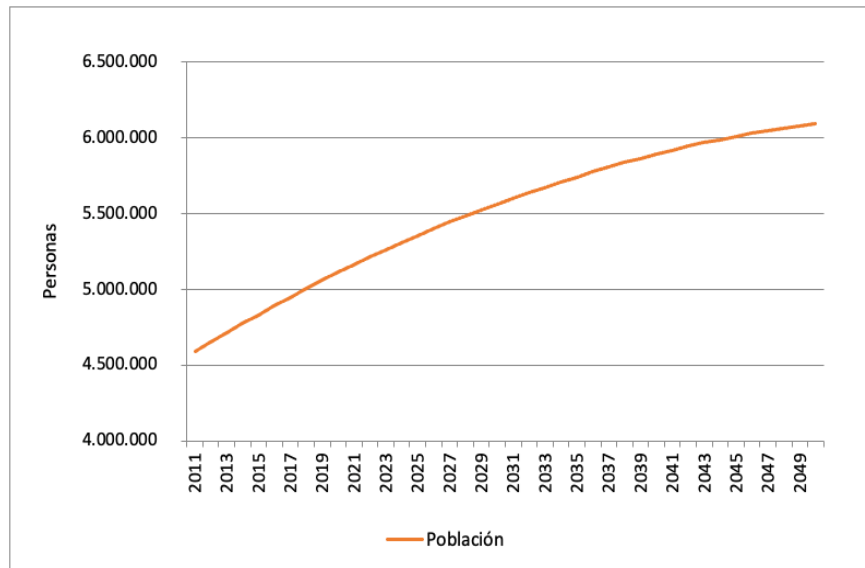
En el sector agrícola se encuentra una fuerte relación del consumo pecuario con la población y el PIB, pero en la parte agrícola, dado que un 77% de los productos tienen un destino a mercados internacionales (con excepción del arroz), el estudio de la evolución del área de siembra se encuentra como un importante driver.

En el sector forestal y uso de la tierra se encuentra fundamental los factores que influyen en el comportamiento de la cobertura del bosque maduro y el bosque secundario, teniéndose presente la fuerte relación con la evolución del área de uso agrícola. También se considera la actividad de plantaciones forestales en el análisis.

3.1 Población

Uno de los principales drivers de las emisiones GEI es el crecimiento de la población. Con base en el Censo Nacional del 2012, el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) ha hecho una nueva proyección de la población hasta el 2050. Los resultados se muestran en el Gráfico 1.

Gráfico 1 Proyección de Población según Censo del 2012

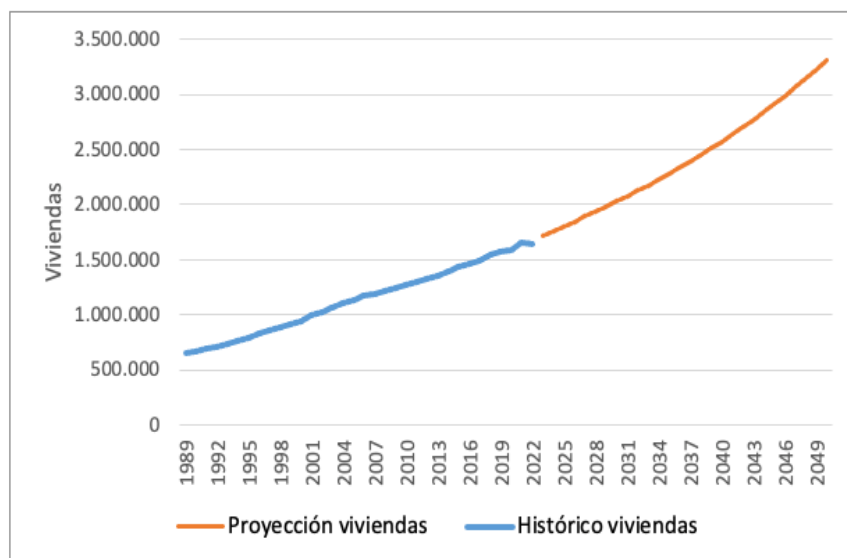


Fuente: INEC, Censo Nacional 2012

3.2 Viviendas

Por otra parte, se realizó una proyección de viviendas basado en los datos de población y de viviendas del INEC. Para incorporar el fenómeno demográfico de que los hogares han venido siendo históricamente habitado en promedio por un numero decreciente de personas, las proyecciones se han hecho respecto a los habitantes por vivienda, a partir de lo cual y con los datos proyectados de población, se han establecido las proyecciones de viviendas para el futuro (Gráfico 2).

Gráfico 2 Histórico y Proyección de Viviendas al 2050



Fuente: Elaboración propia con datos del INEC

3.3 Producto Interno Bruto

El otro driver fundamental de las emisiones es el crecimiento de la producción nacional. Para la estimación del Producto Interno Bruto se elaboran escenarios no sólo basados en el comportamiento de la tendencia del producto en términos reales, sino en el nivel de crecimiento per cápita que se esperaría alcanzar para el 2050. Como se ve en el Cuadro 2, el promedio de ingreso per cápita de los países de la OCDE se ubica actualmente en US\$46.281. Los escenarios futuros de emisiones parten del supuesto que el país alcanzará para el año 2050 niveles comparables con estos países de la OCDE, para poder fijar niveles de crecimiento del PIB y por consiguiente de las emisiones de GEI acorde con las aspiraciones de crecer para llegar a un nivel de país desarrollado.

Cuadro 2 PIB per cápita para Países de la OCDE en US\$ a Precios Corrientes, 2023

País	PIB per cápita	País	PIB per cápita
	US\$		US\$
Alemania	52.745,75	Hungría	22.147,20
Australia	64.711,76	Irlanda	103.684,88
Austria	56.505,96	Islandia	78.811,05
Bélgica	53.475,29	Italia	38.373,16
Canadá	53.371,69	Japón	33.834,39
Corea del Sur	33.121,37	Luxemburgo	128.259,40
Dinamarca	67.967,38	Noruega	87.961,78
		Nueva	
Lituania	27.102,78	Zelanda	48.527,82
Eslovenia	32.163,51	Polonia	22.112,86
España	32.676,98	Portugal	27.275,11
Estados Unidos	81.695,18	Reino Unido	48.866,60
Finlandia	53.755,91	Rep. Checa	30.427,42
Francia	44.460,81	Suecia	56.305,2
Estonia	29.823,74	Suiza	99.994,93
Países Bajos	62.536,73	<i>Costa Rica</i>	<i>16.595,37</i>
Promedio			
OCDE			46.280,58

Fuente: elaboración propia con datos del Banco Mundial²

Para los escenarios de crecimiento del PIB real en primer lugar se utilizó un modelo polinomial de grado dos sobre el comportamiento de la tendencia del PIB real que se registra desde 1991. El ajuste resultante se describe por la ecuación $y = 845,11x^2 + 47356x + 845124$ (con un R cuadrado de 0,9956). El resultado de proyectar para el año 2050 presenta una tasa promedio de crecimiento del PIB real de 2,5%. Esta tasa se utiliza como un escenario *medio* de referencia para

² <https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.PCAP.CD?locations=OE>

crecimiento del PIB real. Un escenario *bajo* se ha construido con una tasa de crecimiento promedio anual del PIB real de 1,5% y el escenario alto supone un crecimiento real promedio anual de 3,5%.

Tomando un ingreso per cápita de Costa Rica para el 2023 de US\$16.595, considerando el crecimiento de la producción y la proyección del tipo de cambio (cuadro 3), en el escenario *medio* para el 2050, el PIB per cápita se ubicaría en US\$33,346, por lo si bien el país no alcanzaría el nivel actual promedio de ingreso de la ODCE, cifrado en US\$46.280, estaría a los niveles actuales de países como Estonia o República Checa.

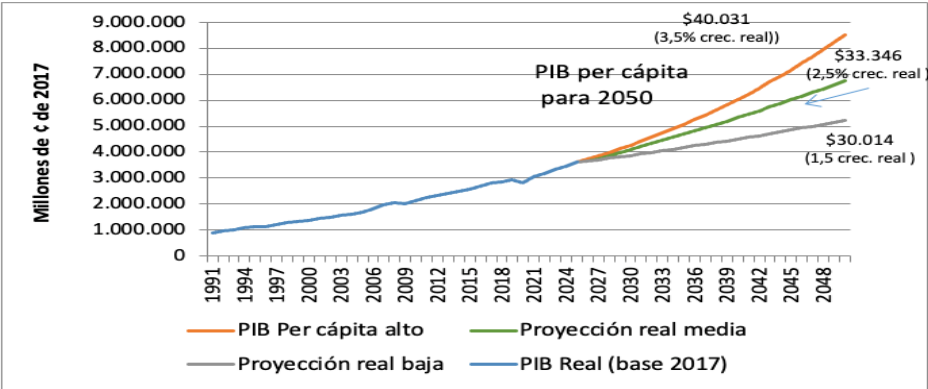
Con la tasa de crecimiento del escenario *bajo*, el PIB per cápita para el 2050 alcanzaría US\$30,014, un nivel cercano al que presentan en la actualidad Estonia o República Checa. En el escenario *alto* de referencia, el país alcanzaría un PIB per cápita de US\$40,031, lo que es coincidente con un ingreso per cápita ubicado entre lo que tienen actualmente países como Italia y Francia (Gráfico 3).

Cuadro 3 Tipo de cambio proyectado 2024-2050

Año	Tipo de cambio	Año	Tipo de cambio
2024	524	2038	645
2025	587	2039	649
2026	593	2040	652
2027	598	2041	656
2028	602	2042	659
2029	607	2043	663
2030	612	2044	666
2031	616	2045	669
2032	621	2046	673
2033	625	2047	676
2034	629	2048	679
2035	633	2049	682
2036	637	2050	685
2037	641		

Fuente: elaboración propia con base en datos del BCCR

Gráfico 3 Histórico y Proyección del Producto Interno Bruto real (1991=100)



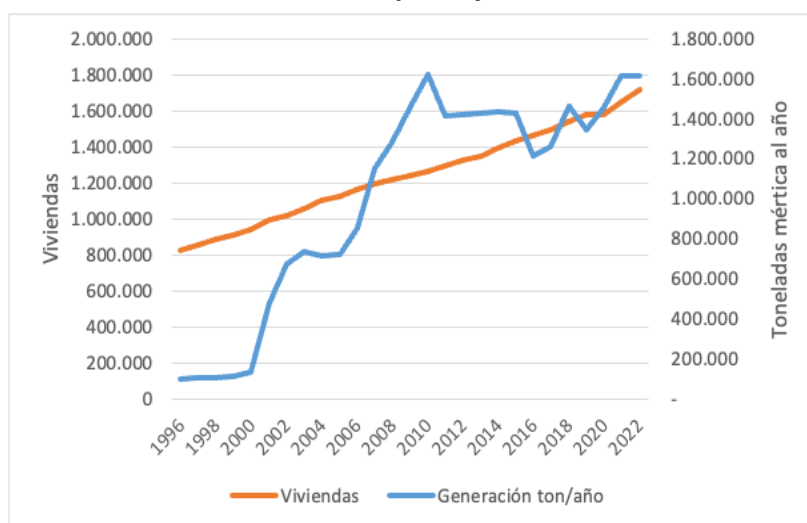
Fuente: elaboración propia con base en datos del BCCR

3.4 Manejo de Residuos

Para el sector de residuos sólidos se analizan los registros de residuos recolectados por los municipios y con base en esto la estimación de residuos generados, según el Censo Nacional de 2011, así como los datos del INGEI 2017. Se observa su relación con el número de hogares y con el tamaño de la población. Se hace además una contraposición con el ingreso per cápita para observar si la combinación de la población y la actividad económica influyen la generación de residuos.

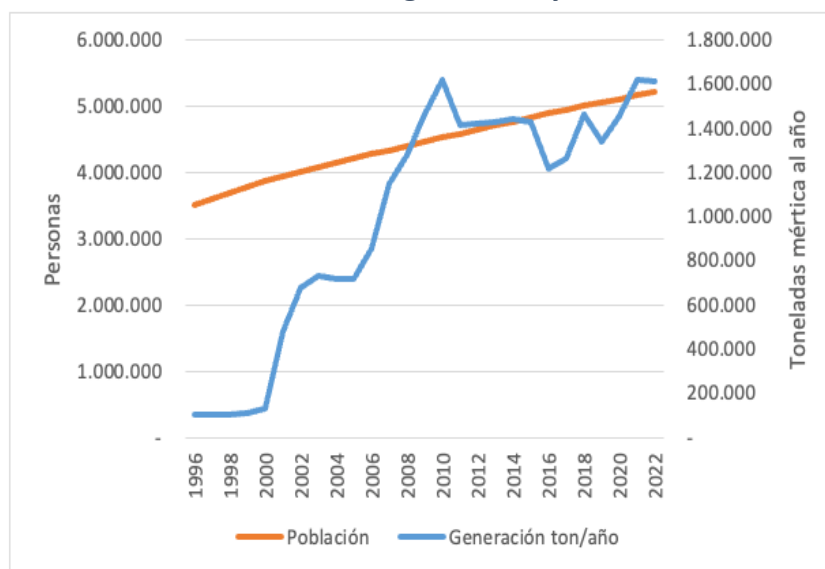
Los datos de generación de residuos presentan dos periodos en los que sus patrones varían apreciablemente. Un primer momento es antes del 2010, en que su correlación con las variables población no se observa muy fuerte, ya que la expansión de los residuos en el tiempo ha sido muy acelerada, en mayor magnitud que las variables comparadas. Otro momento es después del año 2010, en donde dicha correlación es mayor. Esto se debe a la entrada en vigor de la Ley para la Gestión Integral de Residuos (Ley 8839), que obliga a las municipalidades a atender el tema. En la última década los municipios han hecho esfuerzos para gestionar sus residuos y el sector privado ha incrementado sus servicios de recolección a los municipios. En esta última década se ha venido a presentar por parte de la generación de residuos sólidos un comportamiento similar a los drivers analizados (Gráficos 4, 5 y 6).

Gráfico 4 Residuos municipales y Número de Viviendas



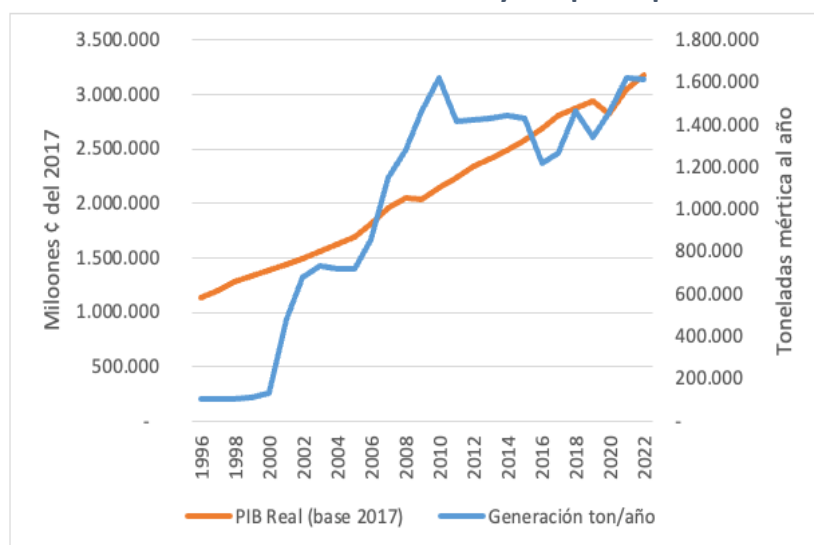
Fuente: elaboración propia con base en datos del INEC y el Ministerio de Salud

Gráfico 5 Residuos generados y Población



Fuente: elaboración propia con base en datos del INEC y el Ministerio de Salud

Gráfico 6 Residuos Sólidos y PIB per cápita

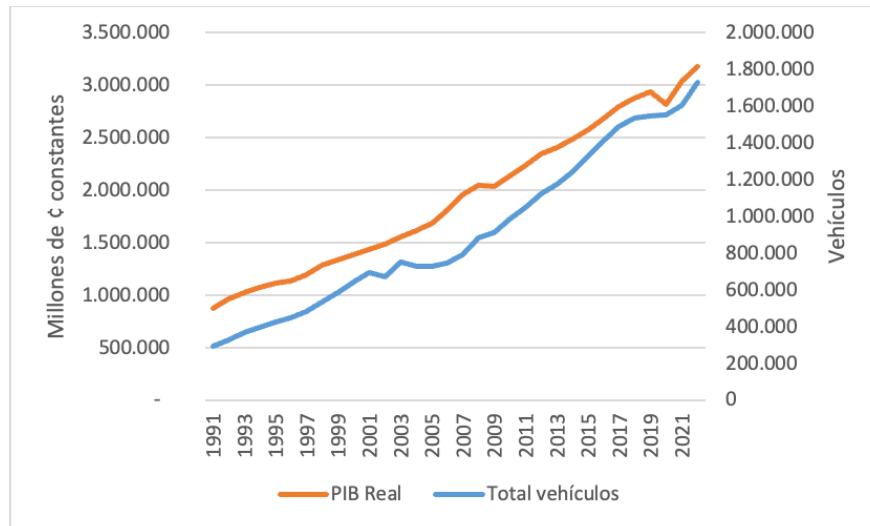


Fuente: elaboración propia con base en datos del BCCR y Ministerio de Salud

3.5 Sector Transporte

El consumo de energía en el sector transporte está asociado al crecimiento de la flota vehicular, la cual, a su vez, tal y como se puede observar en el Gráfico 7, tiene una alta correlación con el crecimiento de la economía, explicado especialmente por el vínculo con el transporte particular privado. Sin embargo, incluso flotas como la de transporte público, así como la de carga, tienen una alta correlación con el crecimiento de la economía.

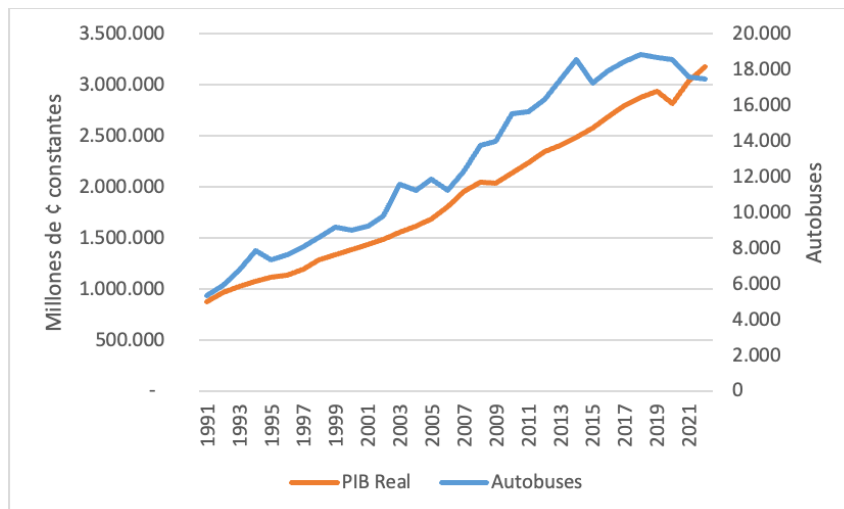
Gráfico 7 Flota Vehicular total y PIB real



Fuente: elaboración propia con base en datos del BCCR, INEC y MINAE

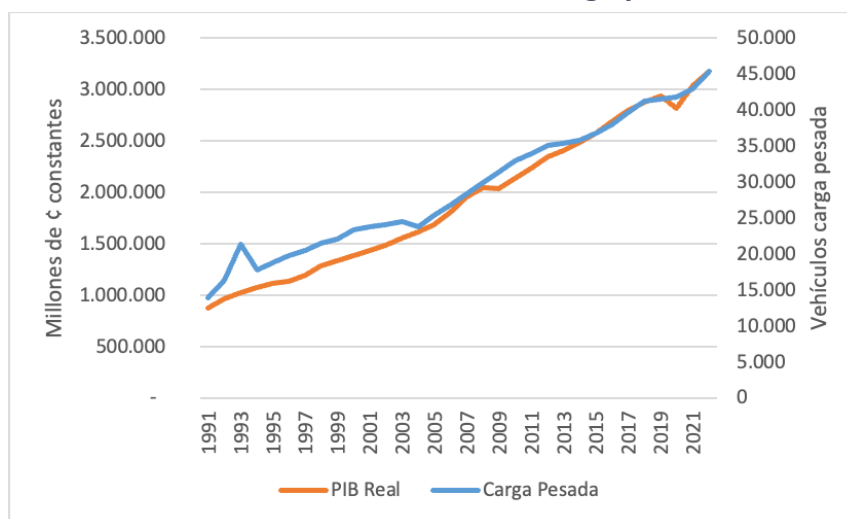
El consumo de combustibles por transportes en el país se puede modelar de acuerdo al consumo del diésel y el consumo de gasolina. El consumo de diésel es una función de la flota de carga y de transporte público por autobuses (Gráfico 8 y Gráfico 9), aunque se puede considerar la porción de transporte que usa el combustible. Asimismo, el consumo de diésel está en función de su precio, el cual depende del precio internacional del petróleo. Por su parte, el consumo de la gasolina está en función de la flota de autos particulares, motocicletas y otros vehículos de gasolina. Igualmente, el consumo está en función del precio de la gasolina, que sigue el comportamiento internacional de los precios del petróleo.

Gráfico 8 Flota de Transporte público y PIB real



Fuente: elaboración propia con base en datos del BCCR, INEC y MINAE

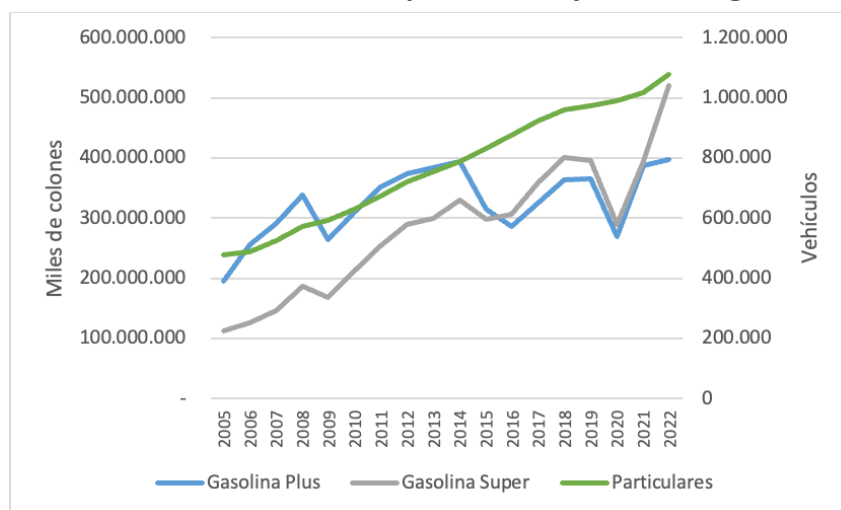
Gráfico 9 Flota de Vehículos de Carga y PIB real



Fuente: elaboración propia con base en datos del BCCR, INEC y MINAE

La influencia del sector transporte sobre las emisiones de GEI es debido al uso de los combustibles fósiles. Las ventas de combustibles no parecen ser un buen indicador del consumo, pues como se observa en el Gráfico 10, las ventas están influenciadas por la relación precio y cantidad, y desde el 2014 las ventas de RECOPE de gasolinas tienen una caída que no concuerda con el parque automotor de vehículos particulares.

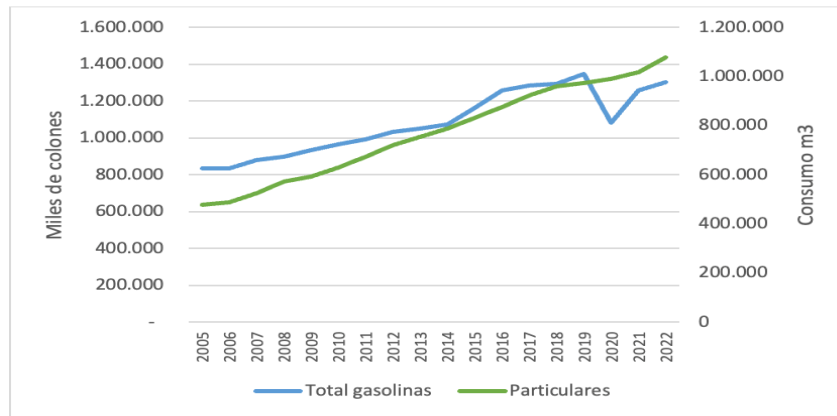
Gráfico 10 Flota de Vehículos particulares y ventas de gasolinas



Fuente: elaboración propia con base en datos del BCCR y RECOPE

Por su parte, las ventas físicas sí reflejan una relación de las ventas de combustibles con la flota vehicular. El Gráfico 11 revela que el volumen total de venta de gasolinas, tanto Super como Plus, tiene una fuerte relación con la evolución de la flota vehicular de uso particular.

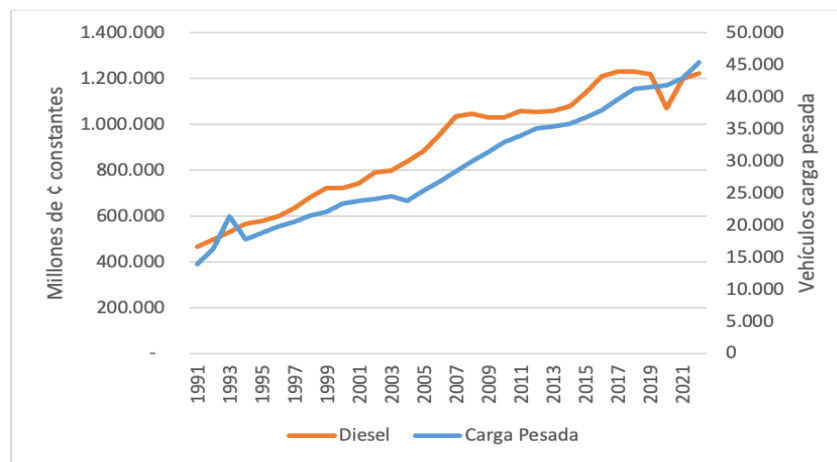
Gráfico 11 Flota de Vehículos particulares y volumen total de gasolinas



Fuente: elaboración propia con base en datos del BCCR y RECOPE

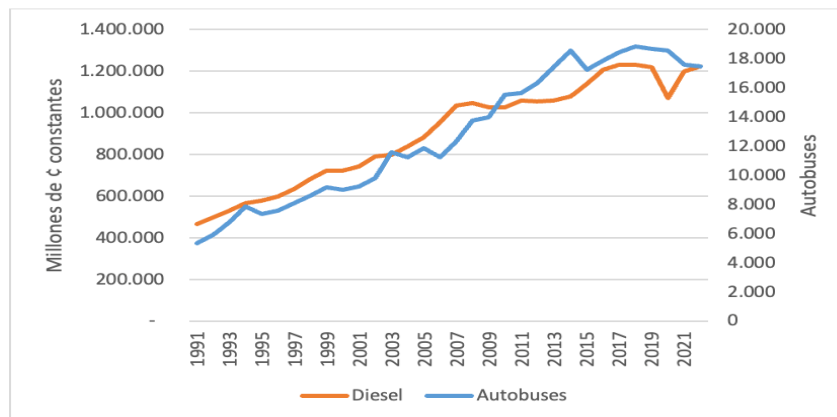
Por su parte, las ventas físicas de diésel tienen una alta relación con el crecimiento de la flota de carga pesada y autobuses (Gráficos 12 y 13).

Gráfico 12 Flota de Vehículos de carga pesada y volumen total de diésel



Fuente: elaboración propia con base en datos del BCCR y RECOPE

Gráfico 13 Flota de Vehículos de autobuses y volumen total de diésel



Fuente: elaboración propia con base en datos del BCCR y RECOPE

3.6 Sector Eléctrico

En Costa Rica para el 2021, la capacidad instalada del Sistema Eléctrico fue de 3 482 MW, conformada por un 67% de plantas hidroeléctricas, un 12.2% de plantas térmicas, un 7.4% de plantas geotérmicas, un 11.2% de plantas eólicas, un 2% de biomasa y un 0.2% de solar.

Las emisiones del sector eléctrico provienen principalmente del uso de combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica con plantas térmicas, que si bien el país cuenta con esa capacidad instalada del 12,2% con fuentes térmicas, su uso en la generación eléctrica en el 2021 representó sólo el 0,1% de un total de 12.540 GWh (Cuadro 4), con lo que la generación eléctrica del país de los últimos años ha sido renovable en casi un 100%.

Cuadro 4 Composición de la Generación Eléctrica (2021)

Fuente	Gwh	Participación
Hidro	9.280	74,0%
Geotérmico	1.450	12,8%
Térmico	1.043	0,1%
Eólico	1.568	12,5%
Biomasa	12,5	0,1%
Solar	2,4	0.02%
Total	12.540	100%

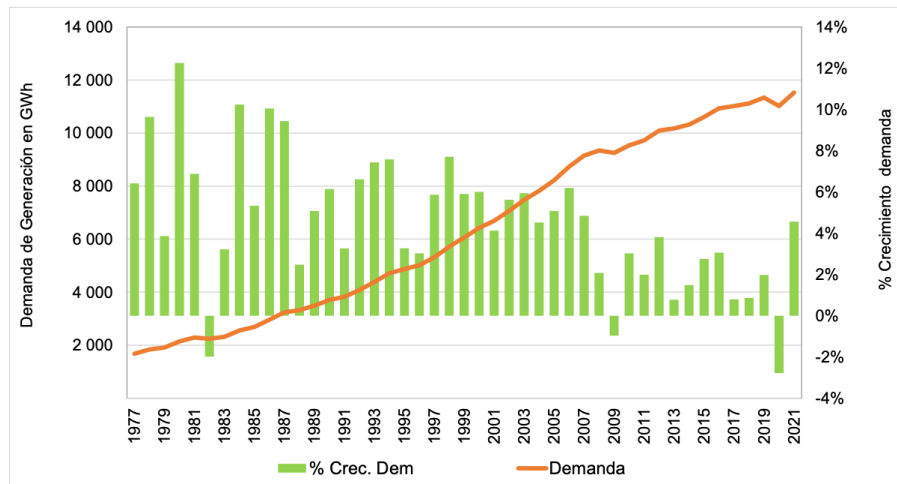
Fuente: Instituto Costarricense de Electricidad

El crecimiento de la demanda de electricidad ha reaccionado directamente con el desenvolvimiento o las expectativas de crecimiento de la economía, aunque con el comportamiento fuera de lo esperado con la crisis del COVID-19. Con un crecimiento expansivo en el 2021 del 4,54%, lo que implicó que la generación del 2021 fue un 8,72% más alta de lo ocurrido en el 2020. En el 2021 la demanda total fue de 11.523 GWh, con una importación del sólo 624 GWh y una exportación de electricidad a la región de 1.641 GWh.

En el Gráfico 14 se observa el crecimiento histórico de la demanda de generación del país. No sólo el periodo de la crisis del COVID-19, con una caída en la demanda de 2,77% ha significado una fuerte fluctuación, especialmente en los últimos 10 años, la demanda se ha mostrado con un crecimiento muy fluctuante, y en los próximos años, es probable que la demanda del país siga mostrando crecimientos erráticos, lo que impone grandes retos a la planificación de la expansión eléctrica.

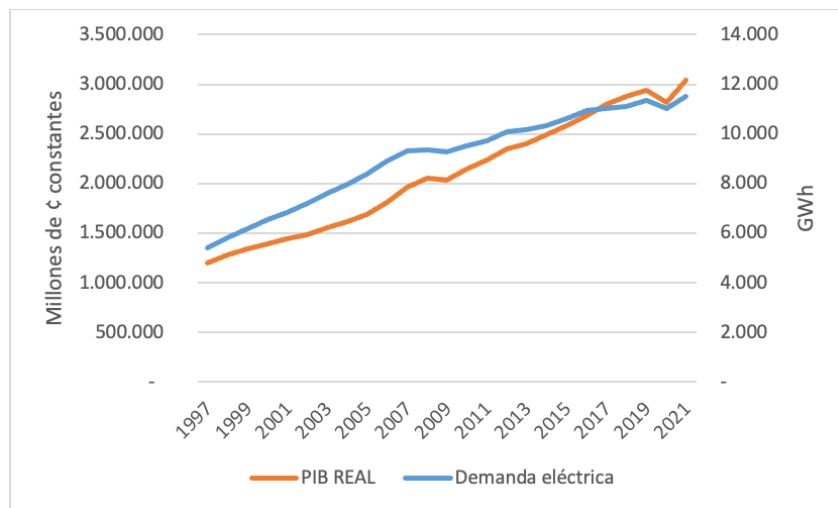
El análisis de la demanda eléctrica indica que sigue un patrón muy relacionado con el crecimiento del PIB, tal y como se observa en el Gráfico 15. Esto indica que las emisiones de la generación eléctrica pueden estar explicadas por el desenvolvimiento de la demanda y la estructura de generación de la oferta, con su componente de generación térmica.

Gráfico 14 Demanda eléctrica y tasa de crecimiento 1976-2021



Fuente: Instituto Costarricense de Electricidad

Gráfico 15 Demanda Eléctrica y PIB real 1997-2021



Fuente: elaboración propia con datos del BCCR e ICE

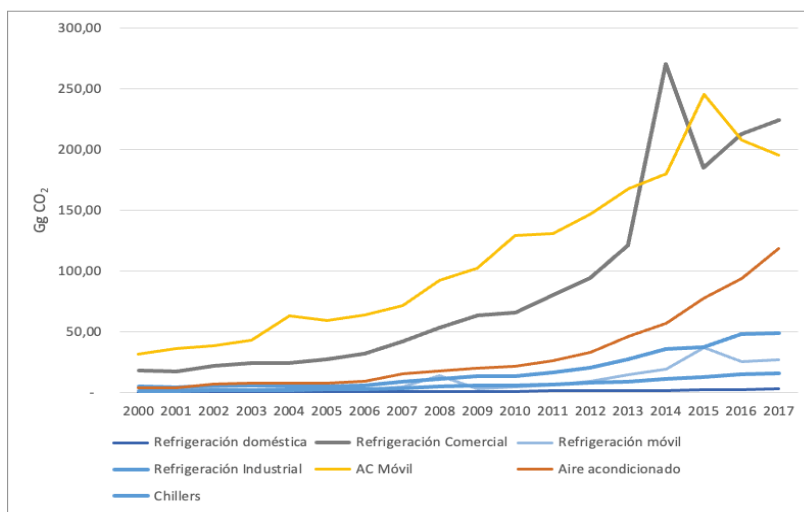
3.7 Procesos Industriales y uso de productos

En los procesos industriales, el INGEI 2017 señala que las emisiones de este sector fueron 1394,7 Gg de CO₂ equivalente. Históricamente la industria de los minerales ha sido la que más ha emitido, y en donde destaca el uso del cemento en la industria de los minerales, que representa el 53% de las emisiones totales. Pero también, en este sector ha venido destacando las emisiones debidas al uso de HFCs que representaron 11 % en el 2000 y alcanzan 45,6% de las emisiones totales del sector en el 2017.

La producción de cemento está ligada con la construcción residencial, comercial, industrial y otras. La actividad de construcción es muy volátil respecto al comportamiento del PIB, y en el análisis macroeconómico se considera que responde a las expectativas de crecimiento de la economía, por lo tanto, es difícil modelar la actividad de la construcción respecto al PIB si no se determinan sus rezagos.

Sobre los otros procesos industriales es posible modelar las emisiones de refrigerantes ya que su registro en el país es reciente y la información aún no está disponible. En este apartado se debe considerar los compromisos de país con el Protocolo de Montreal. En el marco de la implementación de este Protocolo, Costa Rica alcanzó en el 2010 la eliminación de la importación de sustancias sintéticas como los clorofluorocarbonos (CFC) que agotan la capa de ozono y producen calentamiento global. El país ha optado por el uso de sustancias alternativas a los CFC, como los hidroclorofluorocarbonos (HCFC) y los hidrofluorocarbonos (HFC), pero igualmente los HCFC agotan la capa de y tienen un alto potencial de calentamiento global, por lo cual están siendo regulados a través de un sistema de cuotas de importación y se tiene prevista su eliminación total en el año 2030. Los hidrofluorocarbonos (HFC) tienen un alto potencial de calentamiento global, por lo cual su consumo será un condicionante por analizar para el sector industrial. En el Gráfico 16 se muestra que las emisiones de los HFC han venido mostrando una tendencia creciente en sus diferentes fuentes.

Gráfico 16 Emisiones de HFC por fuente en CO₂ equivalente (Gg)

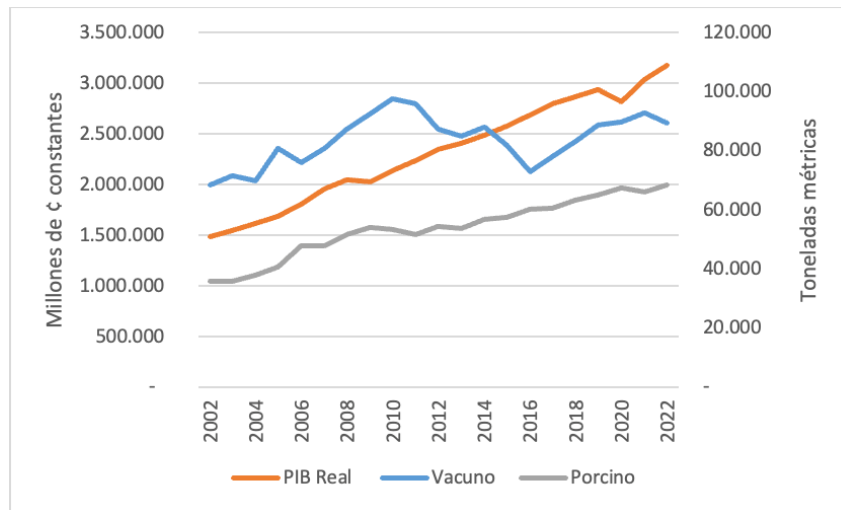


Fuente: elaboración propia con datos del BCCR e ICE

3.8 Sector Agropecuario

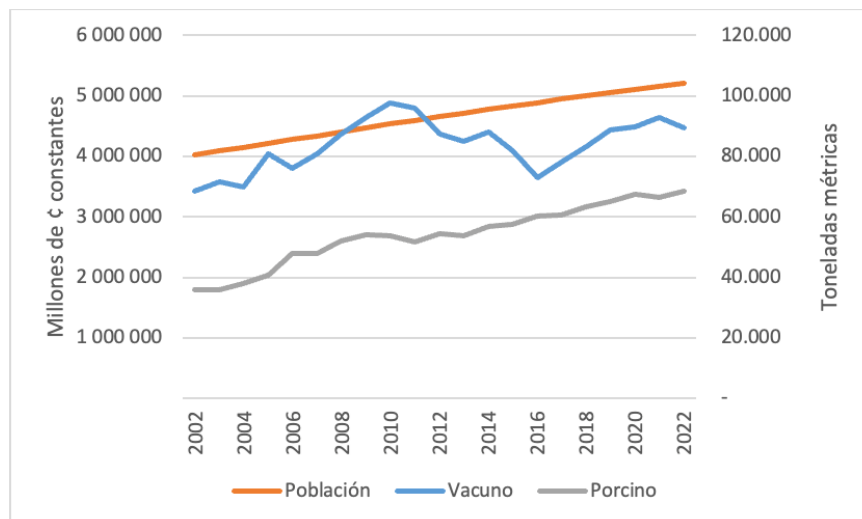
Debido a que la producción de ganado bovino y porcino cuenta con estadísticas, se tiene que para la producción de carne en el país hasta el año 2022, se presentó una tendencia al alza, la cual seguía muy de cerca la tendencia del PIB real (Gráfico 17). Igualmente, se encuentra una estrecha relación con dicha producción y la evolución de la población (Gráfico 18).

Gráfico 17 Producción bovina y porcina y PIB



Fuente: elaboración propia con datos del BCCR y MAG

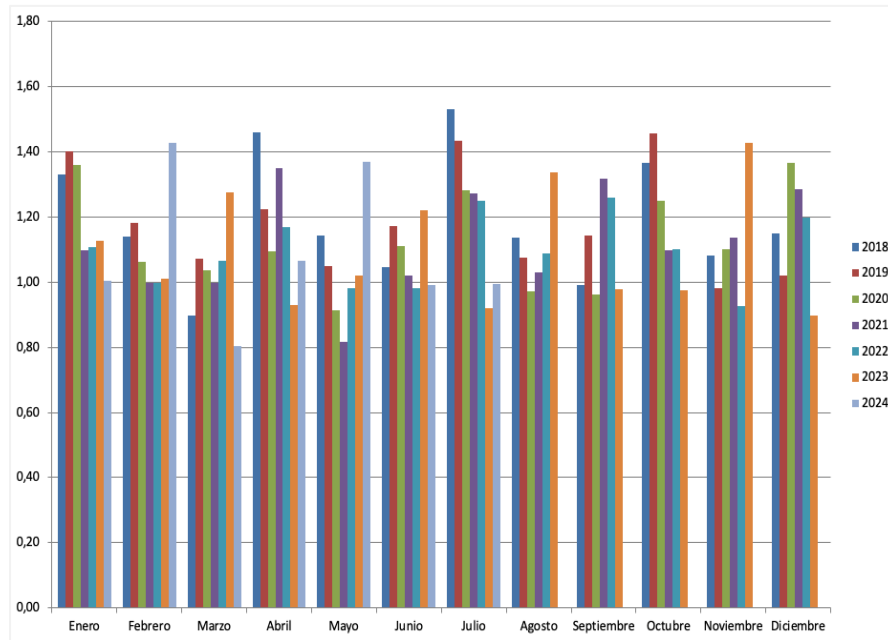
Gráfico 18 Producción bovina y porcina y población



Fuente: elaboración propia con datos del INEC y MAG

Las estadísticas de la Corporación de Fomento Ganadero indican que el costarricense se mantiene con un consumo mensual promedio que oscila entre 1 y 1,40 kg per cápita (Gráfico 19).

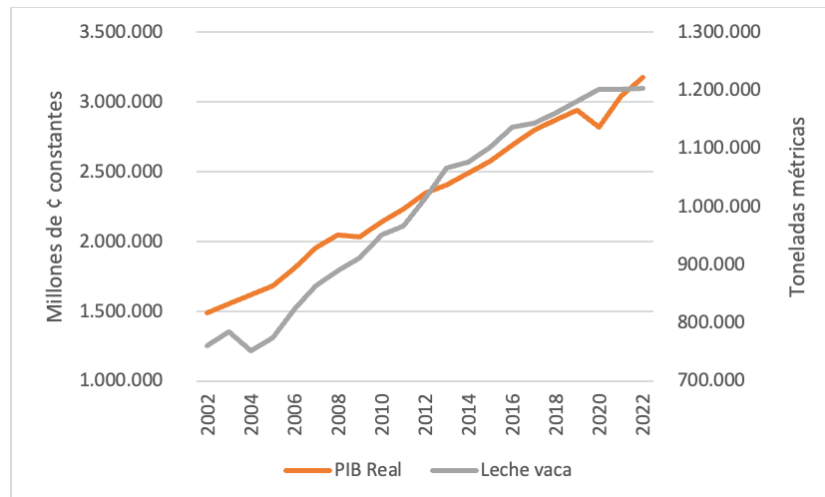
Gráfico 19 Consumo per cápita de Carne de Res



Fuente: elaboración propia con datos de CORFOGA

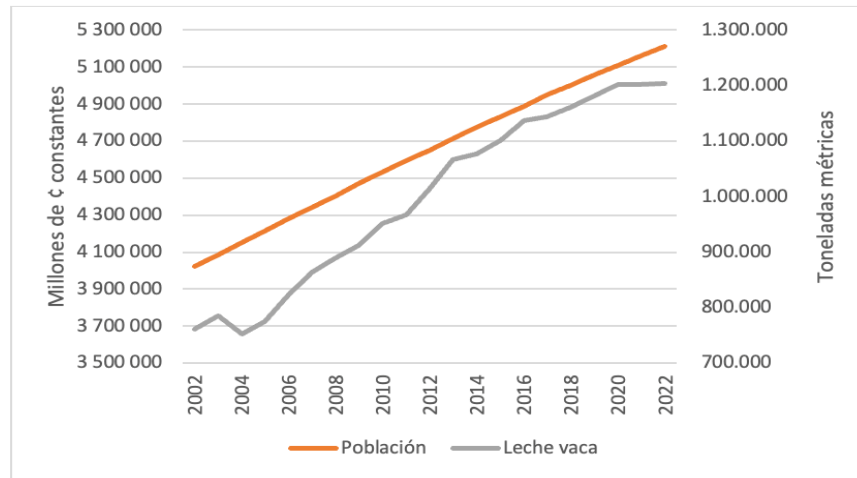
La producción de leche por su parte presenta un crecimiento también fuertemente asociado al Producto Interno Bruto y a la población, señalando el doble efecto de crecimiento poblacional y la actividad económica (Gráficos 20 y 21).

Gráfico 20 Producción de Leche y PIB real



Fuente: elaboración propia con datos del BCCR y MAG

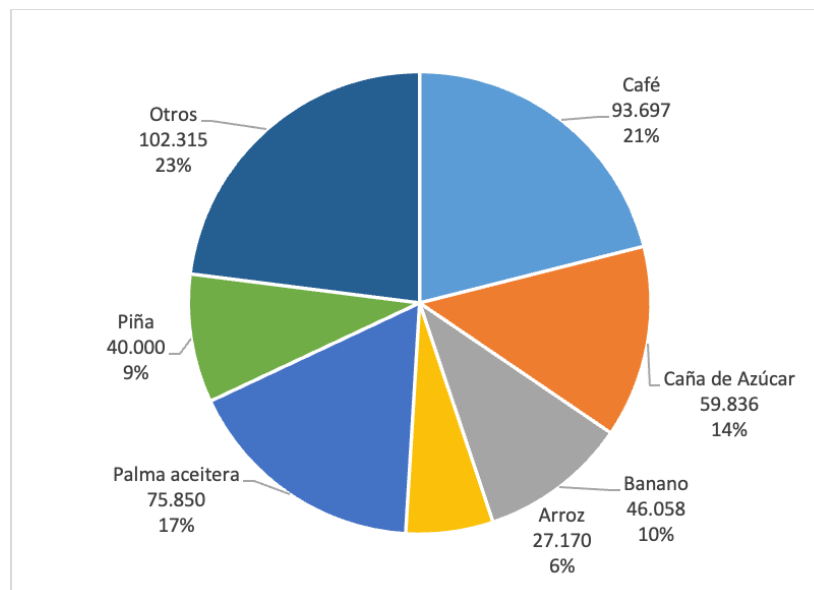
Gráfico 21 Producción de Leche y población



Fuente: elaboración propia con datos de INEC y MAG

Los cultivos agrícolas y las pasturas explican el 32% de las emisiones de las actividades agropecuarias, especialmente por el componente del N_2O en los suelos agrícolas y en las quemas, y por el metano del arroz anegado. Para analizar los drivers de las actividades agropecuarias, es necesario establecer el comportamiento de los productos que más cubre el área de cultivo en el país. En el Gráfico 212 se muestra que las actividades de café, caña de azúcar, banano, arroz, palma de aceite y piña, representan el 77% del área sembrada en el 2022.

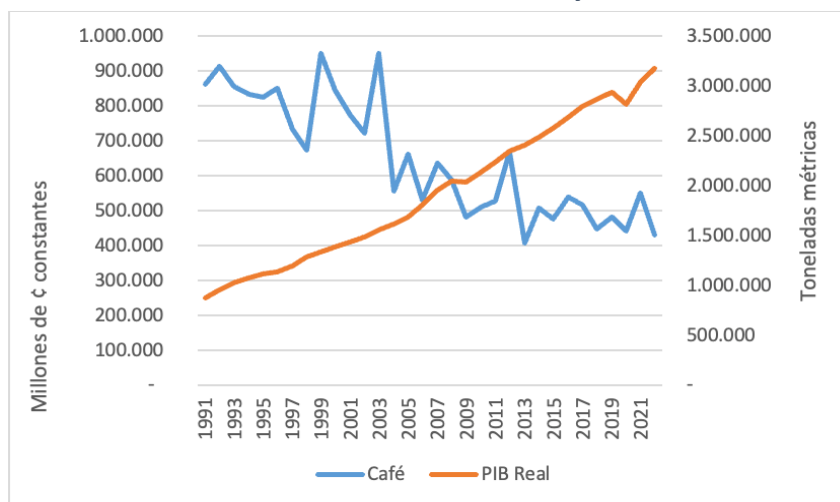
Gráfico 22 Distribución de Área de Siembra agrícola (2022)



Fuente: elaboración propia con datos de SEPSA-MAG

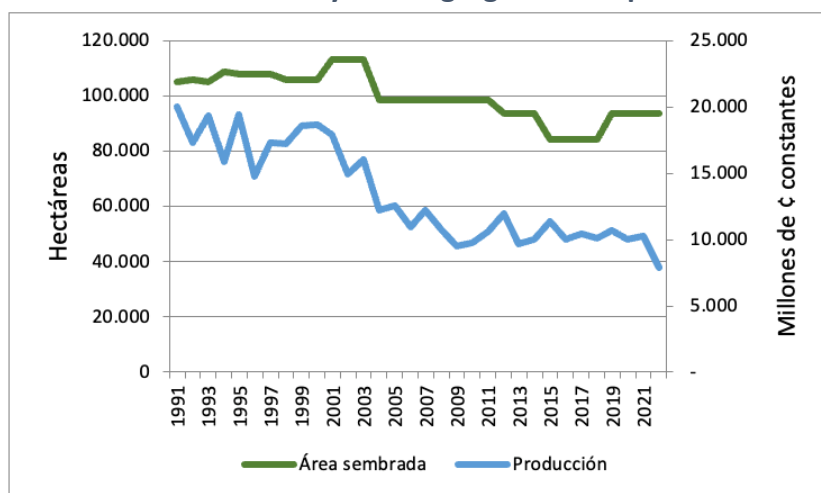
En el caso del café se puede ver que es una actividad que se ha venido contrayendo de manera sostenida en las últimas dos décadas. En el caso de la producción de café y el PIB real, las tendencias se contraponen (Gráfico 23). Por su parte, el valor agregado de la producción manifiesta una caída mayor que la reducción que viene mostrando el área de siembra del café (Gráfico 24).

