

## Proyecto edificaciones neto cero-carbono

### Evaluación de medidas de mitigación de emisiones GEI de las edificaciones en Colombia



Bogotá, archivo Hill

Mayo 14, 2022

Preparado por



## **Proyecto edificaciones neto cero-carbono**

### **Evaluación de medidas de mitigación de emisiones GEI de las edificaciones en Colombia**

#### **Autores:**

Mónica Espinosa - Hill  
José Guevara - Uniandes  
John Salazar - Uniandes  
Felipe Rivera - Hill  
Juan F. Franco - Hill

## Contenido

1.	Introducción .....	1
2.	Metodología de análisis de las medidas de mitigación de emisiones GEI .....	2
2.1.	Identificación del universo de medidas de mitigación y selección de medidas a evaluar.....	2
2.2.	Diseño de las medidas para su aplicación en el contexto nacional .....	4
2.3.	Metodología para desarrollar el análisis multicriterio de las medidas de mitigación .....	5
2.4.	Evaluación cualitativa de medidas por parte del grupo de expertos .....	8
2.5.	Priorización de medidas de mitigación para conformar portafolios al 2030, 2040 y 2050 .....	8
3.	Resultados de la evaluación individual de las medidas de mitigación .....	10
3.1.	Potencial de mitigación y costo efectividad de las medidas de mitigación .....	10
3.2.	Factibilidad de implementación y cobeneficios de las medidas de mitigación .....	16
3.3.	Resultados de la priorización de las acciones de mitigación .....	17
4.	Resultados del portafolio de mitigación .....	20
4.1.	Resultados globales.....	20
4.2.	Resultados del portafolio en carbono incorporado.....	23
4.3.	Resultados del portafolio en carbono operativo .....	24
5.	Mensajes finales .....	27
	Referencias.....	31
	Anexos.....	33
	Anexo 1. Matriz de relación entre acciones transformadoras y medidas de mitigación.....	33
	Anexo 2. Identificación de acciones de mitigación de emisiones GEI para descarbonizar las edificaciones en Colombia. ....	34
	Anexo 3. Fichas de las medidas de mitigación.....	38
	Anexo 4. Interacciones entre las medidas de mitigación. ....	39
	Anexo 5. Priorización de las medidas de mitigación.....	41
	Anexo 6. Gestión integral de residuos sólidos desde las edificaciones. ....	42

## Lista de tablas

Tabla 1. Medidas de mitigación seleccionadas evaluadas en los seis criterios.....	3
Tabla 2. Medidas de mitigación seleccionadas evaluadas parcialmente.....	4
Tabla 3. Supuestos para evaluación de las medidas.....	6
Tabla 4. Definición de escala para evaluar cobeneficios socioeconómicos.....	6
Tabla 5. Definición de escala para evaluar cobeneficios en calidad de vida.....	7
Tabla 6. Definición de escala para evaluar cobeneficios ambientales.....	7
Tabla 7. Definición de escala para evaluar la factibilidad de implementación.....	8
Tabla 8. Resultados de potencial de mitigación y costo efectividad.....	10
Tabla 9. Resultados de potencial de mitigación.....	11
Tabla 10. Curva de costo marginal de abatimiento de emisiones GEI para el sector de las edificaciones en Colombia, periodo 2020-2050 (Nomenclatura).....	15
Tabla 11. Resultados en factibilidad de implementación y cobeneficios.....	16
Tabla 12. Priorización de las medidas de mitigación en carbono incorporado.....	18
Tabla 13. Priorización de las medidas de mitigación en carbono operativo.....	19
Tabla 14. Comparación entre la mitigación lograda con el portafolio y las metas del Proyecto AENCC en carbono operativo.....	21
Tabla 15. Comparación entre la mitigación lograda con el portafolio y las metas del Proyecto AENCC en carbono incorporado.....	22

## Lista de figuras

Figura 1. Análisis multicriterio para las medidas de mitigación de emisiones GEI.....	5
Figura 2. Curva de costo marginal de abatimiento de emisiones GEI para el sector de las edificaciones en Colombia, periodo 2020-2050.....	14
Figura 3. Emisiones GEI reducidas con el portafolio en carbono operativo e incorporado.....	20
Figura 4. Emisiones GEI reducidas con el portafolio en carbono incorporado.....	23
Figura 5. Emisiones GEI reducidas con el portafolio en carbono operativo.....	25
Figura 6. Emisiones GEI reducidas por subsector en el portafolio de carbono operativo.....	26

## 1. Introducción

En este documento se presenta el análisis de medidas de mitigación de emisiones de gases efecto invernadero (GEI) del sector de edificaciones en Colombia. En el análisis de las medidas se consideraron aspectos como el potencial de mitigación de las medidas, costo-eficiencia, factibilidad de implementación y cobeneficios en aspectos socioeconómicos, ambientales y en calidad de vida. Con base en los resultados de este análisis se priorizaron las medidas según el aporte de cada una en los seis criterios seleccionados. Por otra parte, se conformó un portafolio de mitigación buscando lograr las metas de reducción de emisiones propuestas por el Proyecto AENCC con corte al 2030, 2040 y 2050.

Este entregable está estructurado de la siguiente manera. En la **Sección 2** se presenta un listado de medidas con las cuáles podrían reducirse las emisiones GEI del sector. Se explica la metodología que se utilizó para seleccionar las acciones de mitigación que se evaluaron. Se presenta la metodología y resultados del análisis que se desarrolló entre las acciones transformadoras priorizadas por los expertos y las medidas de mitigación propuestas. En esta sección también se expone la metodología de evaluación de las medidas de mitigación en los diferentes criterios y se presenta la metodología utilizada para llegar a una priorización de las medidas.

En la **Sección 3** se presentan los principales resultados de los análisis de cada una de las medidas de mitigación. Esta parte se acompaña con un compendio de fichas desarrolladas para cada una de las medidas. Se presentan los resultados de la priorización de las acciones de mitigación considerando los resultados en los seis criterios evaluados.

En la **Sección 4** se expone el portafolio de acciones conformado para lograr las metas del Proyecto AENCC. Se incluye un análisis sobre la trayectoria de emisiones que se lograría con el portafolio propuesto y se identifica la brecha respecto a las metas de mitigación de emisiones GEI definidas. En la **Sección 5** se presentan reflexiones finales del análisis de las medidas de mitigación.

Este análisis hace parte de los insumos técnicos para la definición de la Hoja de Ruta del Proyecto Acelerador Edificaciones Neto Cero Carbono (AENCC) para Colombia liderado por el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible.

## 2. Metodología de análisis de las medidas de mitigación de emisiones GEI

La metodología empleada para evaluar las medidas de mitigación se basa en estudios previos nacionales y referencias internacionales. El análisis se desarrolló en cinco etapas: i) Identificación del universo de medidas de mitigación y selección de las medidas a evaluar; ii) Diseño de las medidas para su aplicación en el contexto nacional; iii) Evaluación de las medidas de mitigación siguiendo un análisis multicriterio; iv) Evaluación cualitativa de medidas por parte del grupo de expertos; v) Priorización de medidas para conformar el escenario de mitigación al 2030, 2040 y 2050.

### 2.1. Identificación del universo de medidas de mitigación y selección de medidas a evaluar

En la identificación de medidas se consideraron todas las etapas del ciclo de vida de la edificación considerando cuatro referentes principales:

- i. Revisión de literatura nacional e internacional.
- ii. Resultados de la línea base de emisiones GEI del sector edificaciones.
- iii. Resultados de la priorización de acciones transformadoras de la serie de talleres de participación de actores liderados por el CCCS en el marco del proyecto. En este aspecto se desarrolló un análisis que muestra cómo se relacionan las acciones transformadoras de primer y segundo nivel con las acciones de mitigación. A partir de esto se identificó cuáles acciones de transformación son sombrilla de otras más específicas y cuáles son habilitantes. También a partir de este ejercicio se verificó que se contara con medidas de mitigación para todas las acciones transformadoras (ver Anexo 1).
- iv. Resultados del taller de expertos del Proyecto AENCC desarrollado el 18 de febrero de 2022. Los participantes listaron medidas de mitigación que deberían considerarse para la descarbonización de las edificaciones en Colombia.

De estas cuatro fuentes de información se identificaron más de 90 acciones de mitigación (ver Anexo 2). De la lista completa se seleccionó un conjunto de medidas a evaluar considerando los siguientes criterios:

- Disponibilidad de la información para su análisis.
- Etapa del ciclo de vida que cada medida afecta en las edificaciones, teniendo en cuenta que se buscaba cubrir en la medida de lo posible todas las etapas.
- Potencial de mitigación esperado según estudios previos, dado que se requería identificar acciones de mitigación en línea con las metas en reducción de emisiones al 2030, 2040 y 2050 definidas por el proyecto AENCC.

Por ejemplo: sabiendo que una meta es tener emisiones operacionales neto cero en 2040, se descartaron acciones que sólo reducen una proporción de las emisiones (mejorar equipos que operan a gas natural) y se prefirieron acciones que permiten una descarbonización total (electrificación de usos finales de la energía).

A partir de este ejercicio se seleccionaron 25 acciones de mitigación para evaluar en los seis criterios (potencial de mitigación, costos, cobeneficios socioeconómicos, ambientales y en calidad de vida, y factibilidad de implementación). Las acciones se listan en la Tabla 1, diferenciando entre las acciones que

permiten principalmente reducir el carbono operativo y las que llevan a una mitigación del carbono incorporado<sup>1</sup>.