Gráfico 23 Producción de Café y PIB real



Fuente: elaboración propia con datos del BCCR y SEPSA-MAG

Gráfico 24 Área de siembra y valor agregado de la producción de Café

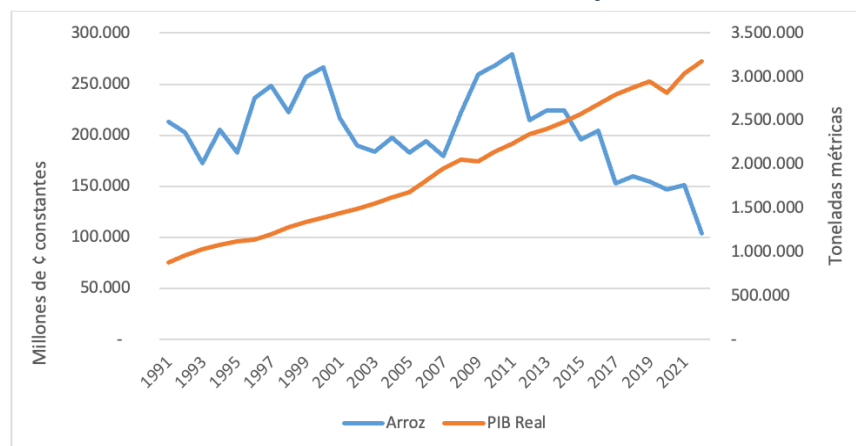


Fuente: elaboración propia con datos de SEPSA-MAG

El arroz presenta poca correlación con el PIB (Gráfico 25). En los últimos 10 años la producción del arroz refleja los cambios estructurales que ha tenido la actividad, la cual había sido protegida de la competencia externa por muchos años, y más recientemente se llevó a cabo la liberalización

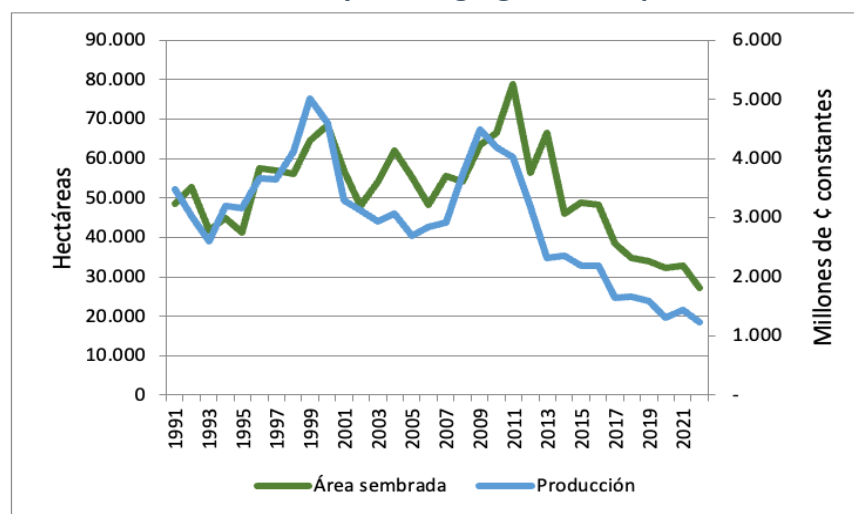
del precio del arroz y por ese medio la protección que se mantenía al sector nacional. A finales de los años noventa se suscita una baja internacional del precio, lo que incentivó más importaciones y una menor producción local. Con la recuperación de los precios internacionales, especialmente desde el 2011, se desincentiva la producción nacional ante importaciones relativamente de menos costo y una industria importadora muy agresiva. El Gráfico 26 muestra que la caída en el valor agregado de la producción sigue la disminución sufrida en el área sembrada.

Gráfico 25 Producción de Arroz y PIB real



Fuente: elaboración propia con datos del BCCR y SEPSA-MAG

Gráfico 26 Área de siembra y valor agregado de la producción de Arroz

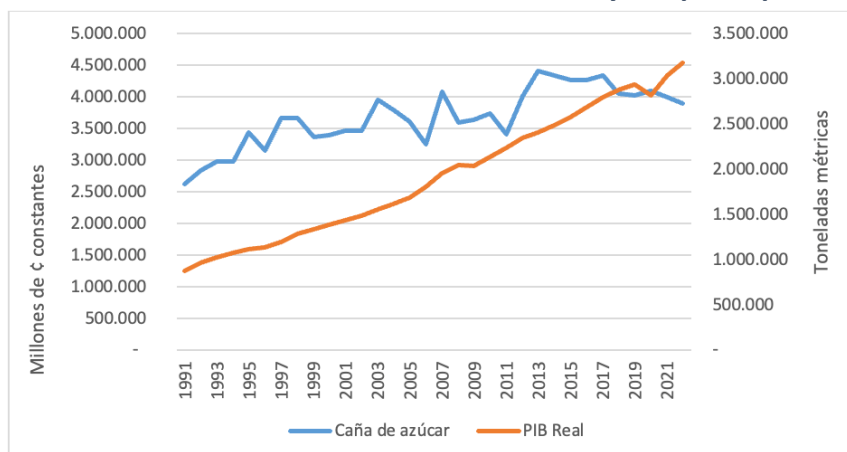


Fuente: elaboración propia con datos de SEPSA-MAG

La caña de azúcar, por su parte, muestra relación con la tendencia del PIB per cápita, dada la importancia del azúcar en la dieta del costarricense (Gráfico 27). No obstante, la reducción en los últimos años parece mostrar un cambio en la dieta a favor de sustitutos dietéticos del azúcar, lo

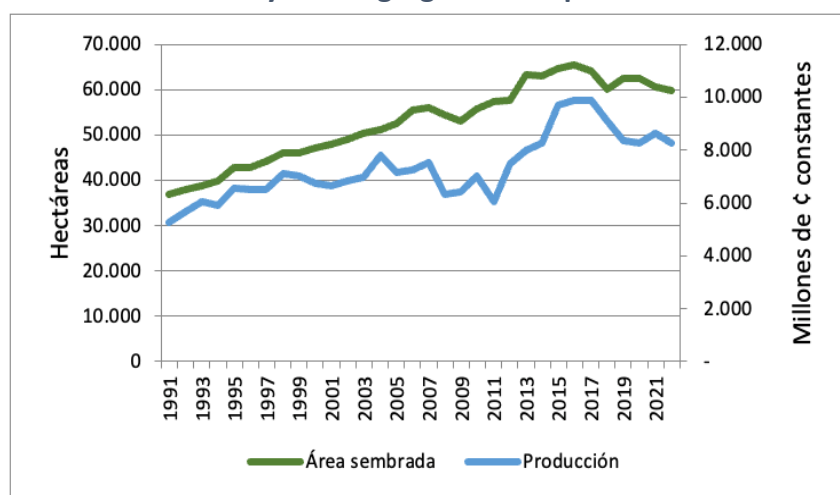
que ha impulsado una campaña de la industria nacional a favor del consumo del azúcar. El Gráfico 28 muestra que la caída en el valor agregado de la producción sigue la disminución sufrida en el área sembrada.

Gráfico 27 Producción de Caña de Azúcar y PIB per cápita



Fuente: elaboración propia con datos del BCCR y SEPSA-MAG

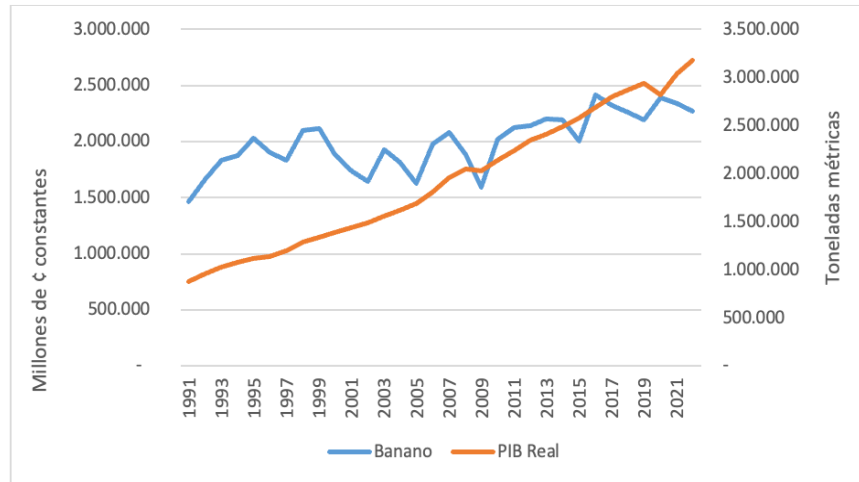
Gráfico 28 Área de siembra y valor agregado de la producción de Caña de Azúcar



Fuente: elaboración propia con datos de SEPSA-MAG

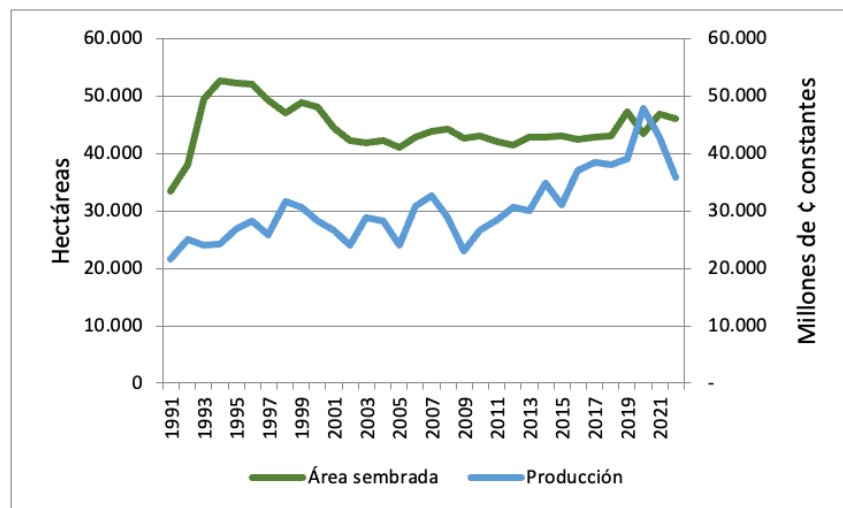
Tanto la producción de banano, palma de aceite y piña están orientadas hacia el comercio internacional, por lo que los drivers son esencialmente externos. En el caso del banano, se está ante una actividad con importante relación con el crecimiento del PIB real, especialmente en la última década (Gráfico 29). El Gráfico 30 muestra que el valor agregado de la producción en los últimos años ha aumentado, pese a que el área sembrada se ha mantenido, lo que refleja una mejora en la productividad.

Gráfico 29 Producción de Banano y PIB real



Fuente: elaboración propia con datos del BCCR y SEPSA-MAG

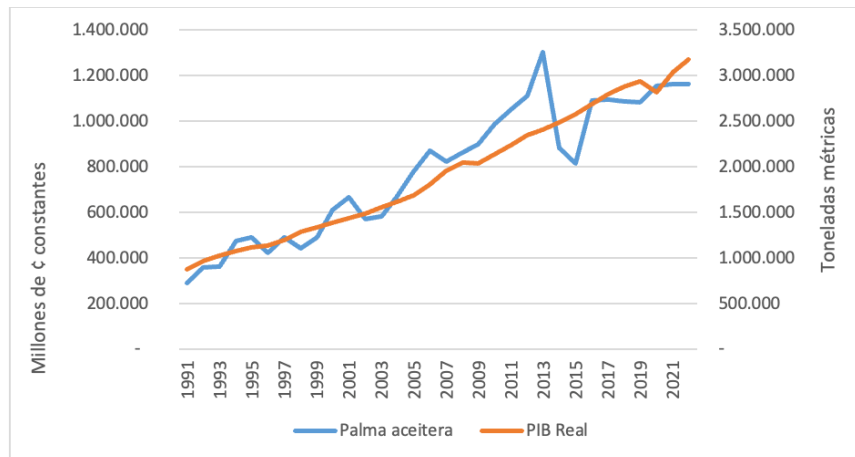
Gráfico 30 Área de siembra y valor agregado de la producción de Banano



Fuente: elaboración propia con datos de SEPSA-MAG

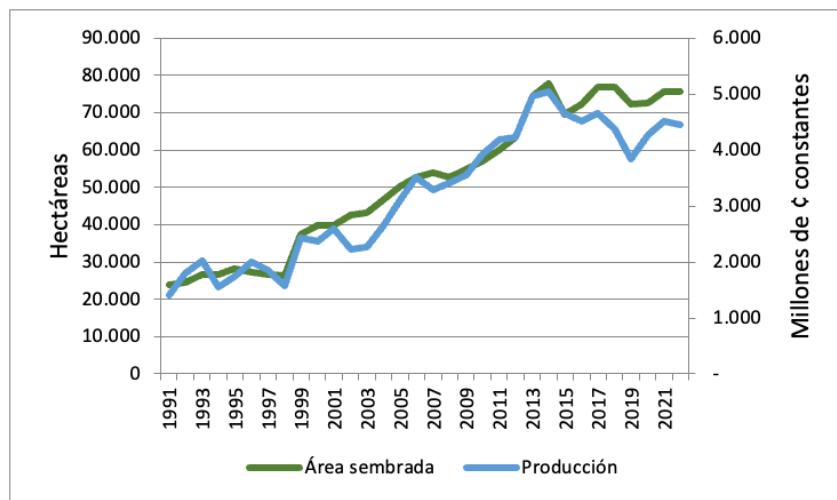
En el caso de la palma de aceite, la relación con el PIB ha sido de más largo plazo (Gráfico 31), y ambos se han mantenido con un crecimiento muy estrecho entre ambos. La relación entre el valor agregado de la producción y su área sembrada se refleja en el Gráfico 32, y registra en el último lustro una disminución de la productividad al caer el valor agregado y no el área sembrada.

Gráfico 31 Producción de Palma de Aceite y PIB real



Fuente: elaboración propia con datos del BCCR y SEPSA-MAG

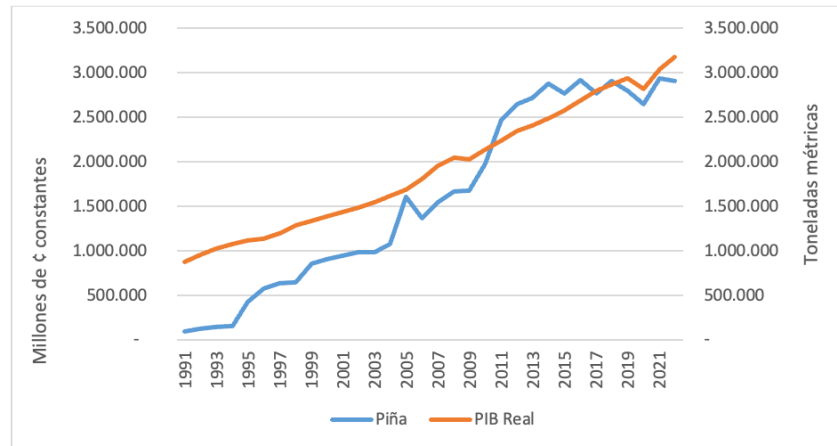
Gráfico 32 Área de siembra y valor agregado de la producción de Palma de Aceite



Fuente: elaboración propia con datos de SEPSA-MAG

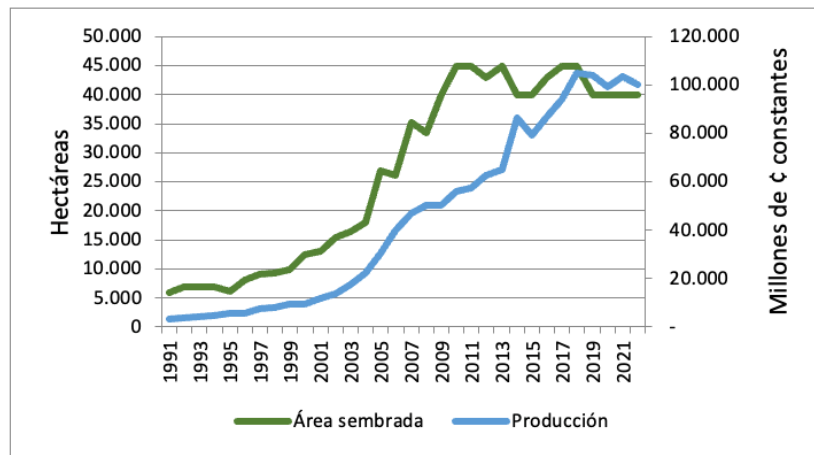
Al igual que pasa con la palma de aceite, la piña muestra una relación con el PIB que se ha mantenido en el largo plazo (Gráfico 33). En la última década, el área sembrada se venía estabilizando, pero el valor agregado se mantenía al alza, pero ambos se han estabilizado en los últimos 5 años en los mismos niveles (Gráfico 34).

Gráfico 33 Producción de Piña y PIB real



Fuente: elaboración propia con datos del BCCR y SEPSA-MAG

Gráfico 34 Área de siembra y valor agregado de la producción de Piña



Fuente: elaboración propia con datos de SEPSA-MAG

3.9 Sector Forestal

Para analizar los drivers en el sector forestal, se parte de una diferenciación de los fenómenos que el bosque puede experimentar: deforestación, degradación, cambio en el uso de la tierra y conservación del acervo de biomasa. La deforestación es una pérdida de cobertura boscosa permanente o de largo plazo, y significa una transformación del bosque a otro uso de la tierra. La degradación forestal por su parte es la reducción de la capacidad del bosque de proporcionar sus productos y sus servicios, y aunque en el país se ha venido midiendo esta incidencia en el marco de REDD+, para efectos de los INGEI, la degradación del bosque maduro no se está considerando.

En Costa Rica, debido a las políticas que en los últimos años han logrado una cobertura forestal hasta un 57% del territorio nacional en el 2021. Esta cobertura forestal, está compuesta de 24.22% de bosques maduros y 23,25% de bosques secundarios³.

Los datos del IMN ratifican una superficie de tierras forestales que equivale al 57% del territorio nacional para el 2021, ubicándolas en 2.931.181 hectáreas (Cuadro 5).

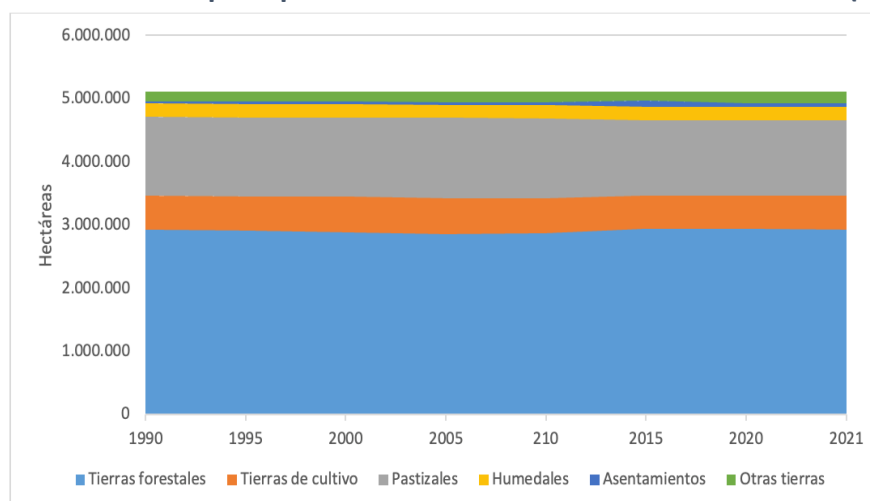
Cuadro 5 Superficie nacional por tipo de Uso de la tierra - Periodo 2008-2013 (hectáreas)

Uso de la tierra	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021
4.A. Tierras forestales	2.932.393	2.905.292	2.882.392	2.860.562	2.868.877	2.946.493	2.933.746	2.931.181
4.B. Tierras de cultivo	535.200	549.725	570.010	567.294	558.490	517.727	528.583	527.596
4.C. Pastizales	1.241.679	1.249.913	1.253.288	1.265.683	1.261.242	1.194.457	1.197.825	1.203.120
4.D. Humedales	215.723	212.833	208.146	206.731	205.549	215.772	212.166	214.769
4.E. Asentamientos	28.989	33.539	38.820	41.868	44.551	95.990	53.234	54.312
4.F. Otras tierras	159.957	162.638	161.283	171.802	175.231	143.500	188.386	182.963
Total general	5.113.940	5.113.940	5.113.940	5.113.940	5.113.940	5.113.940	5.113.940	5.113.940

Fuente: IMN

Como se observa en el Gráfico 35, el registro de superficie por tipo de uso de la tierra que maneja el IMN, no registra la dinámica de reforestación y deforestación que ha venido experimentando el país, lo cual son factores críticos que se deben considerar en la modelación.

Gráfico 35 Distribución por tipo de Uso de la tierra - Periodo 2008-2013 (hectáreas)



Fuente: Elaboración con datos de IMN

³ <https://www.unacomunica.una.ac.cr/index.php/noviembre-2022/4328-lanzan-mapa-de-bosques-y-otras-tierras-del-pais>

El principal factor que impulsa la deforestación en los terrenos privados es la conversión de los bosques para el uso agrícola y ganadero. En muchos casos, los usuarios de la tierra generan un ingreso anual más alto con la agricultura o la cría de ganado que con los bosques, condicionados por factores tales como el acceso vial. Esta situación a veces se ve agravada por las políticas que favorecen el desarrollo agrícola. En las zonas protegidas, la falta de financiamiento suficiente y la falta de recursos humanos para vigilancia es un factor favorecedor para la entrada de ocupantes y leñadores ilegales.

La dinámica de cambio de uso entre el bosque y las actividades agropecuarias va en doble sentido, siendo las tierras agrícolas las que más aportan a la regeneración de los bosques secundarios. Incluso, la recuperación de la cobertura se da como consecuencia de un colapso del sistema productivo nacional, el cual estuvo controlado por factores como el precio internacional de la carne y la presencia de una ganadería extensiva en lugar de intensiva. La recuperación fue consecuencia de una menor extracción de recursos por unidad de uso de la tierra⁴. Además, la implementación de políticas de gobierno en los noventa como el Pago de Servicios Ambientales y la prohibición del cambio de uso del suelo, entre otros, ha permitido la recuperación de cobertura forestal.

A pesar de la existencia de un sistema de titulación relativamente seguro, las cuestiones de tenencia de la tierra también juegan un papel importante. En los territorios indígenas, algunas comunidades tienen dificultades para evitar que los agricultores no indígenas invadan sus tierras forestales; por otra parte, en las zonas protegidas de propiedad privada, las dificultades para obtener un título de propiedad válido impiden la participación en programas tales como el programa de pago por servicios ambientales⁵.

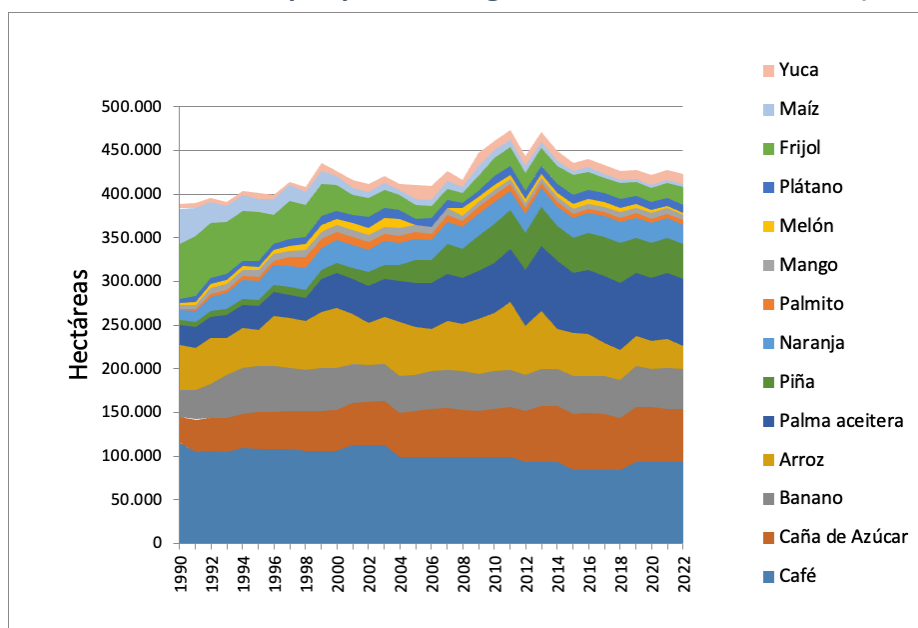
Otro factor condicionante de la pérdida de tierras forestales son los incendios, los cuales son una amenaza en sectores en donde la época seca los hace sumamente vulnerables. La dinámica poblacional, económica, comercial y los patrones de migración seguirán siendo una amenaza por la creación de nuevos centros urbanos, especialmente asociados a las mejoras de infraestructura vial que permite el acceso a nuevas zonas geográficas y el incentivo a nuevos centros económicos o de producción. En este ámbito persiste la amenaza de actividades intensivas en el uso de la tierra, cuya baja competitividad en el pasado permitió el abandono de tierras y el avance del bosque, pero que es una situación difícil de mantener debido a que pese al pago de servicios al bosque, su competitividad respecto a otras actividades económicas es muy limitada.

⁴ Sánchez Azofeifa, Arturo (2015). Análisis de la cobertura forestal de Costa Rica entre 1960 y 2013. Revista Ambientico 253. 4-14 p.

⁵ Hernández, Luis y otros (2016). Gestión de los recursos forestales en Costa Rica. San José: Programa Estado de la Nación.

El Gráfico 36 muestra el área sembrada por producto agrícola durante el periodo 1990-2022 que registra el MAG. El área total que está aquí registrada se mantiene muy estable, pasando de 432.076 ha en 1991 a 343.281 ha en el 2022.

Gráfico 36 Área sembrada por producto agrícola - Periodo 1990-2022 (hectáreas)



Fuente: elaboración propia con datos de SEPSA-MAG

Algunos factores condicionantes o drivers son de política pública, pues la estructura de protección del bosque en Costa Rica se ha sostenido con políticas como la protección por parte del estado con diversos regímenes de conservación y con el sistema de pago de servicios ambientales y más reciente la Estrategia Nacional REDD+, cuyo sostenimiento requiere de grandes esfuerzos del gobierno costarricense en el futuro y apoyo de la comunidad internacional. Por su parte, son importantes los instrumentos políticos que fomentan o castigan ciertas actividades de amenaza a los bosques, y en este ámbito, la Ley Forestal en Costa Rica (1996) prohíbe el cambio de uso del suelo una vez que la tierra se ha convertido en bosque. No obstante, la capacidad del estado para vigilar y hacer valer la ley es limitada, por lo que en muchas zonas del país la amenaza de deforestación del bosque es inminente.

Como drivers políticos que fortalecen la tendencia de aumento de cobertura forestal en Costa Rica, se tiene que el sostenimiento del PSA por medio del impuesto del 3.5% sobre el consumo de combustibles⁶ y el canon al agua, y la recientemente adoptada estrategia REDD+, que vienen a crear un entorno favorecedor para el sostén de las políticas que han distinguido al país durante ya varias décadas. El objetivo de la estrategia REDD+ es ayudar a Costa Rica a reducir las emisiones de carbono derivadas de la deforestación y la degradación forestal, gestionar de manera sostenible los bosques, y conservar y mejorar las reservas forestales de carbono de manera racional en términos sociales y ambientales, a la vez que se obtiene acceso a incentivos

⁶ El PSA también se ha financiado con préstamos del Banco Mundial.

financieros internacionales para los usuarios de los bosques locales, lo que ayudará a mitigar el cambio climático a nivel mundial.

Para las proyecciones de las emisiones netas esperadas en el sector forestal, es importante analizar la dinámica de pérdidas de bosque maduro y regeneración de bosque secundario. Para este análisis se usa el periodo comprendido entre el 2008 y 2013, ya que sólo para este periodo se han generado estudios que consideran las tasas de deforestación y regeneración, podrían ser más representativas de lo que se puede producir en un escenario futuro⁷. En el Cuadro 6 se observa la dinámica de pérdidas de cobertura del bosque maduro entre 2008 y 2013 (45,059 hectáreas), en donde el principal factor es la creación de pastizales, representando un 68% de la pérdida de bosques.

Cuadro 6 Desglose de la Pérdida Bosque Maduro del Periodo 2008-2013 (hectáreas)

Desglose de deforestación	Bosque muy húmedo/pluvial	Bosque muy húmedo	Bosque Seco	Manglares	Yolillales	Total
Cultivos anuales	917	1.444	19	69	457	2.381
Cultivos permanentes	639	1.318	0	32	779	1.957
Pastizales	14.043	15.823	731	88	1.470	30.596
Áreas Urbanas	85	699	3	4	4	787
Suelos desnudos	598	1.506	48	54	23	2.152
Otros	3.277	3.866	43	432	1.396	7.186
Total	19.558	24.656	844	678	4.128	45.059

Fuente: elaboración propia con base en datos a partir de mapas Agresta (2015)

No obstante, cuando se considera la regeneración de bosque secundario (218.752 hectáreas), la principal fuente de área, lo vuelven a constituir las áreas de pastizales, representando un 65% del área aportada, seguido por la pérdida de área de los cultivos permanentes (24%) y los cultivos anuales (7%). Esto suma 96% de la regeneración de bosques secundarios producto de la contracción del área de la actividad agropecuaria (Cuadro 7).

⁷ El análisis se hace con base en la dinámica de uso del suelo observada en el periodo 2008-2013 mediante el estudio de Agresta (2015), para la generación de los mapas de coberturas para el monitoreo de la deforestación, reforestación y degradación forestal para el proceso de construcción del nivel de referencia para el programa de Reducción de Emisiones del mecanismo REDD+ de Costa Rica.
<https://agresta.org/project/generating-consistent-historical-time-series-of-activity-data-from-land-use-change-for-the-development-of-costa-ricas-reddplus-reference-level/>

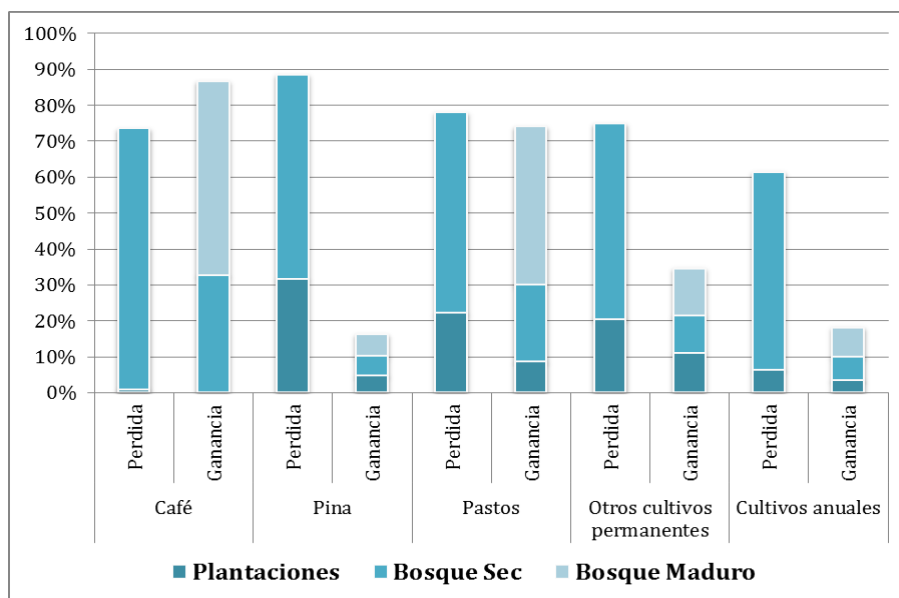
Cuadro 7 Origen de la Regeneración Bosques Secundario del periodo 2008-2013 (hectáreas)

Desglose adiciones	Bosques nuevos muy húmedo/pluvial	Bosques nuevos muy húmedo	Bosque nuevos Seco	Manglares nuevos	Yolillales nuevos	Total
Cultivos anuales	6.888	8.161	217	643	520	15.266
Cultivos permanentes	13.204	38.277	3	495	3.926	51.484
Pastizales	41.632	98.347	2.823	833	5.610	142.802
Áreas Urbanas	6	124	1	5	2	131
Suelos desnudos art	2.357	6.387	325	407	95	9.068
Total	64.088	151.296	3.368	2.384	10.152	218.752

Fuente: elaboración propia con base en datos a partir de mapas Agresta (2015)

En el Gráfico 37 se observa esa dinámica de pérdida y ganancia del bosque maduro y secundario a partir del área agropecuaria sobre el bosque.

Gráfico 37 Destino y Origen de la Pérdida y Ganancia de Área Agropecuaria (2008-2013)



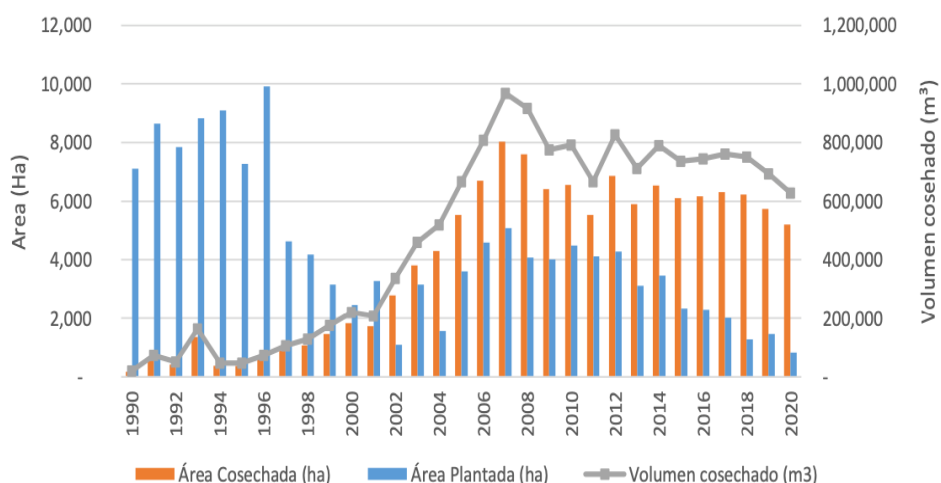
Fuente: Elaboración propia con base en datos a partir de mapas Agresta (2015)

Por su parte, la Oficina Nacional Forestal⁸ indica que el país ha venido disminuyendo las tasas de reforestación en las tierras de aprovechamiento forestal, con lo que no se está estimulando a las

⁸ ONF (2021) Reactivación del sector forestal ante el inminente desabastecimiento de madera, tendencias y perspectivas al 2030. San José: Oficina Nacional Forestal.

plantaciones forestales para atender las necesidades de madera, dado que los productos de madera pueden seguir constituyendo un reservorio de carbono. El Gráfico 38 muestra cómo el área plantada en el país no ha seguido el ritmo de la cosecha de madera y se ha mantenido por debajo.

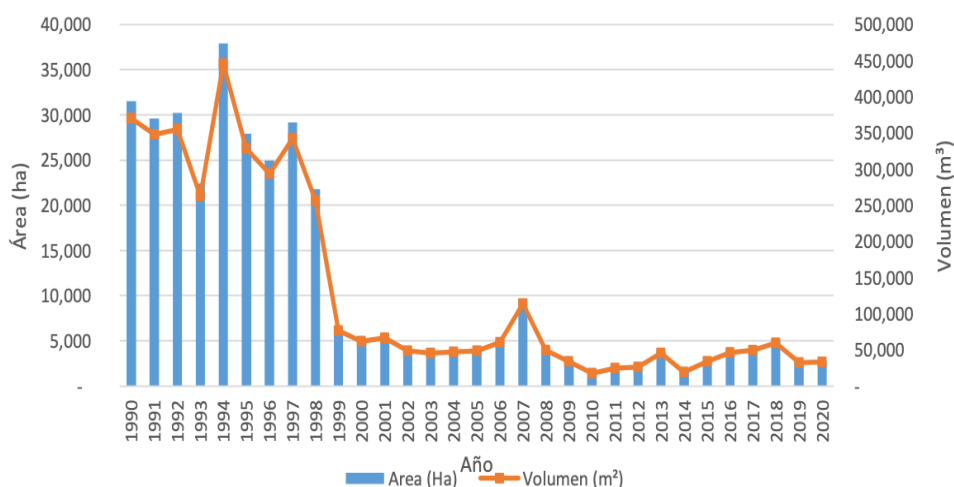
Gráfico 38 Área plantada y cosechada de plantaciones forestales (1990-2020)



Fuente: ONF (2021)

Igualmente, desde los años 90 se viene reduciendo el abastecimiento de madera proveniente de los bosques que sufrían deforestación (Gráfico 39), especialmente ante de las limitaciones que impuso la Ley Forestal para el cambio de uso de la tierra. Posteriormente, a dicha ley, el aprovechamiento de madera se hacía de árboles procedentes de terrenos de uso agropecuario, lo cual se ha venido disminuyendo ostensiblemente en los últimos años.

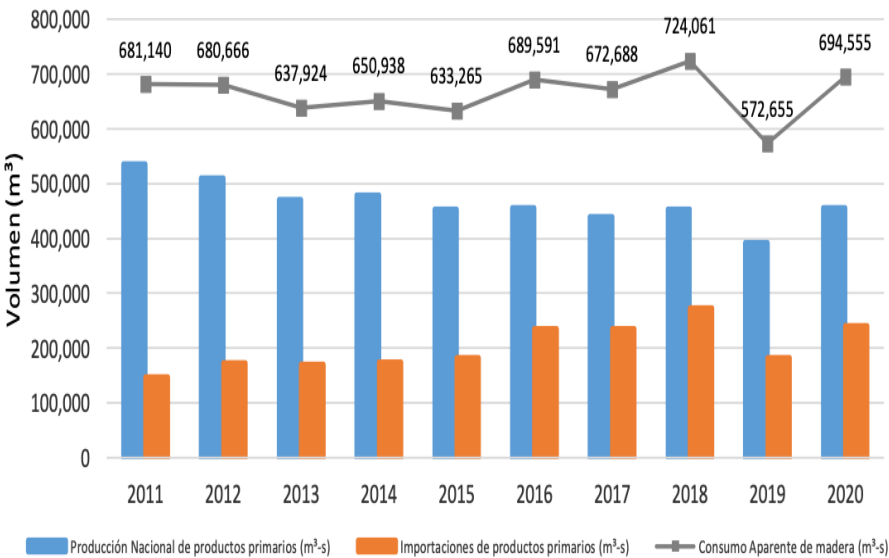
Gráfico 39 Volumen cosechado de bosques naturales (2008-2013)



Fuente: ONF (2021)

La ONF señala que en el país el consumo de madera ha sido estable en la última década, pero la disminución en la reforestación va produciendo un paulatino desplazamiento de la madera de producción nacional por madera importada (Gráfico 40).

Gráfico 40 Destino y Origen de la Pérdida y Ganancia de Área Agropecuaria (2008-2013)



Fuente: ONF (2021)

4 Escenario de Referencia de las Emisiones Sectoriales

En esta sección se describen los fundamentos utilizados para la elaboración de los escenarios de referencia de las emisiones por cada sector analizado. La estimación de un *Escenario de Referencia* con las emisiones totales para el país se hace con base en la agregación de los resultados sectoriales.

4.1 Sector de Residuos

Para el sector de residuos sólidos se construyó un modelo para la simulación de la generación de residuos sólidos en el país, el cual es la referencia para la estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero. Los supuestos del modelo se basan en el estudio realizado por el Ministerio de Salud y otras fuentes estadísticas, con el apoyo y el uso de una calculadora de MRS-GEI de la Agencia Alemana de Cooperación (GIZ)⁹. Con este modelo se estima la generación de residuos sólidos hasta el año 2050, y mediante el uso de una calculadora de GEI se estiman las emisiones para un escenario de referencia. Para la estimación de las emisiones del sector se hace una calibración con los resultados de la calculadora del IPCC Waste Model,¹⁰ con los factores utilizados por el IMN en el Inventario Nacional de GEI del 2021¹¹.

4.1.1 Residuos Sólidos

El modelo de generación de residuos sólidos parte de las suposiciones de generación per cápita y de la estimación de este factor por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) para el Inventario Nacional de Gases de Efecto invernadero del 2021. Como se ve en el Cuadro 8, a partir de la información sobre los residuos generados según la encuesta del Instituto de Estadísticas y Censos (INEC) que se desprende del inventario de GEI del sector residuos para el 2021, el IMN estima una generación per cápita de residuos de 292 kilogramos por año para el año 2018.

Cuadro 8 Generación de Residuos Sólidos per cápita (2017-2018)

Año	kg/per cápita/día	kg/per cápita/año
2017	0,70	256,5
2018	0,80	292,0
2019	0,73	266,5
2020	0,78	285,7
2021	0,86	314,9

⁹ Giegrich, Jürgen y Vogt, Regine (2009). <https://www.bivica.org/files/gases-invernadero-calculo.pdf>

¹⁰ Esta hoja de cálculo implementa el método de Nivel 1 (Tier 1) para estimar las emisiones de metano de los vertederos de desechos sólidos. Para más detalles sobre el método véase las Directrices 2006 del IPCC para los inventarios de gases de efecto invernadero, Volumen 5, capítulo 3.

¹¹ Sasa, Mohammad y Barboza, Jhonatan (2024). Inventario de emisiones de gases de efecto de invernadero (2017-2022) para sector residuos. Informe Final. San José, IMN. Primer Informe Bienal de Transparencia (BTR) de Costa Rica.

2022	0,85	310,3
------	------	-------

Fuente: Sasa Marín, Mohammad y Barboza, Jhonatan (2024)

Dado que se busca construir escenarios hasta el año 2050, se hace una estimación de las tasas per cápita de generación de residuos, y se supone que para el año 2050 el país alcanza la tasa promedio que hoy presentan los países desarrollados reunidos en la OCDE,¹² la cual se ubica en 534Kg por habitante por año. Esto implica que conforme la sociedad aumenta su nivel de desarrollo socio económico, aumenta la tasa de generación de residuos. Las tasas resultantes por año se muestran en el Cuadro 9.

Cuadro 9 Tasa de Generación Per Cápita de Residuos Sólidos

Año	Kg/per/día	Kg/per/año	Año	Kg/per/día	Kg/per/año
2018	0,80	292,00	2035	1,15	420,56
2019	0,82	299,56	2036	1,17	428,13
2020	0,84	307,13	2037	1,19	435,69
2021	0,86	314,69	2038	1,21	443,25
2022	0,88	322,25	2039	1,24	450,81
2023	0,90	329,81	2040	1,26	458,38
2024	0,92	337,38	2041	1,28	465,94
2025	0,95	344,94	2042	1,30	473,50
2026	0,97	352,50	2043	1,32	481,06
2027	0,99	360,06	2044	1,34	488,63
2028	1,01	367,63	2045	1,36	496,19
2029	1,03	375,19	2046	1,38	503,75
2030	1,05	382,75	2047	1,40	511,31
2031	1,07	390,31	2048	1,42	518,88
2032	1,09	397,88	2049	1,44	526,44
2033	1,11	405,44	2050	1,46	534,00
2034	1,13	413,00			

Fuente: elaboración propia con datos de OCDE, INEC y el IMN

Se calculó un porcentaje promedio de residuos recolectados y no recolectados en el periodo 2017-2022 con base en la información del cuadro 10, que da como resultado un promedio de recolección de 91,4% y de no recolección del 8,6% de los residuos sólidos generados.

¹² OCDE (2023). Revisión de desempeño ambiental de la OCDE: Costa Rica 2023. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico.

Cuadro 10 Disposición de Residuos Sólidos Ordinarios en Costa Rica (ton/año)

AÑO	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Total Generado	1.266.917	1.462.397	1.343.609	1.459.288	1.618.533	1.615.776
Total recolectado	1.147.345	1.357.572	1.253.157	1.314.269	1.437.988	1.497.234
Relleno Sanitario	1.043.450	1.296.202	1.162.450	1.223.212	1.282.057	1.323.992
Recuperado	103.895	61.370	90.707	91.057	155.932	173.243
<i>Reciclaje</i>	100.207	53.473	39.827	45.511	63.917	75.983
<i>Co-procesado</i>	1.914	3.040	203	1.810	48.259	51.735
<i>Compostaje</i>	1.774	4.857	50.677	43.736	43.756	45.525
Total no recolectado	119.572	104.825	90.451	145.019	180.544	118.524
% recolectado	90,6%	92,8%	93,3%	90,1%	88,8%	92,7%
% no recolectado	9,4%	7,2%	6,7%	9,9%	11,2%	7,3%

Fuente: IMN INGEI Residuos (2021)

Con respecto al destino de los residuos no localizados, la información preparada para el IMN sobre el INGEI residuos, se presenta en el cuadro 11, y se estiman los promedios para el periodo 2018-2022 que se utilizarán como parámetros.

Cuadro 11 Porcentaje por destino de residuos sólidos ordinarios no recolectados

Año	Enterrado o botado en hueco	Quemado	Arrojado a lote baldío	Rio, quebrada o mar	Otros
2017	26,11	70,99	1,37	0,17	1,37
2018	23,35	72,36	1,49	0,90	1,89
2019	23,41	74,27	1,16	0,67	0,48
2020	22,39	73,02	3,37	0,31	0,92
2021	23,64	72,61	2,14	0,22	1,40
2022	22,36	74,85	1,14	0,35	1,30
Promedio 2018-22	23,54	73,02	1,78	0,44	1,23

Fuente: IMN INGEI Residuos (2021)

El Cuadro 12 presenta la composición de los residuos sólidos por tipo de componente. Esta composición del escenario de referencia se mantiene para los dos escenarios (medio y alto) que posteriormente serán analizados.

Cuadro 12 Composición de los Residuos Sólidos

Componentes	Residuos de Comida	Residuos de Jardines y Parques	Material valorizable	Total
% Residuo	43,5%	8,0%	50,8%	100%

Fuente: IMN INGEI Residuos (2021)

El estudio de Sasa y Barboza (2024), preparado para el BTR del IMN, señala las tasas de composición de los residuos valorizables, las cuales se muestran en el Cuadro 13. Del total de residuos sólidos, actualmente la tasa de reciclaje es del 9,18%. Respecto al material orgánico, compuesto por restos de comida y residuos de jardines y parques, las tasas de compostaje actuales son de 0%.

Cuadro 13 Porcentaje de residuos valorizables	
Tipo de Material	Porcentaje
Papel y cartón	14,1%
Plástico	11,2%
Vidrio	1,9%
Metales	2,0%
Textiles	2,4%
Sanitarios	0,76
Poli-laminados	1,06
Electrónicos	0,57
Total valorizables	33,9%
Otros inerte	16,84
Total	50,8%

Fuente: IMN INGEI Residuos (2021)

Del material valorizable, el Ministerio de Salud registra tasas que fluctúan de manera importante entre 2017 y 2021, por lo que se han calculado los promedios de dicho periodo que se muestran en el Cuadro 14. Respecto al material orgánico, compuesto por restos de comida y residuos de jardines y parques, las tasas de compostaje promedio estimadas son de 1,4%.

Cuadro 14 Porcentaje de residuos valorizables 2017-2021						
Residuo	2017	2018	2019	2020	2021	Promedio
Plástico	36,82%	32,51%	8,40%	12,49%	12,20%	25,91%
Metales		13,34%	3,56%	10,62%	32,76%	8,45%
Papel cartón	55,30%	52,38%	55,27%	59,19%	32,63%	54,32%
Vidrio	5,74%	0,84%	1,93%	6,97%	12,90%	2,84%
Compostaje	0,10%	0,30%	3,80%	3,00%	2,70%	1,40%
Otros residuos ordinarios		0,20%	0,27%	10,09%	3,09%	0,24%

Fuente: Ministerio de Salud 2022¹³

En cuanto a otro tipo de generadores, de acuerdo con datos de la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos 2023-2033, en promedio, los hogares producen el 56% de los residuos sólidos ordinarios y otros generadores el restante 44% (Cuadro 15). Esto se ha estimado como promedio del periodo 2017-2021. Sin embargo, para logra consistencia con el Inventario de GEI de Residuos Sólidos del BTR-IMN, se parte del supuesto que otros generadores, constituido en

¹³ Ministerio de salud (2022). Material de referencia para la actualización de la Política Nacional de Gestión Integral de Residuos 2022-2032. <https://www.ministeriodesalud.go.cr/separayvenceras/img/Linea-base-GIR-Taller-6-de-diciembre%202022.pdf>

gran parte de residuos industriales, institucionales y comerciales, representan un 27,05% de los residuos sólidos ordinarios procedentes de los hogares.

Cuadro 15 Generación de residuos sólidos en hogares y otras fuentes

Generador	2017	2018	2019	2020	2021	Promedio
Hogares	59%	58%	56%	55%	55%	56%
Otros generadores	41%	42%	44%	45%	45%	44%

Fuente: Ministerio de Salud (2023)¹⁴

El Cuadro 9 muestra las estadísticas del Ministerio de Salud en cuanto el tipo de lugar de disposición de los residuos sólidos ordinarios recolectados por las municipalidades.

Cuadro 16 Lugares de Disposición de Residuos sólidos

Lugar de disposición	2017	2018	2019	2020	2021	Promedio
Rellenos Sanitarios y Vertederos	82%	89%	87%	84%	79%	82,6%
Sitios no controlados	9%	7%	7%	10%	11%	8,7%

Fuente: Ministerio de Salud (2022)

En el Cuadro 17 se muestra la generación total de residuos en la línea de referencia y los tipos de sitios donde los residuos son dispuestos. Esta es la base para calcular las emisiones de referencia del total de residuos proyectados al 2050. Se utiliza la calculadora MRS-GEI¹⁵ con ajustes, basado en parámetros del IPCC para la estimación de las emisiones de metano de los desechos sólidos utilizando el primer método para la descomposición (Cuadro 18). El factor de corrección de metano (MCF) es un indicativo del tipo de sitio de disposición final de desechos. Se ha considerado la composición por sitio de disposición y la captación que se da del metano, separando los sitios gestionados como rellenos sanitarios y vertederos, de los sitios de disposición sin control. En el Cuadro 19 se muestran los parámetros utilizados para la calibración con el modelo IPCC Waste Model y calcular las emisiones relacionadas con la tecnología de disposición y tratamiento. Con la estimación de las emisiones de la calculadora MRS-GEI, se formó un índice de crecimiento que fue aplicado a los datos de emisiones de Sasa y Barboza (2024) sobre las emisiones en el INGEI de residuos de 2021 para el BTR del IMN.

Cuadro 17 Generación de Residuos sólidos en el Escenario de Referencia (TM)

Año	Total residuos sólidos generados	Residuos valorizados	Compostaje	Residuos sólidos no recolectados	Residuos sólidos a sitios de disposición	Rellenos Sanitarios y Vertederos	Sitios no controlados
-----	----------------------------------	----------------------	------------	----------------------------------	--	----------------------------------	-----------------------

¹⁴ Ministerio de Salud (2023). Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos 2023-2033 y el Plan Nacional para la Gestión Integral de Residuos 2023-2028.

¹⁵ Giegrich, Jürgen y Vogt, Regine (2009).

2021	1.624.744	149.705	8.808	346.718	1.119.641	924.937	37.624
2022	1.680.010	155.312	9.138	354.112	1.161.579	959.583	39.033
2023	1.735.551	160.955	9.470	361.484	1.203.780	994.445	40.452
2024	1.791.339	166.629	9.804	368.828	1.246.219	1.029.504	41.878
2025	1.847.344	172.333	10.140	376.145	1.288.875	1.064.741	43.311
2026	1.903.533	178.061	10.477	383.428	1.331.718	1.100.135	44.751
2027	1.959.872	183.811	10.815	390.677	1.374.725	1.135.663	46.196
2028	2.016.340	189.581	11.155	397.888	1.417.877	1.171.311	47.646
2029	2.072.917	195.368	11.495	405.062	1.461.158	1.207.065	49.100
2030	2.129.585	201.170	11.837	412.198	1.504.552	1.242.913	50.559
2031	2.186.325	206.985	12.179	419.294	1.548.043	1.278.841	52.020
2032	2.243.116	212.811	12.522	426.350	1.591.614	1.314.835	53.484
2033	2.299.937	218.645	12.865	433.365	1.635.248	1.350.881	54.951
2034	2.357.433	224.549	13.212	440.460	1.679.403	1.387.357	56.434
2035	2.414.908	230.456	13.560	447.507	1.723.582	1.423.854	57.919
2036	2.472.337	236.364	13.907	454.503	1.767.765	1.460.353	59.404
2037	2.529.691	242.269	14.255	461.446	1.811.928	1.496.837	60.888
2038	2.586.937	248.168	14.602	468.331	1.856.048	1.533.284	62.370
2039	2.644.042	254.058	14.948	475.156	1.900.097	1.569.673	63.850
2040	2.700.971	259.934	15.294	481.916	1.944.048	1.605.981	65.327
2041	2.757.690	265.795	15.639	488.608	1.987.876	1.642.188	66.800
2042	2.814.169	271.635	15.983	495.228	2.031.556	1.678.271	68.268
2043	2.870.374	277.452	16.325	501.772	2.075.061	1.714.212	69.730
2044	2.926.272	283.242	16.666	508.238	2.118.368	1.749.987	71.185
2045	2.981.834	289.003	17.005	514.623	2.161.451	1.785.578	72.633
2046	3.037.030	294.730	17.342	520.923	2.204.287	1.820.965	74.072
2047	3.091.835	300.422	17.676	527.136	2.246.857	1.856.133	75.503
2048	3.146.228	306.076	18.009	533.260	2.289.143	1.891.065	76.924
2049	3.200.187	311.690	18.339	539.295	2.331.128	1.925.749	78.335
2050	3.253.698	317.832	18.701	540.376	2.377.062	1.963.694	79.878

Fuente: elaboración propia

Cuadro 18 Parámetros de la Calculadora IPCC para Metano

Tipo de residuo	Composición	Carbono orgánico degradable	Generación de Metano por año
Residuos de Alimentos	0,4	0,15	0,4
Residuos de Jardín	0,2	0,20	0,17
Papel	0,14	0,40	0,07
Madera	0,02	0,43	0,035
Textiles	0,03	0,24	0,07
Desechos sanitarios	0,08	0,24	0,17
Residuos Industriales	0,17	0,15	
Rezago (meses)			2
Fracción de Metano (F) en gas desarrollado			0,465
Factor de Conversión, C to CH ₄			1,33
Factor de oxidación			0%

Fuente: IPCC Waste Model

Cuadro 19 Factor de Corrección de Metano (MCF)

Concepto	Sitio no manejado	Sitio manejado y profundo	Manejado	Manejado semi- aeróbico	No categorizado
Factor de corrección de metano	0,4	0,8	1	0,5	0,6
Distribución (%)	10	10	58	0	21

Fuente: IPCC Waste Model

En el cuadro 20 se muestran las estimaciones de CH₄ de los sitios de disposición de residuos sólidos, considerando la generación tanto doméstica como de otros generadores.

Cuadro 20 Emisiones de Metano en sitios de disposición de residuos

**Emisiones de CH₄ en Sitios Disposición
Residuos Sólidos**

Año	(Ton)
2021	52.400
2022	55.430
2023	57.222
2024	59.020
2025	61.472
2026	63.288
2027	65.108
2028	66.931
2029	68.757
2030	70.586
2031	72.416
2032	74.247
2033	76.078
2034	77.932
2035	79.784
2036	81.634
2037	83.481
2038	85.324
2039	87.870
2040	89.705
2041	91.532
2042	93.351
2043	95.161
2044	96.960
2045	98.747
2046	100.522
2047	102.283

Emisiones de CH ₄ en Sitios Disposición Residuos Sólidos	
Año	(Ton)
2048	104.031
2049	105.764
2050	107.482

Fuente: elaboración propia con base en la Calculadora MRS-GEI y ajuste con datos de Sasa y Barboza (2024)

4.1.1.1 Tratamiento biológico de residuos sólidos

Dado que en los INGEI se contabilizan las emisiones procedentes del compostaje que realizan algunas municipalidades, se realizó una modelación tomando como parámetro el 1,4% que en promedio se ha compostado según el Ministerio de Salud (2022)¹⁶.

Para la estimación de las emisiones de CH₄ y de N₂O, se sigue la metodología del INGEI 2017, basado en las Directrices del IPCC para esta categoría. Para el cálculo se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\text{Emisiones de CH}_4 = \sum i(M_i \cdot E_{Fi}) \cdot 10^{-3} - R$$

Donde:

- M_i = masa de los residuos sometidos al tratamiento biológico i , en Gg
- E_{Fi} = factor de emisión del tratamiento i , en g CH₄/kg de desechos tratados
- i = preparación de abono orgánico o digestión anaeróbica
- R = cantidad total de metano recuperado durante el año de inventario, en Gg

$$\text{Emisiones de N}_2\text{O} = \sum i(M_i \cdot E_{Fi}) \cdot 10^{-3}$$

Donde:

- M_i = masa de los residuos sometidos al tratamiento biológico i , en Gg
- E_{Fi} = factor de emisión del tratamiento i , en g N₂O/kg de desechos tratados
- i = preparación de abono orgánico o digestión anaeróbica

Los parámetros utilizados para la estimación de las emisiones se muestran en el Cuadro 21.

Cuadro 21 Factores de emisión de metano y óxido nitroso por tratamiento biológico de residuos

¹⁶ Ministerio de salud (2022). Material de referencia para la actualización de la Política Nacional de Gestión Integral de Residuos 2022-2032. <https://www.ministeriodesalud.go.cr/separayvenceras/img/Linea-base-GIR-Taller-6-de-diciembre%202022.pdf>

Factor de emisión de CH₄ (g CH₄ /Kg de residuos húmedos)	Factor de emisión de N₂O (g N₂O /Kg de residuos secos)
4,00	0,30
Fuente: IMN INGEI Residuos (2021)	

Los resultados obtenidos de la estimación de las emisiones de metano y de óxido nitroso del tratamiento biológico se utilizan como índice de crecimiento que se aplican a los datos de emisiones del INGEI de residuos de Sasa y y Barboza (2024), que usan una tasa de compostaje diferente a los parámetros de Ministerio de Salud (2022), para así lograr una consistencia con el INGEI 2021. Los resultados de la calibración se muestran en el Cuadro 22.

Cuadro 22 Emisiones de metano y óxido nitroso por tratamiento biológico de residuos

Año	Emisiones de CH₄ (Ton)	Emisiones de N₂O
2021	175	14
2022	182	14
2023	188	15
2024	195	15
2025	201	16
2026	208	16
2027	215	17
2028	222	17
2029	228	18
2030	235	18
2031	242	19
2032	249	19
2033	256	20
2034	262	21
2035	269	21
2036	276	22
2037	283	22
2038	290	23
2039	297	23
2040	304	24
2041	311	24
2042	318	25
2043	324	25
2044	331	26
2045	338	26
2046	345	27
2047	351	27
2048	358	28
2049	364	29
2050	372	29

Fuente: elaboración propia con datos de IMN INGEI Residuos (2021)

4.1.1.2 Incineración abierta de residuos sólidos

De acuerdo con el INGEI 2017, se deben contabilizar las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O generadas por incineración abierta de residuos, dado que no hay evidencia de que existan operaciones en el país de incineración controlada que no sea para aprovechamiento energético.

Para las emisiones de CO₂ se aplican las siguientes ecuaciones:

$$\text{Emisiones de CO}_2 = \sum i(\text{SW}_i \cdot \text{dmi} \cdot \text{CF}_i \cdot \text{FCFi} \cdot \text{OF}_i) \cdot 44/12$$

Donde:

- SW_i = cantidad total de residuos sólidos de tipo i (peso húmedo) quemados, Gg/año
- dmi = contenido de materia seca en los residuos (peso húmedo) quemados, fracción
- CF_i = fracción de carbono en la materia seca, fracción
- FCF_i = fracción de carbono fósil en el carbono total, fracción
- OF_i = factor de oxidación, fracción
- i = tipo de residuo incinerado

$$\text{Emisiones de CH}_4 = \sum i(\text{IW}_i \cdot \text{EF}_i) \cdot 10^{-6}$$

Donde:

- IW_i = cantidad total de residuos sólidos de tipo i (peso húmedo) quemados, Gg/año
- EF_i = factor de emisión de CH₄, kg de CH₄/Gg de residuos
- i = tipo de residuo incinerado

$$\text{Emisiones de N}_2\text{O} = \sum i(\text{IW}_i \cdot \text{EF}_i) \cdot 10^{-6}$$

Donde:

- IW_i = cantidad total de residuos sólidos de tipo i (peso húmedo) quemados, Gg/año
- EF_i = factor de emisión de N₂O, kg de N₂O /Gg de residuos
- i = tipo de residuo incinerado

Los parámetros utilizados para la estimación de las emisiones se muestran en el cuadro 23.

Cuadro 23 Fracción de humedad, carbono, carbono fósil y factor de oxidación en los diferentes tipos de residuos sólidos ordinarios

Tipo de residuo	Alimentos	Jardín	Papel	Plástico	Pañales	Textil
Contenido de materia seca (fracción) (dmi)	0,4	0,4	0,9	1	0,4	0,8
Fracción de carbono en la materia seca (CFi)	0,38	0,49	0,46	0,75	0,7	0,5

Fracción de carbono fósil en el carbono total (FCFi)	0	0	0,01	1	0,1	0,2
Factor de oxidación (Ofi)	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58

Fuente: IMN INGEI Residuos (2021)

Los factores de emisión utilizados para estimar las emisiones de CH₄ y N₂O se muestran en el Cuadro 24, se debe considerar que para el CH₄ se utiliza un factor en base húmeda, mientras que para el N₂O es base seca.

Cuadro 24 Factores de emisión de metano y óxido nitroso por quema abierta de residuos

Factor de emisión de CH ₄ (g CH ₄ /ton de residuos húmedos)	Factor de emisión de N ₂ O (g N ₂ O /ton de residuos secos)
6.500	150

Fuente: IMN INGEI Residuos (2021)

Nuevamente, los resultados obtenidos de la estimación de las emisiones de dióxido de carbono, metano y de óxido nitroso la incineración de residuos sólidos, se utilizan como índice de crecimiento que se aplican a los datos de emisiones del INGEI de residuos de Sasa y y Barboza (2024), que usan una tasa de residuos quemados diferente a los parámetros de Ministerio de Salud (2022). Nuevamente, se busca lograr una consistencia con el INGEI 2021. Los resultados de la calibración se muestran en el Cuadro 18.

Cuadro 25 Emisiones de metano y óxido nitroso por tratamiento de residuos

Año	Emisiones de CO ₂ (Ton)	Emisiones de CH ₄ (Ton)	Emisiones de N ₂ O
2021	24.100	660	6
2022	24.614	674	6
2023	25.126	688	6
2024	25.637	702	6
2025	26.145	716	7
2026	26.652	730	7
2027	27.156	744	7
2028	27.657	757	7
2029	28.155	771	7
2030	28.651	785	7
2031	29.145	798	7
2032	29.635	812	7
2033	30.123	825	7
2034	30.616	838	8
2035	31.106	852	8
2036	31.592	865	8
2037	32.075	878	8
2038	32.553	892	8
2039	33.028	904	8
2040	33.498	917	8
2041	33.963	930	8

2042	34.423	943	9
2043	34.878	955	9
2044	35.327	967	9
2045	35.771	980	9
2046	36.209	992	9
2047	36.641	1.003	9
2048	37.066	1.015	9
2049	37.486	1.027	9
2050	37.561	1.029	9

Fuente: elaboración propia con datos de IMN INGEI Residuos (2021)

4.1.1.3 Emisiones totales de residuos sólidos

Los resultados de la estimación de las emisiones de acuerdo con la calculadora MRS-GEI se han calibrado con los datos del INGEI de residuos 2021 y los datos resultantes son los del Cuadro 26. Los parámetros de calentamiento global que se utilizan son $\text{CO}_2 = 1$, $\text{CH}_4 = 28$ y $\text{N}_2\text{O} = 265$. Según Sasa y Bolaños (2024) para el INGEI residuos 2021 se considera un monto de 41,25 Gg de CO_2 por quema de metano en los sitios de disposición final, lo cual se usa como una proporción de las emisiones totales en las proyecciones.

Cuadro 26 Emisiones de CO_2 equivalente en residuos sólidos

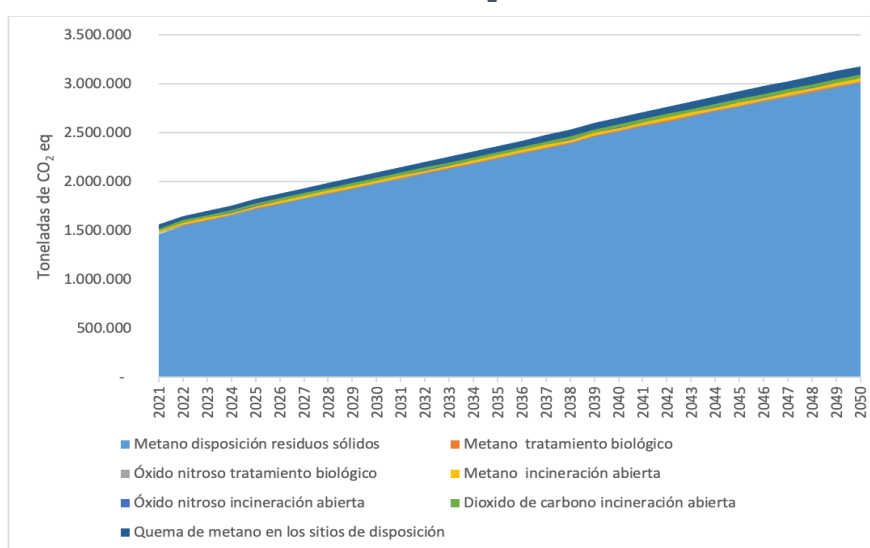
Año	Por metano disposición residuos sólidos	Por metano tratamiento biológico	Por óxido nitroso tratamiento biológico	Por metano incineración abierta	Por óxido nitroso incineración abierta	Dióxido de carbono incineración abierta	Por quema de metano en los sitios de disposición	Dióxido de carbono total equivalent e (Ton)
2021	1.467.200	4.900	3.631	18.480	1.590	24.100	41.250	1.561.151
2022	1.552.052	5.084	3.767	18.874	1.624	24.614	43.636	1.649.650
2023	1.602.203	5.268	3.903	19.267	1.658	25.126	45.046	1.702.472
2024	1.652.561	5.454	4.041	19.659	1.691	25.637	46.461	1.755.504
2025	1.721.218	5.641	4.179	20.048	1.725	26.145	48.392	1.827.348
2026	1.772.057	5.828	4.318	20.437	1.758	26.652	49.821	1.880.871
2027	1.823.013	6.016	4.458	20.823	1.792	27.156	51.254	1.934.510
2028	1.874.065	6.205	4.598	21.207	1.825	27.657	52.689	1.988.246
2029	1.925.198	6.395	4.738	21.590	1.858	28.155	54.127	2.042.060
2030	1.976.395	6.585	4.879	21.970	1.890	28.651	55.566	2.095.936
2031	2.027.639	6.775	5.020	22.348	1.923	29.145	57.007	2.149.856
2032	2.078.913	6.966	5.161	22.724	1.955	29.635	58.448	2.203.802
2033	2.130.196	7.157	5.302	23.098	1.987	30.123	59.890	2.257.754
2034	2.182.089	7.350	5.446	23.476	2.020	30.616	61.349	2.312.345
2035	2.233.946	7.543	5.589	23.852	2.052	31.106	62.807	2.366.895
2036	2.285.745	7.736	5.732	24.225	2.084	31.592	64.263	2.421.378
2037	2.337.459	7.930	5.875	24.595	2.116	32.075	65.717	2.475.767
2038	2.389.061	8.123	6.018	24.962	2.148	32.553	67.168	2.530.033
2039	2.460.361	8.316	6.161	25.326	2.179	33.028	69.172	2.604.542
2040	2.511.737	8.508	6.304	25.686	2.210	33.498	70.617	2.658.559
2041	2.562.905	8.700	6.446	26.043	2.241	33.963	72.055	2.712.352

2042	2.613.835	8.891	6.587	26.396	2.271	34.423	73.487	2.765.890
2043	2.664.499	9.081	6.729	26.744	2.301	34.878	74.912	2.819.144
2044	2.714.867	9.271	6.869	27.089	2.331	35.327	76.328	2.872.082
2045	2.764.912	9.459	7.009	27.429	2.360	35.771	77.735	2.924.675
2046	2.814.608	9.647	7.148	27.765	2.389	36.209	79.132	2.976.897
2047	2.863.932	9.833	7.286	28.096	2.417	36.641	80.519	3.028.724
2048	2.912.866	10.018	7.423	28.423	2.445	37.066	81.895	3.080.136
2049	2.961.391	10.202	7.559	28.744	2.473	37.486	83.259	3.131.114
2050	3.009.495	10.403	7.708	28.802	2.478	37.561	84.611	3.181.058

Fuente: elaboración propia con datos de IMN INGEI Residuos (2021)

La línea de referencia para los residuos sólidos se muestra en el Gráfico 41.

Gráfico 41 Emisiones totales de CO₂ del Sector Residuos Sólidos



Fuente: elaboración propia con datos de IMN INGEI Residuos (2021)

4.1.2 Aguas residuales

4.1.2.1 Generación de aguas residuales domésticas

Para la estimación de las emisiones de las aguas residuales se usa como metodología, la forma de estimación IMN para los INGEI y que ha sido seguida por Sasa y Barboza (2024), en la preparación del Inventarios de GEI para el sector residuos, en el contexto del BTR. Dicho trabajo presenta un modelo con la composición de los métodos de disposición de aguas residuales domésticas y las aguas residuales industriales.

La estimación de las emisiones de metano CH₄, se realiza con la aplicación de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Emisiones de CH}_4 = [\sum_{i,j} (U_i \cdot T_{ij} \cdot EF_j)] \cdot (TOW - S) - R$$

Donde:

- Emisiones CH₄ = CH₄ emitido en el año T, Gg.
- TOW = total de materia orgánica en las aguas residuales del año del inventario, kg de BOD/año.
- U_i = fracción de la población del grupo de ingresos i en el año de inventario.
- T_{ij} = grado de utilización de vía o sistema de tratamiento y/o eliminación j, para cada fracción i.
- EFi = factor de emisión por tipo de tratamiento j, kg de CH₄/ kg de BOD
- S = componente orgánico separado como lodo durante el año de inventario, kg BOD/año
- R = cantidad de CH₄ recuperada durante el año de inventario, kg CH₄/año.

$$EF_j = B_0 \cdot MCF_j$$

Donde:

- EFi = factor de emisión por tiempo de tratamiento j, kg de CH₄/ kg de BOD.
- B₀ = capacidad máxima de producción de metano, kg CH₄/kg BOD.
- MCFi = factor de corrección de metano para cada sistema j, adimensional.

$$TOW = P \cdot BOD \cdot 0,001 \cdot I \cdot 365$$

Donde:

- TOW = total de materia orgánica en las aguas residuales del año del inventario, kg de BOD/año.
- P = población del país en el año del inventario, personas.
- BOD = BOD per cápita del país en el año de inventario, g/persona día
- 0,001 = conversión de gramos a kilogramos de BOD
- I = Factor de corrección para BOD industrial adicional eliminado en cloacas (recolectado valor por defecto de 1,25, si no es recolectado valor por defecto de 1).

Los parámetros aplicables se muestran en el Cuadro 27.

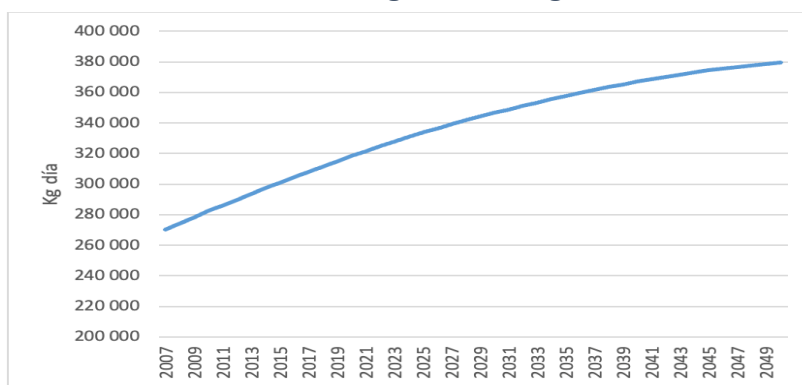
Cuadro 27 Parámetros para los tipos de tratamiento de aguas residuales

Parámetro	Tanque séptico	Planta tratamiento	Alcantarillado sin planta	Letrina
I	1,25	1,25	1,25	1,25
Bo (kg CH ₄ /kg BOD)	0,6	0,6	0,6	0,6
MCFj	0,5	0,5	0,5	0,5
U	1	1	1	1
Tij %	74,4%	15,4%	8,6%	1,3%
S (kg BOD/año)	0	0	0	0
R (kg CH ₄ /año)	0	1,3	0	0

Fuente: IMN INGEI Residuos (2021)

El Gráfico 42 muestra la estimación de carga de demanda biológica de oxígeno (BOD por sus siglas en inglés) proyectada para el 2050.

Gráfico 42 Estimación de Generación de carga BOD en aguas residuales domésticas al 2050



Fuente: elaboración propia con datos de IMN INGEI Residuos (2021)

Como resultado de la estimación de las aguas de las emisiones de CH₄ y N₂O de las aguas residuales domésticas, se obtienen los resultados del cuadro 21.

Cuadro 28 Emisiones de GEI procedentes de las aguas residuales domésticas (ton CH₄ y N₂O)

Año	Emisión CH ₄ domestica (toneladas)	Emisión N ₂ O domestica (toneladas)
2021	38.410	202
2022	38.799	204
2023	39.177	206
2024	39.544	208
2025	39.901	209
2026	40.246	211
2027	40.580	213
2028	40.904	215
2029	41.217	216
2030	41.519	218
2031	41.811	219
2032	42.094	221
2033	42.366	222
2034	42.629	223
2035	42.895	225
2036	43.150	226
2037	43.396	227

Año	Emisión CH ₄ domestica (toneladas)	Emisión N ₂ O domestica (toneladas)
2038	43.632	228
2039	43.858	229
2040	44.074	230
2041	44.281	232
2042	44.477	232
2043	44.663	233
2044	44.838	234
2045	45.004	235
2046	45.160	236
2047	45.305	237
2048	45.441	237
2049	45.566	238
2050	45.682	238

Fuente: elaboración propia con datos de IMN INGEI Residuos (2021)

4.1.2.2 Generación de aguas residuales industriales

Para la estimación de las emisiones de las aguas residuales industriales, se utiliza la metodología del IMN para la estimación del INGEI, que es la que ha sido seguida por Sasa y Barboza (2024).

Para la estimación de las emisiones de metano se emplea la siguiente ecuación:

$$\text{Emisiones de CH}_4 = \sum i (\text{TOW}_i - \text{Si}) \cdot \text{EF}_i - \text{R}_i$$

Donde:

- Emisiones CH₄ = CH₄ emitido en el año T, en Gg.
- TOW_i = total de materia orgánica en las aguas residuales contenidas en la industria i durante el año de inventario, en kg de DQO/año.
- EF_i = factor de emisión por tiempo de tratamiento j, en kg de CH₄/ kg de DQO.
- Si = componente orgánico separado como lodo durante el año de inventario, en kg DQO /año.
- Ri = cantidad de CH₄ recuperada durante el año de inventario, en kg CH₄/año.

$$\text{EF}_j = \text{B}_0 \cdot \text{MCF}_j$$

Donde:

- EF_j = factor de emisión por tiempo de tratamiento j, en kg de CH₄/ kg de DQO.
- B₀ = capacidad máxima de producción de metano, en kg CH₄/kg DQO.
- MCF_i = factor de corrección de metano para cada sistema j, adimensional.

$$\text{TOW}_i = \text{Pi} \cdot \text{DQO}_i$$

Donde:

- TOWi = total de materia orgánica en las aguas residuales contenidas en la industria i durante el año de inventario, en kg de DQO /año.
- Pi = producto industrial total del sector industrial i, en t/año.
- BODi = BOD por unidad de producto, en kg DQO /t producto.

Como parámetros para la estimación de las ecuaciones, se tienen la información del cuadro 29.

Cuadro 29 Parámetros para la estimación de emisiones del tratamiento de aguas industriales

Parámetro	Bobino sacrificados (cabezas)	Porcinos sacrificados (cabezas)	Aves sacrificadas	Beneficiado café (fanegas)	Caña procesada (Ton)	Palma (Ton)
TOW kg de DQO/unidad	11,07	5,32	0,0407	6,1	0,059	0,62
Fracción de agua tratada	0,2	0,28	0,28	0,37	0,2	0,95
MCF aguas tratadas	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
MCF aguas no tratadas	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Bo kg CH ₄ /kg DQO	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25

Fuente: INGEI 1017

Los datos de actividad corresponden a las unidades productivas indicadas en el Cuadro 30. Los datos hasta el 2017 se obtuvieron de las estadísticas incluidas por el IMN y que se basó en información del MAG-SEPSA. Con base en esas estadísticas se realizó la proyección de la actividad hasta el 2050.

Cuadro 30 Datos de actividad para las emisiones de las aguas residuales industriales

Año	Ganado vacuno cabezas	Porcicultura cabezas	Avicultura cabezas	Café Fanegas	Caña toneladas	Fruta de palma toneladas
1990	328.864	60.848	14.330.333	3.175.494	2.437.000	333.000
1991	353.227	73.766	15.821.667	3.408.628	2.629.000	292.000
1992	304.154	81.997	16.649.000	3.615.929	2.840.000	357.000
1993	307.876	81.401	17.417.000	3.384.190	2.987.000	364.000
1994	358.836	98.328	18.111.667	3.296.225	2.985.000	475.000
1995	351.818	100.616	20.141.333	3.257.154	3.439.000	490.000
1996	362.456	85.661	21.955.667	3.364.336	3.153.000	422.000
1997	323.830	90.403	20.946.000	2.901.676	3.682.000	489.000
1998	308.383	105.554	21.830.000	3.379.206	3.670.000	444.000
1999	317.439	123.345	24.826.667	3.239.036	3.363.000	492.000
2000	309.267	131.146	24.413.333	3.338.292	3.398.000	609.000
2001	279.493	151.984	25.720.000	3.056.530	3.472.000	666.000
2002	256.802	153.467	25.574.667	2.852.917	3.462.000	571.200
2003	278.576	152.466	23.940.000	3.761.573	3.959.200	581.000
2004	263.227	161.622	28.153.667	2.202.549	3.755.100	670.000

Año	Ganado vacuno cabezas	Porcicultura cabezas	Avicultura cabezas	Café Fanegas	Caña toneladas	Fruta de palma toneladas
2005	303.526	164.932	30.317.667	2.614.296	3.615.600	780.000
2006	283.226	173.427	32.753.667	2.101.893	3.251.613	872.440
2007	303.925	204.554	36.792.333	2.518.372	4.087.565	825.000
2008	329.025	213.842	35.530.000	2.329.079	3.596.724	863.200
2009	348.457	211.324	36.849.333	1.901.451	3.635.409	897.750
2010	366.475	198.232	35.049.667	2.021.455	3.734.732	985.800
2011	360.885	220.655	33.416.000	2.082.028	3.418.193	1.050.000
2012	329.010	231.408	39.611.000	2.635.490	4.005.752	1.111.250
2013	319.661	228.763	39.946.000	1.611.443	4.411.088	1.303.960
2014	331.551	234.429	41.233.333	2.012.375	4.344.048	884.406
2015	308.206	244.995	41.522.333	1.884.016	4.265.913	816.000
2016	274.253	257.167	42.755.333	2.135.818	4.158.370	1.089.448
2017	293.200	258.356	44.400.000	2.046.352	4.142.143	1.095.800
2018	296.132	263.865	40.980.790	2.000.677	3.443.941	963.123
2019	299.093	271.714	42.224.971	1.979.623	3.459.147	972.979
2020	302.084	279.584	43.478.650	1.959.282	3.473.837	982.501
2021	305.105	287.475	44.741.827	1.939.608	3.488.046	991.710
2022	308.156	295.385	46.014.502	1.920.558	3.501.804	1.000.627
2023	311.238	303.315	47.296.676	1.902.095	3.515.138	1.009.270
2024	314.350	311.266	48.588.348	1.884.184	3.528.074	1.017.654
2025	317.494	319.237	49.889.518	1.866.791	3.540.635	1.025.796
2026	320.669	327.228	51.200.186	1.849.889	3.552.843	1.033.708
2027	323.875	335.239	52.520.352	1.833.449	3.564.715	1.041.403
2028	327.114	343.270	53.850.016	1.817.448	3.576.272	1.048.893
2029	330.385	351.322	55.189.179	1.801.863	3.587.528	1.056.189
2030	333.689	359.394	56.537.840	1.786.672	3.598.498	1.063.299
2031	337.026	367.485	57.895.999	1.771.857	3.609.198	1.070.235
2032	340.396	375.598	59.263.656	1.757.398	3.619.641	1.077.003
2033	343.800	383.730	60.640.812	1.743.280	3.629.837	1.083.611
2034	347.238	391.882	62.027.466	1.729.486	3.639.799	1.090.068
2035	350.710	400.055	63.423.618	1.716.003	3.649.537	1.096.380
2036	354.218	408.247	64.829.268	1.702.815	3.659.061	1.102.553
2037	357.760	416.460	66.244.416	1.689.911	3.668.381	1.108.593
2038	361.337	424.693	67.669.062	1.677.279	3.677.504	1.114.506
2039	364.951	432.947	69.103.207	1.664.908	3.686.439	1.120.298
2040	368.600	441.220	70.546.850	1.652.786	3.695.193	1.125.972
2041	372.286	449.514	71.999.991	1.640.905	3.703.774	1.131.533
2042	376.009	457.827	73.462.630	1.629.254	3.712.188	1.136.987
2043	379.769	466.161	74.934.768	1.617.825	3.720.443	1.142.337
2044	383.567	474.515	76.416.404	1.606.610	3.728.542	1.147.587
2045	387.403	482.890	77.907.538	1.595.600	3.736.494	1.152.741
2046	391.277	491.284	79.408.170	1.584.789	3.744.302	1.157.801
2047	395.189	499.699	80.918.300	1.574.169	3.751.971	1.162.772
2048	399.141	508.134	82.437.928	1.563.734	3.759.508	1.167.657
2049	403.133	516.588	83.967.055	1.553.478	3.766.915	1.172.458
2050	407.164	525.064	85.505.680	1.543.393	3.774.198	1.177.179

Fuente: elaboración propia con datos de INGEI 2017

Con base en los parámetros y datos de actividad se estimaron las emisiones de CH₄ para las aguas residuales de origen industrial y los resultados se muestran en el cuadro 31.

Cuadro 31 Emisiones Totales de Referencia por Aguas Residuales (ton CH₄)

Año	Ganado vacuno cabezas	Porcicultur a cabezas	Avicultura cabezas	Café Fanegas	Caña toneladas	Fruta de palma toneladas	Total CH ₄ (Ton)
2021	220	124	148	1.171	13	132	1.808
2022	222	127	152	1.160	13	133	1.807
2023	224	131	156	1.149	13	135	1.807
2024	226	134	160	1.138	14	136	1.808
2025	228	138	164	1.127	14	137	1.808
2026	231	141	169	1.117	14	138	1.809
2027	233	144	173	1.107	14	139	1.810
2028	235	148	178	1.098	14	140	1.812
2029	238	151	182	1.088	14	141	1.814
2030	240	155	186	1.079	14	142	1.816
2031	243	158	191	1.070	14	143	1.818
2032	245	162	195	1.061	14	144	1.821
2033	247	165	200	1.053	14	144	1.824
2034	250	169	204	1.044	14	145	1.827
2035	252	172	209	1.036	14	146	1.830
2036	255	176	214	1.028	14	147	1.834
2037	257	179	218	1.021	14	148	1.838
2038	260	183	223	1.013	14	149	1.842
2039	263	187	228	1.005	14	149	1.846
2040	265	190	233	998	14	150	1.850
2041	268	194	237	991	14	151	1.855
2042	271	197	242	984	14	152	1.860
2043	273	201	247	977	14	152	1.865
2044	276	204	252	970	14	153	1.870
2045	279	208	257	964	14	154	1.875
2046	282	212	262	957	14	154	1.881
2047	284	215	267	951	14	155	1.886
2048	287	219	272	944	14	156	1.892
2049	290	223	277	938	14	156	1.898
2050	293	226	282	932	14	157	1.905

Fuente: elaboración propia con datos de INGEI 2017

4.1.2.3 Emisiones totales de aguas residuales

Las emisiones totales de aguas residuales, tanto domésticas como industriales, expresadas en CO₂ equivalente se muestra en el Cuadro 25. Los parámetros de calentamiento global que se utilizan son CO₂ = 1, CH₄ = 28 y N₂O = 265.

Cuadro 32 Emisiones de CO₂ equivalente en aguas residuales

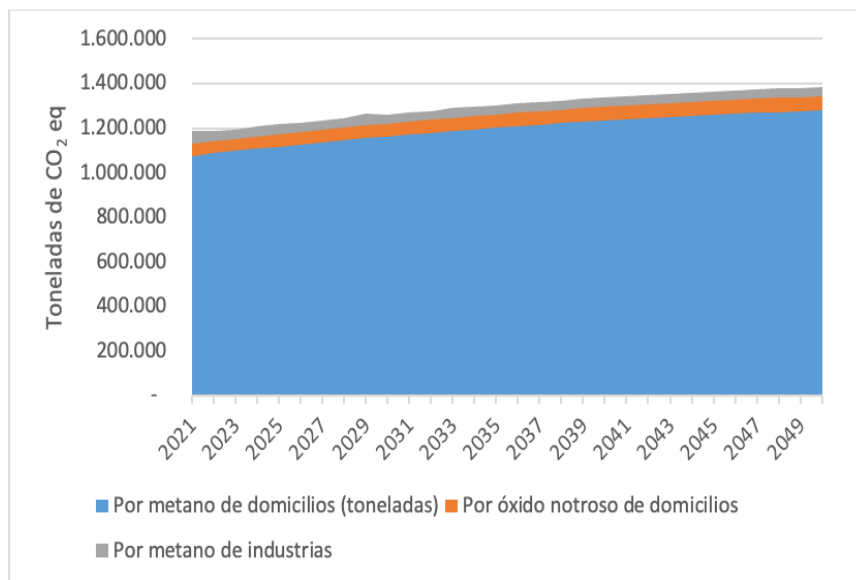
Año	Por metano doméstico (toneladas)	Por óxido nítrico doméstico	Por metano de industrias	Emisión total de CO ₂ (toneladas)
2021	1.075.480	53.521	56.476	1.185.477
2022	1.086.365	54.043	48.440	1.188.848
2023	1.096.960	54.549	41.440	1.192.950
2024	1.107.242	55.041	48.175	1.210.457

2025	1.117.215	55.517	46.011	1.218.743
2026	1.126.885	55.978	40.525	1.223.388
2027	1.136.248	56.424	42.521	1.235.194
2028	1.145.307	56.856	43.547	1.245.710
2029	1.154.066	57.273	51.600	1.262.939
2030	1.162.534	57.676	37.715	1.257.925
2031	1.170.716	58.066	42.386	1.271.169
2032	1.178.621	58.442	40.106	1.277.168
2033	1.186.252	58.804	44.122	1.289.179
2034	1.193.614	59.171	43.340	1.296.125
2035	1.201.050	59.523	42.069	1.302.643
2036	1.208.209	59.863	42.029	1.310.101
2037	1.215.092	60.188	41.999	1.317.279
2038	1.221.699	60.500	41.979	1.324.179
2039	1.228.030	60.798	41.969	1.330.797
2040	1.234.083	61.082	41.967	1.337.132
2041	1.239.855	61.353	41.973	1.343.181
2042	1.245.345	61.610	41.987	1.348.942
2043	1.250.553	61.852	42.009	1.354.415
2044	1.255.477	62.081	42.038	1.359.597
2045	1.260.118	62.295	42.075	1.364.487
2046	1.264.473	62.496	42.117	1.369.087
2047	1.268.545	62.683	42.167	1.373.395
2048	1.272.336	62.856	42.222	1.377.414
2049	1.275.849	63.015	42.283	1.381.148
2050	1.279.088	63.162	42.350	1.384.600

Fuente: elaboración propia con datos de INGEI 2017

En el Gráfico 43 se presenta la línea de referencia para la disposición de aguas residuales.

Gráfico 43 Estimación de Emisiones de CO₂ equivalente en aguas residuales



Fuente: elaboración propia con datos de INGEI 2017

4.1.2.4 Emisiones totales del sector residuos

Los resultados en términos de las emisiones totales de CO₂e proyectadas para el escenario de referencia del sector residuos se muestran en el Cuadro 33. El mayor peso relativo lo tienen las aguas residuales domésticas, que se mantiene hasta el 2050.

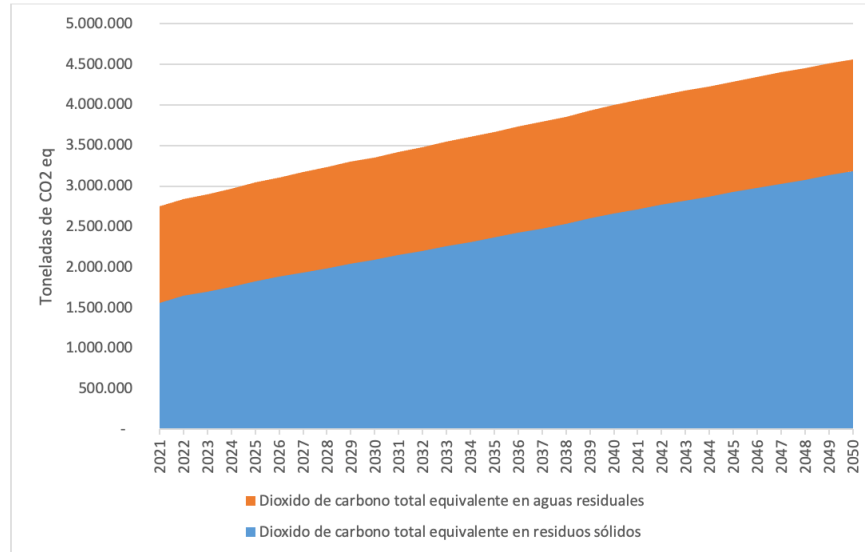
Cuadro 33 Emisiones de CO₂ equivalente en sector residuos

Año	Dióxido de carbono total equivalente en residuos sólidos	Dióxido de carbono total equivalente en aguas residuales	Dióxido de carbono total equivalente en sector residuos
2021	1.561.151	1.185.477	2.746.627
2022	1.649.650	1.188.848	2.838.498
2023	1.702.472	1.192.950	2.895.421
2024	1.755.504	1.210.457	2.965.961
2025	1.827.348	1.218.743	3.046.091
2026	1.880.871	1.223.388	3.104.259
2027	1.934.510	1.235.194	3.169.704
2028	1.988.246	1.245.710	3.233.956
2029	2.042.060	1.262.939	3.304.999
2030	2.095.936	1.257.925	3.353.861
2031	2.149.856	1.271.169	3.421.025
2032	2.203.802	1.277.168	3.480.970
2033	2.257.754	1.289.179	3.546.933
2034	2.312.345	1.296.125	3.608.470
2035	2.366.895	1.302.643	3.669.538
2036	2.421.378	1.310.101	3.731.479
2037	2.475.767	1.317.279	3.793.047
2038	2.530.033	1.324.179	3.854.212
2039	2.604.542	1.330.797	3.935.340
2040	2.658.559	1.337.132	3.995.692
2041	2.712.352	1.343.181	4.055.533
2042	2.765.890	1.348.942	4.114.833
2043	2.819.144	1.354.415	4.173.558
2044	2.872.082	1.359.597	4.231.678
2045	2.924.675	1.364.487	4.289.162
2046	2.976.897	1.369.087	4.345.983
2047	3.028.724	1.373.395	4.402.119
2048	3.080.136	1.377.414	4.457.550
2049	3.131.114	1.381.148	4.512.262
2050	3.181.058	1.384.600	4.565.658

Fuente: elaboración propia con datos de INGEI 2017

La línea de referencia del sector residuos es la que se muestra en el gráfico 44.

Gráfico 44 Estimación de Emisiones de CO₂ equivalente en aguas residuales



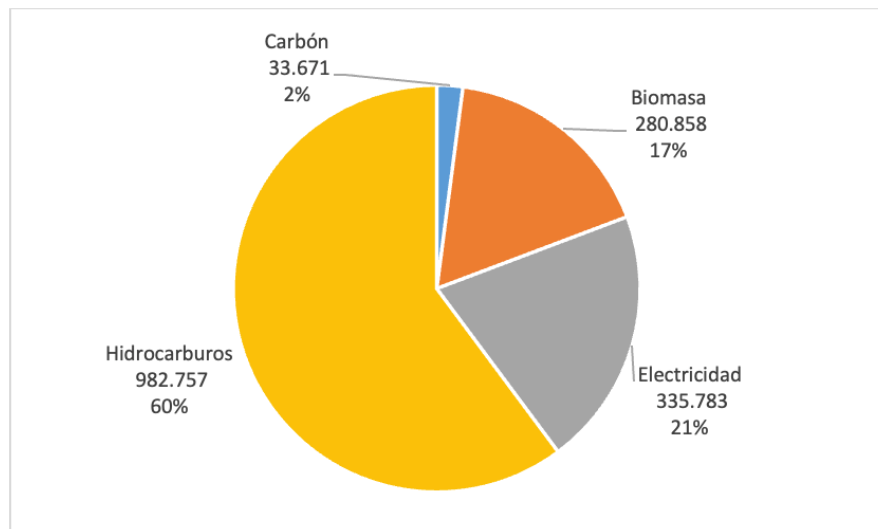
Fuente: elaboración propia con datos de INGEI 2017

4.2 Sector energía

4.2.1 Subsector transporte

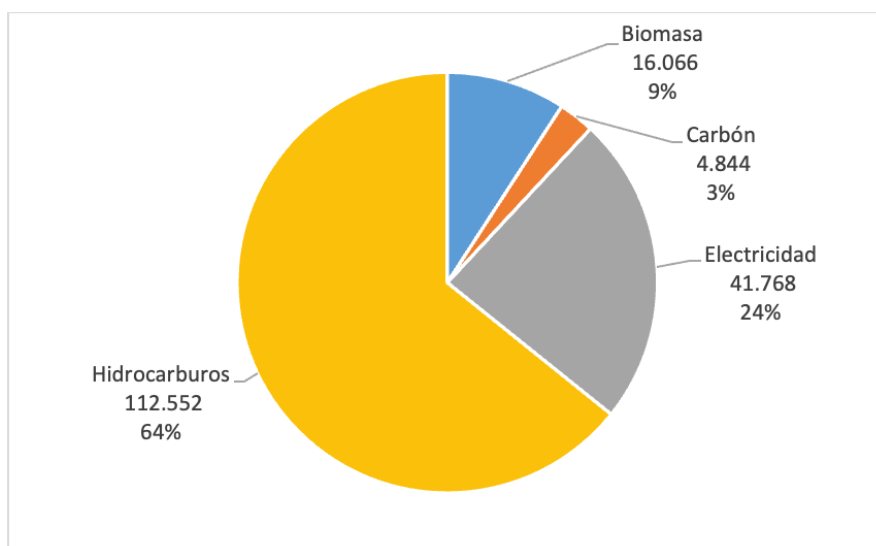
El subsector transporte se caracteriza por ser el principal consumidor dentro del sector energía, de acuerdo con la matriz energética del país, en donde los hidrocarburos representaron entre 2011 y 2020 un 60% del consumo total de la energía (Gráfico 45). Para el año 2021, las cuentas ambientales del Banco Central de Costa Rica (BCCR) registran una utilización final de los hidrocarburos del 64% (Gráfico 46).

Gráfico 45 Costa Rica: Consumo energético total 2011-2020 (Terajulios)



Fuente: SINAMECC

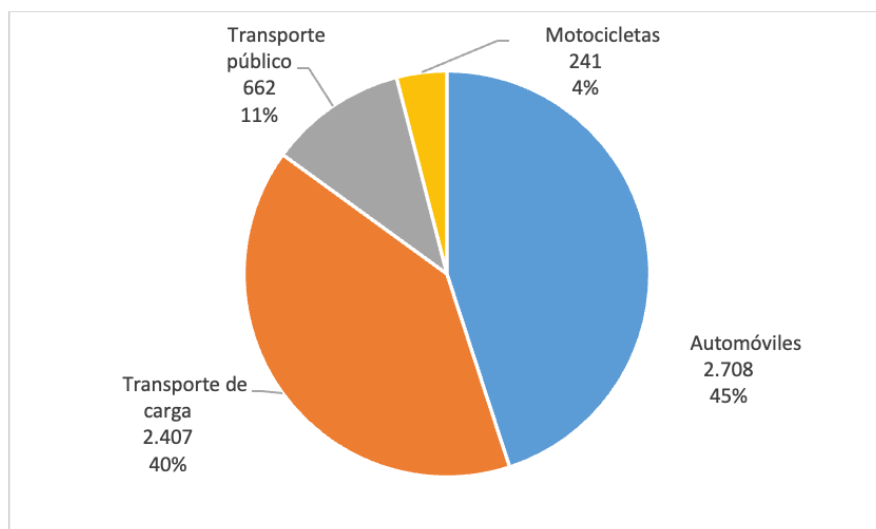
Gráfico 46 Costa Rica: Consumo energético total 2021 (Terajulios)



Fuente: BCCR

De acuerdo con los datos preliminares del INGEI 2021, las emisiones netas de GEI del país proceden en un 50% del sector energía, del cual un 52% de dichas emisiones netas se relacionan con el transporte. De todas las emisiones en el transporte, un 45% se derivan del transporte privado de automóviles. Le siguen las emisiones de la flota de transporte de carga, con un 22%, las motocicletas con el 16% y los autobuses, de transporte público regular y especial, en su conjunto representan un 14% (Gráfico 47).

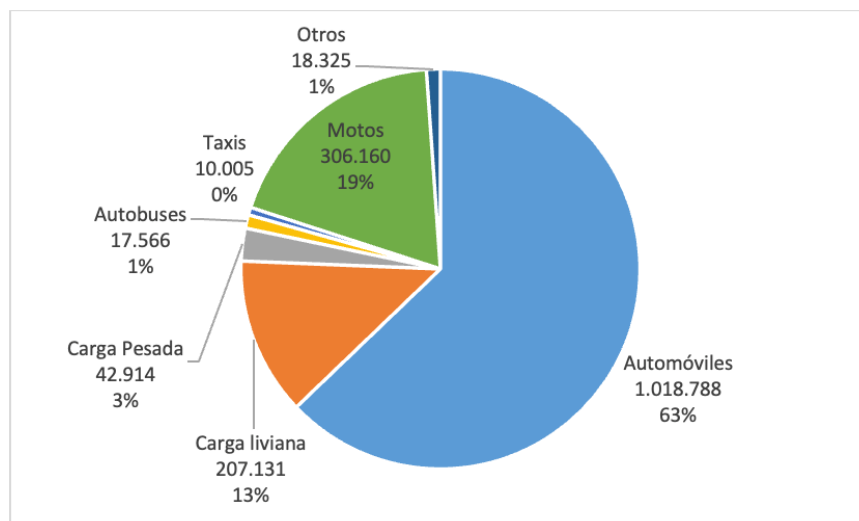
Gráfico 47 Composición de las Emisiones del Sector Transporte 2021 (Gg de CO₂)



Fuente: INGEI 2021

Con respecto a la flota de vehículos en el país, en 2022 esta flota alcanzó un tamaño de 1.602.564 vehículos, siendo 63% vehículos particulares, 19% motocicletas, 13% carga liviana y 3% carga pesada (Gráfico 48).

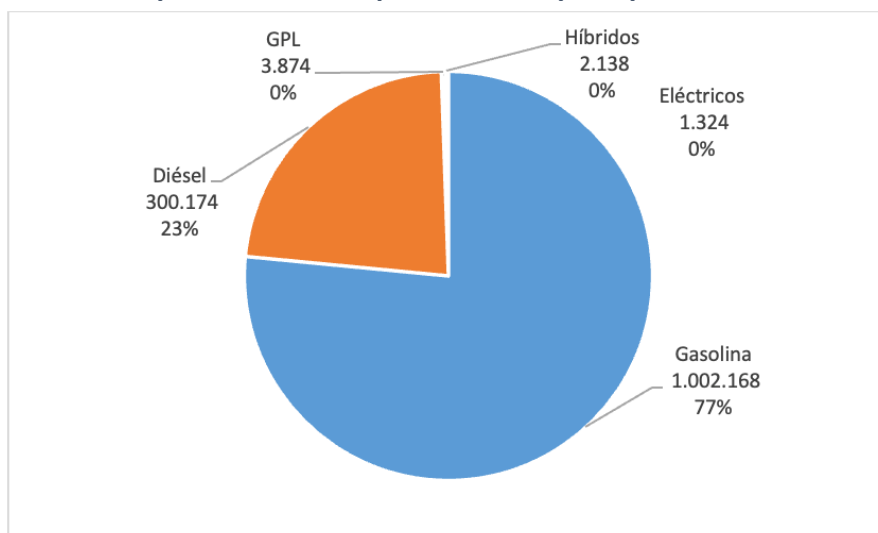
Gráfico 48 Composición del Parque Vehicular 2021



Fuente: INEC

De acuerdo con la memoria estadística del RITEVE del año 2021, un 77% de los vehículos era de gasolina, mientras que el 23% de diésel, siendo los vehículos de GPL, híbridos y eléctricos un porcentaje menor al 1% de la flota total.

Gráfico 49 Composición del Parque Vehicular por tipo de combustible 2021

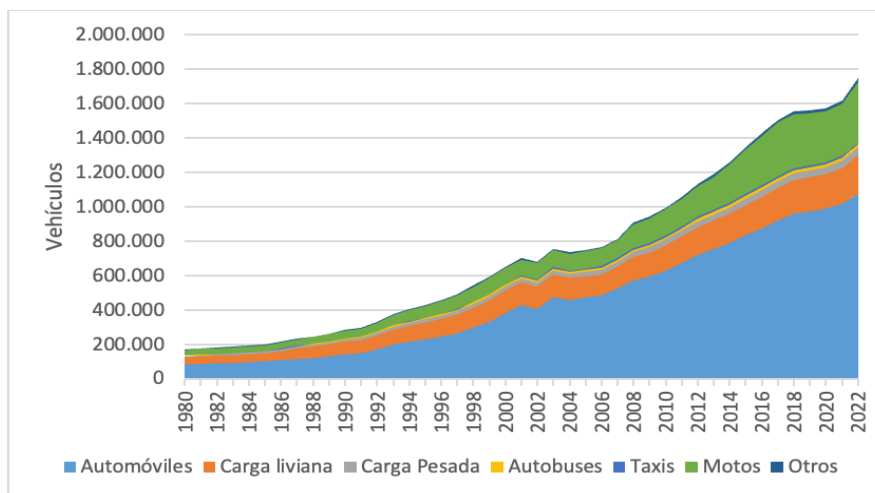


Fuente: RITEVE 2021

En el Gráfico 50 se observa la evolución del parque vehicular, en donde desde el año 1980 ha crecido a una tasa promedio anual de 5,8%, pero si se toma en cuenta que dicho promedio anual fue de 5.0% en la década de los ochenta, el principal empuje en el crecimiento de vehículos se da desde los años noventa, cuyo crecimiento anual registró un promedio de 8,5%. Entre el 2000 y 2009, la tasa de crecimiento anual bajó a 4,9%, y desde el 2010 al 2022, la tasa de crecimiento

anual promedio se mantuvo en ese 4,9%. El crecimiento se centra en los vehículos particulares, los cuales desde 1990 han venido creciendo a una tasa anual del 6,7%.