*Tabla 1. Medidas de mitigación seleccionadas evaluadas en los seis criterios.*

Medida	Clasificación	Nombre
Medida 1 - I	Mitigación - Carbono incorporado	Ahorro de emisiones en la producción de clinker - Combustibles alternativos (Cemento)
Medida 2 - I	Mitigación - Carbono incorporado	Ahorro de emisiones en cemento y aglutinantes - Reducción del factor clinker-cemento
Medida 3 - I	Mitigación - Carbono incorporado	Captura y almacenamiento de CO2 - Tecnología de post-combustión (Cemento)
Medida 4 - I	Mitigación - Carbono incorporado	Mejorar el acceso a viviendas de bajo costo (reducción informalidad)
Medida 5 - I	Mitigación - Carbono incorporado	Optimización en el diseño de las edificaciones
Medida 6 - I	Mitigación - Carbono incorporado	Sistemas constructivos alternativos – Madera estructural
Medida 7 - I	Mitigación - Carbono incorporado	Remodelación de edificaciones existentes
Medida 8 - I	Mitigación - Carbono incorporado	Sustitución de vehículos por nuevas tecnologías (transporte carretero)
Medida 1 - O	Mitigación - Carbono operativo	Implementación Portafolio Resolución 549 Oficinas
Medida 2 - O	Mitigación - Carbono operativo	Implementación Portafolio Resolución 549 Sector comercial
Medida 3 - O	Mitigación - Carbono operativo	Implementación Portafolio Resolución 549 Hoteles
Medida 4 - O	Mitigación - Carbono operativo	Implementación Portafolio Resolución 549 Educación
Medida 5 - O	Mitigación - Carbono operativo	Implementación Portafolio Resolución 549 Hospitales
Medida 6 - O	Mitigación - Carbono operativo	Implementación Portafolio Resolución 549 Sector residencial
Medida 7 - O	Mitigación - Carbono operativo	Sustitución de equipos de refrigeración en sector terciario
Medida 8 - O	Mitigación - Carbono operativo	Sustitución de equipos de iluminación en el sector residencial y terciario
Medida 9 - O	Mitigación - Carbono operativo	Sustitución de equipos de acondicionamiento de espacios en el sector terciario
Medida 10 - O	Mitigación - Carbono operativo	Sustitución de bombas de calor
Medida 11 - O	Mitigación - Carbono operativo	Sustitución de neveras en el sector residencial
Medida 12 - O	Mitigación - Carbono operativo	Sustitución de ventiladores en el sector residencial
Medida 13 - O	Mitigación - Carbono operativo	Sustitución de equipos de aire acondicionado en el sector residencial
Medida 14 - O	Mitigación - Carbono operativo	Sustitución de televisores en el sector residencial
Medida 15 - O	Mitigación - Carbono operativo	Cambio de estufas de gas natural por estufas de inducción sector residencial
Medida 16 - O	Mitigación - Carbono operativo	Generación eléctrica con paneles solares en el sector residencial
Medida 17 - O	Mitigación - Carbono operativo	Implementación de distritos térmicos

*Fuente: elaboración propia.*

<sup>1</sup> Algunas medidas tienen impactos tanto en carbono operativo como en carbono incorporado. En este análisis se estimó el impacto en emisiones GEI solo en uno de los dos, según como se presenta en la clasificación de la Tabla 1. Este es un aspecto que podría mejorarse en futuros análisis, en los que con modelos complementarios se pueda tener una evaluación integrada de las medidas que tienen impactos tanto en carbono operativo como en incorporado.

Adicionalmente se seleccionaron 8 medidas para las que no se cuenta con toda la información requerida para analizarlas en los seis criterios, y por lo tanto se presentan resultados sólo en algunos de ellos. Entre estas medidas se incluyeron: cuatro medidas que reducen las emisiones por carbono incorporado en los materiales y en obra; una medida transversal, que es tener electricidad con menor intensidad de carbono en el Sistema Interconectado Nacional (en línea con la NDC y la E2050); sustitución de fósiles por electricidad en sector terciario; una medida de adaptación priorizada dentro de las acciones transformadoras; y una medida que resalta el rol que tiene el sector de las edificaciones en habilitar acciones de mitigación en el sector de residuos sólidos municipales (ver Anexos 3 y 6).

*Tabla 2. Medidas de mitigación seleccionadas evaluadas parcialmente.*

Medida	Clasificación	Nombre
Medida 1 - C	Mitigación - Carbono incorporado	Ladrillo - electrificación de hornos
Medida 2 - C	Mitigación - Carbono incorporado	Acero - reducción del mineral de hierro con hidrógeno
Medida 3 - C	Mitigación - Carbono incorporado	Sustitución de combustibles en transporte marítimo para materiales
Medida 4 - C	Mitigación - Carbono incorporado	Sustitución de maquinaria amarilla por tecnologías de bajas emisiones
Medida 5 - C	Carbono de todo el ciclo de vida	Electricidad del sistema interconectado nacional de menor intensidad de carbono
Medida 6 - C	Mitigación - Carbono operativo	Sustitución de gas natural por electricidad en sector terciario
Medida 7 - C	Adaptación	Sistemas de drenaje urbano sostenible
Medida 8 - C	Mitigación	Estrategias integrales desde el sector de edificaciones para habilitar medidas de mitigación en el sector de residuos sólidos municipales.

*Fuente: elaboración propia.*

## 2.2. Diseño de las medidas para su aplicación en el contexto nacional

Una vez se seleccionaron las medidas de mitigación, éstas se diseñaron para el contexto colombiano. Esto consistió en delimitar las acciones considerando aspectos como:

- Año de inicio de las medidas: año a partir del cual podría iniciar cada una. En el caso de nuevas tecnologías se refiere al año a partir de la cual se espera que las medidas estén disponibles en Colombia.
- Gradualidad de implementación.
- Alcance de las medidas (nivel de cobertura) y sectores de las edificaciones que afecta, usos finales que afecta y tipos de edificaciones en las que se podrían implementar.
- Enfoque conservador:
  - o en los casos en que no se contaba con información local para definir el alcance de las medidas, se hicieron extrapolaciones a partir de información internacional, en estos casos se seleccionaron los escenarios de mitigación más conservadores.
  - o las trayectorias de implementación de las acciones también se diseñaron con un enfoque conservador, teniendo en cuenta resultados de estudios previos y las recomendaciones de los expertos del Proyecto AENCC consultados durante el desarrollo de los análisis.



### 2.3. Metodología para desarrollar el análisis multicriterio de las medidas de mitigación

El análisis de cada medida se desarrolló para seis criterios. Dos de estos son cuantitativos (potencial de mitigación y costos) y cuatro cualitativos (cobeneficios y factibilidad de implementación) (ver Figura 1).

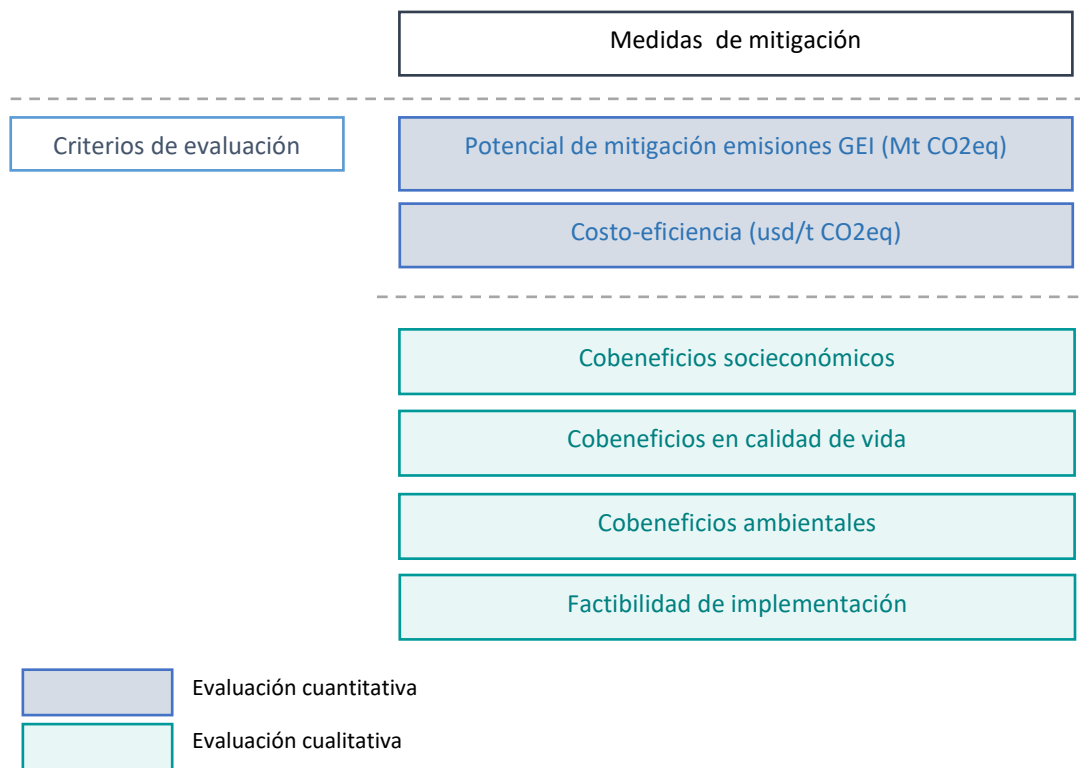


Figura 1. Análisis multicriterio para las medidas de mitigación de emisiones GEI.

Fuente: elaboración propia.

La evaluación de las acciones de mitigación da como resultado un valor para cada uno de los criterios, lo que permite una priorización de las acciones y la conformación de diferentes portafolios que lleven al cumplimiento de las metas para 2030, 2040 y 2050.

Los seis criterios se explican a continuación:

- **Potencial de mitigación de emisiones de CO<sub>2</sub>eq:** se obtiene mediante la comparación de las emisiones entre el escenario de línea base y un escenario con la aplicación de la medida de mitigación. Se analiza para el periodo 2020-2050.
- **Costo-efectividad:** costo marginal de abatimiento de una tonelada de CO<sub>2</sub>eq. Este análisis se hace comparando el costo neto de cada medida y su potencial de reducción respecto al costo neto y emisiones de la línea base, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{Costo}_i}{\text{CO}_{2\text{eq},i}} = \frac{\text{Costo}_{\text{LB}} - \text{Costo}_{\text{Ei}}}{\text{CO}_{2\text{eq}, \text{LB}} - \text{CO}_{2\text{eq}, \text{Ei}}}$$

En donde:

Costo<sub>i</sub>: es el costo incremental entre el escenario de línea base (LB) y el escenario con aplicación de la medida i (Ei). En los costos se consideran los de inversión y operación y mantenimiento. Los cambios por costos de los insumos y los energéticos están incluidos en los de operación y mantenimiento.

CO<sub>2-eq, i</sub>: es la diferencia entre las emisiones dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2eq</sub>) del escenario de línea base y el escenario con aplicación de la medida i.

De la relación Costo<sub>i</sub>/CO<sub>2eq, i</sub> se obtiene el costo de reducir una tonelada de CO<sub>2eq</sub> con cada medida de mitigación.

Los análisis de potencial de mitigación y de costos se desarrollaron bajos los supuestos que se exponen en la Tabla 3.

*Tabla 3. Supuestos para evaluación de las medidas.*

Aspecto	Descripción
Horizonte de análisis	El análisis de las medidas de mitigación se realizó para el periodo 2020 – 2050. Es importante mencionar que cada medida tiene sus propios tiempos de implementación.
Alcance geográfico	Todas las medidas se analizaron a nivel nacional.
Potencial de mitigación de emisiones GEI acumulado	El potencial de mitigación de emisiones corresponde a la comparación de las emisiones de CO <sub>2eq</sub> con la medida implementada respecto al CO <sub>2eq</sub> del escenario de línea base.
Unidad monetaria	Todos los costos se presentan en dólares constantes del año 2020.
Tasas de descuento	Las medidas se analizaron para tres escenarios de tasas de descuento: 3.1%, 6.4% y 9.0%. En los resúmenes en este documento se presentan los resultados para el escenario de 6.3%. En las fichas (Anexo 3) se presentan los resultados con las tres tasas.

*Fuente: elaboración propia.*

- **Cobeneficios socioeconómicos:** valoración cualitativa de beneficios socioeconómicos en costo de vida, creación de empleo y fortalecimiento de las cadenas productivas. Se asigna un valor global para cada medida entre 1-5 teniendo en cuenta la definición de la escala (ver Tabla 4).