Gráfico 50 Evolución del Parque Vehicular



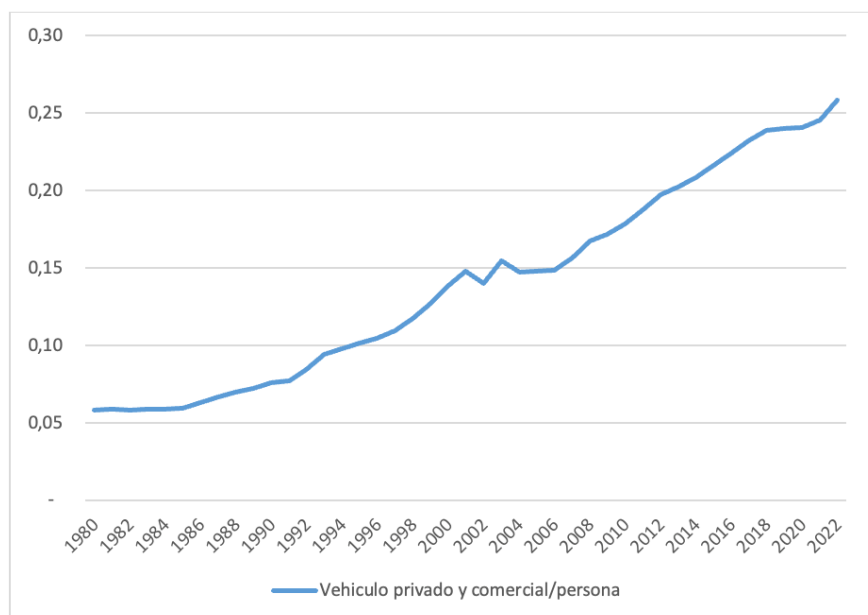
Fuente: Elaboración propia con estadísticas del INEC

4.2.1.1 Proyecciones de la Flota Vehicular

Para la proyección de la flota vehicular y el consumo de energía relacionado con este rubro, se utilizan las estimaciones realizadas por la Dirección de Estadísticas y Censos (INEC) hasta el 2022. Se usan las tendencias de crecimiento por tipo de vehículo para establecer la flota proyectada hasta el 2050.

Para la proyección de la flota vehicular se toma en cuenta el concepto de *saturación de infraestructura vial* que debe alcanzar el parque vehicular, especialmente de vehículos particulares (automóviles) y de vehículos comerciales (carga liviana y pesada), debido a que las personas pueden seguir comprando automóviles hasta un límite razonable, de acuerdo con las condiciones económicas y la oferta de infraestructura vial. Esta condición está reflejada en la relación del número de vehículos (privados y comerciales) respecto a la población. En el Gráfico 51 se observa esta relación desde 1980, donde el parque vehicular ha crecido más rápido que la población, lo que se refleja en la tendencia creciente de los vehículos por persona. En 1980 esa relación era de 0,06 vehículos por persona, hasta que llegar a una relación en el 2022 de 0,26 vehículo por persona.

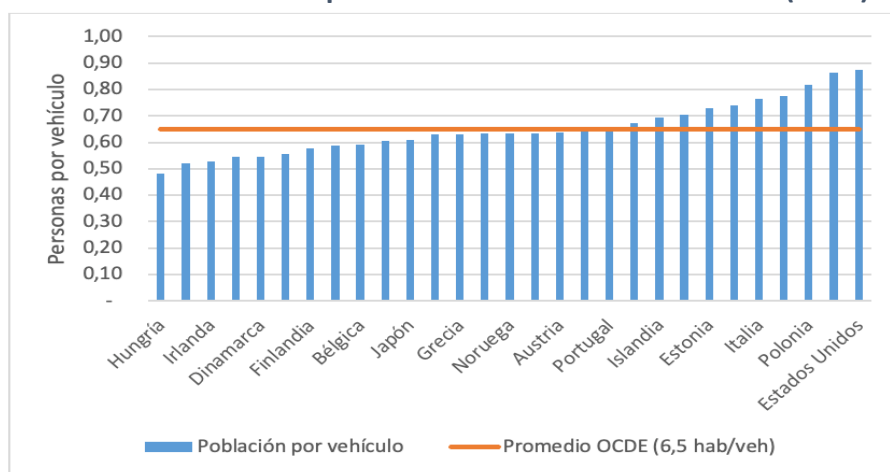
Gráfico 51 Vehículos privado y comercial por persona



Fuente: elaboración propia con datos de INEC

Para determinar el nivel de saturación, se usa como referencia la relación de población por vehículo de los países del OCDE (Gráfico 52). Se observa que esta relación varía del 0,48 a 0,65 vehículos por persona, para un promedio de 0,65 vehículos por persona. Este promedio está constituido por una relación de 0,54 vehículos privados por persona, y sumando 0,11 vehículos comerciales (carga liviana y pesada) por persona. Para analizar el caso de Costa Rica, se toma en cuenta la proyección de cada una de estas flotas, para compararla con el total de referencia de la OCDE de 0,65 vehículos por persona, que se supondrá como el techo máximo que la infraestructura vial del país podrá soportar y a partir de ahí, se parte de la premisa de que las personas cambian su patrón de consumo, al evitar la compra de vehículos debido a los niveles de saturación vial.

Gráfico 52 Población por Vehículo en Países de la OCDE (2022)

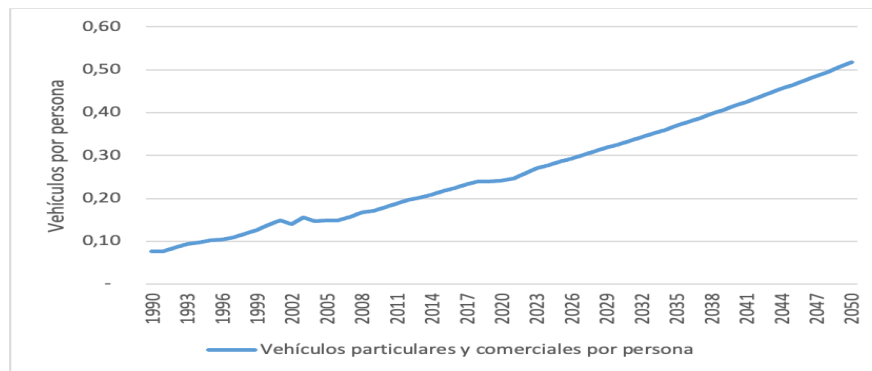


Fuente: Elaboración propia con datos de datosmacro.com

En el Gráfico 53 se observa la relación vehículos por persona tanto histórica como proyectada. Se observa que para 1990, dicha relación fue de 0,08 vehículos por persona, para el 2022 ya fue 0,26 vehículos por persona y para el 2050 se proyecta que alcanzará 0,55 vehículos por persona, pero no alcanza los niveles de la OCDE con un promedio de 0,65 vehículos por persona. Este análisis se aplica a la suma de los autos particulares (automóviles) y comerciales (carga liviana y pesada).

De acuerdo con las tasas de crecimiento proyectadas de vehículos y de la población, el nivel de saturación no se alcanza en el año 2050, por lo que hasta ese horizonte de proyección el techo de vehículos no se ajusta considerando la saturación de la infraestructura vial.

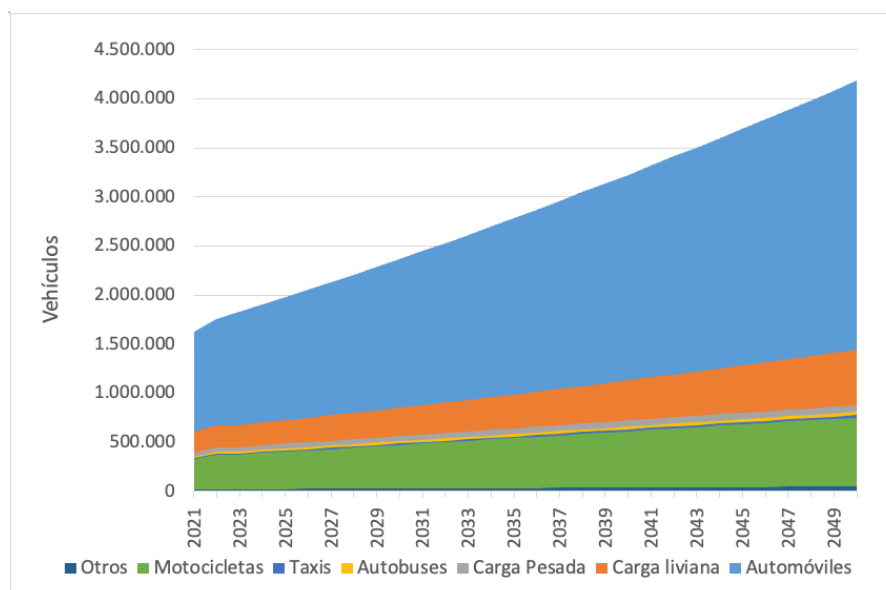
Gráfico 53 Relación histórica y proyección de vehículos por persona (1990-2050)



Fuente: elaboración propia con datos de INEC

La proyección del parque vehicular se ve en el Gráfico 54. Para ello se realizó un análisis de la relación vehículo por persona para cada tipo de flota, como una relación de tamaño de la flota respectiva con respecto a la población. Para esa relación se encontró el ajuste estadístico que más se aplicaba a su tendencia, y el mejor ajuste se usó para la proyección en cada caso. El parque estimado que supera los 4.181.528 vehículos en el 2050.

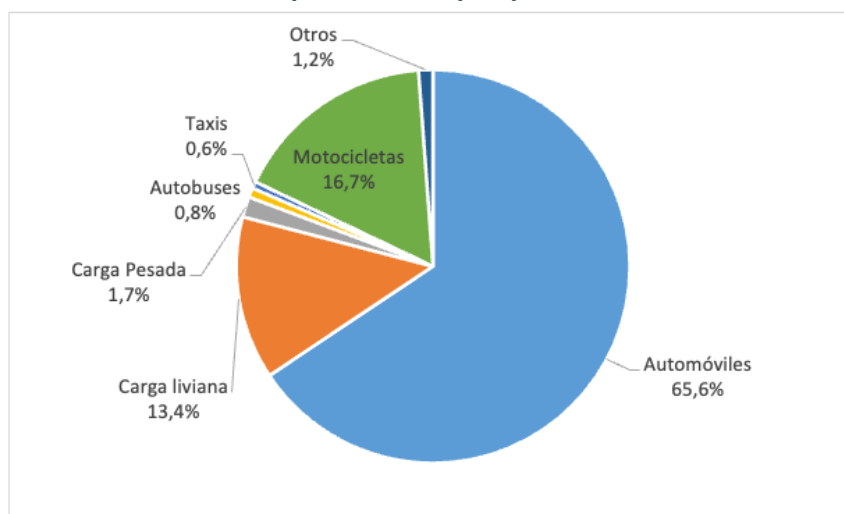
Gráfico 54 Proyección del Parque Vehicular al 2050



Fuente: elaboración propia con datos de INEC

La estructura de la flota de vehículos en el país para el 2050 estaría compuesta por 65,6% de automóviles, 13,4% de carga liviana, 16,7% para motocicletas, 0,8% para autobuses, 1,7% carga pesada y 0,6% para taxis (Gráfico 55).

Gráfico 55 Composición del parque vehicular al 2050

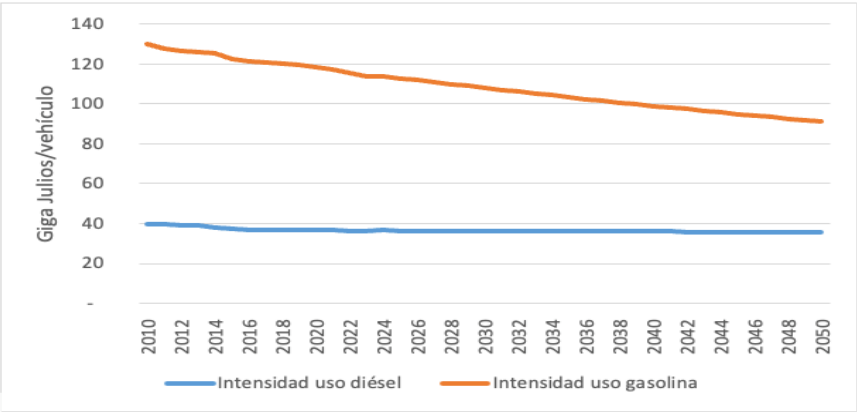


Fuente: elaboración propia con datos de INEC

Uno de los aspectos más importantes de considerar con respecto al consumo esperado de combustibles en el futuro, es que la intensidad en el uso tanto del diésel como de la gasolina va disminuyendo por vehículo a través de los años (Gráfico 56). Este elemento es muy importante de destacar, ya que revela que para la construcción de un escenario base de emisiones para el transporte, ya se incorpora el hecho de que a través de los años la tecnología mejorará los

rendimientos en el uso de los combustibles, independientemente de las políticas que al respecto impulse el país.

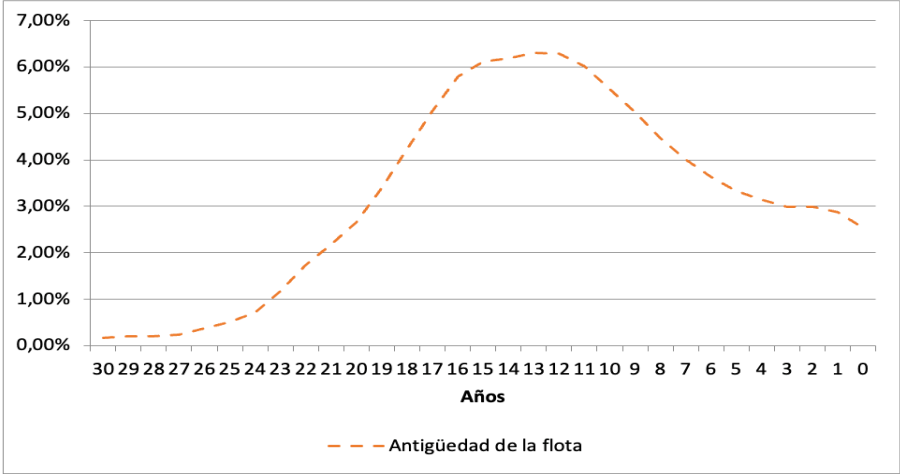
Gráfico 56 Intensidad de uso de combustibles histórica y proyectada



Fuente: elaboración propia con datos INEC y Recope

Para poder modelar el proceso de mejora en el rendimiento de toda la flota vehicular, se ha realizado un análisis de la composición del tamaño de los vehículos particulares inscritos en el INS según la antigüedad basada en el año de inscripción. Para la proyección de la flota se aplica esta antigüedad, pero se mueve hacia adelante año tras año conforme se introducen nuevos automóviles. Con esta modelación, el 50% de la flota se mantiene a futuro con una antigüedad de 12 años y el 80% con 18 años.

Gráfico 57 Composición de la antigüedad de la flota vehicular



Fuente: elaboración propia con datos del INS

Con esta composición de la antigüedad de la flota vehicular y una modelación del recorrido de los vehículos según modelo, se obtiene el rendimiento utilizado para la flota vehicular. Dado que los últimos datos sobre el rendimiento de los vehículos, según tipo y combustible, se tienen con

la Encuesta de consumo energético nacional en el sector transporte del 2013¹⁷, los datos utilizados son los mostrados en el Gráfico 34.

Cuadro 34 Rendimiento según tipo de vehículo y combustible

Tipo de vehículo	Gasolina	Diesel
Particulares	41,00	41,00
Carga Liviana	36,00	36,00
Carga Pesada		18,00
Buses		18,00
Taxis	48,90	48,20
Motos	72,25	

Fuente: elaboración propia con datos del MINAE (2013)

Dado que, para la flota dada en un año, el rendimiento depende de la composición de la antigüedad de dicha flota, al aplicar esa antigüedad con los datos del INS antes indicados, el resultado de la mejora del rendimiento que se usa para los autos particulares (automóviles) se muestra en el gráfico 35, el cual muestra que con los años el rendimiento promedio esperado de la flota va aumentando. Para cada tipo de flota hay una mejora en el rendimiento como en este ejemplo de la flota de autos particulares.

Cuadro 35 Rendimiento promedio de la flota vehicular de automóviles

Año	Km/galón de combustible
2010	39,00
2015	42,70
2020	45,75
2025	48,12
2030	51,19
2035	55,76
2040	59,58
2045	61,57
2050	63,97

Fuente: elaboración propia

Respecto a los kilómetros recorridos por cada tipo de combustible, se utilizan los datos que se muestran en el cuadro 36. Si bien los recorridos fueron publicados por RITEVE en 2021, algunos se han ajustado para que el tipo de flota vehicular refleje el consumo de energía registrado en el INGEI 2017.

Cuadro 36 Recorrido según tipo de vehículo

Tipo de vehículo	Km/año
------------------	--------

¹⁷ MINAE (2013). Encuesta de consumo energético nacional en el sector transporte del 2013. San José: MINAE: Dirección Sectorial de Energía.

Particulares	12.095
Carga Liviana	15.455
Carga Pesada	42.877
Buses	58.999
Taxis	46.880
Motos	17.413

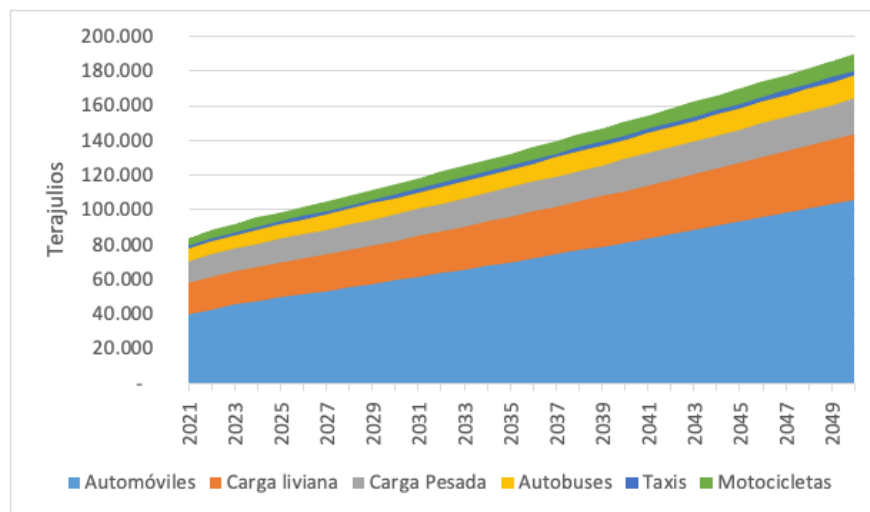
Fuente: elaboración propia

Para cada tipo flota vehicular y cada tipo de combustible, el consumo de combustible se define de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$\text{Consumo de combustible flota } j = \text{Flota Total } j * (\text{Recorrido } j / \text{Recorrido } j)$$

El consumo de energía resultante se observa en el Gráfico 58, donde la mayor parte está explicada por los autos particulares, y le siguen el transporte en su orden la carga liviana, la carga pesada, los autobuses y las motocicletas. Respecto al 2021, estas proyecciones indican que el consumo de combustibles fósiles debido al transporte para el 2050 crece un 88%. La proyección de la flota vehicular y el consumo de energía incorporan la saturación de vehículos por persona.

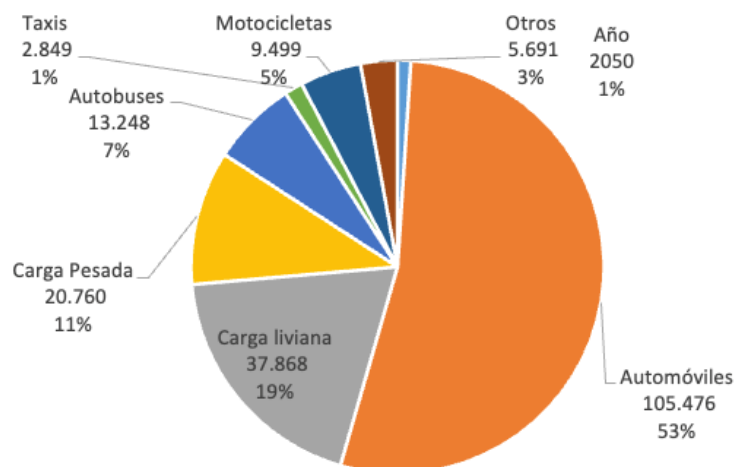
Gráfico 58 Proyección de consumo de energía del parque vehicular



Fuente: elaboración propia

El Gráfico 59 muestra la composición del consumo de la flota vehicular proyectado para el año 2050, con un 53% debido a los automóviles, 19% por la carga liviana, 11% carga pesada, 7% autobuses y 5% motocicletas. El consumo del transporte público en la modalidad taxi es de sólo un 1%.

Gráfico 59 Composición del consumo del parque vehicular del 2050 (Terajulios)

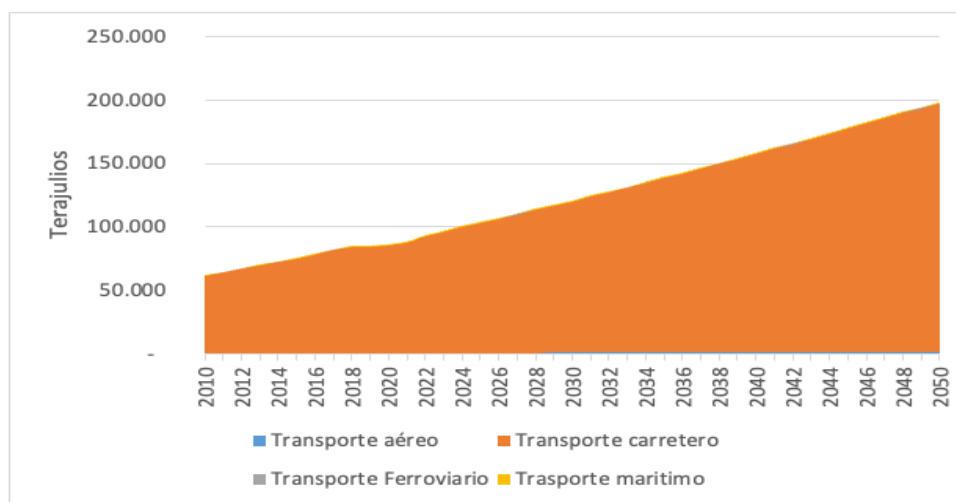


Fuente: elaboración propia

4.2.1.2 Hidrocarburos

El sector de transporte terrestre es el principal consumidor de energía y generador de emisiones del sector hidrocarburos. Sin embargo, para tener un cuadro más adecuado del escenario de consumo de hidrocarburos es necesario considerar otros modos de transporte. El Gráfico 60 muestra la proyección de consumo energético de todos los modos de transporte. Esta proyección se realizó con base en los datos de consumo del sector energía contenidos en el INGEI 2017. Para el transporte aéreo nacional se tomó en cuenta la expansión que se da con el jet fuel y la contracción en el consumo de la gasolina de avión. Similarmente se da una expansión en el consumo de diésel en el transporte marítimo y una contracción en el keroseno. En el transporte ferroviario, si bien crece el consumo de diésel, este aumento se va creciendo a tasas menores a través de los años. Dado que en el gráfico no se observa la participación de las otras modalidades de transporte, el Cuadro 27 presenta las cifras obtenidas.

Gráfico 60 Proyección del Consumo de Energía por Modo de Transporte



Fuente: elaboración propia con datos de DSE y estimaciones de los autores

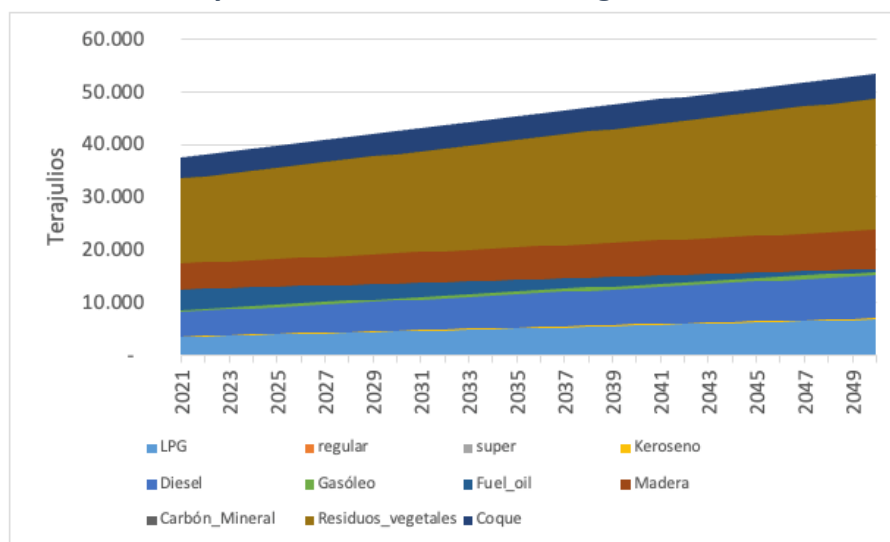
Cuadro 37 Consumo de energía según tipo de transporte

Año	Transporte carretero	Transporte aéreo	Transporte Ferroviario	Transporte marítimo	Total
2021	86.503	706	79	781	88.069
2022	91.605	720	80	790	93.196
2023	94.799	735	81	799	96.413
2024	99.036	750	81	807	100.674
2025	102.275	769	82	815	103.942
2026	105.563	789	83	823	107.259
2027	108.900	809	83	831	110.623
2028	112.284	829	84	839	114.035
2029	115.713	849	84	846	117.492
2030	119.187	869	85	854	120.994
2031	122.705	888	86	861	124.540
2032	126.266	908	86	868	128.128
2033	129.868	928	87	875	131.757
2034	133.537	948	87	881	135.453
2035	137.245	968	88	888	139.188
2036	140.990	988	88	894	142.960
2037	144.771	1.007	88	901	146.767
2038	148.586	1.027	89	907	150.609
2039	152.433	1.047	89	913	154.482
2040	156.311	1.067	90	919	158.386
2041	160.217	1.087	90	925	162.318
2042	164.149	1.106	91	931	166.277
2043	168.107	1.126	91	936	170.261
2044	172.087	1.146	91	942	174.267
2045	176.088	1.166	92	948	178.294
2046	180.108	1.186	92	953	182.339
2047	184.146	1.206	93	959	186.403
2048	188.199	1.225	93	964	190.482
2049	192.267	1.245	93	969	194.575
2050	196.348	1.265	94	974	198.681

Fuente: elaboración propia

Para el consumo de energía en la industria se realizó una proyección para cada tipo de combustible. El consumo proyectado se observa en el Gráfico 61, en donde el principal crecimiento se ve en los residuos vegetales, seguido por diésel, madera y LPG.

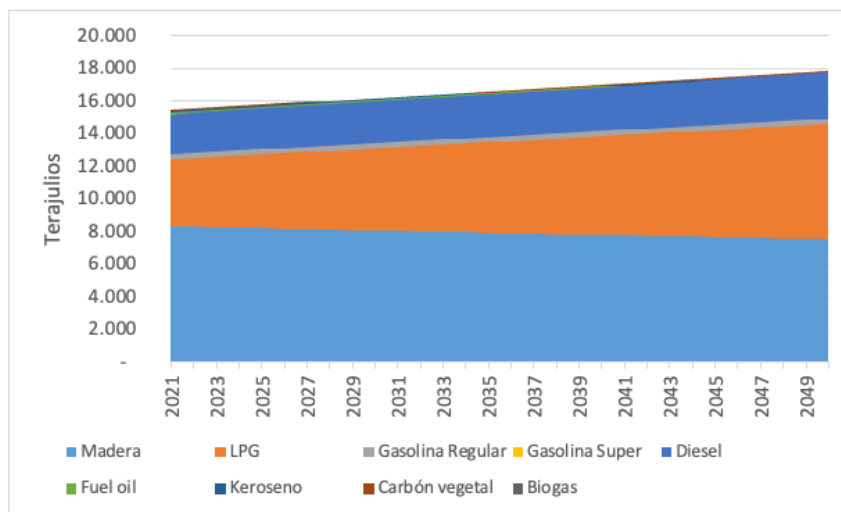
Gráfico 61 Proyección del consumo de energía en sector industria



Fuente: elaboración propia

En cuanto al consumo de energía en las actividades institucionales, comercio, servicios y agricultura, la proyección para cada tipo de combustible se muestra en el Gráfico 62. El consumo de la madera sigue una tendencia que se estabiliza en el largo plazo, continuando como principal componente del consumo de energía. Le sigue el consumo del LPG y luego el del diésel.

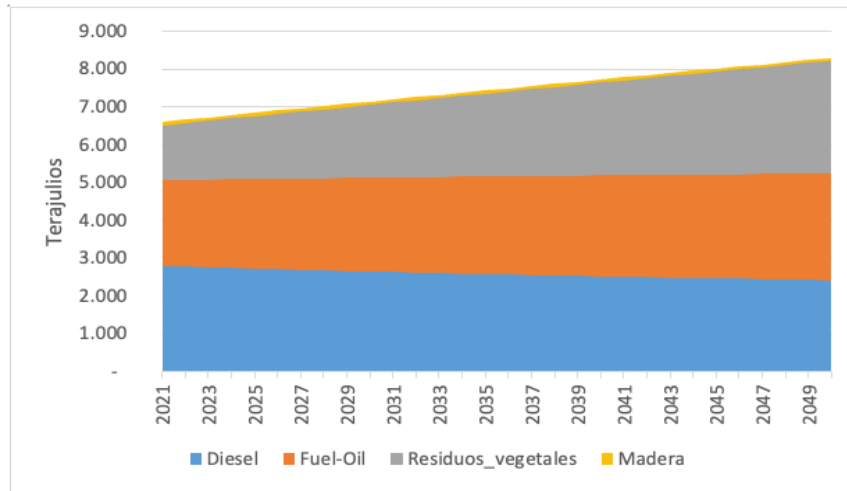
Gráfico 62 Proyección del consumo de energía en sector institucional y agrícola



Fuente: elaboración propia

Para el consumo de las actividades relacionadas con la producción de energía, el Gráfico 63 señala que las fuentes más relevantes son diésel, fuel oil y residuos vegetales.

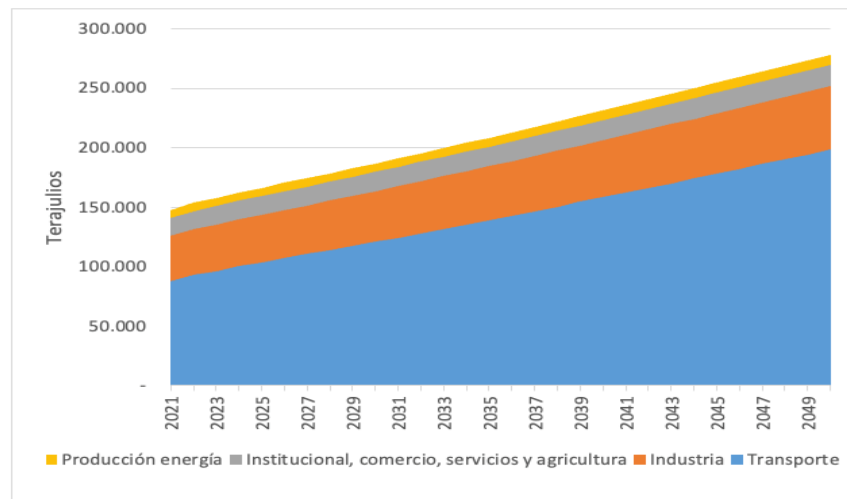
Gráfico 63 Proyección del consumo de energía en sector producción de energía



Fuente: elaboración propia

El consumo total del sector energía se observa en el Gráfico 64, en el cual el consumo total sube de 147.783 terajulios en 2021 a 278.290 terajulios en 2050, un aumento del 88%. En 2050, el transporte representa un 71% del consumo de energía, la industria 19%, las actividades institucionales, comercio, servicios y agricultura un 6% y la producción de energía un 3%. Se debe tomar en cuenta que la producción de energía tuvo una reducción en el consumo de hidrocarburos, pero está volviendo a crecer por cambios en el clima, entre otros. Este comportamiento ha sido irregular, no obstante, no supera el 10% de la generación. Se consideró eso o particularmente los últimos años donde tendió a la baja por el uso de fuentes renovables casi en un 100%.

Gráfico 64 Proyección del consumo total de energía

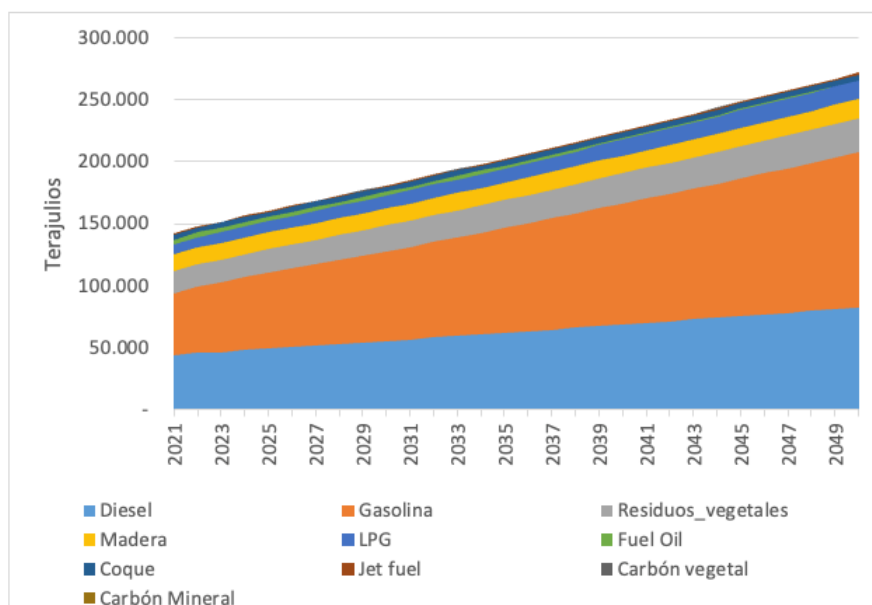


Fuente: elaboración propia

Respecto al consumo por tipo de hidrocarburo, la mayor parte es la gasolina en sus dos tipos, regular y súper, los cuales aumenta apreciablemente durante el periodo proyectado y para el

2050 constituye el 46% del consumo. Les sigue el diésel cuyo consumo en el 2050 es el 30% del total, los residuos vegetales un 10% y la madera y el LPG un 6% cada uno.

Gráfico 65 Proyección del consumo total de energía por fuente



Fuente: elaboración propia

Para la estimación de las emisiones del sector hidrocarburos se consideran los factores de emisión que se muestran en el Cuadro 38.

Cuadro 38 Factores de Emisión de Hidrocarburos

Tipo de Combustible	Toneladas CO ₂ /TJ	Kilogramos CH ₄ /TJ	Kilogramos N ₂ Oe/TJ
Factor de Equivalencia			
Coque	92,7	10	1,4
Diésel	73,6	5	0,6
Jet Fuel Kero	73,7	0,5	2
GLP	63,1	2	0,6
Gasolina	68,6	20	0,6
Carbón mineral	91,5	1	0
Fuel oil	77,2	3	0,3
Residuos vegetales	0	30	4
Madera	0	30	4
Carbón vegetal	0	30	4
Biogás	0	56,4	480

Fuente: IMN

Las emisiones proyectadas por tipo de GEI se muestran en el cuadro 39, así como las emisiones totales de CO₂ equivalente.

Cuadro 39 Emisión en sector energía por tipo de GEI (Toneladas)

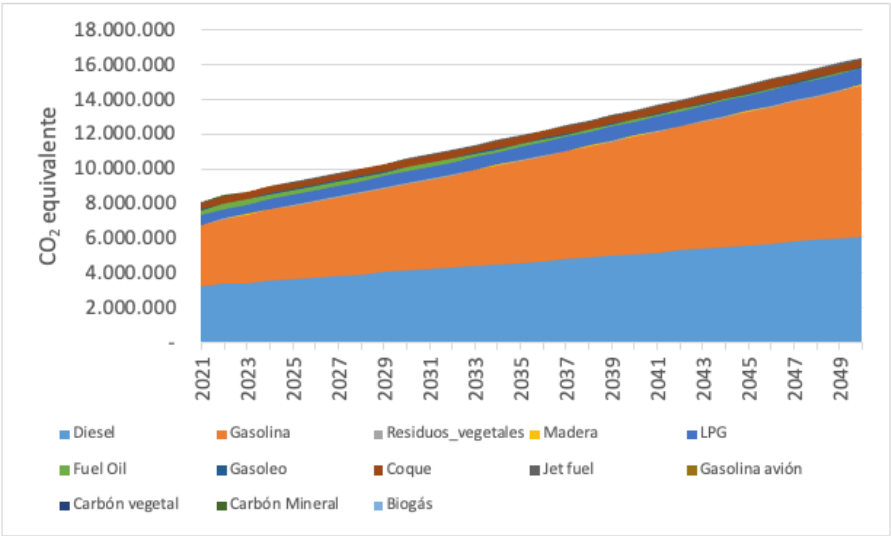
Año	Dióxido de carbono	Metano	Óxido nitroso	Dióxido de carbono equivalente
2021	7.964.779	2.223	194	8.071.541
2022	8.341.812	2.311	199	8.451.971
2023	8.579.648	2.385	203	8.692.559
2024	8.897.148	2.456	207	9.012.933
2025	9.142.656	2.518	211	9.260.949
2026	9.391.782	2.581	215	9.512.611
2027	9.645.137	2.645	219	9.768.525
2028	9.901.710	2.710	223	10.027.682
2029	10.161.429	2.775	227	10.290.009
2030	10.424.223	2.841	231	10.555.435
2031	10.690.020	2.909	235	10.823.916
2032	10.958.742	2.977	239	11.095.315
2033	11.230.303	3.045	243	11.369.575
2034	11.506.473	3.114	247	11.648.478
2035	11.785.311	3.184	251	11.930.070
2036	12.066.715	3.254	255	12.214.249
2037	12.350.577	3.325	260	12.500.903
2038	12.636.775	3.397	264	12.789.913
2039	12.925.183	3.469	268	13.081.149
2040	13.215.670	3.542	272	13.374.480
2041	13.508.105	3.615	277	13.669.776
2042	13.802.360	3.689	281	13.966.905
2043	14.098.330	3.763	285	14.265.763
2044	14.396.302	3.837	290	14.566.636
2045	14.695.697	3.912	294	14.868.944
2046	14.996.394	3.988	298	15.172.564
2047	15.298.273	4.063	303	15.477.376
2048	15.601.225	4.139	307	15.783.269
2049	15.905.146	4.215	311	16.090.140
2050	16.209.946	4.291	316	16.397.896

Fuente: elaboración propia

Las emisiones totales de CO₂e se muestran en el Gráfico 66. Las emisiones crecen de 8,071 millones de toneladas de CO₂e en el 2021 a 16,397 millones de toneladas en el 2050, lo que significa un crecimiento de 103% en este periodo. Entre el 2015 y el 2030 se mantiene un

crecimiento acelerado en las emisiones, con una tasa promedio anual del 3,03%, pero a partir del 2031 al 2050, la tasa de crecimiento anual promedio de las emisiones disminuye a 2,23%, lo que refleja entre otros aspectos la mejora de la eficiencia vehicular.

Gráfico 66 Escenario de Referencia por Uso de Hidrocarburos



Fuente: elaboración propia

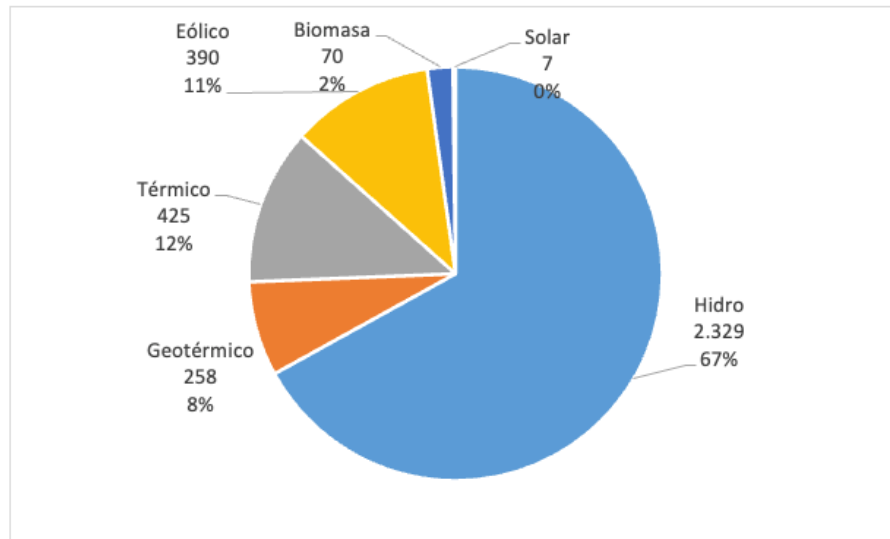
4.2.2 Subsector eléctrico

Con respecto al sector eléctrico, el Gráfico 67 señala una capacidad renovable para el 2021, con un parque térmico de sólo el 12%. Este parque térmico es definido por el ICE como un componente de respaldo, ya que “el rol del parque térmico en el sistema de generación ha sido evaluado por los equipos técnicos de planificación de la expansión y de la operación de la Gerencia de Electricidad en diferentes períodos. Los estudios desarrollados han concluido que el componente térmico del sistema de generación cumple una función fundamental en la confiabilidad del suministro eléctrico del país”¹⁸. Sin embargo, con esto el ICE registra una capacidad instalada de fuentes renovables del 88%, con 67% hidroeléctrico, 11% eólico, 8% geotérmico, 2% biomasa y una capacidad solar que no alcanza el 1%.

Para el año 2021, 92% de la generación eléctrica se produjo con base en fuentes renovables, destacando la hidroelectricidad, con 67% del total de la producción eléctrica (Gráfico 68).

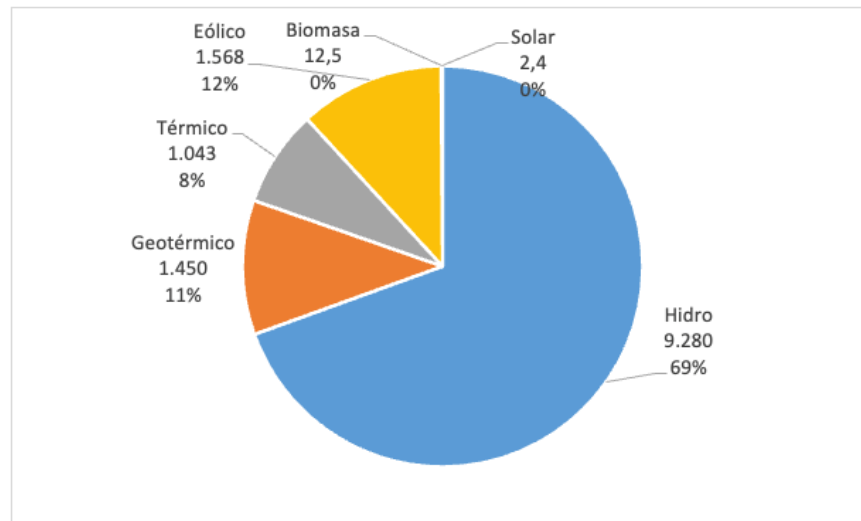
¹⁸ ICE (2021). Plan de expansión de la generación eléctrica 2022-2040. San José: Instituto Costarricense de Electricidad, Área Planificación de la Generación.

Gráfico 67 Capacidad Instalada por fuente 2021 (MW)



Fuente: ICE (2021)

Gráfico 68 Generación de electricidad 2021 (GWh)



Fuente: ICE (2021)

Para incluir el escenario del manejo de la energía eléctrica se considera el Plan de expansión de la generación eléctrica (PEG) 2022-2040¹⁹. Este Plan se presenta como un instrumento de planificación que combina criterios ambientales globales, que forman parte de las políticas energéticas del país y que se orientan en el desarrollo de la expansión de largo plazo, así como los criterios de

¹⁹ ICE (2021)

costos y beneficios aunados a los ambientales²⁰. El PEG 2022-2040 comprende todo el Sistema Eléctrico Nacional (SEN)²¹ y se basa en una política nacional e institucional desde una consideración energética, que fomenta la independencia del petróleo y fuentes importadas, la diversificación de fuentes renovables, la participación en el mercado regional, y el costo de la energía como un factor clave para la planeación futura.

El PEG 2022-2040 se fundamenta en el principio de dar prioridad nacional al desarrollo de fuentes renovables para la generación de electricidad. Por tanto señala que el uso del carbón es el menos deseable, que la adición y operación de plantas térmicas usando combustibles fósiles deben ser evitadas, que se debe privilegiar las fuentes renovables, y diversificar y desarrollar nuevas fuentes para satisfacer la demanda futura.

4.2.2.1 Proyección de la Demanda Eléctrica

Los escenarios de demanda de electricidad (ligados al crecimiento económico proyectado) son elaborados por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE)²². El crecimiento de la demanda de electricidad ha reaccionado directamente con el desenvolvimiento o las expectativas de crecimiento de la economía, aunque con el comportamiento fuera de lo esperado con la crisis del COVID-19. Con un crecimiento expansivo en el 2021 del 4,54%, lo que implicó que la generación del 2021 fue un 8,72% más alta de lo ocurrido en el 2020. En el 2021 la demanda total fue de 11.523 GWh, con una importación del sólo 624 GWh y una exportación de electricidad a la región de 1.641 GWh. El cuadro 40 muestra los tres escenarios de crecimiento de la demanda tanto de la energía y las tasas de crecimiento respectiva, los escenarios son de demanda baja media y alta.

Cuadro 40 Escenarios de demanda de energía y potencia en el PEG 2022-2040

Año	Escenarios de demanda (GWh)			Tasa de crecimiento		
	Bajo	Base	Alto	Bajo	Base	Alto
2016	10.932	10.932	10.932	3,1%	3,1%	3,1%
2017	11.019	11.019	11.019	0,8%	0,8%	0,8%
2018	11.115	11.115	11.115	0,9%	0,9%	0,9%
2019	11.334	11.334	11.334	2,0%	2,0%	2,0%
2020	11.020	11.020	11.020	-2,8%	-2,8%	-2,8%
2021	11.523	11.523	11.523	4,6%	4,6%	4,6%
2022	11.717	11.847	11.973	1,7%	2,8%	3,9%

²⁰ ICE (2021)

²¹ La generación de electricidad en Costa Rica la realizan siete empresas de servicio público y 30 generadores privados. Las empresas de servicio público son: el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE); la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL, subsidiaria del ICE); la Junta Administradora del Servicio Eléctrico de Cartago (JASEC), la Empresa de Servicios Públicos de Heredia (ESPH), la Cooperativa de Electrificación de San Carlos (COOPELESCA), la Cooperativa de Electrificación Rural de Guanacaste (COOPEGUANACASTE) y la Cooperativa de Electrificación Rural Los Santos (COOPESANTOS R.L.). Los generadores privados representan el 15% de la generación, mientras que el ICE aporta un 75% y las empresas distribuidoras un 10%.

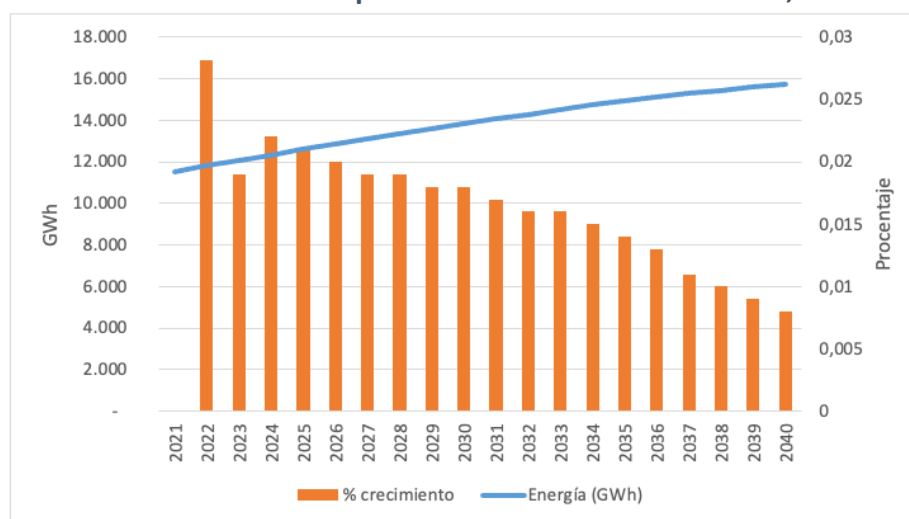
²² ICE (2021)

Año	Escenarios de demanda (GWh)			Tasa de crecimiento		
	Bajo	Base	Alto	Bajo	Base	Alto
2023	11.934	1.268	12.197	1,9%	1,9%	1,9%
2024	12.105	12.334	12.532	1,4%	2,2%	2,7%
2025	12.264	12.595	12.866	1,3%	2,1%	2,7%
2026	12.410	12.843	13.183	1,2%	2,0%	2,5%
2027	12.555	1.393	13.515	1,2%	1,9%	2,5%
2028	12.699	13.336	13.827	1,1%	1,9%	2,3%
2029	12.845	13.576	14.134	1,1%	1,8%	2,2%
2030	12.988	13.814	14.434	1,1%	1,8%	2,1%
2031	13.128	1.449	14.739	1,1%	1,7%	2,1%
2032	13.269	14.281	15.028	1,1%	1,6%	2,0%
2033	13.408	14.505	15.319	1,1%	1,6%	1,9%
2034	13.539	14.720	15.594	1,0%	1,5%	1,8%
2035	13.662	14.922	15.839	0,9%	1,4%	1,6%
2036	13.777	15.108	16.069	0,8%	1,3%	1,4%
2037	13.880	15.280	16.272	0,7%	1,1%	1,3%
2038	13.966	15.435	16.458	0,6%	1,0%	1,1%
2039	1.442	15.576	16.626	0,5%	0,9%	1,0%
2040	14.109	15.703	16.784	0,5%	0,8%	1,0%

Fuente: Elaboración propia con datos de ICE (2021)

En el Gráfico 69 se observa el escenario medio de demanda del PEG 2022-2040, el cual se usará como escenario de referencia. De acuerdo con las proyecciones del ICE, la tasa de crecimiento de la demanda va decreciendo a través de los años, sin embargo, la demanda total de la electricidad se espera que crezca continuamente.

Gráfico 69 Escenarios de Expansión de la Demanda Eléctrica, 2014-2035



Fuente: Elaboración propia con datos de ICE (2021)

4.2.2.2 Expansión Eléctrica

El PEG 2022-2040 establece un escenario de demanda media incorpora en su horizonte de planeamiento y es el escenario que se usará de referencia en el subsector eléctrico. En el Cuadro 41 se muestran los proyectos que salen y entran en el horizonte de planeación, así como la capacidad instalada por año hasta el 2040.

Cuadro 41 Proyectos del Plan Nacional de Expansión Eléctrica de Referencia (2022-2040)

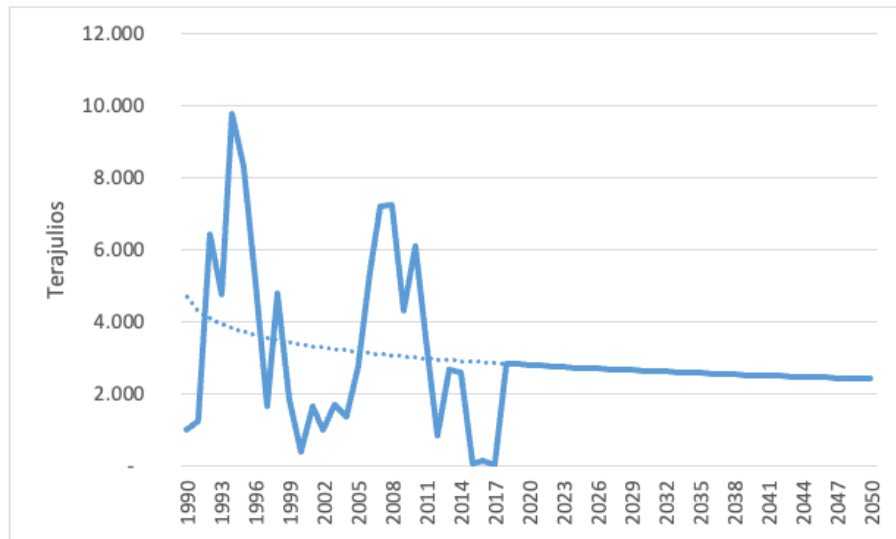
Año	Proyecto	Fuente	Potencia (MW)	Capacidad Instalada (MW)
2021				3.482
2022	Huacas	Solar	5	3.487
	Hidro fin Contrato GP	Hidro	-1,8	3.485
2023	Miravalles5	Geotérmico	-7	3.479
	Hidro fin Contrato GP	Hidro	-40	3.438
	Garita		-5	3.433
2024	Hidro-recontratación-GP	Hidro	55	3.488
	Eólico-recontratación-GP	Eólico	20	3.508
	Solar	Solar	40	3.548
	Garita	Hidro	40,4	3.588
	Cachí-2	Hidro	-40	3.548
2025	Cachí-2	Hidro	40	3.588
	Tejona	Eólico	-6	3.582
	Eólico-recontratación-GP	Eólico	20	3.602
	Solar	Solar	70	3.672
	Eólico	Eólico	40	3.712
2026	Hidro-fin-contrato-GP	Hidro	-61	3.652
	Eólico-fin-contrato-GP	Eólico	-46	3.605
	Biomasa-fin-contrato-GP	Biomasa	-38	3.567
	Solar	Solar	250	3.817
	Biomasa-recontratación-GP	Biomasa	20	3.837
	Eólico	Eólico	60	3.897
2027	Biomasa-recontratación-GP	Biomasa	20	3.917
	Tejona	Eólico	-7	3.910
	Ventanas-Garita	Hidro	-100	3.810
	Boca-de-Pozo	Geotérmico	-5	3.806
	Borinquen-1	Geotérmico	55	3.861
2028	Ventanas-Garita	Hidro	100	3.961
	Boca-de-Pozo	Geotérmico	5	3.965
	Cachí-2	Hidro	-159	3.806
	Eólico-fin-contrato-GP	Eólico	-20	3.786
	Eólico	Eólico	120	3.906
	Batería	Baterías	30	3.936
	Solar	Solar	120	4.056
2029	Geotérmico	Geotérmico	12	4.068
	Ventanas-Garita	Hidro	-50	4.018
	Cachí-2	Hidro	159	4.177
	Ventanas-Garita	Hidro	-50	4.127
2030	Fourth-Cliff	Hidro	60,6	4.188
	Ventanas-Garita	Hidro	50	4.238

Año	Proyecto	Fuente	Potencia (MW)	Capacidad Instalada (MW)
	Solar	Solar	180	4.418
2031	Ventanas-Garita	Hidro	50	4.468
	Miravalles1	Geotérmico	-50	4.418
	Hidro-fin-contrato-GP	Hidro	-2,7	4.415
	Eólico-fin-contrato-GP	Eólico	-9	4.406
	Geotérmico	Geotérmico	12	4.418
	Batería	Baterías	90	4.508
	Eólico	Eólico	40	4.548
2032	Miravalles1-Modern	Geotérmico	35	4.583
	Miravalles3	Geotérmico	-26	4.557
	Miravalles2	Geotérmico	-50	4.507
	Borinquen2	Geotérmico	55	4.562
	Geotérmico	Geotérmico	12	4.574
	Eólico	Eólico	20	4.594
	Baterías	Baterías	60	4.654
	Solar	Solar	45	4.699
	Eólico-fin-contrato-GP	Eólico	-20	4.679
	Hidro-fin-contrato-GP	Hidro	-2,5	4.677
2033	Arenal	Hidro	-55	4.622
	Corobicí	Hidro	-58	4.564
	Miravalles2-Modern	Geotérmico	35	4.599
	Miravalles3-Modern	Geotérmico	20	4.619
	Eólico	Eólico	60	4.679
	Solar	Solar	150	4.829
	Hidro	Hidro	40	4.869
	Baterías	Baterías	120	4.989
2034	Eólico-fin-contrato-GP	Eólico	-80	4.909
	Solar	Solar	250	5.159
	Eólico	Eólico	130	5.289
2035	Eólico	Eólico	60	5.349
	Ampliación-El-Ángel	Hidro	-5	5.344
	Hidro	Hidro	20	5.364
2036	Arenal	Hidro	55	5.419
	Dengo	Hidro	58	5.477
	Sandillal	Hidro	-15	5.462
2037				5.462
2038	Sandillal	Hidro	15	5.477
2039	Hidro	Hidro	20	5.497
	Eólico	Eólico	140	5.637
2040				5.637

Fuente: ICE (2021)

La modelación del consumo de combustibles para producción eléctrica se realizó en las proyecciones de las actividades de producción de energía. El Gráfico 70 muestra el uso del diésel, bunker, el doble ciclo combinado y el carbón en la generación de electricidad. Las emisiones relacionadas a este consumo de energía ya se encuentran registradas para el sector energía.

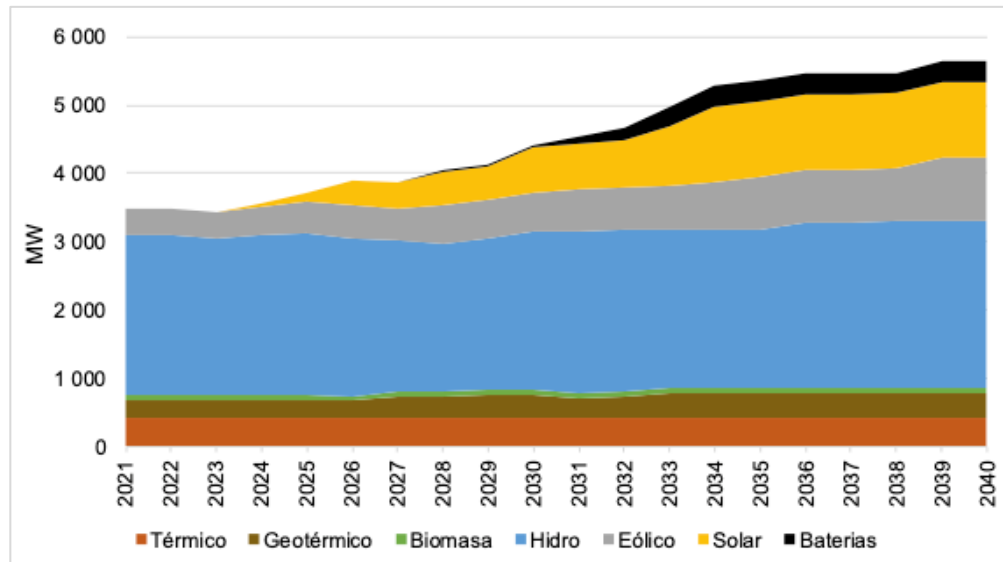
Gráfico 70 Consumo de energía por producción eléctrica



Fuente: Elaboración propia

El Gráfico 71 presenta la composición proyectada de la capacidad instalada en el PEG 2022-2040, el cual prevé una proporción de capacidad térmica de respaldo estable.

Gráfico 71 Capacidad Eléctrica por tipo de fuentes en escenario de referencia



Fuente: ICE (2021)

Por su parte, el Cuadro 42 muestra el plan de generación en el en el PEG 2022-2040, indicando una disminución paulatina de la generación térmica, el cual se puede utilizar como un escenario de mitigación del sector eléctrico.

Cuadro 42 Generación eléctrica proyectada en el PEG 2022-2040

Año	Biomasa	Eólico	Geotérmico	Hidro	Solar	Térmico	Total
2022	74	1.572	1.890	8.256	18	37	11.847
2023	74	1.575	1.836	8.482	18	83	12.068
2024	74	1.652	1.836	8.600	91	81	12.334
2025	74	1.813	1.836	8.584	219	69	12.595
2026	77	1.905	1.836	8.302	673	49	12.842
2027	78	1.883	2.288	8.137	675	32	13.093
2028	78	2.305	2.307	7.755	874	17	13.336
2029	78	2.262	2.410	7.922	873	31	13.576
2030	78	2.269	2.410	7.865	1.174	18	13.814
2031	78	2.440	2.112	8.211	1.181	26	14.048
2032	78	2.439	2.361	8.131	1.251	20	14.280
2033	78	2.636	2.832	7.402	1.523	33	14.504
2034	78	3.011	2.832	6.837	1.952	10	14.720
2035	78	2.977	2.832	7.065	1.949	19	14.920
2036	78	2.973	2.832	7.271	1.949	4	15.107
2037	78	2.980	2.832	7.432	1.954	3	15.279
2038	78	2.977	2.832	7.590	1.951	6	15.434
2039	78	3.512	2.832	7.193	1.956	5	15.576
2040	78	3.520	2.832	7.314	1.952	5	15.701

Fuente: ICE (2021)

4.3 Sector Procesos Industriales y Uso de Productos

Para la estimación de las emisiones en el sector procesos industriales y uso de productos, se usa como fuente los datos y resultados del INGEI 2017. Este sector está constituido por varias actividades, como son la producción de cemento, la producción de cal, la producción de vidrio, otros usos de carbonatos, la producción de carburo, el uso de lubricantes, el uso de ceras de parafina, la refrigeración y el aire acondicionado, los productos de protección contra incendios, los aerosoles, la transferencia de flúor al vidrio y el uso de los equipos eléctricos. En el Cuadro 43 se muestran los gases de efecto invernadero por actividad industrial y uso de productos.

Cuadro 43 Tipos Gases de efecto invernadero

Categoría de Gas de Efecto Invernadero	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	HFCs	PFCs	SF ₆
2.A. Industria de los Minerales						
2.A.1. Producción de cemento	X					
2.A.2. Producción de cal	X					
2.A.3. Producción de vidrio	X					
2.A.4. Otros usos de carbonatos	X					
2.B. Industria Química						
2.B.2. Producción de ácido nítrico			X			
2.B.5. Producción de carburo	X					
2.D. Uso de productos no energéticos de combustibles y de solventes						
2.D.1. Uso de lubricantes	X					
2.D.2. Uso de ceras de parafina	X					

2.F. Emisiones de los sustitutos fluorados para las ODS	
2.F.1. Refrigeración y aire acondicionado	X
2.F.3. Protección contra incendios	X
2.F.4. Aerosoles	X
2.F.6. Otras Aplicaciones: Transferencia de flúor al vidrio	X
2.G. Manufactura y utilización de otros productos	
2.G.1. Equipos eléctricos	X

Fuente: IMN-INGEI (2017)

Con base en los datos del INGEI 2017 se hizo una estimación de la producción de los diversos componentes, proyectando las líneas de tendencia que mejor se ajustaron a su comportamiento histórico. Para la producción de Clinker para producción de cemento, se aplicó el factor basado en las Directrices del IPCC de 0,5101 toneladas de CO₂ por toneladas de Clinker. Igualmente se hace la proyección de la producción de cal con base en los datos del INGEI 2017 y se utilizó un factor de emisiones de 0,746 por tonelada de CO₂ por tonelada de cal viva y asumiendo 95% de pureza. El procedimiento se realizó en la proyección de la producción de vidrio y para las emisiones se usan las Directrices del IPCC de 0,21 kg CO₂ por kg de vidrio. Las estimaciones del carbonato de sodio (Na₂CO₃) se realizan con los datos del INGEI 2017, aplicando un factor de emisiones de 0,41492 toneladas de CO₂ por tonelada de Na₂CO₃. No se realizaron proyecciones de la producción de ácido nítrico por cuanto ya no se produce en el país. Para el carburo de calcio se usa igual procedimiento, primero se hace la proyección de la producción y se usa el factor de emisión por defecto recomendado para el uso del producto de 1,100 toneladas de CO₂ por tonelada del producto. En el caso del uso de los lubricantes, las grasas se ajustaron mejor a una proyección lineal de su tendencia, mientras que los aceites presentaron un ajuste mejor con una tendencia logarítmica. Los factores de emisión para los lubricantes fueron de 0,15 toneladas de CO₂ por tonelada de grasas y 0,59 toneladas de CO₂ por tonelada de aceite. Se hace con igual procedimiento la estimación de producción de parafina y el factor de emisión por defecto es de 73,3 kg de CO₂ por GJ oxidado.

Con respecto a las emisiones de gases HFCs el análisis se basa en el uso de HFC-32, HFC-125, HFC-134a, HFC-143a, HFC-152a y HFC-23 para cada categoría de uso, que incluye Refrigeración doméstica, Refrigeración Comercial, Refrigeración Industrial, Refrigeración móvil, Chillers, Aire acondicionado y AC Móvil. Para el conjunto de HFCs de cada categoría se realizó un análisis de las tendencias y se tomaron ajustes lineales, pese a que los datos históricos señalaron ajustes más expansivos que los elegidos, pero se moderó su crecimiento debido a las políticas que han venido promocionando un uso más racional, lo cual debería manifestarse en el futuro. Igual análisis se aplicó para el uso de productos para la protección contra incendios, los aerosoles y el flúor usado en el vidrio. Los factores de emisión son los recomendados en el INGEI 2017 para los diferentes HFCs. En el caso de los equipos eléctricos, se estima la proyección del SF₆ y se aplica el factor de emisión para estimar su conversión en CO₂.

El cuadro 44 muestra las proyecciones de los diferentes gases de efecto invernadero por actividad industrial y uso de productos.

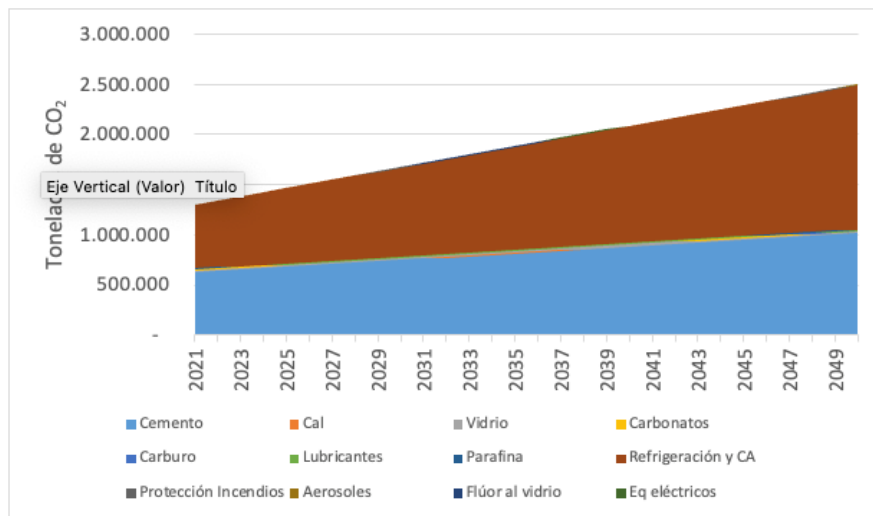
Cuadro 44 Gases de efecto invernadero por actividad industrial y uso de productos

Año	Cemento	Cal	Vidrio	Carbonatos	Carburo	Lubricantes	Parafina	Refrigeración y Protección aire acondicionado	contra incendios	Aerosoles	Transferencia de flúor al vidrio	Equipos eléctricos
	CO ₂ (Ton)	CO ₂ (Ton)	CO ₂ (Ton)	CO ₂ (Ton)	CO ₂ (Ton)	CO ₂ (Ton)	CO ₂ (Ton)	HFCs (Ton)	HFCs (kg)	HFCs (Ton)	HFCs (Ton)	SF ₆ (kg)
2021	627.591	3.362	15.301	2.794	235	11.477	1.384	393	366	3	26	75
2022	640.847	3.427	15.413	2.822	234	11.533	1.403	410	386	3	27	76
2023	654.104	3.492	15.523	2.849	233	11.588	1.422	427	406	3	28	77
2024	667.361	3.557	15.629	2.877	233	11.641	1.442	444	426	3	28	78
2025	680.617	3.622	15.732	2.905	232	11.692	1.461	461	446	3	29	80
2026	693.874	3.687	15.832	2.932	231	11.742	1.480	479	466	3	29	81
2027	707.131	3.753	15.929	2.960	230	11.791	1.499	496	486	3	30	82
2028	720.387	3.818	16.024	2.988	230	11.838	1.518	513	506	4	31	84
2029	733.644	3.883	16.116	3.015	229	11.884	1.537	530	526	4	31	85
2030	746.901	3.948	16.206	3.043	228	11.929	1.556	547	546	4	32	86
2031	760.158	4.013	16.294	3.071	228	11.973	1.575	565	567	4	33	88
2032	773.414	4.078	16.380	3.098	227	12.016	1.594	582	587	4	33	89
2033	786.671	4.143	16.463	3.126	226	12.058	1.613	599	607	4	34	90
2034	799.928	4.208	16.545	3.154	226	12.098	1.632	616	627	4	35	91
2035	813.184	4.274	16.625	3.181	225	12.138	1.651	633	647	4	35	93
2036	826.441	4.339	16.703	3.209	225	12.178	1.670	651	667	5	36	94
2037	839.698	4.404	16.779	3.237	224	12.216	1.690	668	687	5	36	95
2038	852.954	4.469	16.854	3.264	224	12.253	1.709	685	707	5	37	97
2039	866.211	4.534	16.928	3.292	223	12.290	1.728	702	727	5	38	98
2040	879.468	4.599	16.999	3.320	223	12.326	1.747	719	747	5	38	99
2041	892.724	4.664	17.070	3.347	222	12.361	1.766	737	767	5	39	101
2042	905.981	4.729	17.139	3.375	222	12.396	1.785	754	787	5	40	102
2043	919.238	4.794	17.206	3.403	221	12.430	1.804	771	807	6	40	103
2044	932.495	4.860	17.273	3.430	221	12.463	1.823	788	827	6	41	104
2045	945.751	4.925	17.338	3.458	221	12.496	1.842	805	847	6	42	106
2046	959.008	4.990	17.402	3.486	220	12.528	1.861	823	868	6	42	107
2047	972.265	5.055	17.465	3.513	220	12.559	1.880	840	888	6	43	108
2048	985.521	5.120	17.527	3.541	219	12.590	1.899	857	908	6	44	110
2049	998.778	5.185	17.588	3.569	219	12.621	1.919	874	928	6	44	111
2050	1.012.035	5.250	17.647	3.596	219	12.651	1.938	891	948	7	45	112

Fuente: Elaboración propia

El gráfico 72 presenta el escenario de referencia para las emisiones de CO₂ equivalente para las actividades del sector de procesos industriales y uso de productos (IPPU). Para la conversión en el CO₂ equivalente se utilizan los factores de la tabla 38, según el INGEI 2017.

Gráfico 72 Emisiones de CO₂ equivalente para el sector PIUP



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 45 Equivalencia de Gases de efecto invernadero por Potenciales de calentamiento global

Gas	PCG
CO ₂	1
CH ₄	21
N ₂ O	310
HFC-32	650
HFC-125	2800
HFC-134a	1300
HFC-143a	3800
HFC-152a	140
HFC-23	11700
SF ₆	23900

Fuente: IMN-INGEI (2017)

4.4 Sector Agropecuario

Para la estimación de la línea de referencia del sector agropecuario se contó con información del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), de las publicaciones de la Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria (SEPSA), con las que se obtuvieron los datos e información que permitió la construcción de un modelo de proyección de las actividades agrícolas para el periodo 2021-2050.

Para el sector agropecuario los análisis relativos a los cultivos agrícolas fueron tratados por aparte de los de las actividades pecuarias. Para el sub-sector agrícola un factor fundamental en el comportamiento de las emisiones es el área total de siembra, que tiene el uso de fertilizantes nitrogenados como una de las fuentes centrales de emisiones de GEI. Asimismo, en las actividades agrícolas una fuente importante de emisiones es la producción de arroz anegado.

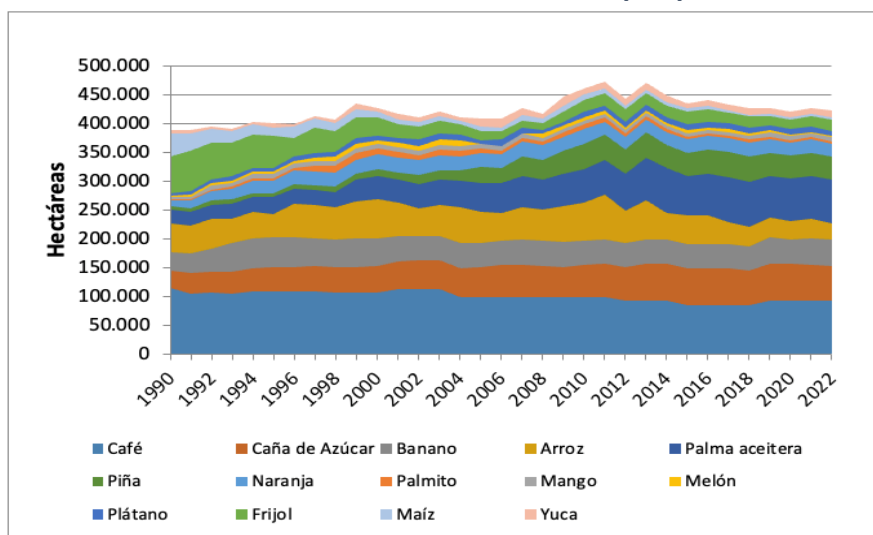
Por su parte, para el sub-sector pecuario, el área de pasturas es uno de los factores de emisiones asociados a fertilizantes, por el hato de los diversos tipos de ganado de donde proceden principalmente las emisiones, debido a la fermentación entérica y el manejo del estiércol. Para el análisis del sub-sector pecuario se contó con datos del MAG, quienes han elaborado la Estrategia de Ganadería Baja en Carbono.²³

4.4.1.1 Área Sembrada de Cultivos Agrícolas

En el Gráfico 73 se observa el comportamiento del área sembrada de los cultivos agrícolas, de acuerdo a los registros estadísticos de SEPSA del MAG. Con los datos de SEPSA se proyectaron las tendencias esperadas de los cultivos en cuanto al área utilizada. Dado que recientemente se publicaron los resultados del Censo Agropecuario 2014, se hicieron ajustes en las proyecciones a partir del año 2014 con los datos de área sembrada reportada en el Censo.

El primer ejercicio que se realizó fue un análisis tendencial de los productos. Por ejemplo, el café describe una tendencia en los últimos 33 años dada por $y = -760,53x + 113049$, en el caso de la caña de azúcar de $y = 10539\ln(x) + 24967$, el banano de $y = 63,005x + 42750$, la palma aceitera de $y = 20047\ln(x) - 999,73$, y la piña de $y = 15544\ln(x) - 13890$. En el caso del arroz, su tendencia ha mostrado un comportamiento fluctuante, que ha manifestado una fuerte caída desde el 2011, pero se incrementó desde el 2017. Dado que la caída en los últimos años están explicados por la apertura de las importaciones y la liberalización del precios de arroz, la tendencia presenta dificultades para servir de base en las proyecciones. Lo que se ha supuesto es que el área sembrada sigue un proceso de reducción hasta alcanzar las 20.000 hectáreas sembradas en el 2050.

Gráfico 73 Histórico del área sembrada por producto



Fuente: elaboración propia con datos de SEPSA/MAG

²³ MAG (2015). La Estrategia de Ganadería Baja en Carbono. San José: Ministerio de Agricultura y Ganadería.

En general, el ajuste con base en la tendencia de estos cultivos desde 1990 solo se utilizó como punto de partida para ver la tendencia que describen en las últimas décadas. Se procedió a establecer un techo o un piso del aumento o caída proyectada del área sembrada, ya que las tendencias en los últimos años marcaban proyecciones que son difíciles de esperar por las expectativas que se manejan de los cultivos.

Para las proyecciones se analizaron primero 6 cultivos en importancia (café, arroz, caña de azúcar, banano, piña y palma de aceite), los cuales en el 2022 representan el 77% del área sembrada. Los resultados se observan en el Cuadro 46.

Cuadro 46 Proyección de Área cultivada por principales Cultivos

Año	Café	Caña de Azúcar	Banano	Arroz	Palma aceitera	Piña
2022	93.697	59.836	46.058	27.170	75.850	40.000
2030	88.476	63.844	46.041	25.121	79.893	41.429
2035	87.292	65.085	46.031	23.841	82.420	42.321
2040	86.503	66.196	46.021	22.561	84.946	43.214
2045	85.516	67.200	46.010	21.280	87.473	44.107
2050	84.529	68.117	46.000	20.000	90.000	45.000

Fuente: elaboración propia con datos de SEPSA-MAG

Un segundo grupo de 8 cultivos suman un 12% del área cultivada, con lo que, unido a los anteriores 6 cultivos, constituyen el 90% del total del área sembrada en el 2022. Las proyecciones que se realizaron de estos cultivos se muestran en el Cuadro 47.

Cuadro 47 Proyección de Área cultivada de otros Productos (Ha)

Año	Naranja	Palmito	Mango	Melón	Plátano	Frijol	Maíz	Yuca	Otros
2022	22.250	5.125	6.703	2.274	9.243	20.070	3.722	10.682	57.285
2030	22.179	5.375	6.788	2.767	9.459	20.050	3.801	10.773	57.370
2035	22.134	5.531	6.841	3.075	9.595	20.038	3.851	10.829	57.259
2040	22.089	5.688	6.894	3.384	9.730	20.025	3.901	10.886	57.132
2045	22.045	5.844	6.947	3.692	9.865	20.013	3.950	10.943	56.991
2050	22.000	6.000	7.000	4.000	10.000	20.000	4.000	11.000	56.838

Fuente: elaboración propia con datos de SEPSA-MAG, Censo Agropecuario 2014 y estimación de los autores

En el Cuadro 48 se observa el área total de las actividades agrícolas considerando otros usos contemplados en el Censo Agropecuario 2014. Como se verá, en el modelo se establece que el área total en caminos y cuerpos de agua no varía a través de los años.

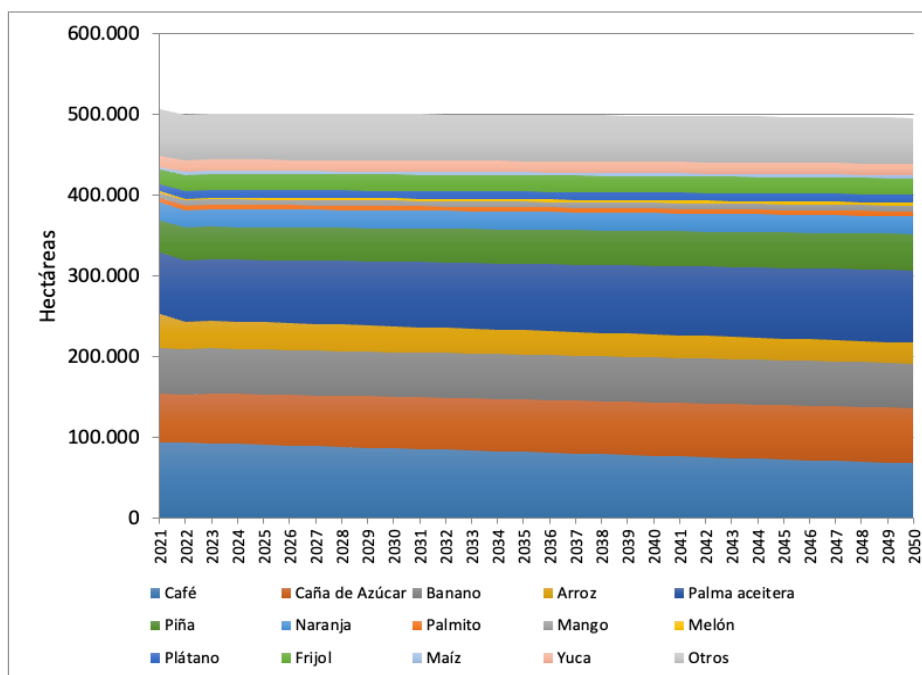
Cuadro 48 Proyección de Área en Actividades en Fincas agrícolas (Ha)

Año	Tierras de cultivo			Otras (caminos y cuerpos agua)
	Total	Tierra en descanso	Otra labranza	
2014	518.577	22.730	10.529	80.656
2022	499.964	21.914	10.151	80.656
2030	500.705	21.947	10.167	80.656
2035	499.740	21.905	10.147	80.656
2040	498.628	21.856	10.124	80.656
2045	497.396	21.802	10.099	80.656
2050	496.066	21.743	10.072	80.656

Fuente: elaboración propia con datos del MAG y el Censo Agropecuario 2014

El escenario de referencia base del área de cultivos se observa en el Gráfico 74. Se han hecho adicionalmente proyecciones de las actividades agrícolas y demanda por suelos. La importancia relativa de los seis cultivos principales se mantiene prácticamente en el tiempo, ya que es 77% del área total de cultivo en el 2022 para ser 76% en el 2050.

Gráfico 74 Línea de Referencia de Área cultivada



Fuente: elaboración propia con datos de SEPSA-MAG

4.4.1.2 Área Sembrada de Pastos y Hato Ganadero

Con respecto a las proyecciones del área utilizada por las actividades de ganado bovino y el hato nacional, las proyecciones se basan en la Estrategia de Desarrollo Ganadero Bajo en Carbono y el escenario de referencia que plantea, es decir, cuál sería la situación del sector ganadero en los

próximos años si se mantuviese la tendencia seguida hasta hoy en día²⁴. La línea de referencia establece que siguiendo el patrón sin ninguna variación (BAU) en los próximos veinte años el sector ganadero se caracterizaría por:

Un hato ganadero con una ligera tendencia de crecimiento.

- El uso del suelo con tendencia hacia menores áreas en pastoreo y algún desplazamiento hacia otros rubros y bosque secundario por abandono de pastizales.
- El aumento moderado de la producción de carne y algo más positiva en la producción de leche.
- Las emisiones de GEI por animal tendrían una ligera disminución, pero no el total de emisiones debido al crecimiento en el tamaño del hato.
- Mayor secuestro de carbono por ampliación de las áreas de bosque en crecimiento.

Para elaborar la línea de referencia se supone una reducción del área total de pastos a una tasa anual del 1 por ciento y del aumento del área de pastos con buen manejo (mejorados) a una tasa de 1 y 2 por ciento anual sobre la tendencia en el escenario de referencia. Se han considerado tres aspectos con relación a la ganadería y el cambio climático (estacionalidad, inestabilidad y contribución neta al cambio climático), y su influencia en la ganadería. Los tres tienen alta relevancia para la Estrategia. La estacionalidad marcada por los períodos de lluvias y ausencia de ellas es uno de los principales desafíos del sector. La situación adquiere particularidades respecto a la escasez de lluvias y agua para el ganado en la zona del Pacífico y lo opuesto por ocasional exceso de lluvias en la zona Atlántica.

La contribución de la ganadería al cambio climático proviene principalmente de las emisiones de metano por razón de la fisiología de los rumiantes (fermentación entérica), por las emisiones de dióxido de carbono por las quemas de pastos y charrales y por la emisión de óxido nitroso por la fertilización de pastos en algunas lecherías con manejo intensivo de pasturas. De las tres fuentes, las emisiones de metano hacen la mayor contribución.

Algunos de los supuestos más importantes se relacionan con la tendencia de los últimos años en cuanto a crecimiento del sistema de ganadería de doble propósito, expansión de la ganadería en la Región Norte y no en otras, tasa de aumento en pastos mejorados, reducción de área de pasto naturalizado pero también una tasa positiva en degradación de pastos que habían sido mejorados (semillas de brachiarias y otras), y una tasa de aumento del área de bosque en crecimiento en las fincas ganaderas a partir de charrales y tacotales en suelos en los que se deja de pastorear ganado. La proyección de pastos se observa en el Cuadro 49.

²⁴ MAG (2015).

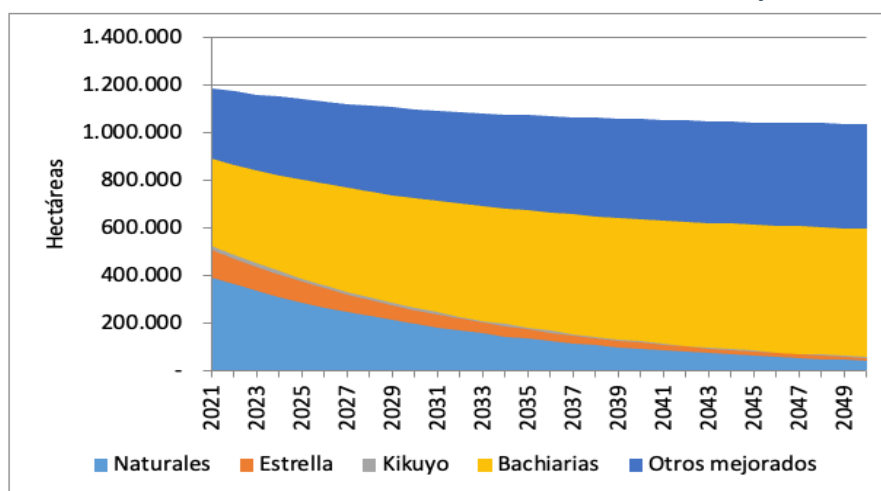
Cuadro 49 Proyección de Área de Pastos (Ha)

Año	Pastos (LEDS Ganadero)	Tipo de pastos LEDS			Tipo de pastos Inventario 2010				
		Pastos Naturalizados	Pastos mejorados	Pastos degradados	Naturales	Estrella	Kikuyo	Bachiarías	Otros mejorados
2020	1.242.878	569.441	453.212	178.833	458.256	136.222	24.561	343.848	279.991
2025	1.188.172	388.166	523.166	229.790	438.085	130.226	23.480	328.714	267.667
2030	1.150.886	264.602	550.189	285.103	424.338	126.139	22.743	318.399	259.267
2035	1.125.398	180.330	554.378	339.830	414.940	123.346	22.239	311.347	253.525
2040	1.107.534	122.779	557.155	377.548	408.354	121.388	21.886	306.405	249.501
2045	1.095.016	83.595	559.947	401.988	403.738	120.016	21.639	302.942	246.681
2050	1.086.209	56.916	562.752	417.453	400.491	119.051	21.465	300.505	244.697

Fuente: elaboración propia con datos del MAG (2015)

El escenario de referencia de cultivo de pastos se observa en el Gráfico 75. Las proyecciones de todo el tipo de ganado están contenidas en el Cuadro 50 y la línea base del hato vacuno se observa en el Gráfico 76, mientras que la línea base del otro tipo de hato está en el gráfico 77.

Gráfico 75 Escenario de Referencia de uso de suelo en pasturas



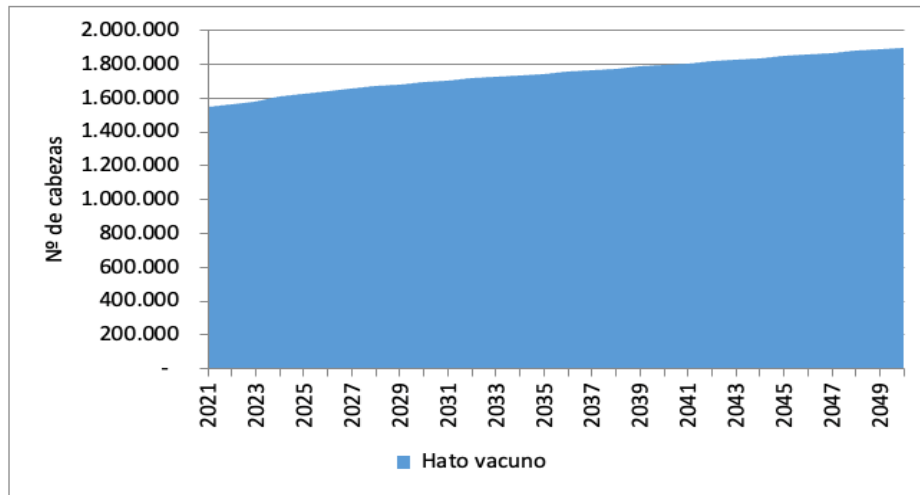
Fuente: elaboración propia con datos de MAG (2015)

Cuadro 50 Proyección del Hato ganadero (Cabezas)

Año	Vacuno	Caprino	Ovino	Porcino	Asnal	Bufalino	Caballar	Mular	Aves de Corral
2015	1.326.762	13.334	37.142	451.561	1.400	4.544	69.452	2.832	19.286.405
2020	1.537.298	15.450	43.036	523.217	1.622	5.265	80.473	3.282	22.346.850
2025	1.629.706	16.378	45.623	554.667	1.719	5.582	85.310	3.479	23.690.134
2030	1.695.938	17.044	47.477	577.209	1.789	5.809	88.777	3.620	24.652.912
2035	1.744.629	17.533	48.840	593.781	1.840	5.975	91.326	3.724	25.360.708
2040	1.796.419	18.054	50.290	611.408	1.895	6.153	94.037	3.835	26.113.555
2045	1.848.210	18.574	51.740	629.035	1.950	6.330	96.748	3.946	26.866.402
2050	1.900.000	19.095	53.190	646.661	2.004	6.508	99.459	4.056	27.619.248

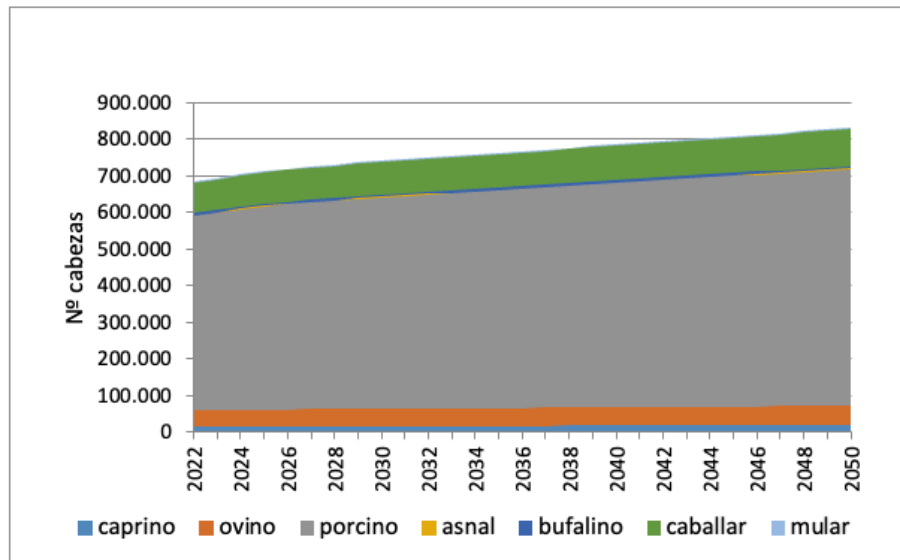
Fuente: elaboración propia con datos del LEDS Ganadero y estimaciones de los autores

Gráfico 76 Línea de referencia del hato vacuno



Fuente: elaboración propia con datos de MAG (2015)

Gráfico 77 Línea de referencia del otro ganado



Fuente: elaboración propia con datos de SEPSA-MAG e INGEI 2017

4.4.1.3 Línea de Referencia de Emisiones Agropecuarias

Para el cálculo de la línea de referencia de emisiones del sector agropecuario se utilizan los factores de emisión del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) para el Inventario de Gases de Efecto Invernadero del 2017. Las fuentes de emisiones consideradas son la fermentación entérica, el manejo de estiércol, la fertilización en los suelos agrícolas, el cultivo de arroz anegado y el efecto de las quemas en tierras de cultivo. Esto último se hizo con un ajuste de las tendencias de los datos en el INGEI 2017.

En el Cuadro 51 se presentan los factores de emisión utilizados.

Cuadro 51 Factores de Emisión del Sector Agropecuario

Óxido nitroso	Factor de Emisión kg/ha/año
Caña de azúcar	5,41
Café con sombra	7,78
Café sin sombra	2,92
Banano	4,85
Plátano	4,60
Cebolla	2,61
Papa	7,86
Piña	3,00
Palmito	2,24
Palma africana	1,31
Naranja	1,46
Mango	0,73
Macadamia	0,86
Otros	0,75
Granos básicos	0,79
Frutas	1,27
Estrella africana	4,94
Kikuyo	10,03
Ratana	3,55
Jaragua	5,33
Cabras	0,26
Ovejas	0,2
Cerdos	0,66
Mulas	0,64
Búfalos de agua	0,79
Caballos	0,66
Mulas	0,002
Aves	0,37
Emisiones de Metano	Factor de Emisión kg/ha/día
Arroz anegado	4,94
Vacuno Leche	61,78
Vacuno Carne	61,81
Vacuno Doble propósito	58,78
Cabras	5
Ovejas	5
Cerdos	0,61
Mulas	10
Búfalos de agua	55
Caballos	18
Mulas	10

Fuente: IMN-INGEI (2017)

Para cada tipo de gas de efecto invernadero, las emisiones se muestran en el Cuadro 52.

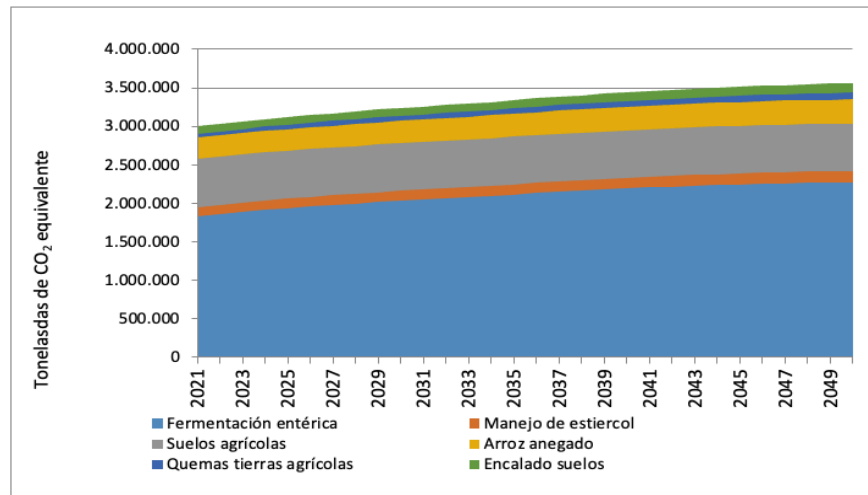
Cuadro 52 Factores de Emisión del Sector Agropecuario

Año	Fermentación entérica (CH₄)	Manejo de estiércol (CH₄)	Manejo de estiércol (N₂O)	Suelos agrícolas (N₂O)	Arroz anegado (CH₄)	Quemas tierras agrícolas (CH₄)	Quemas tierras agrícolas (N₂O)	Encalado suelos (CO₂)
2015	82.559	2.214	204	1.955	2.015	1.729	37	84.712
2016	85.007	2.280	210	2.016	2.016	1.774	38	85.838
2017	87.609	2.350	217	2.017	2.017	1.818	38	86.964
2018	90.589	2.430	224	2.018	2.018	1.863	39	88.091
2019	93.936	2.520	232	2.019	2.019	1.908	39	89.217
2020	95.660	2.566	236	2.020	2.020	1.953	40	90.343
2021	96.202	2.580	238	2.021	2.021	1.998	40	91.469
2022	97.198	2.607	240	2.022	2.022	2.043	41	92.595
2023	98.530	2.643	244	2.023	2.023	2.088	41	93.722
2024	100.084	2.685	247	2.024	2.024	2.133	42	94.848
2025	101.410	2.720	251	2.025	2.025	2.178	42	95.974
2026	102.349	2.745	253	2.026	2.026	2.223	43	97.100
2027	103.154	2.767	255	2.027	2.027	2.267	43	98.226
2028	103.934	2.788	257	2.028	2.028	2.312	44	99.353
2029	104.753	2.810	259	2.029	2.029	2.357	44	100.479
2030	105.532	2.831	261	2.030	2.030	2.402	45	101.605
2031	106.211	2.849	262	2.031	2.031	2.447	45	102.731
2032	106.788	2.864	264	2.032	2.032	2.492	46	103.857
2033	107.273	2.877	265	2.033	2.033	2.537	46	104.984
2034	107.917	2.895	267	2.034	2.034	2.582	47	106.110
2035	108.562	2.912	268	2.035	2.035	2.627	47	107.236
2036	109.206	2.929	270	2.036	2.036	2.672	48	108.362
2037	109.851	2.946	271	2.037	2.037	2.716	48	109.488
2038	110.495	2.964	273	2.038	2.038	2.761	49	110.615
2039	111.140	2.981	275	2.039	2.039	2.806	49	111.741
2040	111.784	2.998	276	2.040	2.040	2.851	50	112.867
2041	112.429	3.016	278	2.041	2.041	2.896	50	113.993
2042	113.074	3.033	279	2.042	2.042	2.941	51	115.119
2043	113.718	3.050	281	2.043	2.043	2.986	51	116.246
2044	114.363	3.068	283	2.044	2.044	3.031	52	117.372
2045	115.007	3.085	284	2.045	2.045	3.076	52	118.498
2046	115.652	3.102	286	2.046	2.046	3.121	53	119.624
2047	116.296	3.119	287	2.047	2.047	3.165	53	120.750
2048	116.941	3.137	289	2.048	2.048	3.210	54	121.877
2049	117.585	3.154	291	2.049	2.049	3.255	54	123.003
2050	118.230	3.171	292	2.050	2.050	3.255	54	123.003

Fuente: elaboración propia con datos de SEPSA-MAG e INGEI 2017

Las emisiones resultantes en CO₂ equivalente se observan en el Gráfico 78.

Gráfico 78 Línea de Referencia de Emisiones del Sector Agropecuario



Fuente: elaboración propia con datos de SEPSA-MAG, y MAG (2015)

4.5 Sector Forestal

Para el sector forestal se construyó la línea de referencia con base en la dinámica de uso del suelo observada en el periodo 2008-2013 mediante el apoyo de Agresta (2015) para la generación de los mapas de coberturas para el monitoreo de la deforestación, reforestación y degradación forestal para el proceso de construcción del nivel de referencia para el programa de Reducción de Emisiones del mecanismo REDD+ de Costa Rica²⁵. La proyección del sector forestal se realizó en tres etapas: 1. Proyección del cambio en el área agropecuaria; 2. Proyección del cambio en la cobertura forestal asociado al cambio en área agropecuaria; y 3. Estimación de existencias y cambios de existencia de carbono en los bosques de Costa Rica basados en los datos provistos por Agresta (2015) .

4.5.1.1 Proyección del Cambio en el Área Agropecuaria

La proyección del cambio de la cobertura forestal básicamente depende de la expansión o reducción del área agropecuaria que se produciría durante el periodo 2014-2050. En el Cuadro 53 se consignan los cambios en área agropecuaria del país, considerados en la proyección de la pérdida y ganancia de la cobertura boscosa en Costa Rica. Los cambios estimados para las pasturas se han estimado a partir de la información consignada en la Estrategia de Ganadería Baja en Carbono del MAG.

²⁵ <https://agresta.org/project/generating-consistent-historical-time-series-of-activity-data-from-land-use-change-for-the-development-of-costa-ricas-reddplus-reference-level/>

Cuadro 53 Cambio neto en el Área agropecuaria durante el Periodo 2014-2050 (ha)

Tierras Agropecuarias	Área 2022	Área 2050	Cambio de Uso
Café	93.697	84.529	-9.168
Caña de Azúcar	59.836	68.117	8.281
Banano	46.058	46.000	-58
Arroz	27.170	20.000	-7.170
Palma aceitera	75.850	90.000	14.150
Piña	40.000	45.000	5.000
Naranja	22.250	22.000	-250
Palmito	5.125	6.000	875
Mango	6.703	7.000	297
Melón	2.274	4.000	1.726
Plátano	9.243	10.000	757
Frijol	20.070	20.000	-70
Maíz	3.722	4.000	278
Yuca	10.682	11.000	319
Otra labranza	10,155	10,451	300
Pastos	1,323,144	1,067,605	-255,539
Total	1,874,980	1,770,132	-104,848

Fuente: elaboración propia con datos de SEPSA-MAG y MAG (2015)

Se estima una reducción de 255.000 ha, entre el periodo 2022-2050, en las áreas dedicadas a la ganadería, principalmente en las tierras en sobreuso, seguida de una reducción en el área de cultivo de café de -9.168 ha y de -7.170 Ha de arroz. La palma de aceite aumenta las hectáreas de cultivo en 14.150 ha, la caña de azúcar aumenta su área en 8.281 ha, la piña en 5.000 ha y otros cultivos en 3.931 (Gráfico 79). Se estima que las áreas agropecuarias tendrán un decrecimiento de 105,000 ha, cediendo estas tierras a urbanizaciones y nuevos bosques. Se asumió un cambio lineal del área para todas las actividades agropecuarias (total del cambio entre el periodo 2022-2050).

Gráfico 79 Cambio Neto en el Área Agropecuaria Durante el Periodo 2022-2050 (ha)



Fuente: Fuente: elaboración propia con datos de INTA-MAG y MAG (2015)

4.5.1.2 Proyección del Cambio en la Cobertura Forestal

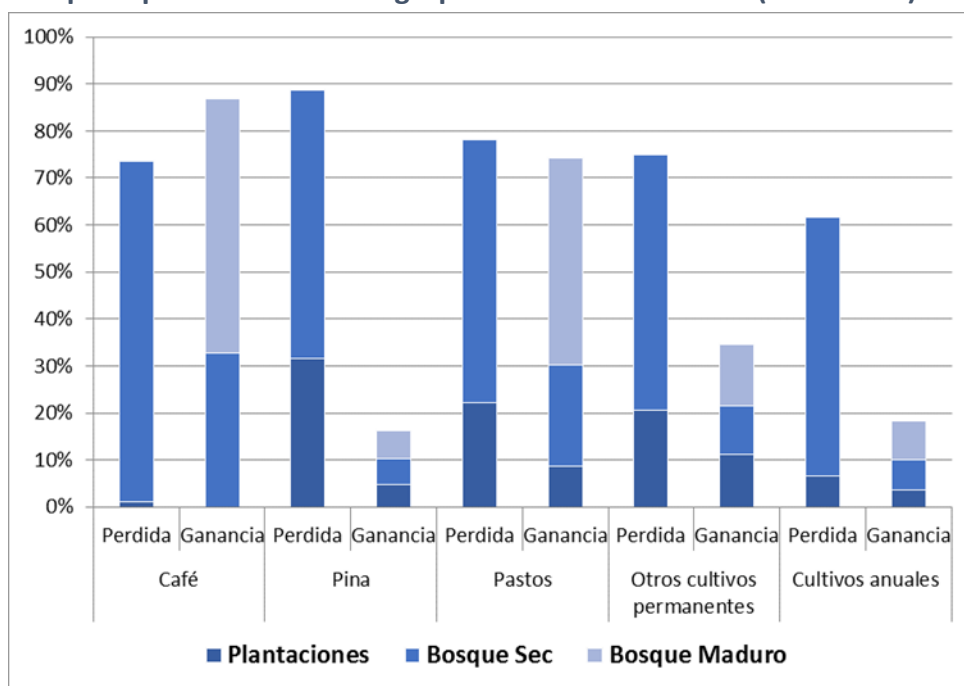
La proyección del cambio en la cobertura forestal se obtuvieron datos de Agresta (2015) utilizando la “Herramienta para generar escenarios de existencias y cambios de existencia de carbono en los bosques de Costa Rica” (Herramienta CDI).²⁶ Esta herramienta requiere de la definición de tres parámetros para la proyección del cambio en la cobertura forestal: a) Tasa de deforestación de bosque maduro; b) Tasa de deforestación de bosques nuevos; y c) Cantidad anual de bosques nuevos.

Tasa de deforestación de bosque maduro: la tasa de deforestación en bosque maduro se estima a partir de la pérdida de bosques asociada con la expansión proyectada del área agropecuaria y la proporción de expansión a costa de bosques maduros (Gráfico 80), observada en el periodo 2008-2013 según Agresta (2015).²⁷ Se asume que las tierras en parques nacionales y reservas biológicas (631,000 ha) no presentarán cambios importantes en ganancia o pérdida de cobertura boscosa. Como se aprecia en el Cuadro 54, el 94.8% (598,000 ha) de las tierras en parques nacionales y reservas biológicas se encuentra bajo cobertura natural (bosques primarios, secundarios, yolillales o manglares). El resto del área (31,000 ha) se encuentra en pasturas y cultivos.