*Tabla 4. Definición de escala para evaluar cobeneficios socioeconómicos.*

Valor	Significado
1	Tiene impactos negativos sobre la mayor parte de la población.
	Tiene impactos negativos sobre el desarrollo económico del país.

Valor	Significado
2	Tiene impactos negativos sobre una proporción baja de la población (<50%).
3	No se identifican impactos socioeconómicos significativos de la medida.
4	Afecta de manera positiva a una proporción baja de la población (<50%).
	Traería algunos beneficios para los más pobres.
5	Tiene impactos positivos sobre la mayoría de la población.
	Los mayores impactos positivos son para la población más pobre.

*Fuente: elaboración propia.*

- Cobeneficios en calidad de vida: se refiere a beneficios por condiciones al interior de las edificaciones como confort (térmico, lumínico, acústica) y salud (ver Tabla 5).

*Tabla 5. Definición de escala para evaluar cobeneficios en calidad de vida.*

Valor	Significado
1	Tiene impactos negativos sobre la mayor parte de la población.
2	Tiene impactos negativos sobre una proporción baja de la población.
3	No se identifican impactos en calidad de vida (al interior de las edificaciones) asociados a la medida.
4	Afecta de manera positiva a una proporción baja de la población (<50%).
	Traería algunos beneficios para los más pobres.
5	Tiene impactos positivos sobre la mayoría de la población.
	Los mayores impactos positivos son para la población más pobre.

*Fuente: elaboración propia.*

- Cobeneficios ambientales: beneficios ambientales sobre el entorno (diferentes a la reducción de emisiones GEI) asociados a cada acción de mitigación como por ejemplo mejora de la calidad del aire, reducción de la explotación de recursos naturales no renovables, reducción de impactos sobre ecosistemas, entre otros. Se asigna un valor global por medida entre 1-5 teniendo en cuenta la definición de la escala (ver Tabla 6).

*Tabla 6. Definición de escala para evaluar cobeneficios ambientales.*

Valor	Significado
1	Tiene altos impactos negativos sobre los recursos naturales.
2	Tiene impactos negativos leves sobre los recursos naturales.
3	Tiene leves impactos positivos sobre alguno de los componentes ambientales del entorno.

4	Tiene impactos positivos moderados sobre los componentes ambientales del entorno.
5	Afecta de manera muy positiva los componentes ambientales del entorno.

*Fuente: elaboración propia.*

- Factibilidad de implementación: Valoración cualitativa de factibilidad técnica y financiera de las medidas de mitigación (ver Tabla 7).

*Tabla 7. Definición de escala para evaluar la factibilidad de implementación.*

Valor	Significado
1	Muy baja factibilidad técnica y financiera para que la medida se implemente en el contexto nacional en los tiempos requeridos.
2	Baja factibilidad técnica y financiera para que la medida se implemente en el contexto nacional en los tiempos requeridos.
3	Factibilidad media técnica y financiera para que la medida se implemente en el contexto nacional en los tiempos requeridos.
4	Alta factibilidad técnica y financiera para que la medida se implemente en el contexto nacional en los tiempos requeridos.
5	Muy alta factibilidad técnica y financiera para que la medida se implemente en el contexto nacional en los tiempos requeridos.

*Fuente: elaboración propia.*

#### 2.4. Evaluación cualitativa de medidas por parte del grupo de expertos

Durante el taller desarrollado el 18 de febrero de 2022, con la participación del grupo de expertos del Proyecto AENCC, se realizó la evaluación cualitativa de las acciones de mitigación. Cada experto según su área de trabajo seleccionó un grupo de medidas de mitigación y evaluó para cada medida los cuatro criterios cualitativos: cobeneficios socioeconómicos, cobeneficios en calidad de vida, cobeneficios ambientales y la factibilidad de implementación.

De las 32 medidas presentadas en las Tabla 1 y Tabla 2, 21 fueron evaluadas por los expertos. Para las medidas restantes la evaluación fue desarrollada por el equipo consultor.

#### 2.5. Priorización de medidas de mitigación para conformar portafolios al 2030, 2040 y 2050

Teniendo en cuenta los resultados para cada medida en los seis criterios presentados anteriormente: i) potencial de mitigación, ii) costo eficiencia, iii) factibilidad de implementación, y iv) cobeneficios (socioeconómicos, ambientales y en calidad de vida) se analizaron diferentes opciones de priorización de las acciones de mitigación, según la técnica de Ranking de Múltiples Atributos Simples (SMART por sus siglas en inglés). La técnica SMART se basa en la teoría de funciones de utilidad (Edwards, 1977; Edwards & Barron, 1994; Olson, 1997). La función de utilidad propuesta por Edwards (1977) viene dada por la siguiente ecuación:

$$U_i = \sum_k w_k * u_{ik}$$

En donde:

$U_i$  : representa la utilidad de la medida i y se representa por un valor que oscila entre 0 y 1. Un valor de uno representa la máxima utilidad y cero la menor. En este análisis se estima un valor  $U_i$  para cada medida de mitigación.

$w_k$ : Es el peso que se asigna a cada uno de los criterios de priorización k (potencial de mitigación, costo eficiencia, factibilidad de implementación, cobeneficios socioeconómicos, cobeneficios ambientales y cobeneficios en calidad de vida). La suma de los pesos de los seis criterios debe ser igual a 1 ( $\sum_k w_k=1$ ).

$u_{ik}$ : Es el valor escalado de cada uno de los criterios de priorización k (potencial de mitigación, costo eficiencia, factibilidad de implementación, cobeneficios socioeconómicos, cobeneficios ambientales y cobeneficios en calidad de vida) en cada una de las medidas de mitigación i. Cada uno de estos valores escalados oscila entre 0 y 1. El valor para escalar este criterio, propuesto por Edwards (1977), consiste en una interpolación lineal, para cada uno de los criterios de priorización, cuyo valor es cero, si el valor del criterio de priorización es el peor entre todas las medidas, y 1 si el valor del criterio de priorización es el mejor.

### 3. Resultados de la evaluación individual de las medidas de mitigación

En el Anexo 3 se presenta un compendio de fichas en las que se presenta para cada medida de mitigación en qué consiste, los principales supuestos utilizados para los análisis y los resultados obtenidos para cada uno de los criterios evaluados. En esta sección se sintetizan los resultados.

#### 3.1. Potencial de mitigación y costo efectividad de las medidas de mitigación

En la Tabla 8 se presentan los resultados de potencial de mitigación y costo efectividad de las medidas para las que fue posible evaluar los seis criterios (listadas en Tabla 1).

Para este grupo de medidas evaluadas se identificaron potenciales de mitigación individuales que varían entre 0.2 MtCO<sub>2</sub>eq y 71.1 MtCO<sub>2</sub>eq. Este valor es el potencial de mitigación de cada medida en el periodo 2020-2050.

En términos del costo marginal de abatimiento los resultados obtenidos varían en un rango muy amplio. Se cuenta con valores entre -2,435 USD/t CO<sub>2</sub>eq, que es la medida con mejor relación de costo eficiencia, y 340 USD/t CO<sub>2</sub>eq para la medida con mayor costo incremental.

21 medidas de las 25 que se presentan en la Tabla 8 tienen costo incremental inferior a cero, es decir que son gana-gana. El grupo de medidas gana-gana abarcan más del 90% del potencial de mitigación total identificado. Vale la pena mencionar que el costo marginal de abatimiento se estimó considerando los principales costos técnicos, y que no consideran otros costos relevantes como por ejemplo los asociados a las campañas de educación, concientización y costos de alistamiento de las tecnologías.

El costo de abatimiento negativo significa que, para esas medidas desde el punto de vista de las tecnologías, materiales y energéticos, la medida de mitigación propuesta representa mejores costos respecto a la alternativa que se esté utilizando en la línea base. El hecho de que las medidas gana-gana no entren por sí solas al mercado muestra que existen otras barreras y costos no identificados que limitan su implementación.

*Tabla 8. Resultados de potencial de mitigación y costo efectividad.*

Medida	Descripción	Costo efectividad* (USD/tCO <sub>2</sub> eq)	Potencial de mitigación (Millones toneladas CO <sub>2</sub> eq)
Medida 1-l	Ahorro de emisiones en la producción de clinker - Combustibles alternativos (Cemento)	22	2.0
Medida 2-l	Ahorro de emisiones en cemento y aglutinantes - Reducción del factor clinker-cemento (Cemento)	-3	3.3
Medida 3-l	Captura y almacenamiento de CO <sub>2</sub> - Tecnología de post-combustión (Cemento)	129	2.2
Medida 4-l	Mejorar el acceso a viviendas de bajo costo (reducción informalidad)	-36	11.8
Medida 5-l	Optimización en el diseño de las edificaciones	-229	25.7
Medida 6-l	Sistemas constructivos alternativos – Madera estructural	43	8.6

Medida	Descripción	Costo efectividad* (USD/tCO2eq)	Potencial de mitigación (Millones toneladas CO2eq)
Medida 7-I	Remodelación de edificaciones existentes	-131	4.3
Medida 8-I	Sustitución de vehículos por nuevas tecnologías (transporte carretero)	-3.54	5.8
Medida 1-O	Implementación Portafolio Resolución 549 Oficinas	-238	8.3
Medida 2-O	Implementación Portafolio Resolución 549 sector comercial	-232	5.5
Medida 3-O	Implementación Portafolio Resolución 549 Hoteles	-250	0.8
Medida 4-O	Implementación Portafolio Resolución 549 Educación	-232	1.0
Medida 5-O	Implementación Portafolio Resolución 549 Hospitales	-247	1.6
Medida 6-O	Implementación Portafolio Resolución 549 Residencial	-69	28.8
Medida 7-O	Sustitución de equipos de refrigeración en sector terciario	-230	2.6
Medida 8-O	Sustitución de equipos de iluminación en el sector residencial y comercial	-200	9.2
Medida 9-O	Sustitución de equipos de acondicionamiento de espacios en el sector terciario	-200	3.9
Medida 10-O	Sustitución de bombas de calor	-303	0.2
Medida 11-O	Sustitución de neveras en el sector residencial	-307	25.6
Medida 12-O	Sustitución de ventiladores en el sector residencial	-18	1.7
Medida 13-O	Sustitución de equipos de aire acondicionado en el sector residencial	340	0.5
Medida 14-O	Sustitución de televisores en el sector residencial	-14	2.8
Medida 15-O	Cambio de estufas de gas natural por estufas de inducción sector residencial	-1,128	71.1
Medida 16-O	Generación eléctrica con paneles solares en el sector residencial	-134	29.7
Medida 17-O	Implementación de distritos térmicos	-2,435	0.2

\*Costo efectividad en escenario con tasa de descuento 6.4%.

*Fuente: elaboración propia.*

En la Tabla 9 se muestran los resultados de potencial de mitigación de las medidas que se evaluaron parcialmente (listadas en Tabla 2). Estas son medidas que también dependen de otros sectores, pero que están muy relacionadas con las actividades del sector de edificaciones y tienen un impacto significativo en mitigación de emisiones GEI. De estas se resalta la medida de con electricidad de menor intensidad de carbono en el Sistema Interconectado Nacional, que es una meta del sector energético, sin embargo, es fundamental en las emisiones mitigadas desde el sector de las edificaciones tanto en carbono incorporado como operativo.