²⁶ Segunda versión borrador de Junio 2015.

²⁷ La actividad agropecuaria mantiene una dinámica de intercambio de tierras, eliminando plantaciones, deforestando bosques primarios y secundarios y cediendo tierras para nuevos bosques y plantaciones.

Gráfico 80 Distribución del Área de Pérdida o Ganancia según Destino u Origen para las principales Actividades agropecuarias en Costa Rica (2008-2013)



Fuente: elaboración propia con base en datos a partir de mapas generados Agresta (2015)

Cuadro 54 Uso del Suelo en Parques Nacionales y Reservas Biológicas

Categoría	Área Ha	Porcentaje
Cobertura natural	598.252	94.8%
Agua	655	0.1%
Urbano	1.043	0.2%
Nubes no bosque	183	0.0%
Pastos y cultivos	31.014	4.9%
Total	631.148	100%

Fuente: elaboración propia con base en datos a partir de mapas generados Agresta (2015)

En el escenario de referencia del sector forestal de Agresta 2015 proyecta para el periodo 2014-2050, pero acá se usan las cifras desde 2021, pues con las mismas se espera hacer un índice con el cual aplicar las ganancias y pérdidas de carbono a lo registrado para el 2021, ya que no existe un modelo dinámico similar a lo propuesto por Agresta. El Cuadro 55 muestra las ganancias y pérdidas en hectáreas de los bosques nuevos y maduros.

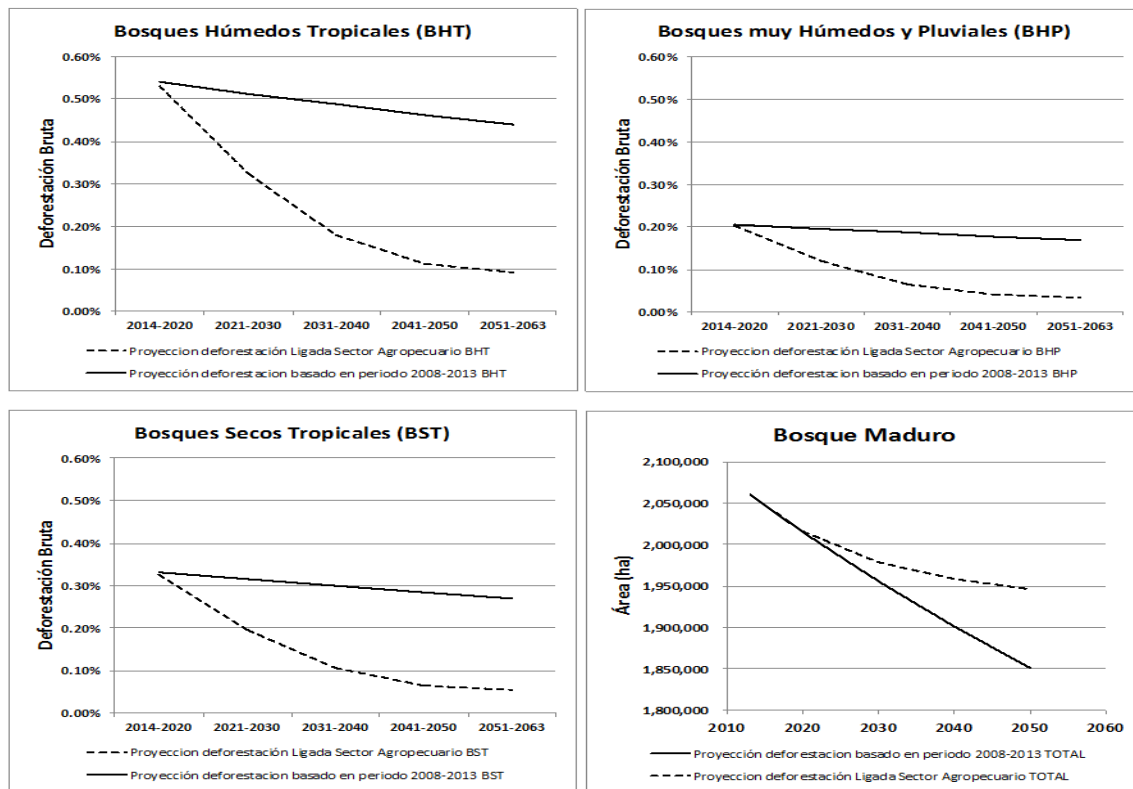
Cuadro 55 Proyección del Cambio neto anual para los Tipos de Cobertura boscosa en función de los Cambios en el Área de las principales actividades agropecuarias en Costa Rica

Año	Bosques Nuevos Pérdidas (ha/año)	Bosques Nuevos Ganancias (ha/año)	Bosques Nuevos Neto (ha*año⁻¹)	Bosques Maduro Pérdidas (ha/año)	Bosques Maduro Ganancias (ha/año)	Bosques Maduro Neto (ha*año⁻¹)
2021	-1.751	9.975	8.224	-3.494	-	-3.494
2022	-1.695	9.498	7.802	-3.381	-	-3.381
2023	-1.645	9.089	7.444	-3.278	-	-3.278
2024	-1.599	8.731	7.132	-3.182	-	-3.182
2025	-1.555	8.411	6.856	-3.093	-	-3.093
2026	-1.515	8.121	6.606	-3.010	-	-3.010
2027	-1.476	7.853	6.377	-2.930	-	-2.930
2028	-1.439	7.604	6.165	-2.854	-	-2.854
2029	-1.403	7.369	5.966	-2.781	-	-2.781
2030	-1.369	7.147	5.778	-2.710	-	-2.710
2031	-1.336	6.936	5.600	-2.642	-	-2.642
2032	-1.305	6.735	5.430	-2.577	-	-2.577
2033	-1.274	6.541	5.267	-2.513	-	-2.513
2034	-1.244	6.355	5.111	-2.451	-	-2.451
2035	-1.215	6.176	4.961	-2.391	-	-2.391
2036	-1.187	6.003	4.816	-2.333	-	-2.333
2037	-1.159	5.836	4.676	-2.276	-	-2.276
2038	-1.133	5.674	4.542	-2.221	-	-2.221
2039	-1.107	5.518	4.411	-2.168	-	-2.168
2040	-1.081	5.366	4.285	-2.116	-	-2.116
2041	-1.057	5.219	4.162	-2.065	-	-2.065
2042	-1.033	5.077	4.044	-2.015	-	-2.015
2043	-1.010	4.939	3.929	-1.967	-	-1.967
2044	-987	4.805	3.818	-1.920	-	-1.920
2045	-965	4.675	3.710	-1.875	-	-1.875
2046	-943	4.548	3.605	-1.830	-	-1.830
2047	-922	4.426	3.503	-1.787	-	-1.787
2048	-902	4.307	3.405	-1.745	-	-1.745
2049	-882	4.191	3.309	-1.703	-	-1.703
2050	-863	4.078	3.216	-1.663	-	-1.663
Total	-37.051	191.202	154.150	-71.101	-	-71.101

Fuente: elaboración propia con datos a partir de Agresta (2015) y Herramienta CDI

En el Gráfico 81 se presentan las tasas de deforestación de bosque maduro para los tipos de bosque identificados en la Herramienta CDI (BHT, BHP y BST), utilizadas en la proyección del cambio en la cobertura forestal de la línea de referencia. La proyección de la cobertura boscosa estima un decrecimiento de bosques maduros de 2.138.257 ha en el 2014 a 2.073.814 ha en el 2050.

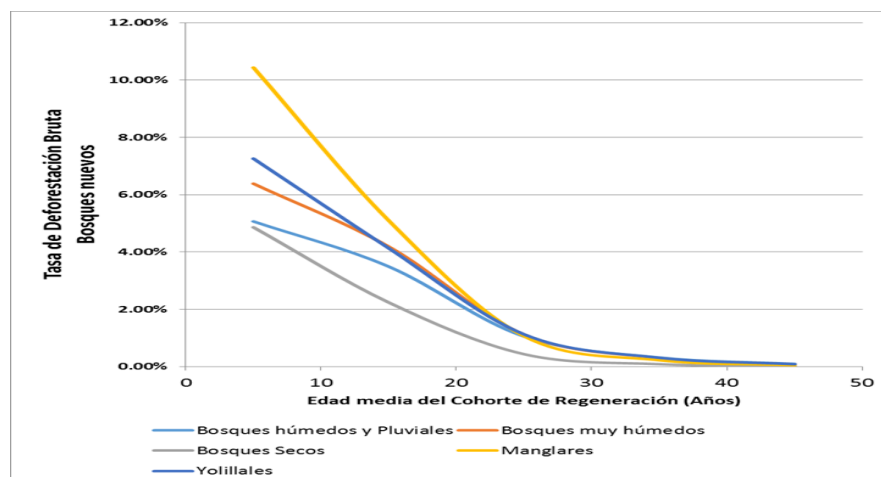
Gráfico 81 Tasas de Deforestación de Bosque Maduro en Costa Rica para los Tipos de Bosque identificados (BHT, BHP y BST y Bosque Maduro)



Fuente: elaboración propia con datos a partir de Agresta (2015) y Herramienta CDI

Respecto a las tasas de deforestación de bosques nuevos, el escenario de referencia se utilizan las tasas de deforestación de bosques nuevos ajustadas a partir de la serie histórica desarrollada por Agresta (2015), detallado en el Gráfico 82.

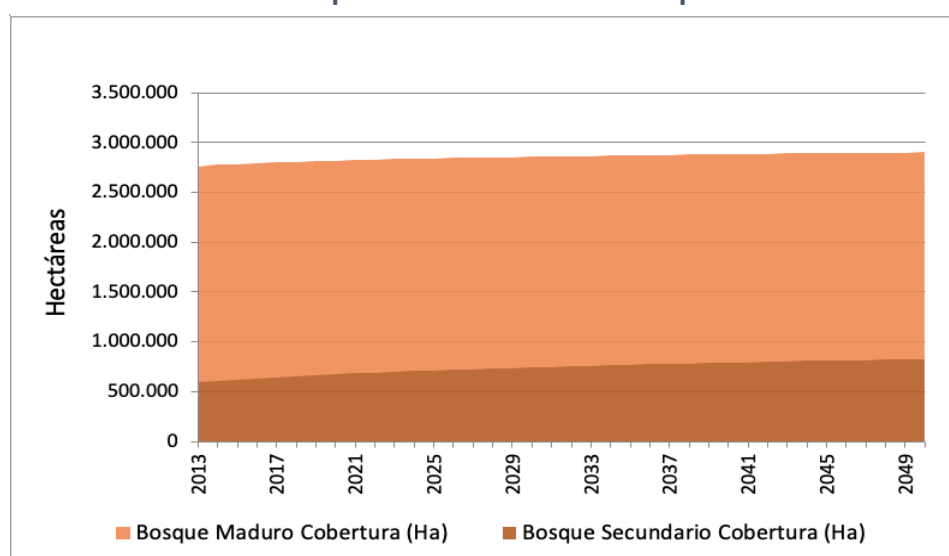
Gráfico 82 Tasas de Deforestación de Bosques Nuevos según Edad media del Cohorte



Fuente: elaboración propia con datos a partir de Agresta (2015) y Herramienta CDI

El Gráfico 83 muestra la evolución de la cobertura boscosa, tanto para los bosques nuevos y bosques maduros en el modelo de Agresta (2015).

Gráfico 83 Cobertura de Bosques nuevos en Costa Rica para el Periodo 2014-2050



Fuente: elaboración propia con datos a partir de Agresta (2015) y Herramienta CDI

En el Cuadro 56 se observan los cambios de acervo de carbono, tanto en bosque nuevos como maduros según el modelo.

Cuadro 56 Proyección de Emisiones de Referencia para el Sector Forestal (Ton CO₂)

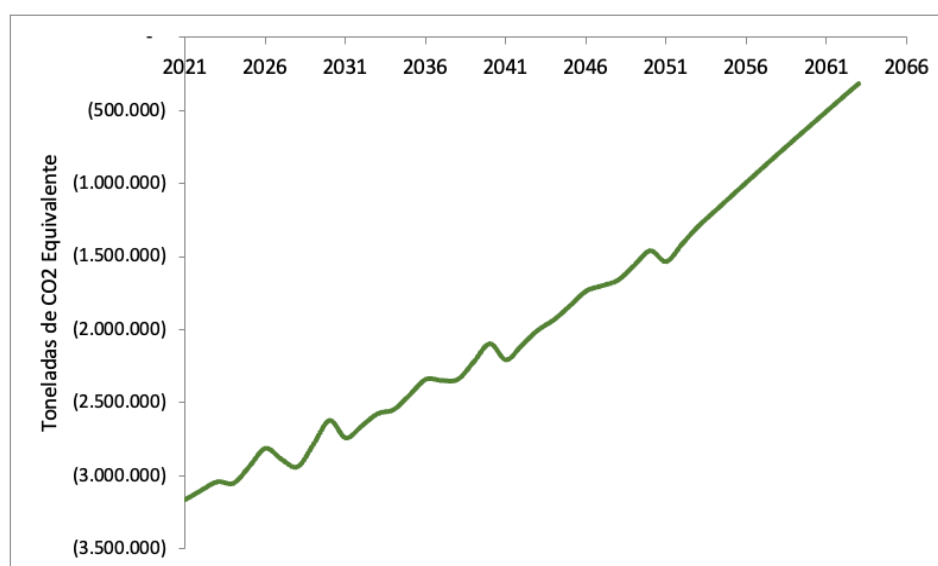
Año	Bosques Nuevos Existentes	Bosques nuevos a establecerse	Bosques Maduros	Total
2015	(1,741,045)	(1,161,234)	3,074,811	172,532
2016	(1,594,746)	(1,557,192)	3,063,685	(88,252)
2017	(1,572,168)	(1,857,693)	3,052,608	(377,252)
2018	(1,519,329)	(2,077,457)	3,041,579	(555,207)
2019	(1,371,559)	(2,228,969)	3,030,598	(569,931)
2020	(1,235,622)	(2,322,916)	3,019,664	(538,874)
2021	(1,215,076)	(2,368,484)	2,858,339	(725,221)
2022	(1,230,398)	(2,373,595)	2,848,557	(755,436)
2023	(1,259,278)	(2,345,102)	2,838,816	(765,564)
2024	(1,291,646)	(2,359,295)	2,829,114	(821,826)
2025	(1,223,181)	(2,350,507)	2,819,453	(754,235)
2026	(1,160,191)	(2,321,880)	2,809,831	(672,240)
2027	(1,264,861)	(2,276,242)	2,800,249	(740,854)
2028	(1,351,972)	(2,216,134)	2,790,706	(777,400)
2029	(1,287,025)	(2,143,847)	2,781,203	(649,668)
2030	(1,224,604)	(2,061,440)	2,771,738	(514,306)
2031	(1,198,033)	(1,970,765)	2,624,197	(544,601)
2032	(1,185,167)	(1,873,481)	2,615,725	(442,922)

2033	(1,174,299)	(1,771,071)	2,607,287	(338,083)
2034	(1,164,264)	(1,776,981)	2,598,881	(342,364)
2035	(1,122,046)	(1,776,161)	2,590,508	(307,699)
2036	(1,081,436)	(1,769,241)	2,582,168	(268,509)
2037	(1,095,102)	(1,756,811)	2,573,860	(278,053)
2038	(1,103,579)	(1,739,423)	2,565,584	(277,418)
2039	(1,065,119)	(1,717,593)	2,557,340	(225,372)
2040	(1,027,865)	(1,691,799)	2,549,129	(170,535)
2041	(1,000,377)	(1,662,487)	2,413,902	(248,962)
2042	(973,857)	(1,630,068)	2,406,548	(197,377)
2043	(948,262)	(1,594,925)	2,399,222	(143,965)
2044	(923,389)	(1,593,960)	2,391,922	(125,427)
2045	(892,190)	(1,589,933)	2,384,650	(97,474)
2046	(861,926)	(1,583,118)	2,377,404	(67,640)
2047	(849,399)	(1,573,770)	2,370,185	(52,984)
2048	(837,134)	(1,562,125)	2,362,992	(36,266)
2049	(810,206)	(1,548,404)	2,355,826	(2,784)
2050	(784,054)	(1,532,812)	2,348,686	31,819
Total	(43,560,454)	(68,388,805)	99,192,952	(12,756,307)

Fuente: elaboración propia con datos a partir de Agresta (2015) y Herramienta CDI

El Gráfico 84 muestra la línea de referencia resultante de la estimación del cambio de existencias de carbono forestal a partir de la proyección de cobertura boscosa de Agresta (2015), pero calibrada con los datos preliminares del INGEI 2021 para el sector Uso de la tierra y cambio de uso de la tierra.

Gráfico 84 Estimación del Cambio de Existencias de Carbono forestal a partir de la Proyección de Cobertura boscosa



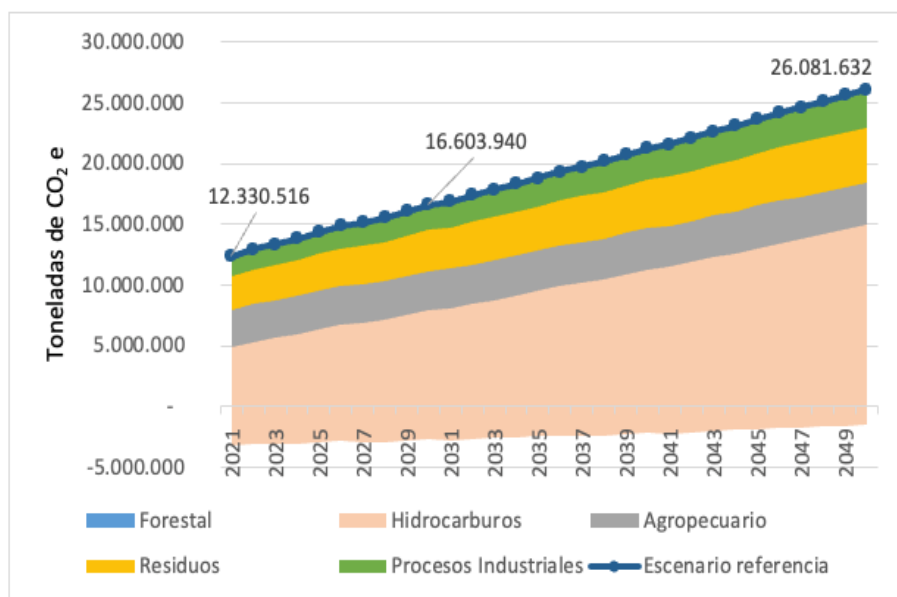
Fuente: elaboración propia con datos a partir de Agresta (2015), Herramienta CDI y valores INGEI 2021.

4.6 Escenario de Referencia de Emisiones Nacionales

Para el escenario de referencia nacional de las emisiones se procede a hacer una agregación de los escenarios de referencia sectoriales. En el Gráfico 85 se muestran los resultados de la suma de las emisiones proyectadas por sector. Para la proyección de las emisiones de gases de efecto invernadero del país, el escenario contempla del año 2021 al 2050. Se parte de una economía que registrará una tasa de crecimiento promedio del 4,0% real. El crecimiento de la población es acorde con las proyecciones del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) con una tasa anual promedio del 0,7%. Las emisiones totales netas están representadas por la línea negra discontinua, que incluye el efecto de la ligera reducción que permite el sector forestal en el escenario de referencia.

Las emisiones netas en este escenario se prevén aumentando de 12,3 millones de toneladas de CO₂e en el 2021 a 26,08 millones de toneladas para el año 2050, lo que implica un crecimiento en el periodo del 112% en las emisiones totales del país y una tasa de crecimiento promedio anual del 2,4%. Para el año 2030 las emisiones son de alrededor 16,6 millones toneladas de CO₂ equivalente, es decir un 35% por encima de lo previsto en el 2021.

Gráfico 85 Escenario Nacional de Referencia: Emisiones Totales al 2050



Fuente: elaboración propia

Como se ve en el Cuadro 57 se ven las emisiones en años seleccionados, tanto por sector como totales netas.

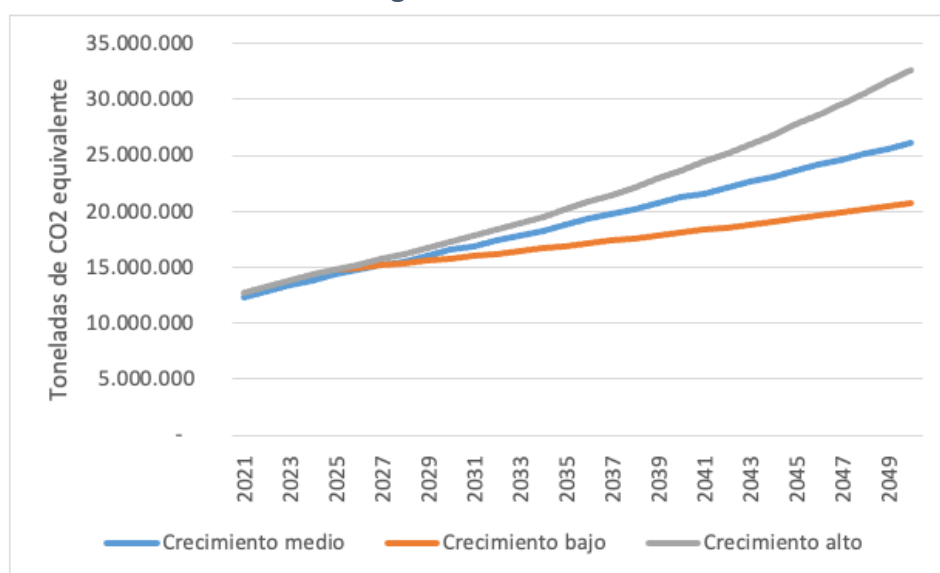
**Cuadro 57 Emisión sectorial y total neta en escenario de referencia
(Toneladas CO₂ equivalentes)**

Año	Hidrocarburos	Agropecuario	Residuos	Procesos Industriales	Uso de la tierra	Emisiones netas
2021	8.071.541	3.068.527	2.746.627	1.609.822	-3.166.000	12.330.516
2030	10.555.435	3.246.923	3.353.861	2.071.080	-2.623.360	16.603.940
2035	11.930.070	3.317.547	3.669.538	2.327.180	-2.447.866	18.796.469
2040	13.374.480	3.393.548	3.995.692	2.583.198	-2.097.097	21.249.821
2050	16.397.896	3.483.014	4.565.658	3.095.049	-1.459.985	26.081.632

Fuente: elaboración propia

Se construyeron escenarios de crecimiento de las emisiones de GEI ante tasas alternativas crecimiento nominal del PIB, como se ve en el Gráfico 86. El escenario medio supone que el crecimiento real del PIB es de 2,5% promedio, el escenario bajo de 1,5% y el escenario alto de 3,5 de tasa real de crecimiento.

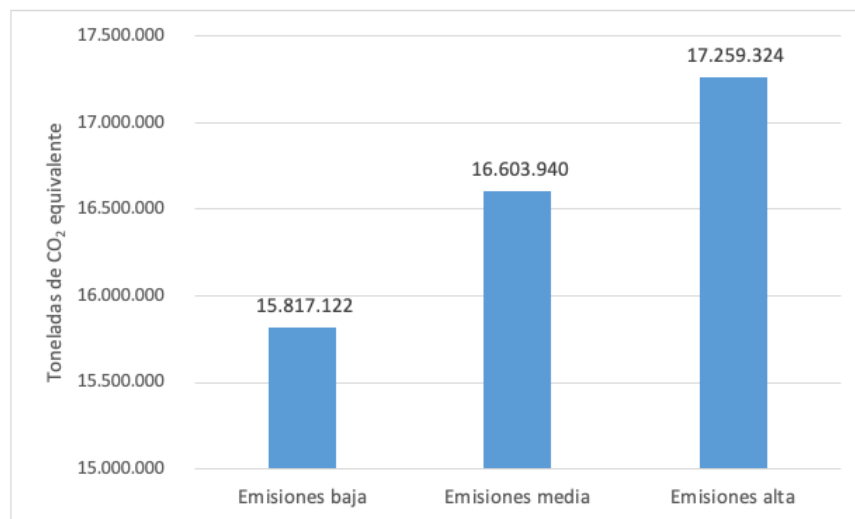
Gráfico 86 Emisiones Totales según Tasas alternativas de Crecimiento del PIB



Fuente: elaboración propia con base en datos oficiales y estimaciones de los autores

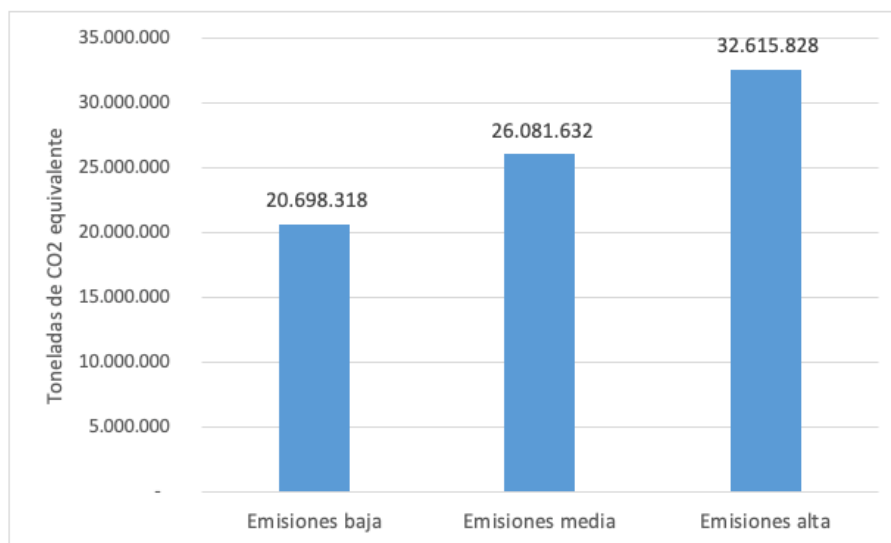
Los resultados para los años 2030 y 2050 de las emisiones totales de GEI a tasas alternativas de crecimiento de la economía se observan en los gráficos 87 y 88.

Gráfico 87 Emisiones totales en el 2030 a tasas alternativas de crecimiento del PIB



Fuente: elaboración propia

Gráfico 88 Emisiones totales en el 2050 a tasas alternativas de crecimiento del PIB



Fuente: elaboración propia

Los datos con las proyecciones del escenario base de emisiones de GEI se muestran en el Cuadro 58.

Cuadro 58 Escenario de Referencia de emisiones por sector y totales netas 2021-2050
(Toneladas CO₂e)

Año	Subsector	Sector	Sector	Procesos y usos		Total
				Residuos	Industriales Sector Forestal	
2021	8.071.541	3.068.527	2.746.627	1.609.822	-3.166.000	12.330.516
2022	8.451.971	3.065.984	2.838.498	1.661.095	-3.101.807	12.915.741
2023	8.692.559	3.092.223	2.895.421	1.712.362	-3.043.568	13.348.996
2024	9.012.933	3.124.055	2.965.961	1.763.623	-3.053.685	13.812.886
2025	9.260.949	3.153.640	3.046.091	1.814.878	-2.937.392	14.338.166
2026	9.512.611	3.174.677	3.104.259	1.866.128	-2.814.355	14.843.320
2027	9.768.525	3.192.827	3.169.704	1.917.373	-2.890.632	15.157.797
2028	10.027.682	3.210.487	3.233.956	1.968.613	-2.940.970	15.499.768
2029	10.290.009	3.229.115	3.304.999	2.019.849	-2.784.746	16.059.227
2030	10.555.435	3.246.923	3.353.861	2.071.080	-2.623.360	16.603.940
2031	10.823.916	3.262.563	3.421.025	2.122.307	-2.743.822	16.885.990
2032	11.095.315	3.275.986	3.480.970	2.173.531	-2.661.310	17.364.492
2033	11.369.575	3.287.418	3.546.933	2.224.751	-2.576.672	17.852.003
2034	11.648.478	3.302.464	3.608.470	2.275.967	-2.549.139	18.286.241
2035	11.930.070	3.317.547	3.669.538	2.327.180	-2.447.866	18.796.469
2036	12.214.249	3.332.674	3.731.479	2.378.389	-2.341.797	19.314.993
2037	12.500.903	3.347.840	3.793.047	2.429.596	-2.349.781	19.721.605
2038	12.789.913	3.363.043	3.854.212	2.480.799	-2.341.587	20.146.380
2039	13.081.149	3.378.280	3.935.340	2.532.000	-2.220.330	20.706.439
2040	13.374.480	3.393.548	3.995.692	2.583.198	-2.097.097	21.249.821
2041	13.669.776	3.408.846	4.055.533	2.634.393	-2.208.274	21.560.273
2042	13.966.905	3.424.169	4.114.833	2.685.586	-2.106.409	22.085.084
2043	14.265.763	3.439.517	4.173.558	2.736.777	-2.003.836	22.611.780
2044	14.566.636	3.454.888	4.231.678	2.787.965	-1.933.101	23.108.066
2045	14.868.944	3.470.279	4.289.162	2.839.151	-1.836.185	23.631.351
2046	15.172.564	3.485.690	4.345.983	2.890.334	-1.736.828	24.157.744
2047	15.477.376	3.501.118	4.402.119	2.941.516	-1.699.737	24.622.392
2048	15.783.269	3.516.563	4.457.550	2.992.696	-1.660.906	25.089.172
2049	16.090.140	3.532.023	4.512.262	3.043.873	-1.560.686	25.617.611
2050	16.397.896	3.483.014	4.565.658	3.095.049	-1.459.985	26.081.632

Fuente: elaboración propia

5 Análisis de Medidas de Mitigación por Sector

En esta sección se hace un análisis del conjunto de medidas de reducción o remoción de GEI que han sido identificadas en un primer proceso de trabajo con base con las medidas contenidas tanto en la Contribución Nacionalmente Determinada (NDC por sus siglas en inglés) presentada por Costa Rica para el 2020, como lo contenidos en el Plan Nacional de Descarbonización al 2050. Como una primera etapa de la construcción del modelo de análisis, se consideran aquellas medidas para los cuales es posible desarrollar un escenario cuantitativo, ya que algunas medidas propuestas requieren de mayor definición para estimar su potencial de mitigación, pero esa labor se espera pueda ser realizada con las partes interesadas, como una revisión de la estimación de las medidas de mitigación que se propone en este documento.

5.1 Sector Residuos Sólidos

Para el sector de manejo de residuos sólidos se construyó un escenario de mitigación de GEI, con una combinación alternativa de las opciones tecnológicas del tratamiento final de desechos y actividades de valorización de residuos. El escenario se basa en mayor recolección, aumento del reciclaje y compostaje, la construcción de rellenos con aprovechamiento de gas para producción de electricidad y quema eficiente del metano, y tecnologías modernas de incineración. No se añade estabilización biológica, con lo que la combinación entre rellenos sanitarios con aprovechamiento del gas e incineración se ve modificada. En el Cuadro 59 se tiene una descripción de las tecnologías de valorización y de tratamiento final de los desechos, de acuerdo con la herramienta (Calculadora MRS-GEI) en que se basó el estudio del Ministerio de Salud.²⁸

Cuadro 59 Sistemas de Tratamiento de los Residuos Sólidos

Sistema	Descripción
Aumento en reciclaje	Hay sistema de separación y lugares para valorización de estos residuos. La tasa sube del 11,71% al 15%.
Compostaje	Se hace separación previa y hay plantas de compostaje en el país para el tratamiento de los residuos. La tasa sube del 1,4% a 10%.
Vertederos	Relleno de tierra controlado. En los escenarios futuros se cierran para pasar los residuos a tratamiento en rellenos.
Rellenos sanitarios con captura del biogás	El tratamiento del biogás es: Ventilación 44%; Quema 56%; Generación de electricidad 0%. Se pasa a mayor eficiencia.
Relleno sanitario con estabilización biológica	Rellenos sanitarios con tratamiento mecánico-biológico en los sitios de disposición no se contemplan en este escenario. La estabilización biológica se lleva a cabo mediante la creación de pilas de compost usando los RSU y aireándolas de acuerdo con el principio de chimenea. No se lleva a cabo ningún

²⁸ Janssen (2012).

Sistema	Descripción
Incineración	<p>pretratamiento mecánico o, en algunos casos, sólo un pretratamiento simple (por ejemplo, homogeneización, fragmentación, modulación del contenido de agua).</p> <p>Existen diferentes tecnologías de plantas de incineración. En términos de preocupaciones ambientales, el aspecto más importante de las tecnologías es el tipo de tratamiento de gases de combustión. En general, las plantas IRSU deben estar en conformidad con los estándares internacionales, por lo tanto, en estas emisiones no representan un peligro para la salud. Los residuos son cuidadosamente examinados para determinar si es adecuado incinerarlos.</p>

Fuente: Janssen (2012) y Calculadora MRS-GEI

Un primer cambio que se registra en los escenarios de mitigación con respecto al de referencia es el porcentaje de reciclaje. Del total de residuos sólidos, actualmente la tasa de reciclaje es del 9,18%. Los escenarios de mitigación suponen aumentos de esta tasa de reciclaje al 15,1% (ver Cuadro 60). Respecto al material orgánico el compostaje actual es de 0%, y para los escenarios de mitigación se supone que aumenta al 10% (Cuadro 61).

Cuadro 60 Porcentaje de Reciclaje del Material Recolectado

Tipo de Material	Línea Referencia	Escenario Mitigación
Papel y cartón	54,32%	65%
Plástico	25,91%	35%
Vidrio	2,84%	15%
Metales	8,45%	15%
Aluminio	8,45%	15%
Textiles	0,2%	5%
Otros	0,24%	5%
Tasa de reciclaje respecto al total de residuos	11,71%	14,9%

Fuente: elaboración propia con base en Janssen (2012)

Cuadro 61 Porcentaje de Compostaje

Tipo de Material	Línea Referencia	Escenario Medio	Escenario Alto
Restos de alimentos	1,4%	10%	10%
Restos de jardines y parques	1,4%	10%	10%

Fuente: elaboración propia con base en Janssen (2012)

En el Cuadro 62 se observan otros parámetros que se utilizan en los escenarios de referencia y de mitigación. Se plantea un aumento de la recolección total de residuos, ya que en el escenario de referencia 8,6% no es recolectado, según el promedio registrado por el IMN INGEI Residuos (2021) entre 2017-2022. En los escenarios de mitigación plantean reducir ese porcentaje al 5%, con una disminución de las quemas de residuos a cielo abierto. El porcentaje de residuos que se llevan a vertederos en el escenario de referencia es de 8,8% y en los escenarios de mitigación se asume que esos vertederos son cerrados para llevar los residuos sólo a sistemas de tratamiento modernos.

Cuadro 62 Parámetros de Tratamiento de Residuos en Escenarios de Referencia y de Mitigación

Disposición de Desechos	Escenario de Referencia	Escenario de Mitigación
Reducción de desechos no recolectados y menor quema a cielo abierto	8,6%	5,0%
Cierre de vertederos y rellenos sanitarios	8,8%	0,0%
Rellenos sanitarios con captación de gas y alta eficiencia	75,7%	65,0%
Incineración eficiente	0,0%	25,0%
Rellenos sanitarios con estabilización biológica	0,0%	0,0%

Fuente: elaboración propia con base en Janssen (2012)

Los escenarios de mitigación contemplan sistemas rellenos sanitarios más eficientes, donde la capacidad de metano aumenta de 25% a 50%, respecto al escenario de referencia, y ahora el 70% del metano captado es aprovechado. La incineración es introducida en los escenarios como método de tratamiento de residuos. En el escenario de mitigación, un 25% de los residuos son incinerados. Para el cálculo de las emisiones, la Calculadora MRS-GEI utiliza factores de contenido carbónico por tipo de material (Cuadro 64). Los valores calóricos utilizados se muestran en el Cuadro 65.

Cuadro 63 Tasas de Eficiencia de Captación

Concepto	Línea de Referencia	Escenario de Mitigación 1
Tasa de captación de metano	25%	50%
Quema de gas	55%	30%

Fuente: elaboración propia

Cuadro 64 Residuos Sólidos: Contenido de Carbono por Fracción de Residuo

Material	C total	C fósil
Restos de alimentos	15,2%	0%
Restos de jardines y parques	19,6%	0%
Papel y cartón	41,4%	1%
Plástico	75,0%	100%
Vidrio	0%	0%
Metales	0%	0%
Aluminio	0%	0%
Textiles	40,0%	20%
Cuero	56,3%	20%
Desechos sanitarios	28,0%	10%
Madera	42,5%	0%
Residuos minerales	0,0%	0%
Otros	2,7%	100%

Fuente: Janssen (2012) según parámetros de Calculadora MRS-GEI

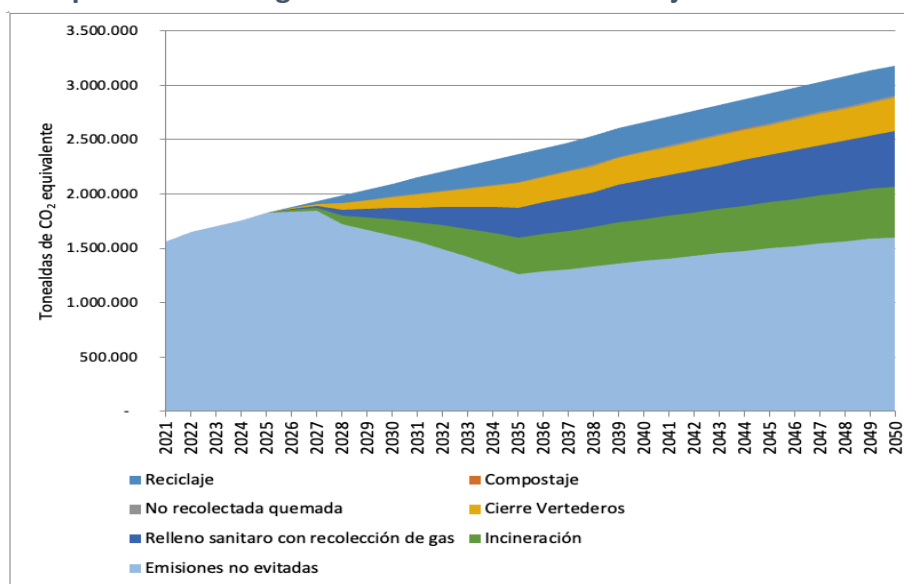
Cuadro 65 Valor calórico de las Fracciones de Residuos (MJ/Kg de Residuos húmedo)

Material	Valor
Contenido orgánico de baja contenido húmedo	4
Contenido orgánico de alto contenido húmedo	2
Papel y cartón	11,5
Plástico	31,5
Vidrio	0
Metales	0
Textiles, cuero y hule	14,6
Madera	15
Restos minerales	0
Otros bajo contenidos húmedos	8,4
Otros alto contenidos húmedos	5

Fuente: Janssen (2012) según parámetros de Calculadora MRS-GEI

El Gráfico 89 muestra las emisiones del escenario de referencia y las áreas representan las reducciones en las emisiones resultantes de cada sistema de manejo y tratamiento de residuos introducido como medidas de mitigación. Este escenario contempla una introducción de las medidas que será paulatina desde el 2026 hasta el 2035, en el transcurso de 10 años. Usando el 2030 como año de referencia, se tiene que la reducción total en este escenario es del 22,7% respecto a las emisiones esperadas para ese año en el sector. En el Cuadro 66 se observa que el reciclaje puede contribuir en 5,8% en la reducción de las emisiones en un año de referencia como en el 2030. El compostaje ofrece una contribución muy limitada por su aporte neto en emisiones. El cierre de vertederos ofrece una contribución del 4,8% y los rellenos sanitarios con aprovechamiento de gas y la incineración ofrecen la mitad de la contribución total en el escenario de mitigación.

Gráfico 89 Opciones de Mitigación de Residuos Sólidos bajo Escenario de mitigación



Fuente: elaboración propia

Cuadro 66 Escenario: Potencial Reducción de Emisiones del Sector Residuos en el 2030

Medida	Reducción de la Medida
Reciclaje	-5,8%
Compostaje	-0,0%
Mayor recolección/menor quema	-0,2%
Cierre de vertederos a rellenos sanitarios	-4,8%
Relleno sanitario con aprovechamiento de gas	-5,0%
Incineración	-6,9%
Total	-22,7%

Fuente: elaboración propia

Una contribución establecida en la NDC es que para el año 2030 al menos el 50% de las aguas residuales en las áreas de alta densidad poblacional recibirán tratamiento. Esta medida no es modelada en esta fase de los escenarios, ya que es una medida muy amplia y no delimitada para establecer los parámetros aplicables.

5.2 Sector energía

5.2.1 Subsector Transporte

Para analizar el potencial de mitigación en el sector transporte se han configurado un escenario como varias medidas de mitigación, que señalan los niveles de avance de algunos objetivos de mitigación en este componente del sector energía. El escenario de mitigación plantea una

composición de la flota vehicular con mayor presencia de motores eficientes de combustión fósil y un aumento paulatino de opciones renovables. Además, los criterios del Plan Nacional de Transporte Eléctrico, de que el país debe plantearse una introducción más agresiva de los autos eléctricos en el futuro, de manera de que se logre una verdadera reconversión de la forma en que se usa la energía para el transporte en el país. Dado que Costa Rica cuenta con una base de energía eléctrica esencialmente renovable, se dan condiciones para que el país apueste por una mayor flota vehicular eléctrica en el futuro. Otras medidas son la introducción del tren eléctrico de pasajeros y la modernización del transporte público por autobús, que es una medida en la NDC establecida como Renovación de las concesiones de autobuses públicos con criterios de descarbonización.

5.2.1.1 Tren Rápido de Pasajeros (TRP) de la Gran Área Metropolitana (GAM)

El proyecto de tren metropolitano por muchos años ha buscado complementar la modernización del transporte público en el área metropolitana, que reúne a las capitales provinciales de San José, Cartago, Heredia y Alajuela. Los estudios que han marcado un concepto que se ha mantenido en el tiempo, de un sistema de tren metropolitano integrado con un sistema de autobuses sectorizado y con otras modalidades de transporte, se remonta al Estudio realizado por la firma costarricense L.C.R. Logística S.A.²⁹ para el Ministerio de Vivienda y Asentamiento Humanos, en el llamado proyecto PRU-GAM (Planificación Regional y Urbana de la Gran Área del Valle Central de Costa Rica). El estudio de PRU-GAM llamaba a la necesidad de la sectorización de los autobuses y la integración con el tren interurbano, dadas las características urbanas de la ciudad de la GAM, que es una región urbana con un núcleo primario (área central de San José), tres núcleos secundarios (áreas centrales de Cartago, Heredia y Alajuela), y varios núcleos terciarios de población (Guadalupe, Tibás, Escazú, Hatillo, Desamparados, San Pedro, etc.) en la periferia del núcleo primario y de los núcleos secundarios. Según L.C.R Logística, “... Cualquiera sea el futuro del ferrocarril, es necesario salvaguardar la protección sobre el derecho de vía actual de los ferrocarriles, especialmente en las zonas urbanas. El uso del ferrocarril en el Valle Central mantiene gran potencial para el transporte masivo de personas si se transforma radicalmente en un RLT que funcione entre Cartago, Alajuela y Heredia pasando por San José donde se podría integrar a un nuevo esquema de transporte masivo de pasajeros.”³⁰.

En el año 2011, el Ministerio de Obras Públicas y Transporte (MOPT) publicó el Plan Nacional de Transportes 2011-2035³¹, en el cual se reitera la necesidad de hacer un sistema de transporte público integrado. En el año de 2013, el Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER) finalizó

²⁹ LCR Logística S. A. (2007). Estudio de oferta y demanda de transportes de la GAM. Costa Rica. San José, Costa Rica.

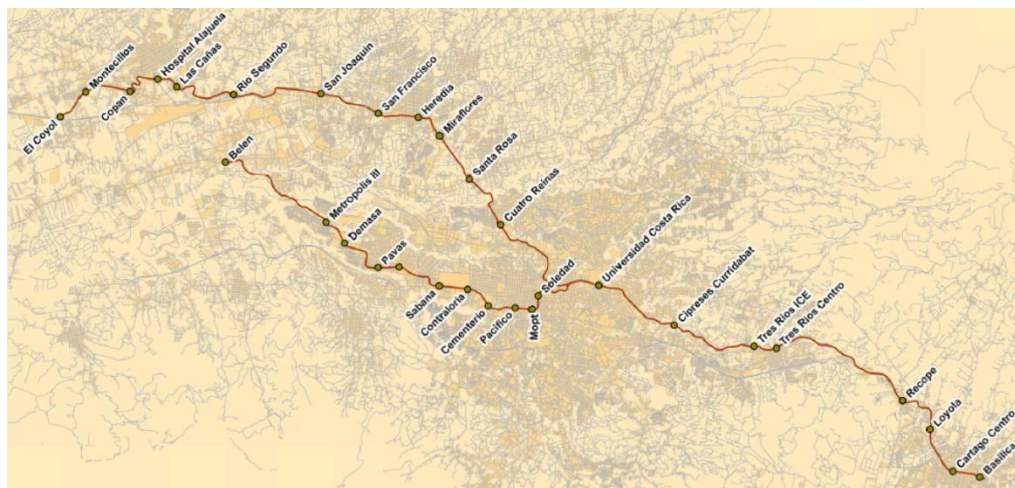
³⁰ LCR Logística S. A. (2007)..

³¹ MOPT (2011). Plan Nacional de Transportes de Costa Rica 2011-2035. San José, Costa Rica: Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

un estudio de pre-factibilidad para el diseño de un sistema de tren rápido funcionando sobre las rutas actuales del tren metropolitano, haciendo uso de los derechos de vía existentes. La propuesta se realizó con base en la propuesta de una empresa española de gran experiencia internacional, Ingeniería y Economía del Transporte S.A. (INECO) en el 2013³². En este estudio, INECO indica que “la deficiente organización y operación del sistema de autobuses en el área de la GAM está provocando su progresivo deterioro operacional, técnico, profesional y económico. Habitualmente el transporte público tiene un efecto beneficioso sobre la calidad ambiental de los centros urbanos. Sin embargo, en las áreas urbanas centrales de la GAM, y en especial de San José, se produce el fenómeno opuesto: el sistema de autobuses acrecienta la congestión vial y contribuye al deterioro urbano. La concentración de los puntos terminales de las rutas en un área urbana reducida ha sido denunciada como inapropiada en múltiples ocasiones. Hay que decir, sin ningún tipo de atenuaciones, que la situación provocada por esta forma de operar es inadmisible, innecesaria, e insostenible. La calidad del servicio y de la vida urbana se deteriora progresivamente. No existe ninguna justificación técnica ni económica que avale este tipo de criterio operacional”³³.

La Ilustración 1 muestra la propuesta de trazado del tren metropolitano habilitando los actuales trayectos del servicio de tren.

Ilustración 1 Sistema de Tren Metropolitano actual



Fuente: INECO (2013)

En el año 2014, el INCOFER anunció una alternativa de sistema de Transporte Rápido de Pasajeros (TRP)³⁴ que, si bien seguiría con los principios de integración con el servicio de transporte público

³² INECO (2013). Estudio para determinar la viabilidad técnica y financiera de la puesta en servicio del tren interurbano de pasajeros del Gran Área Metropolitana de San José de Costa Rica (GAM)

³³ MOPT (2011).

³⁴ INCOFER (2014). Ficha Técnica del Proyecto SISTEMA DE TRANSPORTE RÁPIDO DE PASAJEROS del Gran Área Metropolitana (TRP). San José Costa Rica: Instituto Costarricense de Ferrocarriles.

por autobús, planteaba un cambio fundamental respecto al trazado que seguirá el sistema de transporte ferroviario. Esta alternativa planteaba que no sólo se usarían todos los trayectos del sistema actual de tren, sino que tendrá un trazado sobre las alternativas de recorrido en función de la topografía, pendientes, soluciones de paso (puentes, intersecciones, pasos a desnivel), seguridad y potencial de disminución de accidentes, entorno urbano y otras. “Sería consolidar un tren eléctrico interurbano de movilización de pasajeros en la GAM, coligado a los sistemas metropolitanos y urbanos de autobuses sectorizados, como mecanismo de descongestión vial y promoviendo el uso de combustibles alternativos con el fin de disminuir la dependencia de los hidrocarburos y la emisión de gases contaminantes. La propuesta de nuevo trazado se denominaba la “raqueta” y proponía iniciar nuevos trazados de la ruta a centros urbanos periféricos, como inicialmente a Santa Ana, tal y como se muestra en la Ilustración 2.

Ilustración 2. Sistema de Transporte rápido de Pasajeros alternativo



Fuente: INCOFER (2014)

En 2020 el INCOFER presentó una nueva propuesta con un estudio de factibilidad del Sistema de Tren Rápido de Pasajeros (TRP) de la Gran Área Metropolitana (GAM) ³⁵. Este estudio es el que se ha utilizado como parámetros para las estimaciones de reducción de emisiones de GEI que se presentan a continuación.

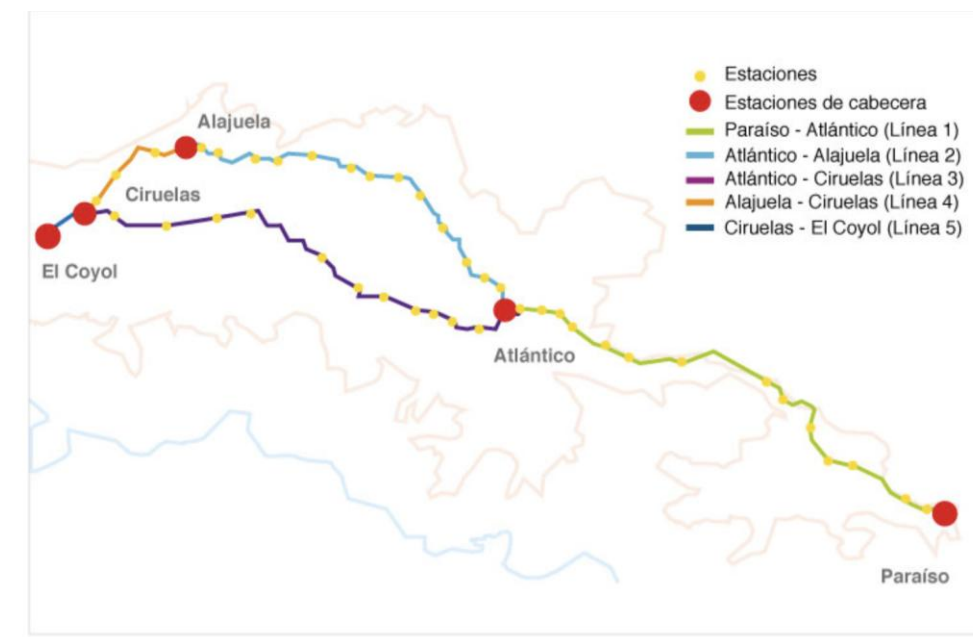
³⁵ INCOFER (2020). Estudios de Factibilidad Técnica, Económico-Financiera, Ambiental, Social y de vulnerabilidad para la Construcción, Equipamiento, Puesta en marcha, Operación y Mantenimiento, bajo la modalidad de Concesión de Obra con Servicio Público, del Sistema de Tren Rápido de Pasajeros (TRP) de la Gran Área Metropolitana (GAM). Cuarto Informe: Estudio Económico y Financiero. Documento 2: Análisis Costo-Beneficio. DOM Consulting, Engineering and Architecture, S.A.U.