*Tabla 9. Resultados de potencial de mitigación.*

Medida	Descripción	Potencial de mitigación (Millones toneladas CO2eq)
Medida 3 - C	Sustitución de combustibles en transporte marítimo para materiales	0.2
Medida 4 - C	Sustitución de maquinaria amarilla por tecnologías de bajas emisiones	4.1

Medida	Descripción	Potencial de mitigación (Millones toneladas CO <sub>2</sub> eq)
Medida 5 - C	Electricidad del sistema interconectado nacional de menor intensidad de carbono	165.7
Medida 6 - C	Sustitución de gas natural por electricidad en sector terciario	42.7

*Fuente: elaboración propia.*

En la Figura 2 se presenta la curva de costo marginal de abatimiento (MACC) para el sector de las edificaciones en Colombia para el periodo 2020-2050.

Las medidas para mitigar carbono operativo son las que dominan el grupo de opciones con costo negativo. Estas medidas en general tienen altos costos de inversión, pero los ahorros en consumo de energía durante el periodo de análisis superan los de inversión. Los altos costos de inversión probablemente sean una de las principales barreras para su implementación.

Dentro de las acciones para reducir las emisiones GEI del carbono operativo, se resalta el alto potencial de mitigación y buena relación de costo-eficiencia de la sustitución de combustibles fósiles por electricidad en los usos finales de la energía en la etapa de operación de las edificaciones. Para lograr emisiones neto cero en las edificaciones se requiere minimizar el uso de combustibles fósiles antes del año 2040; sin embargo, en todos los escenarios del Plan Energético Nacional 2020-2050 se contempla el uso de combustibles fósiles hasta el año 2050 (UPME, 2020). Estas acciones de mitigación deberán ser analizadas teniendo en cuenta los objetivos y posibilidades desde el sector energético nacional, pues el gas natural es considerado un energético de transición y el Plan Energético Nacional (UPME, 2020) contempla su participación hasta el año 2050. Este es un ejemplo de la coordinación intersectorial que se necesitará para lograr puntos de encuentro entre diferentes agendas, en este caso la energética y la de mitigación del cambio climático, en los tiempos requeridos para lograr las metas de mitigación de emisiones GEI de las edificaciones en Colombia.

En la MACC las medidas de eficiencia energética en el sector residencial también sobresalen por su alto potencial de mitigación.

En cuanto a las acciones para mitigar emisiones por carbono incorporado, las medidas con el mayor potencial identificado son la optimización en el diseño de las edificaciones y mejorar el acceso a viviendas de bajo costo (reducción de la informalidad). Estas dos medidas tienen relación de costo-eficiencia muy positiva, desde un análisis de costos técnicos que es la metodología empleada en este estudio. Sin embargo, se identifican múltiples barreras de diversa naturaleza para reducir la informalidad en el sector residencial, así como necesidades en educación, capacitación a actores de toda la cadena, coordinación intersectorial y necesidad de ajustes a los incentivos para la producción de vivienda de interés social y prioritario, para que se pueda lograr la masificación de mejores prácticas en el diseño y construcción de las edificaciones.

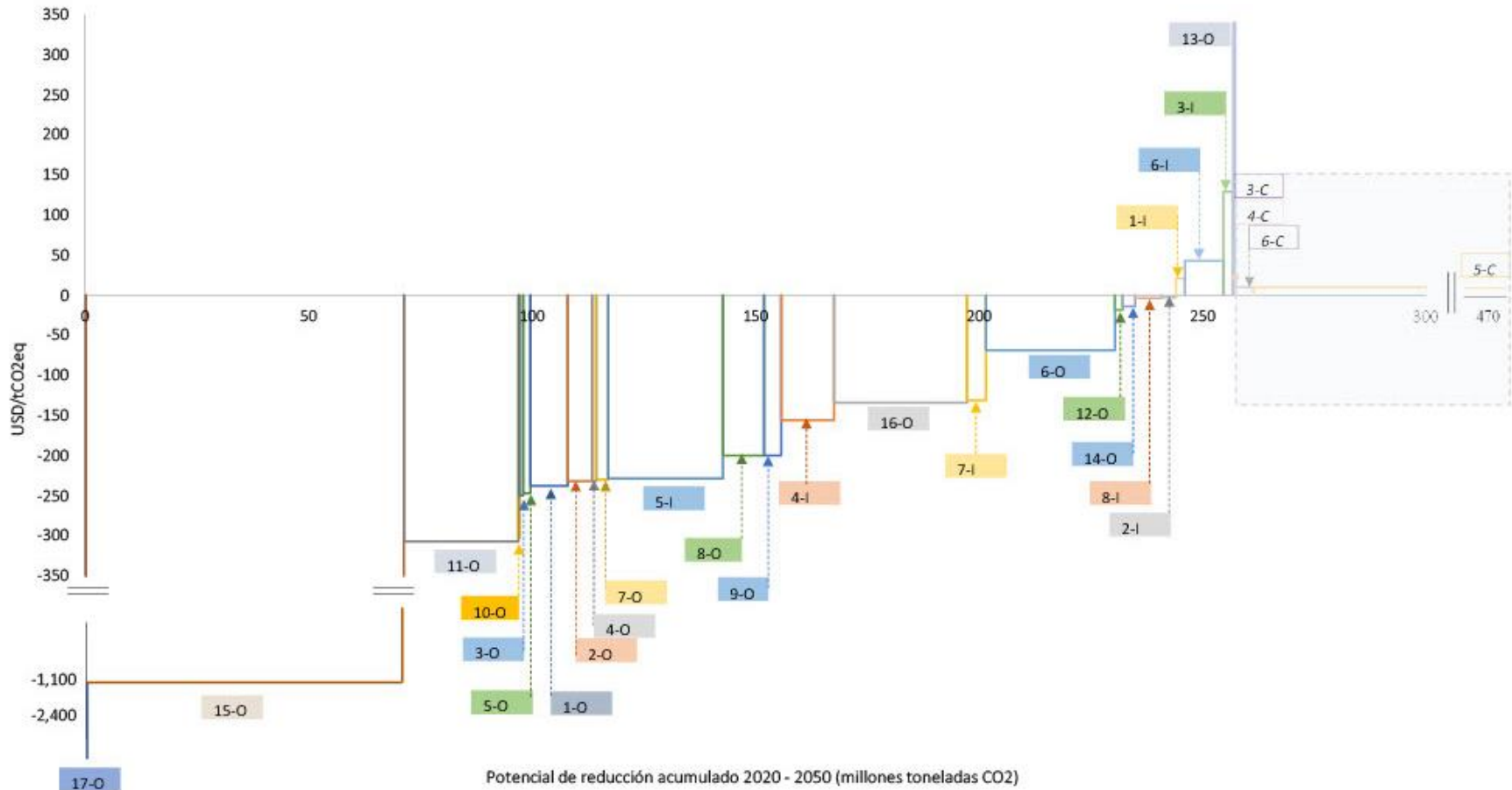
La tercera medida por su aporte en el potencial de mitigación del carbono incorporado tiene que ver con utilizar sistemas constructivos alternativos (madera estructural). Este tipo de acciones, requieren altas inversiones y periodos de planeación y alistamiento de más largo plazo, pues involucran la generación de una nueva industria nacional. Si bien diferentes políticas nacionales<sup>2</sup> han llamado la atención sobre el potencial positivo que podría tener el desarrollo de la industria forestal en el país con aprovechamientos

<sup>2</sup> DNP: Conpes 3934 de 2018.



desde los sectores de edificaciones, industria y energía, no se identifican avances significativos en esta dirección.

Este ejercicio de la curva MACC muestra que para lograr la descarbonización de las edificaciones en Colombia se requieren intervenciones en toda la cadena, abarcando desde las industrias de los materiales, el sector transporte para la carga y maquinaria, en las prácticas de diseño y construcción de las edificaciones, en las prácticas de operación de las edificaciones, así como en sectores transversales como son el de generación de electricidad.



Los recuadros en colores presentan la nomenclatura asignada a cada medida de mitigación (ver Tabla 10).

Las medidas que se presentan en el recuadro gris, en la parte derecha de la gráfica, cuentan con análisis de potencial de mitigación, pero no de costo-eficiencia. Estas medidas se presentan únicamente para mostrar el potencial total de mitigación identificado.

Figura 2. Curva de costo marginal de abatimiento de emisiones GEI para el sector de las edificaciones en Colombia, periodo 2020-2050.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 10. Curva de costo marginal de abatimiento de emisiones GEI para el sector de las edificaciones en Colombia, periodo 2020-2050 (Nomenclatura).

Medida	Descripción
Medida 17-O	Implementación de distritos térmicos
Medida 15-O	Cambio de estufas de gas natural por estufas de inducción sector residencial
Medida 11-O	Sustitución de neveras en el sector residencial
Medida 10-O	Sustitución de bombas de calor
Medida 3-O	Implementación Portafolio Resolución 549 Hoteles
Medida 5-O	Implementación Portafolio Resolución 549 Hospitales
Medida 1-O	Implementación Portafolio Resolución 549 Oficinas
Medida 2-O	Implementación Portafolio Resolución 549 sector comercial
Medida 4-O	Implementación Portafolio Resolución 549 Educación
Medida 7-O	Sustitución de equipos de refrigeración en sector terciario
Medida 5-I	Optimización en el diseño de las edificaciones
Medida 8-O	Sustitución de equipos de iluminación en el sector residencial y comercial
Medida 9-O	Sustitución de equipos de acondicionamiento de espacios en el sector terciario
Medida 4-I	Mejorar el acceso a viviendas de bajo costo (reducción informalidad)
Medida 16-O	Generación eléctrica con paneles solares en el sector residencial
Medida 7-I	Remodelación de edificaciones existentes
Medida 6-O	Implementación Portafolio Resolución 549 Residencial
Medida 12-O	Sustitución de ventiladores en el sector residencial
Medida 14-O	Sustitución de televisores en el sector residencial

Medida	Descripción
Medida 8-I	Sustitución de vehículos por nuevas tecnologías (transporte carretero)
Medida 2-I	Ahorro de emisiones en cemento y aglutinantes - Reducción del factor clinker-cemento
Medida 1-I	Ahorro de emisiones en la producción de clinker - Combustibles alternativos (Cemento)
Medida 6-I	Sistemas constructivos alternativos – Madera estructural
Medida 3-I	Captura y almacenamiento de CO2 - Tecnología de post-combustión (Cemento)
Medida 13-O	Sustitución de equipos de aire acondicionado en el sector residencial
Medida	Descripción
Medida 3 - C	Sustitución de combustibles en transporte marítimo para materiales
Medida 4 - C	Sustitución de maquinaria amarilla por tecnologías de bajas emisiones
Medida 6 - C	Sustitución de gas natural por electricidad en el sector terciario.
Medida 5 - C	Electricidad del sistema interconectado nacional de menor intensidad de carbono

Fuente: elaboración propia.

Además de las medidas incluidas en la MACC existen otras que también podrían aportar en la descarbonización del sector de las edificaciones (ver Anexo 2). En particular, en este estudio no se analizaron acciones basadas en la naturaleza para mitigación de emisiones GEI. Diferentes estudios a nivel nacional e internacional muestran que estrategias para aumentar la captura de carbono en biomasa a través de acciones como la conservación de áreas verdes urbanas, la restauración ecológica de zonas verdes protegidas, la reducción de áreas duras al interior de áreas verdes y la plantación de árboles en zonas verdes públicas y privadas, además de su alto potencial en reducción de emisiones GEI conllevan múltiples beneficios (Cadena et al., 2020; EEA, 2021). Se presenta una primera aproximación a este tipo de estrategias en el Anexo 3.

### 3.2. Factibilidad de implementación y cobeneficios de las medidas de mitigación

En la Tabla 11 se presentan los resultados del análisis cualitativo en cuanto a la factibilidad de implementación de las medidas y sus cobeneficios.

*Tabla 11. Resultados en factibilidad de implementación y cobeneficios.*

Medida	Nombre	Cobeneficios socioeconómicos	Cobeneficios calidad de vida	Cobeneficios ambientales	Factibilidad de implementación
Medida 1 - I	Ahorro de emisiones en la producción de clinker - Combustibles alternativos (Cemento)	3	3	4	5
Medida 2 - I	Ahorro de emisiones en cemento y aglutinantes - Reducción del factor clinker-cemento	3	3	3	5
Medida 3 - I	Captura y almacenamiento de CO2 - Tecnología de post-combustión (Cemento)	2	3	4	3
Medida 4 - I	Mejorar el acceso a viviendas de bajo costo (reducción informalidad)	5	5	5	3
Medida 5 - I	Optimización en el diseño de las edificaciones	5	3	4	5
Medida 6 - I	Sistemas constructivos alternativos – Madera estructural	3	3	3	3
Medida 7 - I	Remodelación de edificaciones existentes	4	3	5	3
Medida 8 - I	Sustitución de vehículos por nuevas tecnologías (transporte carretero)	4	3	4	3
Medida 1 - O	Implementación Portafolio Resolución 549 Oficinas	3	4	4	4
Medida 2 - O	Implementación Portafolio Resolución 549 Sector comercial	4	3	3	4
Medida 3 - O	Implementación Portafolio Resolución 549 Hoteles	3	3	3	3

Medida	Nombre	Cobeneficios socioeconómicos	Cobeneficios calidad de vida	Cobeneficios ambientales	Factibilidad de implementación
Medida 4 - O	Implementación Portafolio Resolución 549 Educación	5	5	3	3
Medida 5 - O	Implementación Portafolio Resolución 549 Hospitales	4	4	3	4
Medida 6 - O	Implementación Portafolio Resolución 549 Sector residencial	4	5	5	3
Medida 7 - O	Sustitución de equipos de refrigeración en sector terciario	4	5	5	4
Medida 8 - O	Sustitución de equipos de iluminación en el sector residencial y terciario	5	5	4	5
Medida 9 - O	Sustitución de equipos para el acondicionamiento de espacios en el sector terciario	3	3	3	5
Medida 10 - O	Sustitución de bombas de calor	3	3	3	5
Medida 11 - O	Sustitución de neveras en el sector residencial	5	5	5	4
Medida 12 - O	Sustitución de ventiladores en el sector residencial	3	3	3	3
Medida 13 - O	Sustitución de equipos de aire acondicionado en el sector residencial	5	5	5	3
Medida 14 - O	Sustitución de televisores en el sector residencial	2	2	3	3
Medida 15 - O	Cambio de estufas de gas natural por estufas de inducción sector residencial	4	3	4	2
Medida 16 - O	Generación eléctrica con paneles solares en el sector residencial	4	4	4	2
Medida 17 - O	Implementación de distritos térmicos	4	3	5	3

*Fuente: elaboración propia.*

### 3.3. Resultados de la priorización de las acciones de mitigación

Aplicando la función de utilidad que se explicó en la Sección 2.5 se priorizaron las medidas de mitigación. En el Anexo 4 se presenta la memoria de cálculo del análisis desarrollado con los pasos intermedios para llegar a la priorización.

Es importante aclarar que para la priorización que se expone en esta sección se asignó el mismo peso a los seis criterios evaluados. Debido a que el Proyecto AENCC cuenta con metas específicas para el carbono

incorporado y para el carbono operativo, se desarrolló una priorización para cada grupo de medidas de mitigación.

En las Tabla 12 y Tabla 13 se muestran los resultados de la priorización de las medidas. Mayores valores obtenidos para la función utilidad representan mejor desempeño global de la medida de mitigación en los seis criterios: potencial de mitigación acumulado entre 2020 y 2050, costo-eficiencia, cobeneficios (socioeconómicos, en calidad de vida y ambientales) y factibilidad de implementación.

Según este análisis las tres medidas más integrales en el caso del carbono incorporado son: i) optimización del diseño de las edificaciones; ii) mejorar el acceso a viviendas de bajo costo (reducción de la informalidad) y iii) la remodelación de edificaciones existentes.

En el carbono operativo las tres medidas más integrales afectan al sector residencial y son: i) sustitución de neveras, ii) sustitución de equipos de iluminación (que también afecta al sector comercial) y iii) sustitución de equipos de refrigeración. La implementación de la Resolución 549 de 2015 en el sector residencial es la cuarta medida.

En ambos grupos (carbono incorporado y operativo) se observa un amplio rango en los resultados de utilidad obtenidos, que fluctúa entre 0.75 y 0.08 en las medidas de carbono incorporado y entre 0.71 y 0.08 en las de carbono operativo.

Tabla 12. Priorización de las medidas de mitigación en carbono incorporado.

Medidas de mitigación carbono incorporado		Ranking
Medida 5 - I	Optimización en el diseño de las edificaciones	0.750
Medida 4 - I	Mejorar el acceso a viviendas de bajo costo (reducción informalidad)	0.646
Medida 7 - I	Remodelación de edificaciones existentes	0.415
Medida 1 - I	Ahorro de emisiones en la producción de clinker - Combustibles alternativos (Cemento)	0.355
Medida 2 - I	Ahorro de emisiones en cemento y aglutinantes - Reducción del factor clinker-cemento (Cemento)	0.292
Medida 8 - I	Sustitución de vehículos por nuevas tecnologías (transporte carretero)	0.283
Medida 6 - I	Sistemas constructivos alternativos – Madera estructural	0.142
Medida 3 - I	Captura y almacenamiento de CO2 - Tecnología de post-combustión (Cemento)	0.084

Fuente: elaboración propia.

Tabla 13. Priorización de las medidas de mitigación en carbono operativo.

Medidas de mitigación carbono operativo		Ranking
Medida 11 - O	Sustitución de neveras en el sector residencial	0,710
Medida 8 - O	Sustitución de equipos de iluminación en el sector residencial y comercial	0,637
Medida 7 - O	Sustitución de equipos de refrigeración en sector terciario	0,595
Medida 6 - O	Implementación Portafolio Resolución 549 Residencial	0,592
Medida 13 - O	Sustitución de equipos de aire acondicionado en el sector residencial	0,556
Medida 17 - O	Implementación de distritos térmicos	0,556
Medida 15 - O	Cambio de estufas de gas natural por estufas de inducción sector residencial	0,505
Medida 4 - O	Implementación Portafolio Resolución 549 Educación	0,425
Medida 1 - O	Implementación Portafolio Resolución 549 Oficinas	0,415
Medida 16 - O	Generación eléctrica con paneles solares en el sector residencial	0,403
Medida 5 - O	Implementación Portafolio Resolución 549 Hospitales	0,372
Medida 2 - O	Implementación Portafolio Resolución 549 sector comercial	0,325
Medida 9 - O	Sustitución de equipos de acondicionamiento de espacios en el sector terciario	0,319
Medida 10 - O	Sustitución de bombas de calor	0,316
Medida 3 - O	Implementación Portafolio Resolución 549 Hoteles	0,204
Medida 12 - O	Sustitución de ventiladores en el sector residencial	0,192
Medida 14 - O	Sustitución de televisores en el sector residencial	0,083

Fuente: elaboración propia.

#### 4. Resultados del portafolio de mitigación

A partir de las medidas de mitigación evaluadas<sup>3</sup>, se conformó un portafolio buscando el conjunto de medidas que permitiera la máxima mitigación de emisiones GEI posible. En este portafolio se consideraron únicamente acciones de mitigación no excluyentes y se ajustaron las medidas en los casos necesarios para evitar traslajos (ver Anexo 4).

El portafolio de máxima mitigación se comparó con las metas de reducción definidas por el Proyecto AENCC para los años 2030, 2040 y 2050.

##### 4.1. Resultados globales

El portafolio evaluado lleva a una reducción del 59% de las emisiones totales acumuladas en el BAU entre 2020 y 2050. La reducción de emisiones GEI que se logra cada año con el portafolio respecto al BAU es del 53% en 2030, de 73% en 2040 y 86% en 2050 (ver Figura 3).

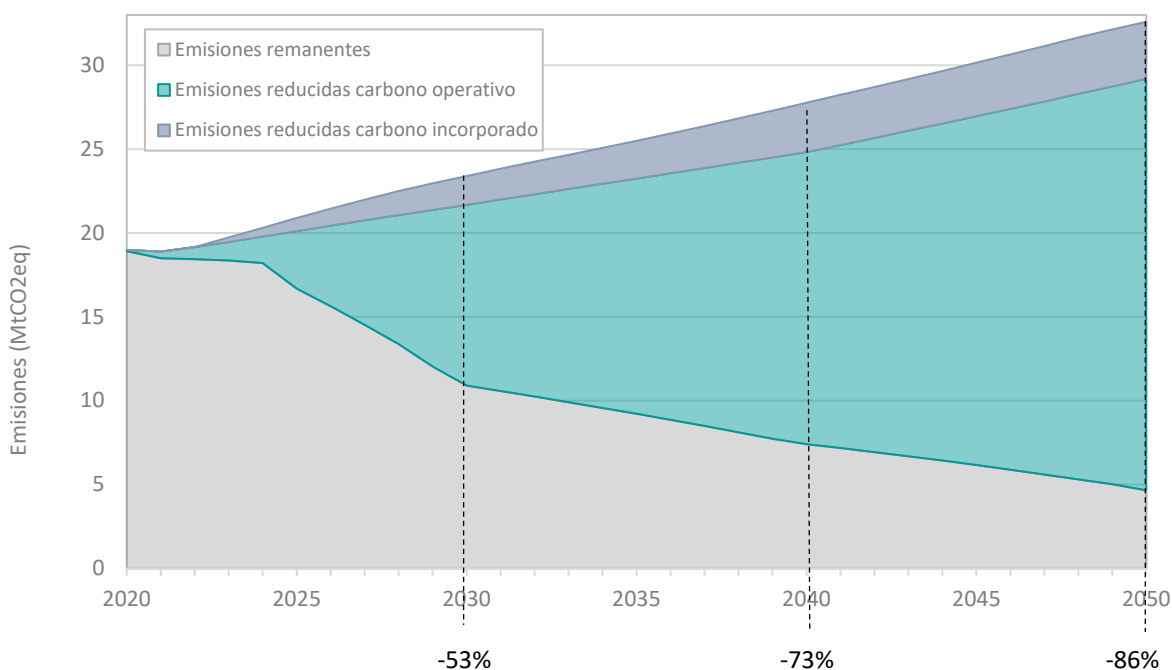


Figura 3. Emisiones GEI reducidas con el portafolio en carbono operativo e incorporado.