“El Tren Rápido de Pasajeros de la GAM consiste en un sistema ferroviario bidireccional que conectará las ciudades de Cartago, San José, Heredia y Alajuela, el cual será licitado al amparo de la Ley de Concesión de Obra Pública con Servicios Público, para diseño, construcción y operación del Sistema. Una vez que esté concluido, se convertirá en el nuevo eje central de movilización dentro de la Gran Área Metropolitana, un sistema de transporte público eficaz que impulsará la movilidad sostenible”³⁶.

Si bien el estudio de factibilidad plantea la demanda en términos de despachos por día, INCOFER (2020) establece que se espera transportar a más de 200 000 pasajeros por día, con servicio continuo de, al menos, 18 horas al día, 7 días de la semana. Estos parámetros se usan en las estimaciones de la situación con el proyecto.

El trazado de la propuesta de INCOFER (2020) se muestra en la Ilustración 3. Mientras que la Ilustración 4 señala que el sistema contará con 5 líneas, con una Línea 1 de la Estación del Atlántico a Paraíso con 16 estaciones y una longitud de 27,4 km. La Línea 2 será de la Estación del Atlántico al Aeropuerto con 15 estaciones y 21,6 km. La Línea 3 será entre la Estación del Atlántico a Ciruelas con 14 estaciones y 21,4 km. La Línea 4 será entre Ciruelas a las Cañas, con 5 estaciones y 7,8 km. Por último, la línea 5 será entre Ciruelas a El Coyo, con 2 Estaciones y 2,7 km.

Ilustración 3. Sistema TRP de la GAM



Fuente: INCOFER (2020)

³⁶ INCOFER (2020).

Ilustración 4. Líneas y estaciones del Sistema TRP de la GAM



Fuente: INCOFER (2020)

Cuadro 67 Demanda actual de Pasajeros registrados por INCOFER (2019-2023)

Año	Viajeros día	Viajeros año
2019	10.831	3.379.210
2020	4.161	1.298.151
2021	2.879	898.321
2022	8.247	2.572.952
2023	10.974	3.423.887

Fuente: INCOFER

Para la demanda actual como situación sin proyecto, se toma el recuento de INCOFER de la demanda atendida entre 2019 al 2023. Se supone que la demanda crece de acuerdo con el crecimiento de la población. En la situación de ejecución del proyecto. El punto de partida para las estimaciones es la demanda esperada de pasajeros que se plantea por parte del estudio de INCOFER (2020), en caso de la implementación del proyecto, el cual supone 200 mil personas al primer año de funcionamiento del nuevo sistema de tren. Nuevamente, la demanda crece a la tasa de crecimiento de la población. Se supone en esta modelación que implementación del tren comienza en el 2026, con 4 años de construcción y operación a partir del 2030 (Cuadro 67).

Con la ejecución del proyecto, se supone que, del aumento neto de pasajeros para el TRP, un 60% de los pasajeros son usuarios del transporte público, mientras que el 40% provienen de usuarios de automóviles particulares. Con base en datos de MINAE (2013)³⁷ se parte de una

³⁷ MINAE (2013). Encuesta de consumo energético nacional en el sector transporte del 2013. San José: MINAE: Dirección Sectorial de Energía.

ocupación promedio de 1,5 pasajeros por auto, para la estimación de la cantidad de vehículos que se sustituyen por el servicio del tren, con un rendimiento promedio de 10,86 km/litro de combustible. Por su parte con base en las estimaciones de EPYSA (2014)³⁸ se usa como kilometraje promedio de los vehículos una distancia promedio diaria de 24 kilómetros y una ocupación promedio de 49,12 pasajeros por autobús para estimar la cantidad de buses sustituidos y un rendimiento de 4,76 km/litro de combustible.

Cuadro 68 Estimación de Demanda Anual sin proyecto y con proyecto (2021-2050)

Año	Demanda con sistema actual sin proyecto	Demanda estimada para TRP con proyecto
2030	3.620.169	122.903.609
2031	3.644.611	123.779.224
2032	3.668.209	124.616.310
2033	3.690.974	125.416.898
2034	3.713.969	126.181.123
2035	3.736.105	126.908.188
2036	3.757.389	127.598.225
2037	3.777.821	128.253.534
2038	3.797.399	128.876.587
2039	3.816.115	129.467.761
2040	3.833.964	130.026.768
2041	3.850.941	130.554.293
2042	3.867.045	131.051.441
2043	3.882.272	131.519.471
2044	3.896.621	131.959.488
2045	3.910.089	132.372.861
2046	3.922.682	132.761.248
2047	3.934.404	133.125.531
2048	3.945.267	133.465.866
2049	3.955.283	133.785.877
2050	3.964.469	134.089.980

Fuente: Elaboración propia con base en INCOFER (2020)

Para la estimación de energía ahorrada se asume una eficiencia energética de los motores de combustión del 40% y del 90% de los motores eléctricos. La eficiencia energética se calcula comparando la energía de salida útil con la energía de entrada requerida. La fórmula general es: Eficiencia energética = (Energía de salida útil ÷ Energía de entrada) x 100%³⁹. La eficiencia de los motores eléctricos en comparación a los de gasolina es superior, “un motor térmico representa un despilfarro energético por el proceso complejo que se requiere para transformar la energía

³⁸ EPYSA (2014). Apoyo al modelo general de sectorización de transporte público de San José, Costa Rica.

Presentado a INTER-AMERICAN DEVELOPMENT BANK – IDB - WASHINGTON D.C. Consorcio EPYPSA - SIGMA GP

³⁹ <https://rentingfinders.com/glosario/rendimiento-termico-volumetrico/#:~:text=La%20eficiencia%20o%20rendimiento%20térmico,energía%20por%20bombeo%2C%20entre%20otros>

química del combustible en energía mecánica. El motor diésel logra, en la práctica, un 60 y hasta 70% de eficiencia térmica gracias a su tecnología de funcionamiento, la baja volatilidad y el poder calorífico del combustible, y por supuesto, su adecuado mantenimiento. El restante se libera en calor. El motor que consume gasolina logra una eficiencia térmica aproximada de un 40 y hasta 50% bajo condiciones óptimas. El motor eléctrico logra una eficiencia térmica por encima del 90%⁴⁰.

Con base en la proporción de viajeros esperados provenientes del servicio de bus y de automóviles, y la estimación de la cantidad de buses y autos sustituidos por el TRP, se hace una estimación de la energía ahorrada. El ahorro con el sistema de TRP se observa en el Cuadro 69.

Cuadro 69 Estimación de Ahorro total por sustitución vehicular del TRP (en Terajulios)

Año	Ahorro en buses	Ahorro	
		automóviles	Ahorro total
2030	109	1.265	1.374
2031	111	1.286	1.398
2032	109	1.264	1.374
2033	109	1.259	1.368
2034	110	1.270	1.380
2035	111	1.281	1.392
2036	112	1.292	1.404
2037	113	1.302	1.415
2038	113	1.312	1.426
2039	114	1.322	1.436
2040	115	1.331	1.446
2041	116	1.340	1.456
2042	117	1.349	1.466
2043	117	1.357	1.475
2044	118	1.366	1.484
2045	119	1.374	1.493
2046	119	1.382	1.501
2047	120	1.389	1.509
2048	121	1.396	1.517
2049	121	1.403	1.525
2050	122	1.410	1.532

Fuente: Elaboración propia con base en INCOFER (2020)

5.2.1.2 Tren Eléctrico Limonense de Carga (TELCA)

Las estimaciones para el TELCA se basan en estudio del INCOFER (2019) sobre el Estudio de Factibilidad del Tren Eléctrico Limonense de Carga⁴¹. El Proyecto TELCA, se llevaría a cabo en las regiones Huetar Norte y Huetar Caribe. Es impulsado por INCOFER, para la modernización y

⁴⁰ Bojórquez, Francisco y Hernández, Javier. Eficiencia energética en la movilidad: el gran reto. México: Eficiencia Energética, año 6, Número 24, periodo octubre-diciembre de 2019.

⁴¹ INCOFER (2019). Estudio de Factibilidad del Tren Eléctrico Limonense de Carga (TELCA). Elaboración por AUDINGINTRAESA-AUDINGMEX

ampliación de la red ferroviaria y de la operación del ferrocarril de transporte de carga desde y hacia los puertos de Moín, en la provincia de Limón, en una transición de una energía basada en el diésel a una energía basada en la electricidad. Su desarrollo se ha planificado de manera gradual en cuatro fases:

- Fase 1. Muelle JAPDEVA – Patio GAM ZN en Río Frío
- Fase 2. Patio GAM ZN en Río Frío - Chilamate.
- Fase 3. Chilamate – Muelle de San Carlos.
- Fase 4. Limón – Valle de la Estrella.

De acuerdo con INCOFER (2019), las fases 1 y 4 corresponden a tramos ya existentes en los cuales INCOFER posee las propiedades y derechos de vía, y las fases 2 y 3 son completamente nuevas y actualmente no se poseen las propiedades. La Ilustración muestra el trazado del proyecto.

Ilustración 5. Trazado proyecto TELCA



Fuente: Elaboración propia con base en INCOFER (2019)

A partir del INCOFER (2019), se toman los datos de transporte de contenedores por transportar de 10 estaciones: Muelle de San Carlos, Chilamate, Río Frío, Leescille, Guácimo, Siquirres, Matina, Bananito y Valle de la Estrella. Se estima una distancia promedio de 65 km por transporte, con lo que se toman los valores de costo promedio de \$162 por contenedor convencional y \$216 por contenedor refrigerado. Dados los ingresos proyectados en el proyecto, la estimación de contenedores transportado se presenta en el Cuadro 70, el cual supone que el proyecto se inicia en el 2030 en su etapa de construcción y entre en operación en el 2030.

Cuadro 70 Estimación de contenedores transportado por el TELCA

Año	Contenedores convencionales	Contenedores refrigerados	Total de contenedores
2030	184.827	147.749	332.576
2031	190.832	152.549	343.381
2032	197.004	157.484	354.488
2033	203.352	162.558	365.910
2034	209.885	167.780	377.665
2035	216.612	173.158	389.770
2036	223.547	178.701	402.248
2037	230.252	184.062	414.314
2038	237.120	189.552	426.672
2039	244.154	195.175	439.329
2040	251.362	200.937	452.299
2041	258.752	206.844	465.597
2042	265.748	212.436	478.184
2043	272.872	218.131	491.003
2044	280.125	223.930	504.055
2045	287.513	229.836	517.349
2046	295.038	235.851	530.889
2047	301.955	241.381	543.336
2048	308.957	246.978	555.935
2049	316.043	252.642	568.685
2050	316.043	252.642	568.685

Fuente: Elaboración propia con base en INCOFER (2020)

Se parte del supuesto que cada contenedor representa un vehículo de carga pesada que se sustituye, con lo cual se estiman el ahorro de combustible, partiendo de un rendimiento de 18 km/litro de diésel. Los resultados de los kilómetros estimados de los vehículos de carga pesada, el combustible ahorrado y el ahorro en energía se muestra en el cuadro 71.

Cuadro 71 Estimación de kilómetros y ahorro por combustibles del TELCA

Año	Kilómetros no recorridos por carretera	Ahorro en combustible (litros de diésel)	Ahorro de energía (Terajulios)
2030	21.617.420	4.546.158	165
2031	22.319.786	4.693.866	170
2032	23.041.705	4.845.686	176
2033	23.784.156	5.001.824	182
2034	24.548.205	5.162.504	187
2035	25.335.073	5.327.982	193
2036	26.146.144	5.498.551	200
2037	26.930.408	5.663.483	206
2038	27.733.661	5.832.407	212
2039	28.556.359	6.005.421	218
2040	29.399.412	6.182.716	224
2041	30.263.778	6.364.492	231
2042	31.081.949	6.536.554	237
2043	31.915.200	6.711.788	244

2044	32.763.568	6.890.200	250
2045	33.627.663	7.071.920	257
2046	34.507.809	7.257.015	263
2047	35.316.839	7.427.154	270
2048	36.135.781	7.599.378	276
2049	36.964.516	7.773.662	282
2050	36.964.516	7.773.662	282

Fuente: Elaboración propia con base en INCOFER (2020)

5.3 Diésel consumido por transporte de trenes.

Por último, Inventario Nacional de emisiones de Gases de Efecto Invernadero del 2017⁴², se realizó una estimación del consumo de diésel por transporte en ferrocarril, lo que a partir del 2030 se usa como ahorro de combustible. El aumento del consumo de energía por electricidad se estima a partir de la relación de eficiencia energética de la movilidad por vehículos respecto a la movilidad por motores eléctricos de los trenes, eso se aplica para cada tipo de vehículo que es sustituido, tanto por el TRP como por el TELCA.

Cuadro 72 Estimación de kilómetros y ahorro por combustibles del TELCA

Ahorro de energía por diésel de los trenes (Terajulios)	
Año	
2030	869
2031	888
2032	908
2033	928
2034	948
2035	968
2036	988
2037	1.007
2038	1.027
2039	1.047
2040	1.067
2041	1.087
2042	1.106
2043	1.126
2044	1.146
2045	1.166
2046	1.186
2047	1.206
2048	1.225
2049	1.245
2050	1.265

Fuente: Elaboración propia con base en INCOFER (2020)

⁴² IMN (2021). Inventario Nacional de emisiones por fuentes y absorción por sumideros de Gases de Efecto Invernadero Costa Rica, 1990-2017. San José: Instituto Meteorológico Nacional.

5.3.1.1 Modernización del Transporte Público Metropolitano de San José

La Modernización del Transporte Público Metropolitano de San José es un proyecto del Ministerio de Obras Públicas y Transporte que está esbozado desde 1999 mediante la implementación del proyecto de sectorización del transporte público.⁴³ Para un diseño preliminar se contrató al Consorcio EPYPSA - SIGMA GP quienes elaboraron un modelo general de sectorización de transporte público de San José, el cual se utiliza como base de los datos aportados por el MOPT. Con base en los datos se pudo definir la cantidad de viajes, pasajeros y longitud de recorrido del sistema actual y de la situación que el MOPT estableció como escenario de mitigación (ver Cuadro 73 y Cuadro 74). La implementación de este proyecto supone la operación de los sectores de Pavas y San Pedro operando con su Diametral, así como el Sector de Desamparados en los próximos 5 años. Los otros sectores se incorporarán después de este periodo. Para la estimación del efecto de la reducción de autobuses y de viajes que se espera con el proyecto de modernización se utilizan los recorridos promedio del Cuadro 74 y los parámetros del Cuadro 75.

Cuadro 73 Situación del Sistema Metropolitano de Autobuses

Sector	Longitud (km)	Despachos (viajes al día)	Demanda observada
			en el campo (pasajeros/día)
Central	99	n.d.	88.723
Escazú - Santa Ana	750	1.784	100.583
Guadalupe – Moravia	835	3.646	208.797
Hatillo – Alajuelita	462	3.503	182.881
Intersectorial	71	28	13.357
Pavas	84	1.460	73.593
San Francisco - Desamparados	619	3.520	160.812
San Pedro - Curridabat	684	3.578	168.769
ibas - Santo Domingo	337	1.892	72.087
Uruca - Heredia	333	2.589	118.399
Total	4.370	22.200	1.208.019

Fuente: elaboración propia con datos del MOPT, SYGMA-EPYPSA e INEC

⁴³ Decreto MOPT 28337 de 1999 “Reglamento sobre políticas y estrategias para la modernización del transporte colectivo remunerado de personas por autobuses urbanos para el Área Metropolitana de San José y zonas aledañas que la afecta directa o indirectamente.”

Cuadro 74 Situación esperada con la Modernización del Sistema Metropolitano de Autobuses

Sector	Demanda estimada (pasajeros)	Flota estimada (unidades)	Longitud del recorrido (Km al día)
Central	31.056	43	5.973
Escazú-Santa	69.195	150	21.883
Guadalupe-Moravia	127.767	183	35.576
Hatillo-Alajuelita	187.088	151	27.665
Intersectorial	67.327	83	21.866
Pavas	42.883	41	7.769
San Francisco-Desamparados	127.226	154	30.187
San Pedro-Curridabat	166.287	190	39.015
Tibás-Santo Domingo	50.512	78	15.827
Uruca-Heredia	79.486	106	21.392
Diametral	281.094	221	75.287
Total	1.232.282	1.433	319.252

Fuente: elaboración propia con datos del MOPT, SYGMA-EPYPSA e INEC

Cuadro 75 Recorrido Promedio de los Pasajeros por Sector

Sector	Recorrido promedio al día (Km)
Central	17,79
Escazú-Santa Ana	36,49
Guadalupe-Moravia	24,03
Hatillo-Alajuelita	18,68
Pavas	25,51
S Francisco-Desamparados	21,36
S Pedro-Curridabat	21,81
Tibás-Sto Domingo	23,91
Uruca Heredia	29,48

Fuente: elaboración propia con datos del MOPT, SYGMA-EPYPSA e INEC

Cuadro 76 Parámetros de la composición de la flota actual y flota con la modernización

Información	Total	Escazú-Santana	Hatillo- Alajuelita	Sto. Domingo - Tibás	S. Pedro - Curridabat	Pavas	Desamparados- S. Fco	Moravia Guadalupe	Heredia sur - La Uruca	Sector Central	Intersectorial	Diametrales
Número Buses alta capacidad (15 m)	553	53	92	34	86	26	107	95	60			
Complementarias	455	4	4	2	21	9	5	8	22	43	116	221
Número Buses alimentadores (12 M)	425	93	55	42	83	6	42	80	24			
Número Buses nuevos	1.433	150	151	78	190	41	154	183	106	43	116	221
Número Buses actuales	2.032	276	194	146	306	73	332	349	160	103	93	
Km x carrera alta cap (promedio)	19	30	13	12	21	20	19	19	21			
Km x carrera complementarios (promedio)	16	14	16	6	10	15	12	12	12	9	29	43
Km x carrera alimentad (promedio)	10	16	7	12	10	6	10	8	10			
Km x carrera actuales (promedio)	21	36	13	17	19	18	18	21	24	17	25	
Viajes x día buses alta capacidad	5.235	410	1.277	588	951	238	107	1.084	580			
Viajes x día buses complementarias	4.734	72	72	72	394	122	143	144	360	638	987	1.730
Viajes x día alimentadores	8.173	1.176	1.552	723	1.567	222	836	1.646	451			
Viajes x día buses actuales	23.812	1.784	3.503	1.892	3.578	1.460	3.520	3.646	2.589	1.138	702	
Buses actuales 2,032			553 Buses Troncales 455 Buses Líneas Complementarias 425 Buses Líneas Alimentadores									
Viajes actuales 23,812			5,235 Viajes Buses Troncales 4,734 Viajes Líneas Complementarias 8,173 Viajes Buses Líneas Alimentadores									
Rendimiento buses convencionales 10 km/litro			Rendimiento buses alta capacidad 7 km/litro									

Fuente: elaboración propia con datos del MOPT, SYGMA-EPYPSA e INEC

El Cuadro 72 resume los resultados de los efectos de la reducción de unidades y de viajes con el proyecto de modernización. Los efectos se pueden separar por sector. Los efectos negativos que se ven en las intersectoriales y en las diametrales se debe a que en el sistema actual las intersectoriales son más reducidas que lo que se espera en el proyecto e incluso las diametrales no existen, por lo que se percibe como un incremento de consumo de energía, pero en realidad su efecto indirecto en la reducción de buses en los sectores que transitan no se ve por separado.

Para estimar el ahorro por la reducción en uso de vehículos privados de habitantes de cada sector, se usan datos de la encuesta del proyecto sobre personas del sector que poseen automóvil y la distancia de viaje según matriz origen-destino de EPYSA-SIGMA (2013). En última Encuesta de Transporte del MINAE (2013) se establece disposición a dejar el auto del 29% de conductores, pero se supone en este ejercicio que se alcanza 15% de sustitución de autos privados, lo que será una sustitución paulatina que se llevará a cabo en un plazo de 5 años (Cuadro 77). Los resultados de este *efecto rebote* se ven en los Cuadros 78 y 79.

Cuadro 77 Reducción potencial de Emisiones de GEI por Reducción de Unidades y Viajes
(miles de toneladas de CO₂)

	Total	Escazú-Santana	Hatillo- Alajuelita	Sto. Domingo - Tibás	S. Pedro - Curridabat	Pavas	Desamparados- San Francisco	Moravia Guadalupe	Heredia sur - La Uruca	Sector Central	Intersectorial	Diametrales	Diametral Pavas-San Pedro
Ahorro potencial por año*	35,3	9,6	3,5	5,0	6,8	5,3	17,4	10,9	12,0	4,0	-6,6	-32,6	-3,2
Ahorro potencial al 2050**	2.093	270	99	141	190	149	487	305	338	113	-184	-917	-90

* El ahorro anual supone plena operación del sector.

** El ahorro en el 2050 supone sectores de Pavas y San Pedro operando con su Diametral y el Sector de Desamparados en próximos 5 años. Los otros sectores después de este periodo.

Fuente: elaboración propia con datos del MOPT, SYGMA-EPYPSA e INEC

Cuadro 78 Reducción potencial de Emisiones de GEI por Reducción de Uso de Vehículos privados (miles de toneladas de CO₂)

	Total	Escazú-Santana	Hatillo- Alajuelita	Sto. Domingo - Tibás	S. Pedro – Curridabat	Pavas	Desamparados- San Francisco	Moravia Guadalupe	Heredia sur – La Uruca	Sector Central
Ahorro potencial por año*	197	34	18	19	29	9	26	35	21	7
Ahorro potencial al 2050**	5.919	1.015	533	569	870	267	765	1.049	636	215

* * El ahorro anual supone plena operación del sector. El ahorro en el 2050 sigue sectores en dos etapas.

Fuente: elaboración propia con datos del MOPT, SYGMA-EPYPSA e INEC

Cuadro 79 Reducción potencial de Emisiones de GEI por efecto descongestión (miles de toneladas de CO₂)

	Total	Escazú-Santana	Hatillo- Alajuelita	Sto. Domingo - Tibás	S. Pedro – Curridabat	Pavas	Desamparados- San Francisco	Moravia Guadalupe	Heredia sur – La Uruca	Sector Central
Ahorro potencial por año*	244	42	22	23	36	11	32	43	26	9
Ahorro potencial al 2050**	7.368	1.263	663	708	1.084	333	952	1.306	792	268

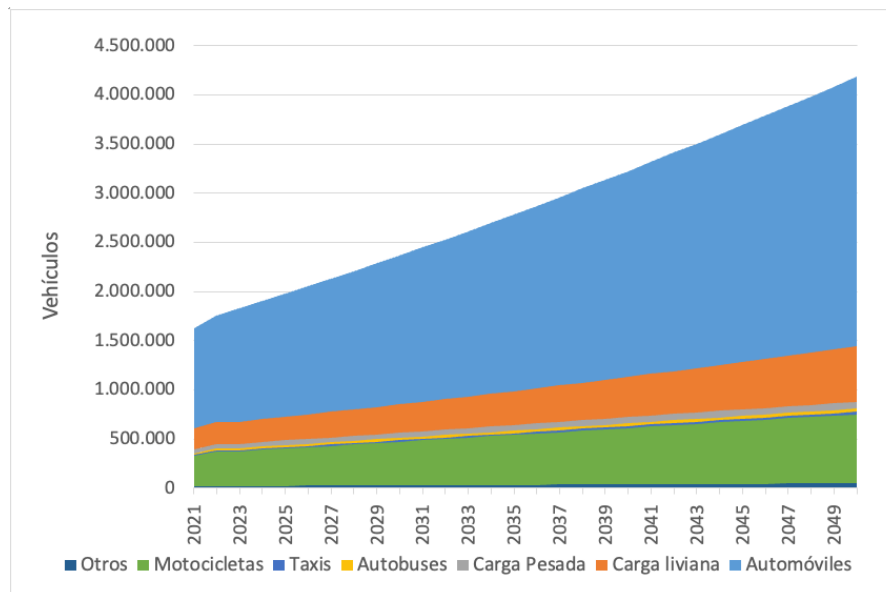
* * El ahorro anual supone plena operación del sector. El ahorro en el 2050 sigue sectores en dos etapas.

Fuente: elaboración propia con datos del MOPT, SYGMA-EPYPSA e INEC

5.3.1.2 Tecnologías para la Flota Vehicular

El Gráfico 90 muestra la composición de la flota vehicular en el escenario de referencia. En el escenario de mitigación plantea la introducción de un mayor parque de vehículos eficientes que, si bien son motores de combustibles fósiles, sus niveles de eficiencia seguirían los estándares internacionales (acompañado con una política de estándares de eficiencia y limitación de vehículos de baja eficiencia y vehículos usados).

Gráfico 90 Proyección del Parque Vehicular en Escenario de Referencia



Fuente: elaboración propia con datos de MINAE

Preponderancia del papel futuro del transporte eléctrico

Los resultados del Primer Informe Bienal de Transparencia (BTR) que desarrolla el Ministerio de Ambiente y Energía, por medio del Instituto Meteorológico Nacional (IMN), y el Desarrollo de escenarios de proyección de emisiones de gases de efecto invernadero en Costa Rica, establecen un escenario de mitigación en el futuro que estará mayormente influido por una introducción agresiva de los vehículos eléctricos.

Sin embargo, este escenario de mitigación futura también analiza algunas medidas de mayor sostenibilidad. Por ejemplo, el país ha venido experimentando la introducción de un mayor parque de vehículos eficientes que, si bien son motores de combustibles fósiles, sus niveles de eficiencia seguirían los estándares internacionales (acompañado con la política de estándares de eficiencia del MINAE y limitación de vehículos de baja eficiencia y vehículos usados).

Este escenario futuro de mitigación también analiza acciones de descongestionamiento como teletrabajo, restricción vehicular metropolitana, introducción de vehículos eléctricos, uso de vehículos híbridos, educación vial y mejoras en infraestructura metropolitana.

Sin embargo, las medidas de mayor impacto, como los trenes eléctricos metropolitano y de carga del atlántico, así como la modernización del sistema de transporte remunerado de servicio de buses metropolitano y su integración multimodal con el servicio de tren y otras modalidades de transporte, son medidas que aún no se han introducido y no se tiene una programación en el tiempo para las mismas. En este modelo de mitigación se supone que estas medidas se

comienzan a aplicar desde el 2026-2028, con una habilitación paulatina en infraestructura y servicios.

Las acciones como el tren eléctrico y el bus tienen poco efecto en la reducción total de emisiones si se analizan de manera aislada, ya que su principal importancia radica en las posibilidades de complementarlas con medidas de contención del uso del auto privado, teniéndose bajo este escenario la posibilidad para las personas un transporte público moderno e integrado.

Otras medidas como los vehículos híbridos tienen un impacto reducido y ceden su lugar a los autos eléctricos en una transición que se ha modelado entre estas tecnologías. Medidas como biodiesel, bioetanol y medidas de ahorro suman al esfuerzo de mitigación en transporte, pero igualmente no son medidas que logren producir un cambio fundamental en las emisiones del sector.

Introducción agresiva de los autos eléctricos

De esta manera, las principales acciones de mitigación en el transporte recaen en una introducción agresiva de los autos eléctricos. El país tiene como objetivo promover la transición hacia una mayor participación de las energías renovables en la matriz energética nacional. En este sentido el VII Plan Nacional de Energía establece el desarrollo del transporte eléctrico como una política que responde a ese objetivo energético⁴⁴.

La transición hacia el transporte eléctrico tiene una ventaja estratégica en el país, ya que la matriz de generación eléctrica es altamente renovable, por lo que la huella de carbono del transporte podría disminuirse de mane ostensible. Además, existen cobeneficios adicionales, como la baja de las emisiones contaminantes del transporte.

El país cuenta ya con la Ley de incentivos y promoción para el transporte eléctrico (Ley 9518), que fue aprobada en el 2018, y que tiene como objeto crear el marco normativo para regular la promoción del transporte eléctrico y fortalecer las políticas públicas para incentivar su uso. El Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO) desarrolló normativa técnica para los centros de recarga, con el propósito de contar con estándares técnicos en el país. Además, el MINAE ha impulsado exoneraciones en el valor del vehículo, en los impuestos sobre la venta, en el impuesto selectivo de consumo y en el valor aduanero. Estas exoneraciones tienen una vigencia de 5 años. Otro incentivo es la exoneración de los repuestos de los vehículos eléctricos, que aplica al impuesto sobre la venta y el impuesto selectivo de consumo a los repuestos relacionados con el motor eléctrico y las baterías. Además, exoneraciones del equipo de ensamblaje y la producción de vehículos eléctricos, con una vigencia de 10 años. Se ofrece una exoneración del impuesto a la propiedad para los vehículos eléctricos, con lo que están exentos del pago del impuesto a la propiedad de vehículos por un plazo de 5 años. Los vehículos

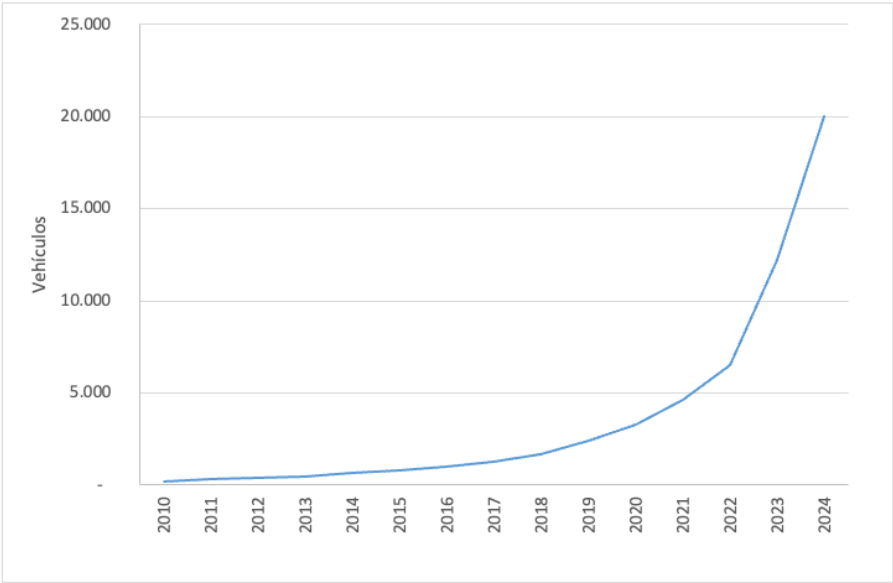
⁴⁴ MINAE (2019). Plan nacional de transporte eléctrico 2018-2030 San José: Ministerio de Ambiente y Energía, DGM, SEPSE. Con el apoyo de BID, PNUD, GIZ.

comprados para servicio de taxi, tiene derecho a una exoneración del 60% de los impuestos por la importación. Se contempla una exoneración del pago de parquímetros, así como exoneración de impuestos para partes de los centros de recarga. Para el incentivo del uso de vehículos eléctrico, se contempla el incentivo a la construcción de parqueos azules para vehículos eléctricos.

En materia de financiamiento al transporte eléctrico, la Ley de incentivos y promoción para el transporte eléctrico establece disposiciones para que el Sistema de Banca de Desarrollo (SBD) incluya el tema de transporte eléctrico como parte de la cartera de proyectos, así como líneas de financiamiento especiales del Sistema Bancario Nacional, y se autoriza para que utilicen fondos de inversión para el financiamiento de obra pública para transporte eléctrico.

El Gráfico 91 muestra la evolución del transporte eléctrico que registra el MINAE, cuyo crecimiento ha sido exponencial desde el 2010. El Cuadro 80 muestra la composición de la flota eléctrica.

Gráfico 91 Evolución de la flota de transporte eléctrico 2010-2024



Fuente: elaboración propia con base en datos del MINAE

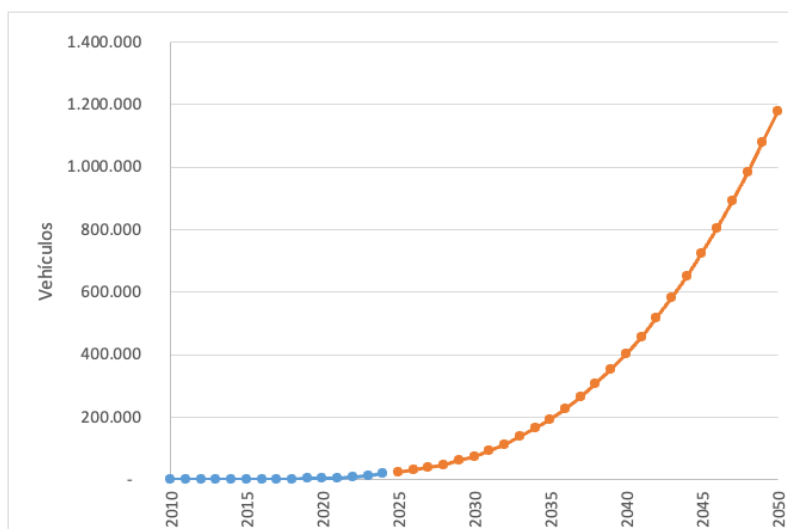
Cuadro 80 Composición de la flota vehicular eléctrica 2010-2024

Año	Automóviles	Motocicletas	Especial	Trabajo	Flota eléctrica
2010	72	34	113	14	233
2011	85	39	165	15	304
2012	96	56	245	15	412
2013	103	89	290	15	497
2014	115	144	376	43	678
2015	119	170	463	43	795
2016	130	195	648	43	1.016
2017	156	278	763	43	1.240
2018	349	356	910	46	1.661
2019	806	476	1.063	48	2.393
2020	1.417	659	1.162	62	3.300
2021	2.443	846	1.263	81	4.633
2022	4.007	1.069	1.326	124	6.526
2023	8.889	1.242	1.712	375	12.218
2024	16.066	1.340	1.874	740	20.020⁴⁵

Fuente: Dirección de Energía, MINAE

La tendencia mostrada hasta la actualidad en el crecimiento de los vehículos eléctricos se ha mantenido en el escenario de mitigación como se muestra en el Gráfico 92, como la proyección inicial de la flota eléctrica hasta el 2050. Bajo esta proyección, el país pasaría de una flota de 20.020 vehículos en el 2024 a 24.086 vehículos eléctricos en el 2025, lo que implica una tasa de crecimiento del 20%. Con estas mismas proyecciones, para el año 2050, la flota eléctrica sería de 1.179.040 vehículos, representando el 28,12% de la flota total del país en el 2050.

Gráfico 92 Proyección de la flota de transporte eléctrico

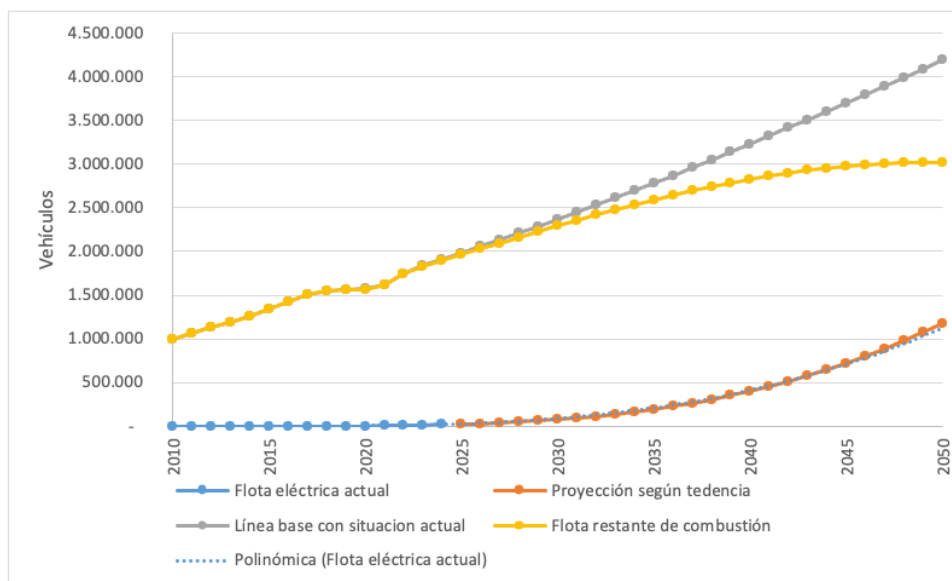


Fuente: elaboración propia con base en datos del MINAE

⁴⁵ Para el 2024 se contó con el corte de las estadísticas a setiembre del 2024.

El efecto en el cambio de modalidad hacia vehículos eléctricos se observa en el Gráfico 93, el cual presenta en gris la línea base de vehículos proyectada, pero con la introducción de vehículos eléctricos, de acuerdo con la tendencia mostrada hasta ahora, se tendría una disminución de la flota restante con motores de combustión interna.

Gráfico 93 Transición hacia flota de vehículos eléctricos según tendencia

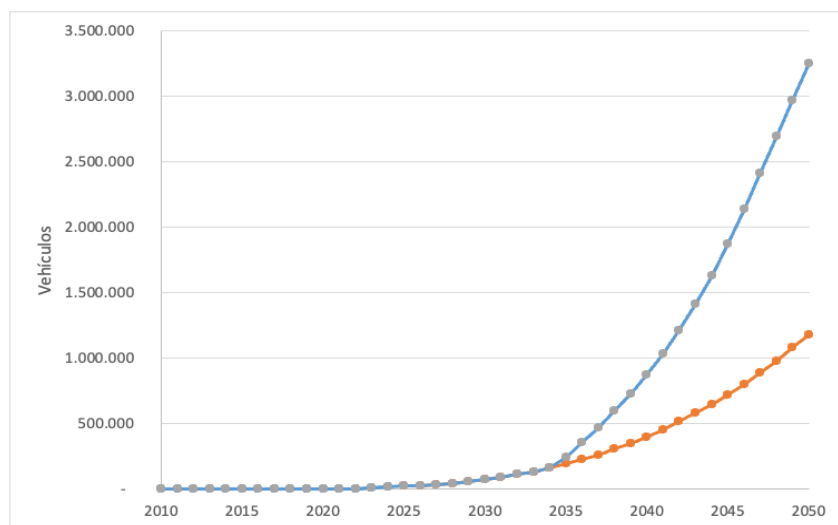


Fuente: elaboración propia con base en datos del MINAE

Sin embargo, la transición hacia el transporte eléctrico se haría más notoria si se dan dos posibles situaciones: que los países productores de automóviles como la Comunidad Europea, los Estados Unidos y otros productores asiáticos acuerden finalmente la prohibición de vehículos de combustión interna a partir del 2035, lo cual se ha puesto sobre la mesa como directrices políticas, que sin embargo, aún encuentran importantes detractores entre la industria automovilística y en la misma arena política. La otra situación es que Costa Rica defina que prohíba la importación de vehículos que no sean eléctricos a partir del 2035.

Cualquiera que sea el origen de este panorama, para el 2035 en adelante no habría opción que importar y comprar autos nuevos si no son eléctricos. El efecto de estas políticas se vería en el crecimiento de la flota eléctrica como se ve en el Gráfico 94, en el que para el 2050 se alcanza una flota vehicular de 3.254554 vehículos, constituyendo el 77,63% de la flota total del país.

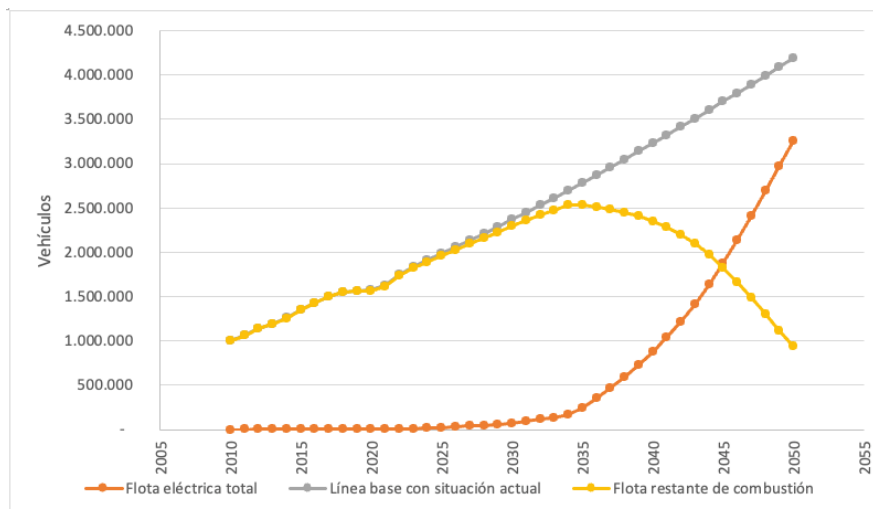
Gráfico 94 Flota de vehículos eléctricos y flota total 2010-2050



Fuente: elaboración propia con base en datos del MINAE

El cambio de modalidad hacia el transporte eléctrico se ve con mayor impacto en esta situación de políticas para el 2035 (Gráfico 95). La línea base en gris de vehículos proyectados, se ve más impactada con la introducción de vehículos eléctricos bajo las políticas mencionadas para el 2035. La disminución de la flota restante con motores de combustión interna es más marcada.

Gráfico 95 Transición hacia flota de vehículos eléctricos según políticas al 2035



Fuente: elaboración propia con base en datos del MINAE

El Cuadro 81 muestra el tamaño de la flota eléctrica para años seleccionados según sea el supuesto sobre su crecimiento: un crecimiento de acuerdo con la tendencia mostrada en la actualidad o un crecimiento debido a los efectos de políticas internacionales de prohibir la producción o nacionales para prohibir la importación de vehículos de combustión interna.

Cuadro 81 Flota de vehículos eléctricos según crecimiento esperado

Año	Flota según tendencia	Flota con políticas 2035
2024	20.020	20.020
2025	24.086	24.086
2030	74.830	74.830
2040	401.963	876.237
2050	1.179.040	3.254.554

Fuente: elaboración propia

Red de recarga eléctrica

La transición hacia el transporte eléctrico tiene otro componente importante, como lo es la creación de una red de recarga amplia en el país para atender el crecimiento en la flota e incentivar su uso y la confianza de los usuarios, ya que una de las principales barreras para la inserción de los vehículos eléctricos es el temor de los usuarios de realizar viajes de larga distancia y quedarse sin carga de batería en el camino⁴⁶. Para junio del 2024 el país tenía un total de 423 puntos de carga para autos eléctricos en todo el país⁴⁷. Con una flota total de 20.020 vehículos eléctricos en el 2024, la relación de puestos de recarga por cada 1000 vehículos eléctricos es de 21 estaciones. Sólo mantener esa relación ante la transición hacia la electrificación del transporte total al 2050, de acuerdo con la proyección de vehículos para ese año, sólo basada en su tendencia de crecimiento actual, implicaría la necesidad de unas 24.912 estaciones de carga para el 2050. Con la proyección de crecimiento de la flota vehicular siguiendo políticas internacional o nacionales para el 2035, implicaría la necesidad de 63.667 estaciones de recarga para el 2050.

Las inversiones de la red de centros de recarga de las empresas distribuidoras de energía eléctrica, correrán por el presupuesto propio de estas empresas, pero no incluye los sistemas de recarga para transporte público, que serán desarrollados gradualmente entre el Estado y las empresas de transporte.

5.4 Reducción de emisiones

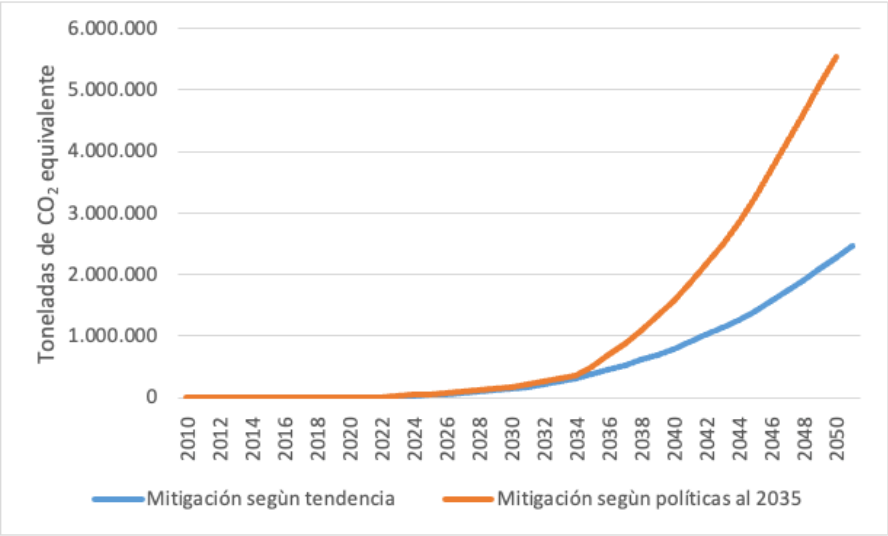
El Gráfico 96 muestra los efectos en términos de reducción de emisiones de GEI con un escenario en el que la flota vehicular crece en el futuro de acuerdo con su tendencia actual y otro escenario en el que la flota se incrementa en mayor medida debido a las políticas internacionales y nacionales a partir de 2035.

⁴⁶ MINAE (2019).

⁴⁷ Datos de Asomove con Electromaps <https://www.electromaps.com/es/puntos-carga/costa-rica>

La reducción de emisiones que se alcanza para el 2050 con las políticas internacionales de prohibición de construcción de autos de combustión interna o políticas nacionales para prohibir su importación, sería más que el doble que si el país sigue la fuerte tendencia de la actualidad.

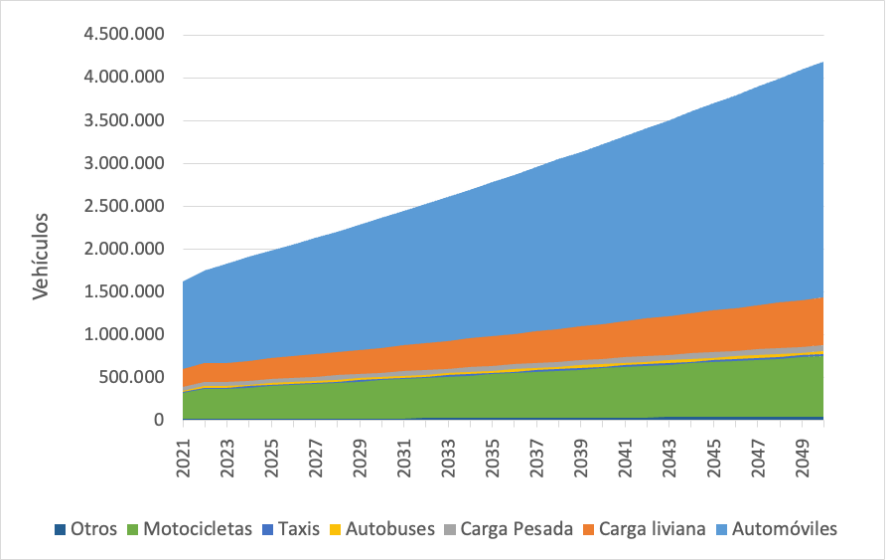
Gráfico 96 Reducción de emisiones de GEI por escenario de flota eléctrica



Fuente: elaboración propia

El gráfico 97 presenta las estimaciones que han realizado del tamaño de la flota vehicular por tipo de vehículo.

Gráfico 97 Escenario 2: Proyección de Flota de Transporte



Fuente: elaboración propia

Para determinar el consumo de combustibles en los dos escenarios, al número de vehículos en cada flota proyectada se le aplican los factores indicados en el Cuadro 82. Para los híbridos-eléctricos se supone que un 70% de la energía es eléctrica y 30% combustible fósil, aplicando los factores para autos híbridos y autos eléctricos en dicha proporción. Se utiliza el supuesto que, con acciones como teletrabajo, relocalización urbana, restricción vehicular y otras medidas de contención de la demanda, se logra un ahorro en el consumo adicional del 15%.

Cuadro 82 Factores por Tipo de Vehículo

Factores Autos Híbridos*	
Consumo de combustible Fósil (Km/L)	13,74
Consumo de combustible híbrido (Km/L)	20,90
Factores Autos Eléctricos	
Consumo de combustible promedio (Km/L)	16,38
Consumo de electricidad (km/kWh)	6,2
Factores Autos Gas	
Gasolina (TJ/Litro)	0,000033
LPG (TJ/Litro)	0,000026
Factores Motores Eficientes (15% de mayor eficiencia)	
Consumo de combustible auto base (Km/L)	15,93
Consumo de combustible auto eficiente (Km/L)	19,20
Mezcla en Biocombustibles	
Bioetanol (Mezcla)	10%
Biodiesel	7%

Fuente: Elaboración propia con datos del MINAE

5.4.1 Resultados para el escenario de mitigación

Los resultados para el escenario de mitigación se presentan en el Gráfico 95. En este escenario se reconocen que algunas medias de eficiencia en los motores y acciones de descongestionamiento como teletrabajo, restricción vehicular metropolitana, introducción de vehículos eléctricos, uso de vehículos híbridos, educación vial y mejoras en infraestructura metropolitana. Sin embargo, las medidas de mayor impacto, como los trenes eléctricos metropolitano y de carga del atlántico, así como la modernización del sistema de transporte remunerado de servicio de buses metropolitano y su integración multimodal con el servicio de tren y otras modalidades de transporte, son medidas que aún no se han introducido y no se tiene una programación en el tiempo para las mismas. En este modelo de mitigación se supone que las medidas se comienzan a aplicar desde el 2026-2028, con una habilitación de infraestructura paulatina. Se puede observar que acciones como el tren eléctrico y el bus tienen poco efecto en

la reducción total de emisiones, pero su principal importancia radica en las posibilidades de aplicar medidas de contención del uso del auto privado teniéndose la posibilidad de un transporte público moderno. El impacto de los vehículos híbridos es reducido y ceden su lugar a los autos eléctricos en la transición que se explicó sobre estas tecnologías. Medidas como biodiesel, bioetanol y medidas de ahorro suman al esfuerzo de mitigación en transporte, pero se puede observar que no son medidas que logren producir un cambio fundamental en las emisiones del sector.

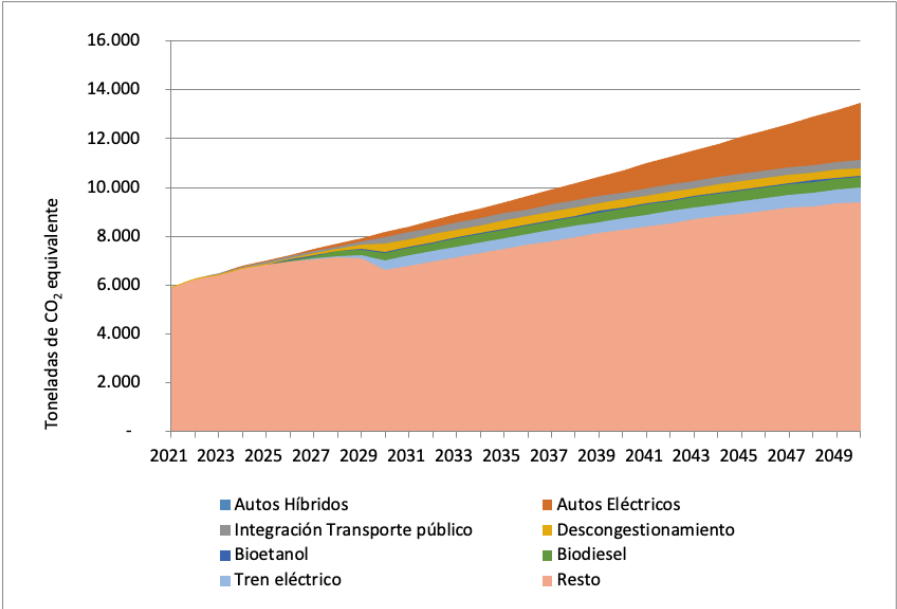
Los factores de emisión del Cuadro 83 se utilizan para estimar las emisiones y la mitigación correspondiente con los escenarios analizados y las medidas respectivas.