Fuente: elaboración propia.

El portafolio es ambicioso y genera una reducción de emisiones significativa, sobre todo después del año 2030. Sin embargo, con estas medidas de mitigación no se llega a emisiones cero. La franja gris en la Figura

<sup>3</sup> En este portafolio están incluidas 28 acciones de mitigación, las 24 del capítulo anterior más las cuatro que cuentan con sólo con potencial evaluado (Medidas: 10-I, 11-I, 1-C y 2-C) (estas cuatro no tienen análisis de costos).



3 muestra la magnitud de las compensaciones que se requerirían para lograr emisiones cero en los diferentes años del análisis, si solo se consideran las medidas incluidas en el portafolio.

En la Tabla 14 se presenta la comparación entre la mitigación que se alcanza con el portafolio y las metas definidas por el Proyecto AENCC para el carbono operativo. Este portafolio permite mitigaciones entre el 68% y el 94% en los diferentes segmentos para los años 2030, 2040 y 2050. De las seis metas en carbono operativo definidas por el Proyecto AENCC, se logran dos (resaltadas en amarillo en la Tabla 14) y las otras cuatro quedan a menos de 20 puntos porcentuales para su cumplimiento (resaltadas en azul en la Tabla 14).

En la Tabla 15 se muestran los resultados para el carbono incorporado. Con las medidas de mitigación que conforman el portafolio se alcanza un porcentaje de mitigación que oscila entre el 26% y el 53% de las metas propuestas por el Proyecto AENCC. En este caso ninguna meta se cumple.

Para cumplir con las metas definidas por el Proyecto AENCC quedarían por reducir con otras medidas, o por compensar, emisiones anuales hasta de 4.6 MtCO<sub>2</sub>eq considerando las brechas en carbono operativo más incorporado.

Tabla 14. Comparación entre la mitigación lograda con el portafolio y las metas del Proyecto AENCC en carbono operativo.

Año	Segmento	Meta en mitigación	Emisiones anuales línea base (MtCO <sub>2</sub> eq)	Meta en emisiones anuales (MtCO <sub>2</sub> eq)	Emisiones anuales con portafolio de mitigación (MtCO <sub>2</sub> eq)	Porcentaje alcanzado en mitigación	Brecha (MtCO <sub>2</sub> eq)
2030	Edificaciones nuevas - Estratos 5 y 6	100%	0.87	0.00	0.81	93%	0.06
	Edificaciones nuevas - Comercial e institucional	100%	1.96	0.00	1.56	80%	0.40
	Edificaciones nuevas - Residencial VIS y VIP + estratos 3 y 4	40%	2.90	1.16	1.98	68%	0
2040	Edificaciones nuevas	100%	10.86	0.00	9.25	85%	1.61
	Edificaciones existentes	40%	10.53	4.21	8.18	78%	0
2050	Edificaciones nuevas y existentes	100%	26.23	0	24.55	94%	1.68

Fuente: elaboración propia.

Tabla 15. Comparación entre la mitigación lograda con el portafolio y las metas del Proyecto AENCC en carbono incorporado.

Año	Segmento	Meta en mitigación	Emisiones anuales línea base (MtCO <sub>2</sub> eq)	Meta en emisiones anuales (MtCO <sub>2</sub> eq)	Emisiones anuales con portafolio de mitigación (MtCO <sub>2</sub> eq)	Porcentaje alcanzado en mitigación	Brecha (MtCO <sub>2</sub> eq)
2030	Edificaciones nuevas, obras de infraestructura y renovaciones	30%	6.60	4.62	4.87	26%	0.26
2040	Edificaciones nuevas, obras de infraestructura y renovaciones	70%	6.37	1.91	3.44	46%	1.53
2050	Edificaciones nuevas, obras de infraestructura y renovaciones	100%	6.36	0	2.96	53%	2.96

Fuente: elaboración propia.

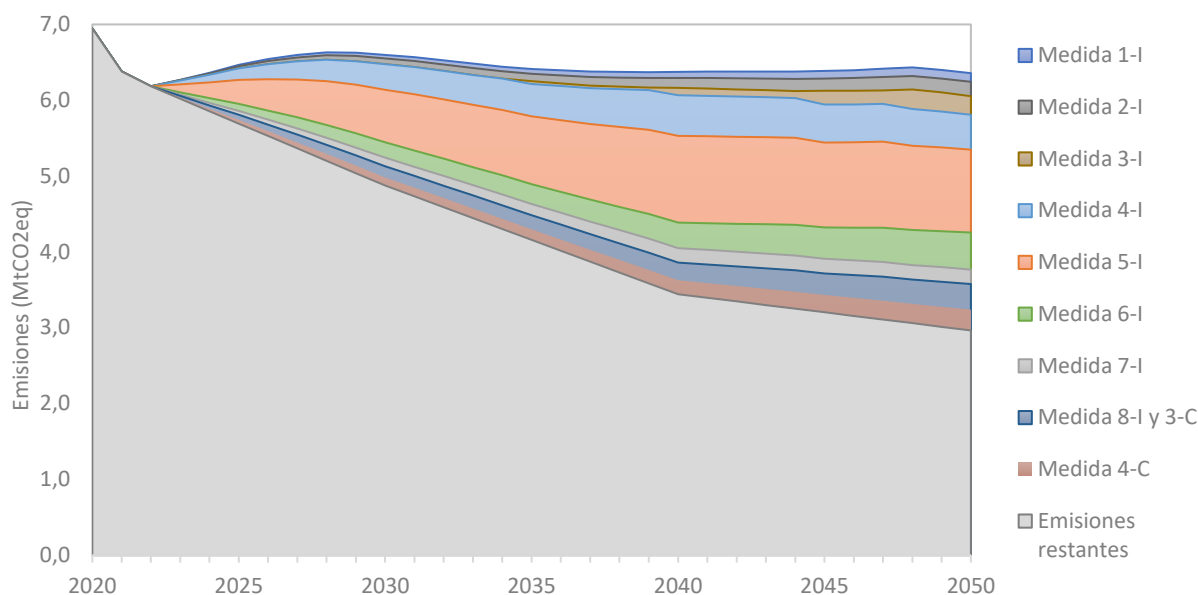
Las medidas de mitigación que conforman el portafolio cubren las fuentes más relevantes de emisión del sector, abarcando más del 80% de las emisiones que hacen parte del escenario BAU de emisiones GEI del sector de edificaciones. Es decir que aún queda un potencial por explorar.

En cuanto al carbono operativo, si bien al final del periodo de análisis la mayor parte de los usos finales de la energía ya están electrificados, y en las medidas se incluyó una proporción de generación in-situ con renovables, la electricidad del Sistema Interconectado Nacional no es cero emisiones, lo que explica parte del remanente de emisiones. Otra proporción de las emisiones remanentes se explica porque no fue posible abarcar con las medidas el 100% de las fuentes de emisión, en algunos casos por limitaciones en la información disponible para caracterización de la línea base.

Por su parte, en relación con el carbono incorporado, el portafolio incluye acciones para las industrias de los principales materiales, medidas de sustitución de materiales y de reducción de la cantidad de materiales en obra, así como acciones para reducir las emisiones del transporte de los materiales. Sin embargo, estas medidas no son suficientes para generar grandes cambios en la industria de los materiales. La matriz energética resultante en la industria de los materiales analizados (cemento, acero, vidrio, ladrillos), con la aplicación del portafolio, continúa con una participación predominante de los fósiles durante todo el periodo de análisis. Esto también explica por qué se logran mayores mitigaciones en el carbono operativo respecto al incorporado con el portafolio analizado.

## 4.2. Resultados del portafolio en carbono incorporado

En la Figura 4 se muestran las emisiones que se reducen con el portafolio en carbono incorporado y las emisiones remanentes durante el periodo de análisis.



*Medida 1 – I: Ahorro de emisiones en la producción de clinker - Combustibles alternativos (Cemento); Medida 2 – I: Ahorro de emisiones en cemento y aglutinantes - Reducción del factor clinker-cemento; Medida 3 – I: Captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> - Tecnología de post-combustión (Cemento); Medida 4 – I: Mejorar el acceso a viviendas de bajo costo (reducción informalidad); Medida 5 – I: Optimización en el diseño de las edificaciones; Medida 6 – I: Sistemas constructivos alternativos – Madera estructural; Medida 7 – I: Remodelación de edificaciones existentes; Medida 8 – I: Sustitución de vehículos por nuevas tecnologías (transporte carretero); Medida 3 – C: Sustitución de combustibles en transporte marítimo para materiales; Medida 4 – C: Sustitución de maquinaria amarilla por tecnologías de bajas emisiones.*

Figura 4. Emisiones GEI reducidas con el portafolio en carbono incorporado.

Fuente: elaboración propia.

El portafolio tiene una implementación gradual por lo cual la mayor proporción de mitigación respecto al BAU se da hacia el final del horizonte de análisis. En 2050 se logra una reducción del 53% de las emisiones anuales del carbono incorporado.

De las acciones que conforman el portafolio, las medidas que consisten en reducir la proporción de viviendas informales y la optimización en el diseño de las edificaciones, aportan el 60% de la mitigación del carbono incorporado. Le sigue por su aporte individual en las emisiones reducidas, el transporte de carga de bajas emisiones que representa el 10% de las emisiones mitigadas. Por su parte, las tres medidas de la industria del cemento contribuyen con el 12% de las emisiones reducidas.

Una descripción más detallada de cada una de las medidas de mitigación se presenta en el Anexo 3.

### 4.3. Resultados del portafolio en carbono operativo

En la Figura 5 se presentan las emisiones que se logran reducir con el portafolio en carbono operativo y las emisiones remanentes durante el periodo de análisis. En la Figura 6 se muestra la mitigación presentada según la clasificación utilizada en la definición de las metas del Proyecto AENCC.

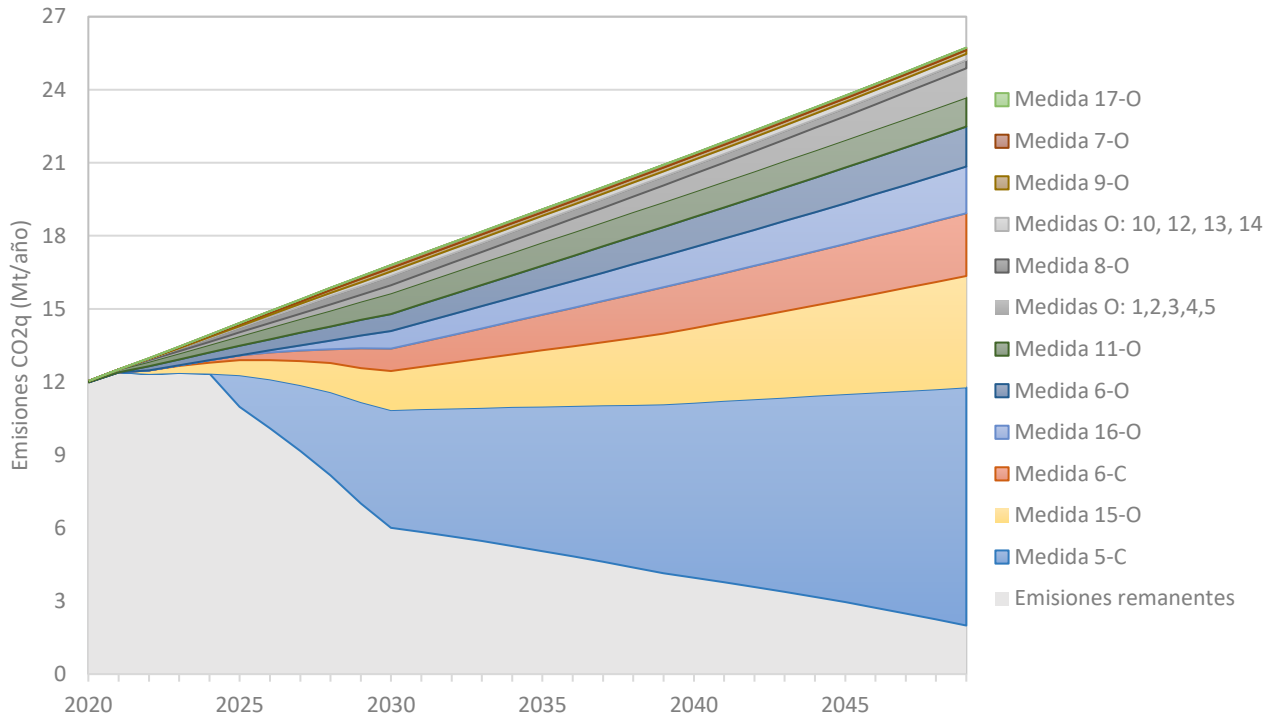
Con el portafolio evaluado la trayectoria de emisiones decrece rápidamente a partir del año 2025. Las medidas que conforman el portafolio llevan a una reducción del 94% de las emisiones del BAU en 2050.

La mitad del potencial de mitigación identificado (54%) corresponde a las acciones que afectan las viviendas de los estratos 1-4 (nuevas y existentes). Las acciones para el sector terciario contribuyen con el 36% de la mitigación. Las acciones enfocadas a las viviendas de los estratos 5 y 6 (nuevas y existentes) aportan el 10% del potencial de mitigación identificado para el carbono operativo.

Por tipo de medida, la implementación de la Resolución 549 de 2015<sup>4</sup> en el sector residencial y terciario aportaría el 11.5% del potencial identificado. El grupo de medidas de sustitución de equipos con mayor eficiencia energética en todos los subsectores representa el 10.4% de la mitigación que se logra en carbono operativo; la sustitución de gas natural por electricidad para cocción en sector residencial aporta el 17% del potencial; paneles solares en vivienda y distritos térmicos en sector comercial aportan el 7% de las emisiones reducidas. En este portafolio se incorporó el escenario de electricidad con bajas emisiones del Sistema Interconectado Nacional según lo propuesto en la NDC, y este es el factor que aporta en mayor medida en las emisiones evitadas por carbono operativo (42% de la mitigación del carbono operativo).

---

<sup>4</sup> El efecto de la Resolución 549 de 2015 se modeló incrementando la ambición en los ahorros de energía, teniendo en cuenta las mejores tecnologías disponibles en el país (ver Anexo 3).



Medida 1-O: Implementación Portafolio Resolución 549 Oficinas; Medida 2-O: Implementación Portafolio Resolución 549 sector comercial; Medida 3-O: Implementación Portafolio Resolución 549 Hoteles; Medida 4-O: Implementación Portafolio Resolución 549 Educación; Medida 5-O: Implementación Portafolio Resolución 549 Hospitales; Medida 6-O: Implementación Portafolio Resolución 549 Residencial; Medida 7-O: Sustitución de equipos de refrigeración en sector terciario; Medida 8-O: Sustitución de equipos de iluminación en el sector residencial y comercial; Medida 9-O: Sustitución de equipos de acondicionamiento de espacios en el sector terciario; Medida 10-O: Sustitución de bombas de calor; Medida 11-O: Sustitución de neveras en el sector residencial; Medida 12-O: Sustitución de ventiladores en el sector residencial; Medida 13-O: Sustitución de equipos de aire acondicionado en el sector residencial; Medida 14-O: Sustitución de televisores en el sector residencial; Medida 15-O: Cambio de estufas de gas natural por estufas de inducción sector residencial; Medida 16-O: Generación eléctrica con paneles solares en el sector residencial; Medida 17-O: Implementación de distritos térmicos; Medida 5 - C: Electricidad del sistema interconectado nacional de menor intensidad de carbono; Medida 6 - C: Sustitución de gas natural por electricidad en sector terciario.

Figura 5. Emisiones GEI reducidas con el portafolio en carbono operativo.

Fuente: elaboración propia.

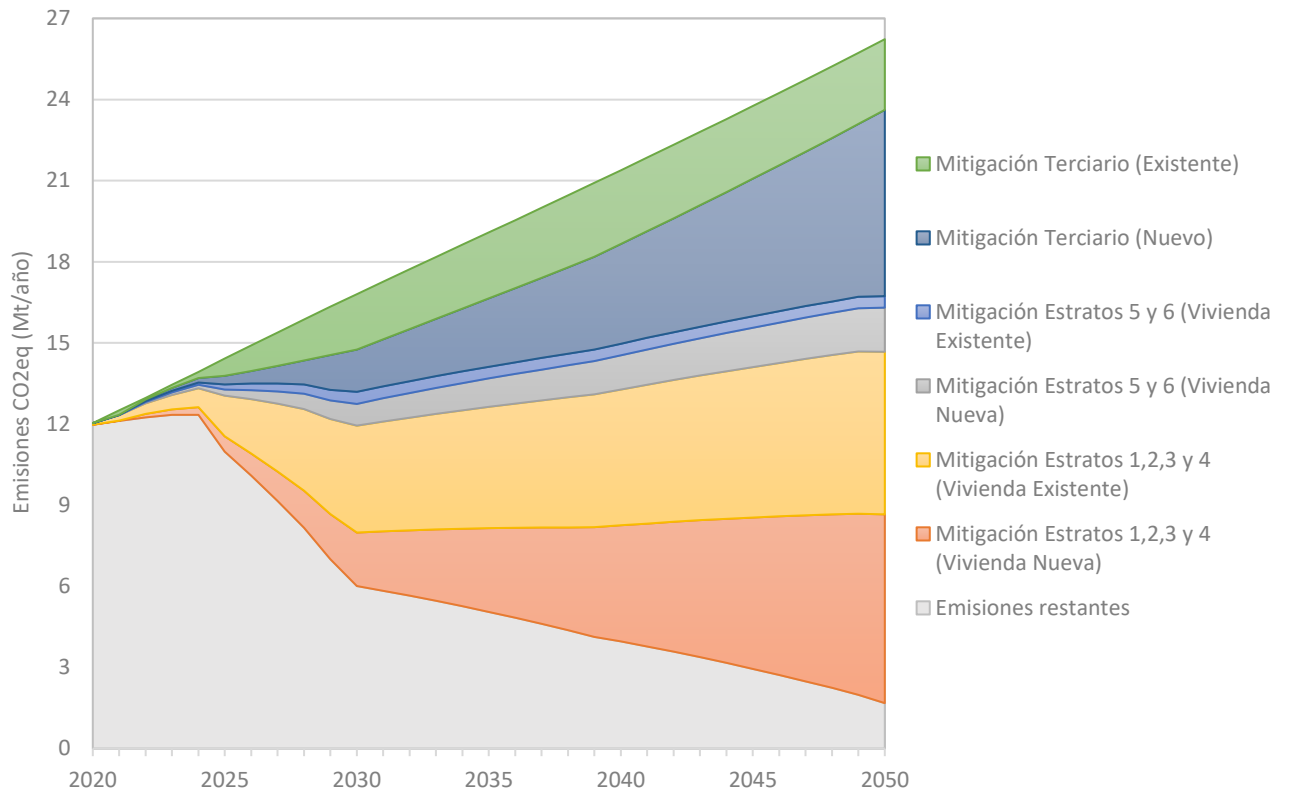


Figura 6. Emisiones GEI reducidas por subsector en el portafolio de carbono operativo.

Fuente: elaboración propia.

## 5. Mensajes finales

- *Técnicamente es posible aportar desde todas las etapas del ciclo de vida en la descarbonización de las edificaciones en Colombia.*

- Las acciones de mitigación de emisiones GEI identificadas y evaluadas en este estudio abarcan las emisiones GEI de todas las etapas del ciclo de vida de las edificaciones. Esto muestra que técnicamente es posible aportar desde todas las etapas en el logro de las metas de descarbonización del sector de edificaciones en Colombia.

- Las medidas de mitigación que se evaluaron en este estudio cubren las fuentes más relevantes de emisión del sector, abarcando más del 80% de las emisiones que hacen parte del escenario BAU de emisiones GEI del sector de edificaciones. Esto también muestra que aún queda un potencial por explorar en las fuentes que no se cubrieron en este análisis.

- *El portafolio de mitigación evaluado permite avanzar de manera significativa en el cumplimiento de las metas de descarbonización de las edificaciones en Colombia.*

- Con el portafolio de máxima mitigación, se logra reducir el 53%, 73% y 86% de las emisiones GEI anuales, en comparación con las emisiones de la línea base en 2030, 2040 y 2050, respectivamente.

- Con el portafolio de máxima mitigación se logra un avance significativo respecto a las metas de mitigación definidas por el Proyecto AENCC para carbono operativo, pero se requiere adicionar nuevas estrategias para lograr las metas en carbono incorporado:

- Dos de las seis metas en carbono operativo se cumplen, y las otras cuatro metas quedan a menos de 20 puntos porcentuales para su cumplimiento.

Año	Segmento	Meta en mitigación	Porcentaje alcanzado
2030	Edificaciones nuevas - Estratos 5 y 6	100%	93%
	Edificaciones nuevas - Comercial e institucional	100%	80%
	Edificaciones nuevas - Residencial VIS y VIP + estratos 3 y 4	40%	68%
2040	Edificaciones nuevas	100%	85%
	Edificaciones existentes	40%	78%
2050	Edificaciones nuevas y existentes	100%	94%

- En carbono incorporado no se cumple ninguna de las tres metas.