Cuadro 83 Factores de Emisión de Hidrocarburos

Tipo de Combustible	Toneladas CO ₂ e/TJ
Coque	93,4
Diésel	73,9
Kero	73,4
GLP	63,3
Gasolina	69,2
Bioetanol	16,5
Biodiesel	45,8
Fuel oil	77,3

Fuente: IMN

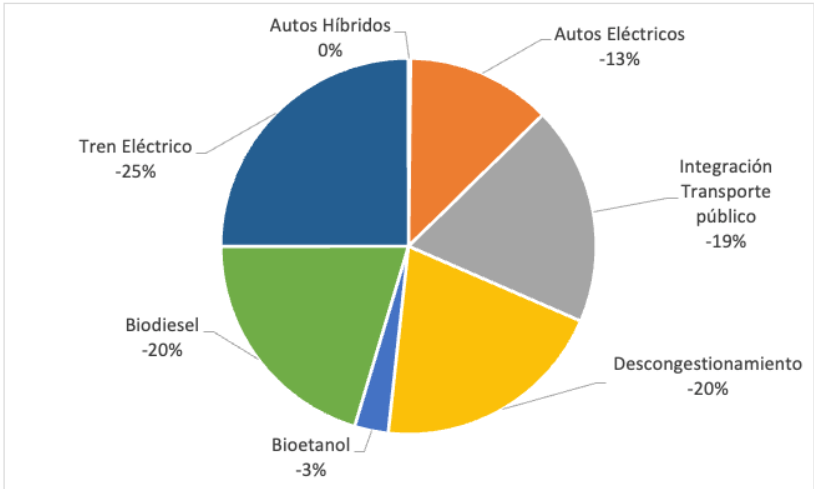
Gráfico 98 Escenario de mitigación por medidas en transporte



Fuente: elaboración propia

El potencial de contribución en ese escenario en el 2030 es una disminución de las emisiones de la línea base en emisiones de transporte del 19%. El Gráfico 99 presenta la contribución de cada medida en esta potencial mejora en las emisiones, suponiendo la implementación gradual de dichas medidas.

Gráfico 99 Composición de la reducción en emisiones proyectada para el 2030

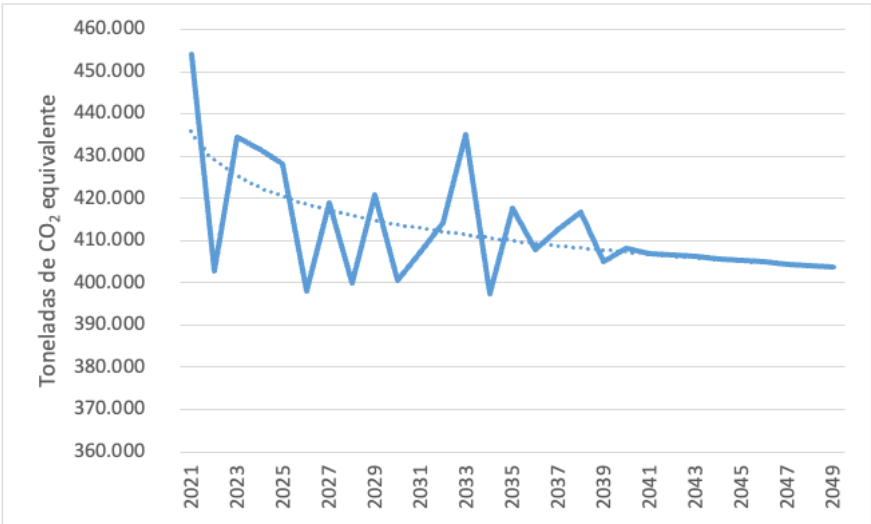


Fuente: elaboración propia

5.4.2 Subsector Eléctrico

En el Gráfico 100 se presenta las estimaciones de emisiones del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) en el Plan de expansión de la generación eléctrica (PEG) 2022-2040. Estas estimaciones se realizaron por el ICE hasta el 2040, por lo que las estimaciones 2040 a 2050 son propias, como se observa en el gráfico.

Gráfico 100 Emisiones estimadas a partir del PEG 2022-2040



Fuente: elaboración con datos de ICE (2021)

Para el sub-sector eléctrico, la NDC plantean la meta de alcanzar y mantener una generación eléctrica 100% renovable al 2030, por lo que en el Cuadro 84 señala las emisiones que se deben reducir de acuerdo con el escenario del sector energético.

Cuadro 84 Mitigación esperada por generación 100% renovables (ton CO₂ equivalente)

Año	Emisiones
2025	107.058
2026	99.526
2027	104.744
2028	200.040
2029	210.428
2030	400.606
2031	407.392
2032	414.120
2033	435.120
2034	397.440
2035	417.760
2036	407.889
2037	412.533
2038	416.718
2039	404.976
2040	408.226
2041	407.110
2042	406.639
2043	406.189
2044	405.760
2045	405.348
2046	404.954
2047	404.575
2048	404.210
2049	403.859
2050	403.520

Fuente: elaboración con datos del ICE (2021)

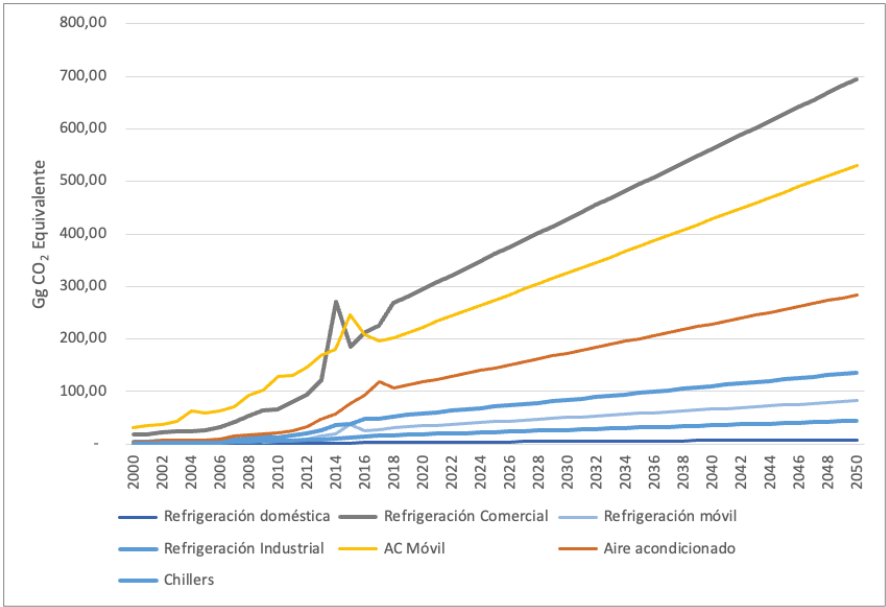
5.5 Sector de Procesos Industriales y Uso Productos

En el sector de Procesos industriales y uso productos, las emisiones de gases HFCs se basan en el uso de HFC-32, HFC-125, HFC-134a, HFC-143a, HFC-152a y HFC-23 para cada categoría de uso, que incluye Refrigeración doméstica, Refrigeración Comercial, Refrigeración Industrial, Refrigeración móvil, Chillers, Aire acondicionado y AC Móvil.

Con base en la tendencia de cada HFCs, se modeló el crecimiento esperado hasta el 2050, de acuerdo con el escenario Business as Usual (BAU). Las políticas del país han venido

promocionando un uso más racional, no obstante, el país es signatario de la Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal, para reducir progresivamente los hidrofluorocarbonos (HFC) y promover los refrigerantes de bajo poder de calentamiento global. Costa Rica ratificó la Enmienda de Kigali en mayo de 2018, comprometiéndose a reducir gradualmente los hidrofluorocarbonos (HFC), que son sustancias agotadoras de la capa de ozono. El periodo de aplicación es 2020-2030 y a partir de este último año, el país se comprometió a sustituir los HFCs por refrigerantes de bajo poder de calentamiento global. El gráfico 101 muestra las proyecciones de uso de los HFC en varias actividades de refrigeración y AC, y se plantea un escenario de crecimiento sostenido en el uso de todos ellos.

Gráfico 101 Porcentaje de Generación con Fuentes Renovables para Escenarios de Referencia y Mitigación



Fuente: elaboración con datos del IMN-INGEI 2017

El Cuadro 85 muestra las emisiones de CO₂ equivalente que el país reducirá al sustituir los HFCs por refrigerantes de bajo poder de calentamiento global.

Cuadro 85 Emisiones por reducir en uso de productos (ton CO₂ equivalente)

Año	Refrigeración y CA	Protección Incendios	Aerosoles	Flúor al vidrio
2030	1.094.094	1.532	530	4.483
2031	1.128.447	1.588	550	4.573
2032	1.162.799	1.645	569	4.663
2033	1.197.152	1.701	589	4.752
2034	1.231.504	1.757	608	4.842
2035	1.265.856	1.814	628	4.932
2036	1.300.209	1.870	647	5.021
2037	1.334.561	1.926	667	5.111
2038	1.368.914	1.982	686	5.201

Año	Refrigeración y CA	Protección Incendios	Aerosoles	Flúor al vidrio
2039	1.403.266	2.039	706	5.291
2040	1.437.618	2.095	725	5.380
2041	1.471.971	2.151	745	5.470
2042	1.506.323	2.207	764	5.560
2043	1.540.676	2.264	784	5.649
2044	1.575.028	2.320	803	5.739
2045	1.609.380	2.376	823	5.829
2046	1.643.733	2.432	842	5.919
2047	1.678.085	2.489	862	6.008
2048	1.712.438	2.545	881	6.098
2049	1.746.790	2.601	901	6.188
2050	1.781.142	2.657	921	6.277

Fuente: elaboración con datos del IMN-INGEI 2017

5.6 Sector Agropecuario

Para el sector agropecuario se analizan un escenario de mitigación en donde varía el alcance de la mejora en la alimentación animal, lo que implica disminuciones en los procesos de fermentación entérica y manejo de estiércol en el caso del ganado vacuno. En este sector también se identificaron dos medidas de mitigación adicionales. Una medida está relacionada con un programa de reducción en el uso de fertilizantes, mientras que la otra forma parte de la NAMA de ganadería,⁴⁸ y consiste en la introducción de más árboles en las fincas ganaderas (sistemas silvopastoriles). Sin embargo, esta última medida se analiza en la sección correspondiente al sector forestal.

5.6.1 Producción ganadera baja en emisiones

Como parte de la Estrategia de Ganadería Baja en Carbono⁴⁹, el MAG ha venido analizando con el sector productivo vacuno alternativas para reducir las emisiones. El MAG reconoce que el sector ha venido introduciendo prácticas de mejoras en alimentación y pastos como parte de su estrategia de aumento de productividad y para enfrentar las condiciones climáticas cambiantes. Sin embargo, la adopción de prácticas de producción ganadera baja en emisiones no ha sido ampliada por parte de los productores debido a la ausencia de condiciones favorables, especialmente financiamiento y asistencia técnica. Lo que el MAG visualiza para el futuro es un crecimiento de la actividad ganadera debido a, entre otras razones, precios crecientes de la carne que promuevan el aumento de su oferta. Esto podría generar mayores emisiones y el riesgo de

⁴⁸ MAG (2013).

⁴⁹ MAG (2015). La Estrategia de Ganadería Baja en Carbono. Sam José: Ministerio de Agricultura y Ganadería.

la reducción de los sumideros ubicados en las fincas ganaderas, los que serían sustituidos por áreas de pastos.

La Estrategia de Ganadería Baja en Carbono propone mejorar el desempeño de la ganadería y contribuir con una mayor productividad y rentabilidad, reducir emisiones de GEI y aumentar el secuestro de CO₂. Las medidas buscan transformar el escenario BAU por una serie de condiciones que se describen a continuación:

- Fortalecimiento del monitoreo, reporte y verificación (MRV) para crear un sistema intensivo en conocimiento y movilizar a los productores hacia la ganadería de precisión.
- Implementación de medidas de mitigación en mejora de alimentación animal con un 80% de las fincas en un período de quince años.
- Implementación de las prácticas para incrementar la productividad y rentabilidad para los ganaderos, en equilibrio con la reducción de emisiones de GEI y aumento el secuestro de dióxido de carbono.

Las opciones de mitigación parten de una mejora en la alimentación del ganado que reduzca las emisiones por fermentación entérica y el manejo de estiércol, lo que implica nuevas prácticas como mejora de pasturas, opciones variadas de alimentación, rotación de pasturas, mejora genética y mejor gestión de la finca. El Cuadro 86 muestra una serie de nuevas prácticas en alimentación que se acompañarían con técnicas de ganadería de precisión, con lo que las prácticas se implementarían de acuerdo con una serie de condiciones en la finca. La Estrategia de Ganadería Baja en Carbono hizo un diseño de clústeres en las fincas del país para reconocer un alcance diferenciado de estas medidas. Otro aspecto que se trabajará paralelamente, pero como un objetivo de largo plazo, es la mejora genética, lo cual ha sido una práctica en el país a través de los años, de tal manera que se cuenta con un hato ganadero muy adaptado a las diversas condiciones del país. Sin embargo, en materia de cambio climático todavía son muchos los retos en términos de adaptación a futuras condiciones climáticas y en mejora genética para lograr resultados de fermentación entérica con menos impacto en emisiones de metano.

Cuadro 86 Medidas de Manejo de la Alimentación y la Finca

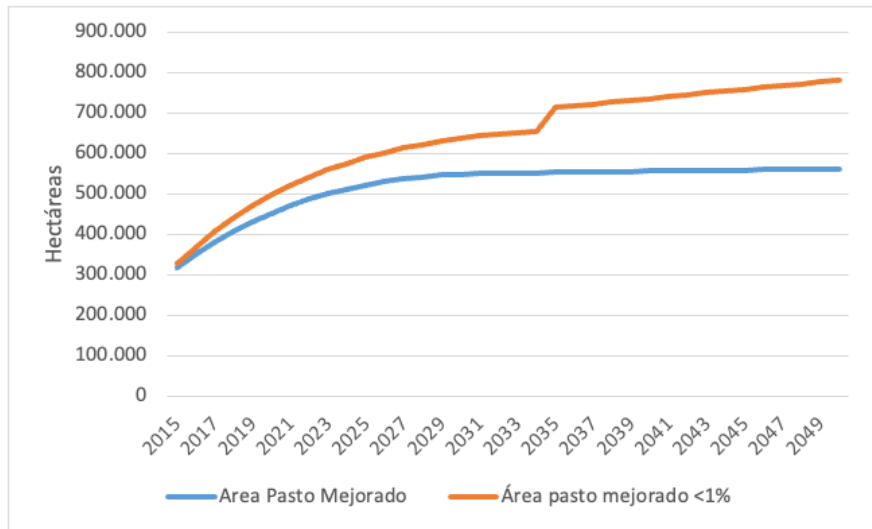
Alternativa	Prácticas o Componentes
Mejor manejo de pastos	Potreros más pequeños
	Cercos eléctricos
	Rotación de potreros
	Control sistemático de malezas
	Fertilización (opción A química)
	Fertilización (orgánica opción B)
Sistemas silvopastoriles	Arboles dispersos en potrero

Alternativa	Prácticas o Componentes
	Bosquetes y parches Cercas vivas Ramoneo de Leguminosas arbustivas
Plantaciones forestales	Teca Melina
Bancos forrajeros	Caña de azúcar Sorgo forrajero King grass Cratylia y otras leguminosas
Ensilajes	En bolsa (pastos nutritivos) Pacas (pastos nutritivos) Silo-pacas (pastos nutritivos) Silo de piso (maíz o sorgo)
Manejo de la finca-negocio	Control de sanidad Manejo reproductivo Mejoramiento genético Decisiones de saca de ganado improductivo Gestión de riesgos Suplementación estratégica y diferenciada Manejo de costos
Infraestructura y equipos	Instalaciones de manejo Sala y equipos de ordeño Romana para control de pesos Equipos de campo (motoguadañas, bombas de aspersión)
Pacas	Trasvala Braquipara Arroz
Concentrados	Varios

Fuente: MAG (2015)

El escenario de mitigación surge a partir de la tasa de incremento de pastos mejorados que se plantee el sector. En el Gráfico 102 se muestra el crecimiento de áreas de pastos mejorados en el escenario de referencia y en un escenario donde la tasa de crecimiento es del 1%.

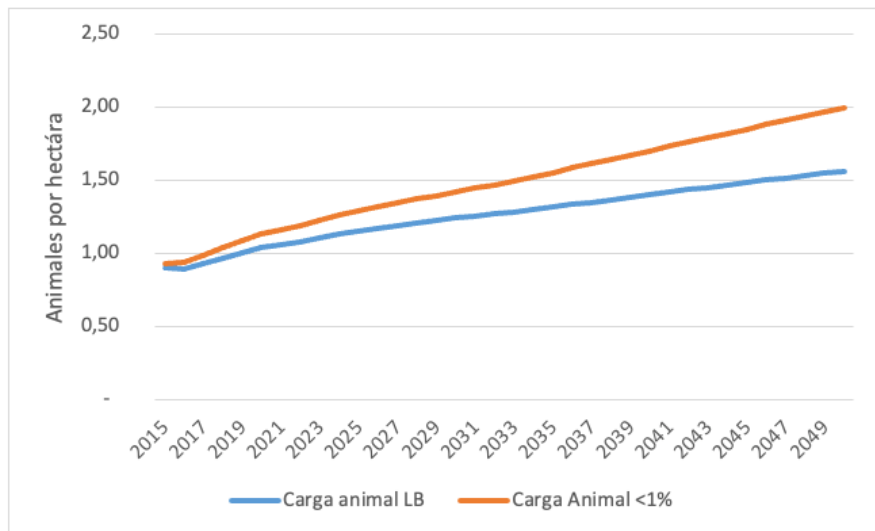
Gráfico 102 Escenarios de Pastos Mejorados



Fuente: MAG (2015)

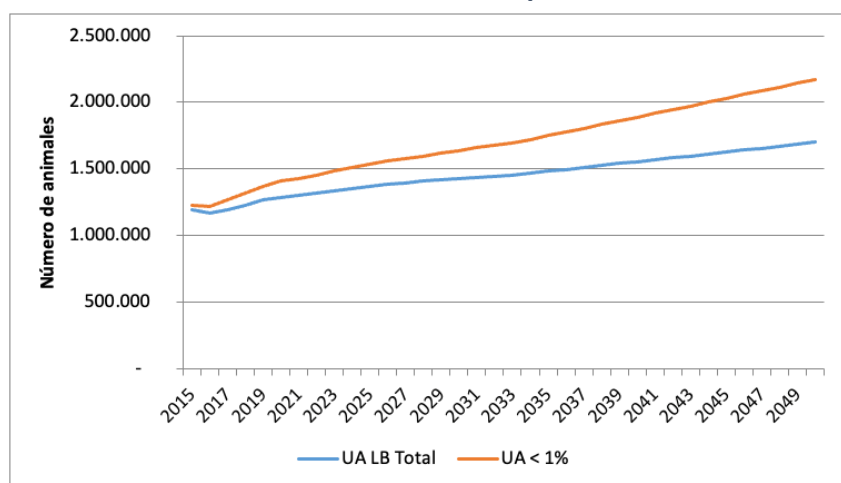
El efecto del ritmo en mejora de pastos se observa en la capacidad de carga animal en los diversos tipos de finca (Gráfico 103). Dependiendo del clúster al que pertenece la finca, la mejora de pastos es acompañada con otras medidas de mejora en la capacidad de alimentación del ganado. Los resultados del hato ganadero esperado en cada escenario se presentan en el Gráfico 104.

Gráfico 103 Escenarios de Carga Animal



Fuente: MAG (2015)

Gráfico 104 Hato Ganadero por Escenario



Fuente: MAG (2015)

Uno de los efectos esperados con la introducción de pastos mejorados y una dieta bajo un manejo de precisión es la disminución en las emisiones por fermentación entérica y por manejo de estiércol. La Estrategia de Ganadería Baja en Carbono plantea que, en el escenario de mitigación, la disminución en las emisiones por cabeza de ganado es de 0,6% anual. Los factores se diferencian muchos de los oficialmente aplicados en los inventarios nacionales de GEI.

5.6.2 Reducción de un 15% en el Uso de los Fertilizantes Nitrogenados

Uno de los retos más importantes que enfrenta el sector agropecuario es el manejo racional de los fertilizantes nitrogenados por su alto efecto en las emisiones de óxido nitroso (N_2O). Como medida de mitigación se ha incorporado un programa cuyo objetivo general es la reducción del 15% en el uso de fertilizantes en el sector agropecuario. Esta sería una meta global, ya que cada actividad agropecuaria tendría una meta diferenciada según el avance que hasta la fecha ha tenido en el uso racional de los fertilizantes nitrogenados, su potencial de reducción y su factibilidad de implementación de acuerdo con la dispersión de los productores respecto al alcance que pueda tener el programa. Este programa se estima que implicaría un costo incremental del 20% en el uso de la fertilización y producción, además del costo de implementación del programa. En el Cuadro 87 se muestran los parámetros usados en el programa de reducción de fertilizantes.

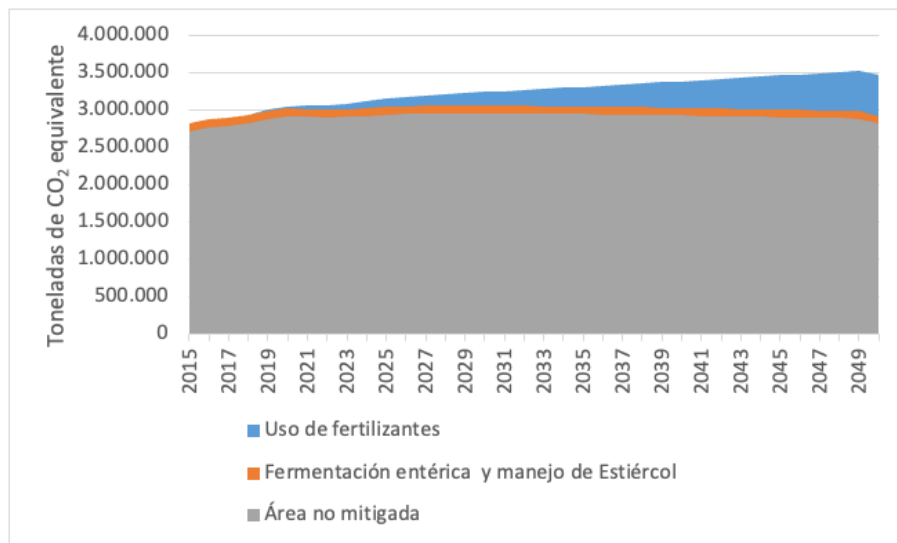
Cuadro 87 Parámetros del Programa de Reducción de Fertilizantes

Consumo	
Consumo aparente (kg)	265,738,453
En sacos de 45 kg	5,905,299
Porcentaje nitrogenado	60,31%
Sacos de nitrogenado	3,561,486
Costo promedio por saco (colones)	14,662
Costo total (millones de colones)	52,219
Área	
Pasturas (ha)	1,044,910
Cultivos permanentes (ha)	377,214
Labranza (ha)	167,133
Cultivos permanentes (ha)	141,363
Total (ha)	1,730,620
Sacos/ha	2,06
Costo/ha (colones)	30,173

Fuente: elaboración propia con datos de INEC y MEIC

El potencial de reducción de ambos escenarios de mitigación se muestra en el Gráficos 105.

Gráfico 105 Impacto de Medidas Agropecuarias en Escenario de mitigación



Fuente: Elaboración propia con datos del IMN y MAG(2015)

5.7 Sector Forestal

Por parte del sector forestal como medidas de remoción de CO₂ se incluyeron las siguientes cuatro acciones: 1. Incorporación de área adicional de PSA para la captura de carbono en nuevas plantaciones forestales; 2. Incorporación de área adicional de PSA para evitar la deforestación en

bosques maduros; 3. Incorporación de área adicional de PSA para la captura de carbono en bosques nuevos; y 4. Introducción de más árboles en las fincas ganaderas (sistemas silvopastoriles). Las primeras tres acciones forman parte de la propuesta de programa de reducción de emisiones REDD+ (FONAFIFO ER-PIN). La cuarta acción es parte de la Estrategia de Ganadería Baja en Carbono.

Cuadro 88 Opciones de REDD+ Considerados en el ER-PIN y Área Estimada

Opción	Tenencia	Opción de Reducción de Emisiones	Área PSA (ha)
A	Bosques privados y Reservas Indígenas	Incorporación de área adicional de PSA para evitar la deforestación en bosques maduros	107,600
B	Bosques privados	Incorporación de área adicional de PSA para evitar deforestación en bosques de regeneración media	19,191
C	Terrenos privados	Incorporación de área adicional de PSA para la captura de carbono en bosque nuevos	124,282
D	Terrenos privados	Incorporación de área adicional de PSA para la captura de carbono en nuevas plantaciones forestales	72,132
E	Reservas Indígenas	Incorporación de área adicional de PSA para la captura de carbono en nuevos bosques regenerados en Territorios Indígenas	18,742
F	No Aplica	El almacenamiento de carbono en los productos de madera recolectada (PMR) mediante el aumento de consumo de madera	-
Total			341,946

Fuente: Costa Rica ER-PIN FONAFIFO

La proyección de emisiones producto de la incorporación de área adicional de PSA para la captura de carbono a partir de nuevas plantaciones forestales se realizó utilizando la Herramienta CDI desarrollada por Carbon Decisions International. La aplicación de esta herramienta requiere de la definición de los siguientes parámetros: a) Plantaciones forestales a establecerse; y b) Existencias y cambios de existencias de carbono por hectárea en plantaciones forestales.

La cantidad de plantaciones nuevas a establecerse durante el periodo 2021-2050 se define en 70.000 ha, muy cerca de las 72.132 ha sugeridas en la propuesta de programa de reducción de emisiones presentado por el Gobierno de Costa Rica ante el Fondo de Carbono. Se asume que dichas plantaciones se establecerían con *Tectona grandis* (Teca) y *Gmelina arborea* (melina). Estas son las dos especies más utilizadas para la reforestación en Costa Rica. En el caso de teca se asume que se establecerían un total de 40,000 ha a una tasa de 2,000 ha/año⁻¹, con un ciclo de corta de 20 años. Con melina se establecerían 30,000 ha a una tasa de 3,000 ha/año⁻¹ y un ciclo de corta de 10 años. Tanto en el caso de la teca como melina, se asume que las áreas aprovechadas al final del turno son reforestadas nuevamente.

La proyección del cambio en las existencias de carbono en bosques maduros para la segunda acción se realizó utilizando la Herramienta CDI. Para tal efecto, esta herramienta requirió la definición de la tasa de deforestación en bosques maduros asociada a la incorporación de área adicional de PSA. Se utilizó la tasa estimada de deforestación para cada tipo de bosque maduro asociada a la incorporación de área adicional de PSA. Esta tasa se calculó considerando un área adicional de PSA de 107.600 ha. Esta cifra es la igual a la propuesta en el programa de reducción de emisiones presentado por el Gobierno de Costa Rica ante el Fondo de Carbono (FONAFIFO, 2012). Las 107.600 ha adicionales de PSA se distribuyeron proporcionalmente al tamaño del estrato de bosque maduro, asignando 70.845 ha para Bosques húmedos y pluviales (BHP), 34.831 ha en bosques muy húmedos (BHT) y 1.924 ha en bosques secos (BS) (Cuadro 94). Para estimar la tasa de deforestación de esta iniciativa se asume una deforestación de cero en el área adicional de PSA. Asimismo, se considera que durante el periodo 2016-2025 se mantendrá una tasa de incorporación de PSA anual fija para todos los estratos (7.084 ha en BHP; 3,483 ha en BHT; y 192 ha en BS). Las tasas de deforestación en bosque maduro resultantes de incorporar estas áreas de PSA adicional.

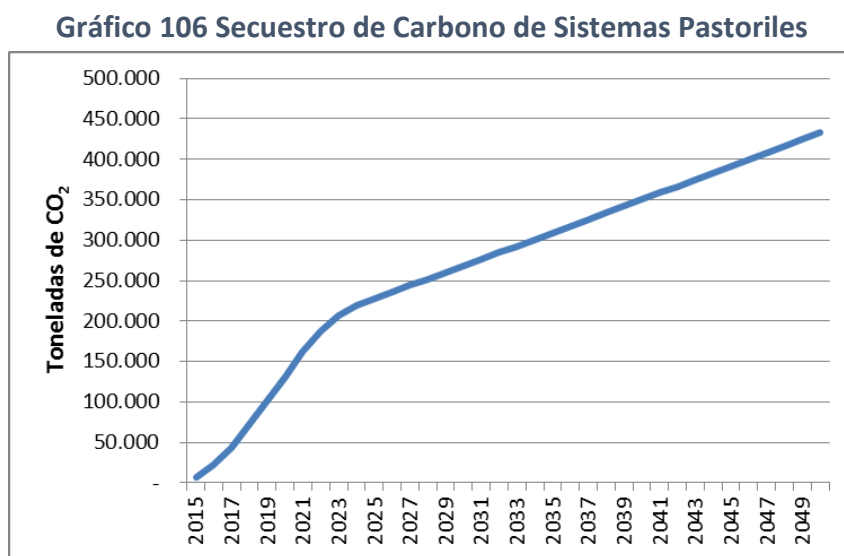
La proyección del cambio en las existencias de carbono en bosques nuevos se realizó utilizando la Herramienta CDI con la definición de la tasa de deforestación en bosques nuevos asociada a la incorporación de área adicional de PSA. Se utilizó la tasa estimada de deforestación para cada tipo de bosque nuevo asociada a la incorporación de área adicional de PSA. Esta tasa se calculó considerando un área adicional de PSA de 124.282 ha. Esta cifra es la igual a la propuesta en el programa de reducción de emisiones presentado por el Gobierno de Costa Rica ante el Fondo de Carbono (FONAFIFO, 2012). Las 124.282 ha adicionales de PSA se distribuyeron proporcionalmente a la cantidad de bosques nuevos reclutados en el periodo 2011-2013 por cada estrato de bosque, asignando 40.232 ha para Bosques húmedos y pluviales (BHP), 82.347 ha en bosques muy húmedos (BHT) y 1.702 ha en bosques secos (BS).

Para estimar la tasa de deforestación de esta iniciativa se asume una deforestación de cero en el área adicional de PSA. Asimismo, se considera que durante el periodo 2021-2020 se mantendrá

una tasa de incorporación de PSA anual fija para todos los estratos, de 5.747 ha en BHP, 11.764 ha en BHT y 243 ha en BS.

La Estrategia de Ganadería Baja en Carbono plantea los sistemas silvopastoriles con la plantación de árboles dispersos en un 35% del área de pasturas implementado en un periodo de 7 años. La arborización es para proporcionar sombra para el ganado y, a su vez, la captura de carbono. Los árboles ya en potreros, al alcanzar su vida útil, son utilizados por los agricultores para otros fines, por lo tanto, nuevos árboles deben ser sembrados después de ciertos períodos de tiempo para asegurar que la captura de carbono y los beneficios de sombra siguen estando presentes. También se contempla el aprovechamiento de la madera con extracciones de árboles en la finca.

El secuestro de carbono de los sistemas silvopastoriles se muestra en el Gráfico 106.



Fuente: elaboración propia con datos de Mag (2015)

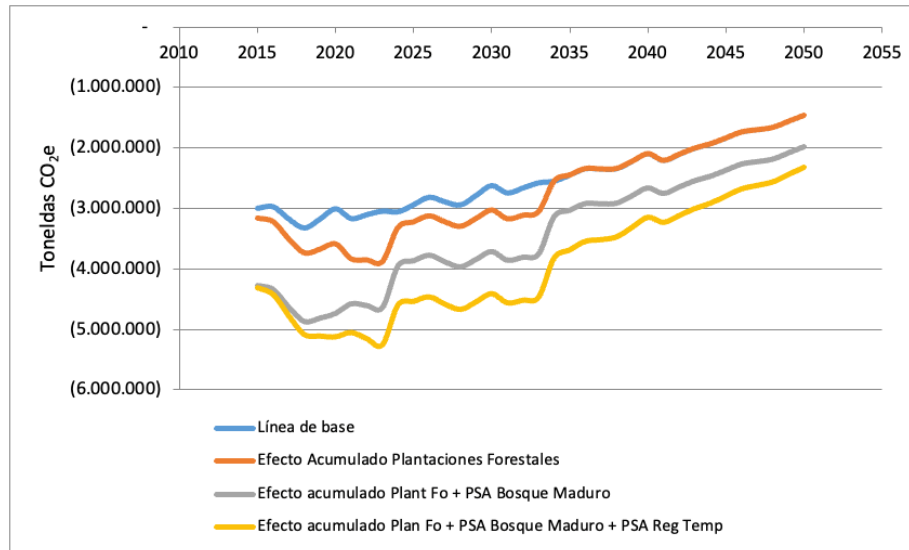
Con el conjunto de las medidas analizadas para el sector forestal (nuevas plantaciones forestales, deforestación evitada en bosques maduros, captura de carbono en bosques nuevos) más los sistemas silvopastoriles, se ha estimado el nivel de contribución del sector forestal como un todo. Se estimó el cambio total de emisiones de la implementación acumulativa de las cuatro acciones consideradas para el Sector Forestal. En el Cuadro 89 se consigna el cambio total de emisiones para cada una de las acciones. En el Gráfico 107 se muestra el cambio en las existencias de carbono en el sector forestal con respecto a la línea base para cada una de las acciones implementadas acumulativamente.

Cuadro 89 Reducción de Emisiones Estimadas de las Acciones Forestales

Año	Efecto Plantaciones forestales		Efecto PSA Bosque Maduro		Efecto PSA deforestación evitada Regeneración Temprana		Sistemas silvopastoriles	
	Mg CO ₂ -e año ⁻¹		Mg CO ₂ -e año ⁻¹		Mg CO ₂ -e año ⁻¹		Mg CO ₂ -e año ⁻¹	
2021	-	672.000	-	736.836	-	476.434	-	162.218
2022	-	756.000	-	745.497	-	550.867	-	187.175
2023	-	840.000	-	754.178	-	614.105	-	206.346
2024	-	264.000	-	625.380	-	649.594	-	219.866
2025	-	288.000	-	634.104	-	675.440	-	227.856
2026	-	312.000	-	642.847	-	692.946	-	235.875
2027	-	336.000	-	651.612	-	703.248	-	243.921
2028	-	360.000	-	660.396	-	707.343	-	251.993
2029	-	384.000	-	669.201	-	706.117	-	260.088
2030	-	408.000	-	678.027	-	700.358	-	268.205
2031	-	432.000	-	675.825	-	708.619	-	276.342
2032	-	456.000	-	684.942	-	714.526	-	284.497
2033	-	480.000	-	694.076	-	718.292	-	292.670
2034	-	-	-	578.228	-	691.377	-	300.859
2035	-	-	-	574.898	-	662.217	-	309.059
2036	-	-	-	571.584	-	631.150	-	317.270
2037	-	-	-	568.288	-	598.488	-	325.490
2038	-	-	-	565.009	-	564.515	-	333.717
2039	-	-	-	561.746	-	529.489	-	341.952
2040	-	-	-	558.501	-	493.642	-	350.196
2041	-	-	-	537.169	-	485.926	-	358.446
2042	-	-	-	534.217	-	478.288	-	366.704
2043	-	-	-	531.280	-	470.734	-	374.967
2044	-	-	-	528.357	-	453.907	-	383.236
2045	-	-	-	525.448	-	436.930	-	391.511
2046	-	-	-	522.554	-	419.829	-	399.790
2047	-	-	-	519.673	-	402.626	-	408.073
2048	-	-	-	516.807	-	385.340	-	416.361
2049	-	-	-	513.956	-	367.992	-	424.652
2050	-	-	-	511.118	-	350.598	-	432.947

Fuente: elaboración propia con estimaciones con base en datos de FONAFIFO y Herramienta CDI

Gráfico 107 Emisiones del Sector Forestal en Escenario de Referencia y con las Medidas



Fuente: elaboración propia con estimaciones con base en datos de FONAFIFO y Herramienta CDI

5.8 Potencial de Mitigación con las medidas identificadas

El conjunto de medidas de reducción y remoción de las emisiones que han sido identificadas y cuantificadas en este análisis preliminar, se observan en el cuadro 90.

Cuadro 90 Escenario de emisiones de GEI con medidas de mitigación por sector y total neto 2021-2050 (Toneladas CO₂e)

Año	Subsector	Sector	Procesos y usos			Sector	Total
			Residuos	Industriales			
	Hidrocarburos	Agropecuario				Forestal	
2021	7.812.386	2.914.515	2.746.627	1.609.822	-	3.523.170	11.560.180
2022	8.220.229	2.899.227	2.838.498	1.661.095	-	3.926.200	11.692.848
2023	8.443.591	2.912.208	2.895.421	1.712.362	-	4.335.185	11.628.398
2024	8.736.766	2.930.259	2.965.961	1.763.623	-	4.812.525	11.584.083
2025	8.875.898	2.945.768	3.046.091	1.814.878	-	4.762.791	11.919.844
2026	9.033.710	2.952.400	3.062.569	1.866.128	-	4.698.023	12.216.784
2027	9.162.642	2.955.836	3.083.358	1.917.373	-	4.825.413	12.293.796
2028	9.190.041	2.958.391	2.965.975	1.968.613	-	4.920.702	12.162.318
2029	9.245.055	2.961.479	2.935.722	2.019.849	-	4.804.152	12.357.952
2030	8.767.343	2.963.392	2.877.248	970.440	-	4.677.949	10.900.475
2031	8.966.851	2.962.865	2.831.012	987.150	-	4.836.608	10.911.270
2032	9.166.076	2.959.856	2.771.474	1.003.855	-	4.801.275	11.099.985
2033	9.344.001	2.954.563	2.711.852	1.020.557	-	4.761.711	11.269.262
2034	9.574.935	2.951.631	2.641.422	1.037.255	-	4.119.603	12.085.641
2035	9.758.025	2.949.283	2.564.349	1.053.950	-	3.994.040	12.331.568

Año	Subsector Hidrocarburos	Sector Agropecuario	Sector Residuos	Procesos y usos		Sector Forestal	Total
				Industriales	-		
2036	9.945.140	2.946.092	2.595.568	1.070.642	-	3.861.802	12.695.640
2037	10.132.044	2.942.662	2.626.400	1.087.331	-	3.842.047	12.946.390
2038	10.312.379	2.939.010	2.656.834	1.104.016	-	3.804.828	13.207.412
2039	10.510.707	2.935.154	2.691.801	1.120.699	-	3.653.517	13.604.844
2040	10.677.677	2.931.114	2.721.413	1.137.379	-	3.499.436	13.968.147
2041	10.849.830	2.926.908	2.750.578	1.154.057	-	3.589.816	14.091.557
2042	11.013.963	2.922.558	2.779.282	1.170.732	-	3.485.618	14.400.917
2043	11.179.756	2.918.084	2.807.511	1.187.404	-	3.380.817	14.711.938
2044	11.338.403	2.913.508	2.835.252	1.204.074	-	3.298.601	14.992.636
2045	11.480.289	2.908.852	2.862.490	1.220.742	-	3.190.075	15.282.299
2046	11.614.780	2.904.139	2.889.217	1.237.408	-	3.079.000	15.566.543
2047	11.768.653	2.899.393	2.915.422	1.254.072	-	3.030.109	15.807.431
2048	11.878.410	2.894.638	2.941.101	1.270.734	-	2.979.415	16.005.469
2049	12.007.007	2.889.900	2.966.252	1.287.393	-	2.867.286	16.283.266
2050	12.100.881	2.823.543	2.985.163	1.304.051	-	2.754.647	16.458.991

Fuente: elaboración propia

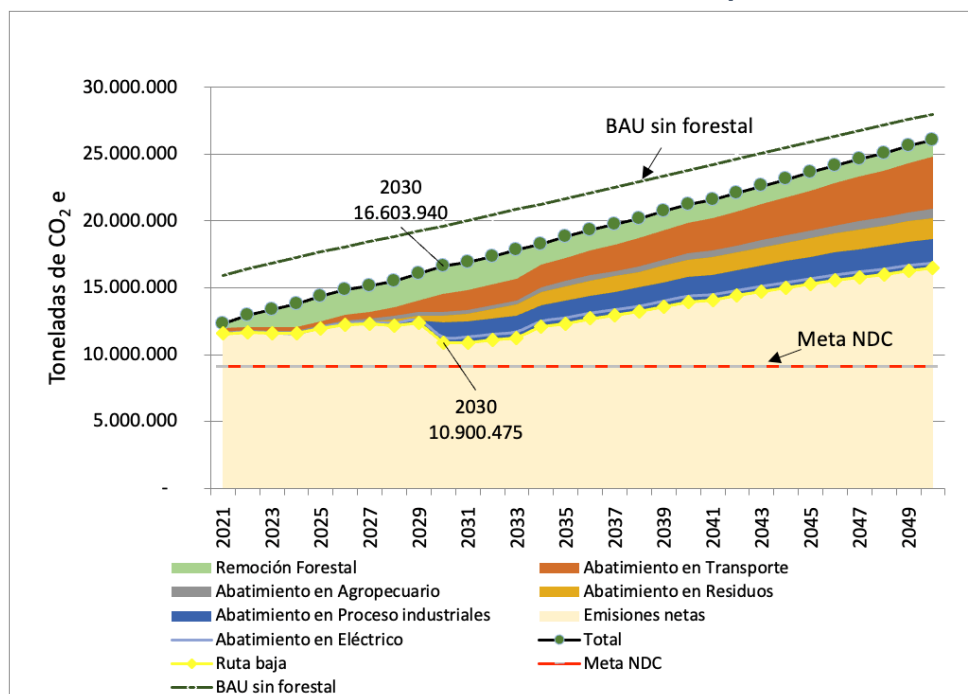
En este momento, el sector forestal sigue siendo el que contribuye a plantear una ruta de mitigación mayor hacia el 2030, sin embargo, este sector no está siendo acompañado por otros sectores para lograr los compromisos puestos en la NDC, de emisiones netas en el 2030 de 9,11 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂e). Lo que deja evidente este ejercicio es que la meta de la NDC de las emisiones netas del 2030 no está acompañada de suficientes acciones de descarbonización concretas y en ejecución, como se ve en el Gráfico 108.

Pese a que el proceso de identificación de medidas para modelar ha sido exhaustivo, basado en las acciones que han sido documentadas sobre el alcance que las contribuciones a la NDC, se plantea la necesidad de generar más datos e información para un mejor entendimiento de las medidas hasta ahora consideradas y otras que no se han incorporado al análisis por carecer de definición conceptual de su alcance o de datos que permitan ver su abatimiento potencial o costos asociados.

Este análisis preliminar ha permitido configurar un escenario en el cual el país debe implementar mayores medidas para los compromisos de la NDC. Se puede observar que desde el año 2015, cuando se presentó la primera NDC, en el país se han venido hablando de impulsar medidas en los sectores transporte, agropecuario y manejo de residuos sólidos, sin que se haya avanzado en la implementación concreta con las medidas, pese a los avances y esfuerzos por crear marcos habilitantes con normativa, políticas y programas, así como algunos avances en el sector agropecuario. El sector forestal no sólo es el que más contribuye con la remoción de emisiones, sino que el programa REDD+ es el que más acciones concretas ha venido desarrollando. La

contribución en remociones del sector forestal se aprecia mejor cuando se añade la línea base de emisiones sin el sector forestal, que está representada por la línea café discontinua. Cuando se introduce el sector forestal, la línea base de emisiones se desplaza hacia abajo para alcanzar la línea con puntos verde. Cuando se añade el escenario de abatimiento, el sector forestal se prevé que contribuya con el área verde claro a través de los años.

Gráfico 108 Abatimiento de emisiones totales y meta NDC



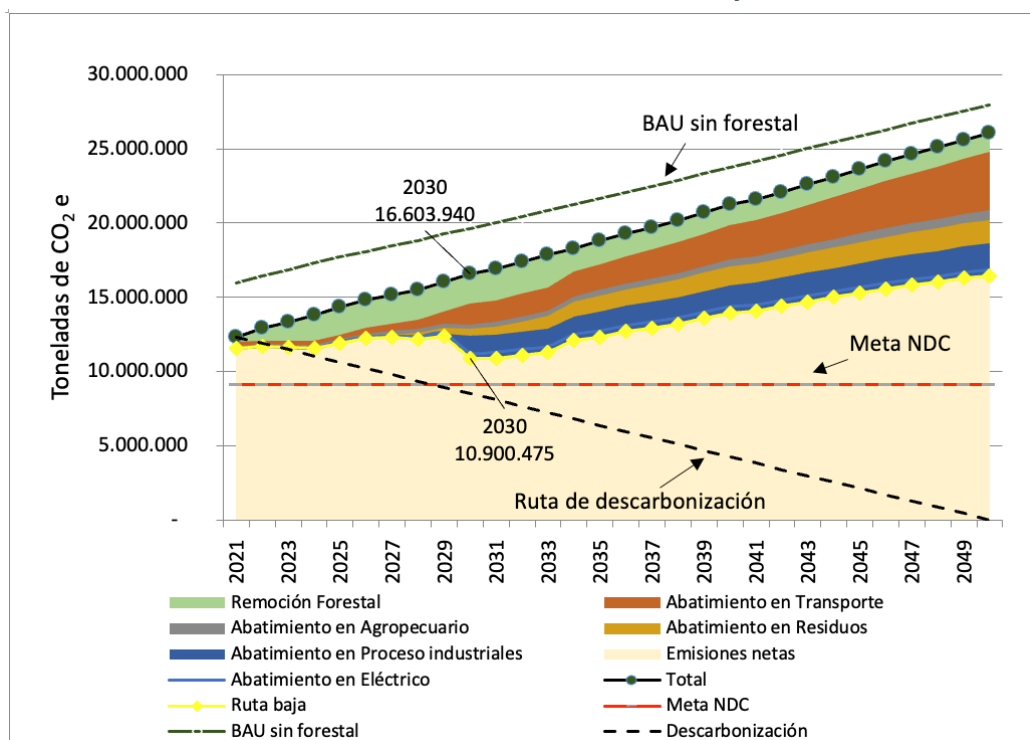
Fuente: elaboración propia

Las emisiones que se estiman para el 2030 serían de 10,9 millones de toneladas de CO₂e, que estarían por encima de los 9,11 millones de toneladas de CO₂e que plantea el compromiso NDC al respecto.

Un escenario aún más desafiante es el relacionado con el Plan Nacional de Descarbonización al 2050. El Gráfico 109 muestra que, si el país quiere seguir en la ruta de descarbonización de la economía para el 2050, el modelo escenario de mitigación no tiene identificadas las medidas necesarias para lograrlo, especialmente en términos de cuantificación, planeación y ejecución, ya que son varias la medidas de tipo aspiracional, esbozadas en políticas y programas de la agenda climática, que aún no se convierten en medidas concretas, con la métrica y el cronograma necesarios para poder configurar su potencial de mitigación.

El trabajo en concretar las acciones de mitigación, así como su ejecución en los años que faltan para el 2030, podría definir para el país las posibilidades reales de cumplimiento de la meta NDC de 9,11 millones de toneladas de CO₂e para ese año.

Gráfico 109 Abatimiento de emisiones totales, Meta NDC y ruta de descarbonización



Fuente: elaboración propia

6 Bibliografía

- Agresta (2015). Generación de los mapas de coberturas para el monitoreo de la deforestación, reforestación y degradación forestal para el proceso de construcción del nivel de referencia para el programa de Reducción de Emisiones del mecanismo REDD+ de Costa Rica. <https://agresta.org/project/generating-consistent-historical-time-series-of-activity-data-from-land-use-change-for-the-development-of-costa-ricas-reddplus-reference-level/>
- Bojórquez, Francisco y Hernández, Javier. Eficiencia energética en la movilidad: el gran reto. México: Eficiencia Energética, año 6, Número 24, periodo octubre-diciembre de 2019.
- EPYSA (2014). Apoyo al modelo general de sectorización de transporte público de San José, Costa Rica. Presentado a INTER-AMERICAN DEVELOPMENT BANK – IDB - WASHINGTON D.C. Consorcio EPYPSA - SIGMA GP
- Giegrich, Jürgen y Vogt, Regine (2009). IPCC Waste Model. <https://www.bivica.org/files/gases-invernadero-calculo.pdf>.
- Groves, David y otros (2020). Costos y beneficios de la descarbonización de la economía de Costa Rica: evaluación del Plan Nacional de Descarbonización bajo incertidumbre. (Monografía del BID, 863).
- ICE (2021). Plan de expansión de la generación eléctrica 2022-2040. San José: Instituto Costarricense de Electricidad, Área Planificación de la Generación.
- INCOFER (2014). Ficha Técnica del Proyecto SISTEMA DE TRANSPORTE RÁPIDO DE PASAJEROS del Gran Área Metropolitana (TRP). San José Costa Rica: Instituto Costarricense de Ferrocarriles.
- INCOFER (2020). Estudios de Factibilidad Técnica, Económico-Financiera, Ambiental, Social y de vulnerabilidad para la Construcción, Equipamiento, Puesta en marcha, Operación y Mantenimiento, bajo la modalidad de Concesión de Obra con Servicio Público, del Sistema de Tren Rápido de Pasajeros (TRP) de la Gran Área Metropolitana (GAM). Cuarto Informe: Estudio Económico y Financiero. Documento 2: Análisis Costo-Beneficio. DOM Consulting, Engineering and Architecture, S.A.U.
- INEC (2012). Censo Nacional del 2012. San José: Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC).
- INECO (2013). Estudio para determinar la viabilidad técnica y financiera de la puesta en servicio del tren interurbano de pasajeros del Gran Área Metropolitana de San José de Costa Rica (GAM).

- IMN (2021). Inventario Nacional de emisiones por fuentes y absorción por sumideros de Gases de Efecto Invernadero Costa Rica, 1990-2017. San José: Instituto Meteorológico Nacional.
- MAG (2015). La Estrategia de Ganadería Baja en Carbono. San José: Ministerio de Agricultura y Ganadería.
- MINAE (2013). Encuesta de consumo energético nacional en el sector transporte del 2013. San José: MINAE: Dirección Sectorial de Energía.
- MINAE (2018). Plan Nacional de Descarbonización al 2050. San José: Ministerio de Ambiente y Energía.
- MINAE (2019). Plan nacional de transporte eléctrico 2018-2030. San José: Ministerio de Ambiente y Energía.
- MINAE (2020). Contribución Nacionalmente Determinada de Costa Rica 2020. San José: Ministerio de Ambiente y Energía.
- MOPT (2010). Plan Nacional de Transportes 2011-2035. San José: Ministerio de Obras Públicas y Transporte.
- Ministerio de salud (2022). Material de referencia para la actualización de la Política Nacional de Gestión Integral de Residuos 2022-2032. <https://www.ministeriodesalud.go.cr/separayvenceras/img/Linea-base-GIR-Taller-6-de-diciembre%202022.pdf>
- LCR Logística S. A. (2007). Estudio de oferta y demanda de transportes de la GAM. Costa Rica. San José, Costa Rica.
- OCDE (2023). Revisión de desempeño ambiental de la OCDE: Costa Rica 2023. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico.
- ONF (2021) Reactivación del sector forestal ante el inminente desabastecimiento de madera, tendencias y perspectivas al 2030. San José: Oficina Nacional Forestal.
- PIB per cápita para Países de la OCDE en US\$ a Precios Corrientes, 2023. <https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.PCAP.CD?locations=OE>
- Sasa, Mohammad y Barboza, Jhonatan (2024). Inventario de emisiones de gases de efecto de invernadero (2017-2022) para sector residuos. Informe Final. San José, IMN. Primer Informe Bienal de Transparencia (BTR) de Costa Rica.