Año	Segmento	Meta en mitigación	Porcentaje alcanzado
2030	Edificaciones nuevas, obras de infraestructura y renovaciones	30%	26%
2040		70%	46%
2050		100%	53%

- Con el portafolio de máxima mitigación se reducen 467 Mt CO<sub>2</sub>eq entre 2020 y 2050.

- *Para lograr carbono-neutralidad hacia 2050 la brecha de emisiones es de 32 Mt CO<sub>2</sub>eq acumuladas entre 2045 y 2050.*

- Para cerrar la brecha entre el potencial de mitigación identificado y las metas propuestas en el Proyecto AENCC sería posible acelerar la implementación de las acciones de mitigación respecto a los tiempos propuestos en este análisis. También se podría aumentar la ambición de las acciones, para que tengan mayor cobertura respecto a la propuesta en este estudio. Finalmente, se requiere explorar el potencial de mitigación de las fuentes de emisión que no se cubrieron en este análisis (v.g., procesos de producción nacional del acero y vidrio; y procesos específicos y demanda de energía en la etapa de construcción de las edificaciones). La inclusión de acciones de mitigación que no se cubrieron en este análisis también podrá contribuir con el cierre de la brecha, en este sentido se resalta el potencial que podrían tener las soluciones basadas en naturaleza (EEA, 2021).

En cuanto al carbono operativo, si bien al final del periodo de análisis la mayor parte de los usos finales de la energía ya están electrificados, y en las medidas se incluyó una proporción de generación in-situ con renovables, la electricidad del Sistema Interconectado Nacional no es cero emisiones, lo que explica parte del remanente de emisiones.

Por su parte, la matriz energética de la industria de los materiales no tiene grandes cambios en el escenario de máxima mitigación, ni se está proponiendo una electrificación de dichas industrias (cemento, acero, vidrio, ladrillos), tampoco se evaluó una sustitución significativa o reducción de los materiales convencionales por otros de menores emisiones. Esto también explica por qué se logran mayores mitigaciones en el carbono operativo respecto al incorporado en 2050 en el escenario de máxima mitigación.

- *Más del 90% del potencial de mitigación de emisiones GEI identificado corresponde a acciones con costo marginal negativo, es decir que, desde un análisis de costos de las tecnologías y consumo energético, éstas son medidas gana-gana.*
  - 21 medidas de las 25 que se analizaron tienen costo incremental negativo.
  - Las medidas para mitigar carbono operativo son las que dominan el grupo de opciones con costo negativo. Estas medidas en general tienen altos costos de inversión, pero los ahorros en consumo de energía durante el periodo de análisis superan los de inversión. Los altos costos de inversión probablemente sean una de las principales barreras para su implementación.
  - En general, las acciones de mitigación para carbono operativo con costo negativo suponen ventajas para los usuarios de las edificaciones, por menores costos de operación derivados de una reducción del consumo energético.
  - Las medidas con costo negativo tienden a tener barreras de diversa naturaleza que será necesario identificar y solucionar para habilitar la implementación de estas acciones en los próximos años. Además de las barreras en costos de inversión, otras limitaciones pueden estar relacionadas con factores como falta de coordinación entre actores y entre instrumentos de política, necesidades en educación y capacitación en nuevas alternativas a lo largo de la cadena de las edificaciones, entre otros.
- *La mayor parte del potencial de mitigación identificado se concentra en el segmento residencial y en los estratos socioeconómicos bajo y medio.*



- Dentro del carbono operativo, el 54% del potencial de mitigación identificado corresponde a las acciones que afectan las viviendas de los estratos 1-4 (nuevas y existentes).
  - En el carbono incorporado, el 17% del potencial de mitigación proviene de la medida enfocada en mejorar el acceso a viviendas de bajo costo (reducción informalidad).
  - Las acciones enfocadas a las viviendas de los estratos 5 y 6 (nuevas y existentes) aportan el 10% del potencial de mitigación identificado para el carbono operativo.
- *La priorización de las medidas de mitigación considerando los seis criterios de evaluación permitió identificar cuáles acciones contribuyen a la mitigación del cambio climático al mismo tiempo que aportan en el logro de otros objetivos locales en términos socioeconómicos, de calidad de vida y ambientales y además para las cuales se percibe una mayor probabilidad en su factibilidad de implementación.*
    - Según los resultados del análisis con la función de utilidad, integrando los resultados de los seis criterios evaluados, las tres medidas más integrales en el caso del carbono incorporado son: i) mejorar el acceso a viviendas de bajo costo (reducción de la informalidad); ii) optimización del diseño de las edificaciones y iii) la remodelación de edificaciones existentes.

En el carbono operativo las tres medidas más integrales son: i) sustitución de neveras, ii) sustitución de equipos de iluminación (que también afecta al sector comercial) y iii) sustitución de equipos de refrigeración. La implementación de la Resolución 549 de 2015 en el sector residencial es la cuarta medida.
- *La participación activa de los representantes de los diferentes subsectores que hacen parte de la cadena de las edificaciones en el diseño de la Hoja de Ruta para la descarbonización de las edificaciones en Colombia muestra el interés por parte del sector en la mitigación del cambio climático.*
    - Durante el desarrollo de este análisis se observaron grandes diferencias dentro del sector de las edificaciones, mientras que algunos de los gremios y empresas que pertenecen al sector ya han incorporado estas prácticas de análisis de mitigación de emisiones GEI dentro de su planeación de mediano y largo plazo, en otros casos se observa que es un tema incipiente e inexistente. Sin embargo, el hecho de contar con la participación de un amplio grupo de expertos muestra que hay un interés en estos temas.
- *Parte de los esfuerzos requeridos para un mejor entendimiento de las oportunidades y necesidades del sector de las edificaciones en Colombia en términos de mitigación de emisiones GEI está relacionado con seguir mejorando la calidad de la información disponible.*
    - La falta de información detallada para la caracterización de la línea base explica en parte por qué para algunas fuentes de emisión no se analizaron opciones de mitigación en este estudio. Algunos ejemplos se resaltan a continuación:
      - i) Uso de energía en subsectores del terciario (bodegas, sector institucional y otros): no se cuenta con información desagregada para estos subsectores sobre los energéticos por uso final de la energía.

- ii) Demanda de energía en los procesos de construcción: de manera similar al caso anterior, si bien se cuenta con información sobre la demanda neta de energía y tipo de energético por unidad de área, hace falta información más detallada sobre las características de la maquinaria, y la intensidad de uso por tipo de edificación para poder analizar alternativas que generen una menor huella de carbono.
  - iii) Descarbonización de la industria de los materiales: en este estudio se evaluaron de manera cuantitativa las medidas de mitigación asociadas únicamente a la industria del concreto. Se esperaría poder replicar este análisis para los principales materiales constructivos para lo cual se requieren datos más completos y representativos de las industrias nacionales.
- A lo largo de los reportes de este estudio se resaltan oportunidades en mejora de la información para contar con una línea base más desagregada y más completa del sector de las edificaciones en Colombia. Contar con mejor información para el sector, también será relevante para hacer seguimiento a los avances en el cumplimiento de las metas de mitigación propuestas por el Proyecto AENCC.

## Referencias

- Cadena, A., Smith, R., Escallón, C., Espinosa, M., Guevara, J., Guzmán, L., ... Torres, O. (2020). Systemic perspectives on low-carbon cities in Colombia An integrated urban modeling approach for policy and regulatory analysis - Libro Blanco. Retrieved from [https://electricayelectronica.uniandes.edu.co/sites/default/files/proyectos/Libro\\_Blanco\\_DIC\\_Final\\_V2.pdf](https://electricayelectronica.uniandes.edu.co/sites/default/files/proyectos/Libro_Blanco_DIC_Final_V2.pdf)
- CAMACOL B&C. (2018). Informe Construcción Sostenible. Construcción sostenible - Informe 2018. Recuperado el 20 de 09 de 2020, de <https://ww2.camacolcundinamarca.co/documentos/informes/AECS2018-2.pdf>
- Celsia. (10 de 05 de 2021). Celsia. Obtenido de Celsia: <https://www.celsia.com/es/blog-celsia/te-explicamos-en-que-consiste-el-consumo-de-subsistencia/>
- CENAC & ASOCRETO. (2012). Estimación del consumo de materiales de construcción en la vivienda informal en Bogotá - Informe resultados.
- DANE. (2018). Censo Nacional de Población y Vivienda. Bogotá: DANE.
- Ecoingeniería. (2012). Determinación de propiedades físicas y, estimación del consumo energético en la producción, de acero, concreto, vidrio, ladrillo y otros materiales, entre ellos los alternativos y otros de uso no tradicional, utilizados en la construcción de edificaciones. Cali.
- Edwards, W. (1977). How to Use Multiattribute Utility Measurement for Social Decisionmaking. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 7(5), 326–340. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1977.4309720>
- Edwards, W., & Barron, F. H. (1994). Smarts and smarter: Improved simple methods for multiattribute utility measurement. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 60(3), 306–325. <https://doi.org/10.1006/obhd.1994.1087>
- EEA. (2021). Nature-based solutions in Europe: Policy, knowledge and practice for climate change adaptation and disaster risk reduction. <https://doi.org/10.2800/919315>
- Gmünder, S., Myers, N., Laffley, J., Rubio, L., & Belizario, S. (2018). Life Cycle Inventories of Cement, Concrete and Related Industries - Colombia and Peru. Bogotá.
- ISO. (2006). NTC ISO 14064-3. Gases de efecto invernadero. Parte 3: Especificación con orientación para la validación y verificación de declaraciones sobre gases de efecto invernadero.
- Moncaster, A., & Symons, K. (Febrero de 2013). A method and tool for 'cradle to grave' embodied carbon and energy impacts of UK buildings in compliance with the new TC350 standards. 66, 514-523. *Energy and Building*.
- National Association of Home Builders. (Febrero de 2007). Study of Life Expectancy of Home Components .
- Olson, D. L. (1997). Decision aids for selection problems. *Journal of the Operational Research Society*, 48(5), 541–542. <https://doi.org/10.1057/PALGRAVE.JORS.2600636>

- Ortiz-Rodríguez, Ó., Castells, F., & Sonnemann, G. (2012). Environmental Impact of the Construction and Use of a House: Assessment of Building Materials and Electricity End-Uses in a Residential Area of the Province of Norte de Santander, Colombia. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/262504797\\_Environmental\\_Impact\\_of\\_the\\_Construction\\_and\\_Use\\_of\\_a\\_House\\_Assessment\\_of\\_Building\\_Materials\\_and\\_Electricity\\_End-Uses\\_in\\_a\\_Residential\\_Area\\_of\\_the\\_Province\\_of\\_Norte\\_de\\_Santander\\_Colombia?enrichId=rgreq-22](https://www.researchgate.net/publication/262504797_Environmental_Impact_of_the_Construction_and_Use_of_a_House_Assessment_of_Building_Materials_and_Electricity_End-Uses_in_a_Residential_Area_of_the_Province_of_Norte_de_Santander_Colombia?enrichId=rgreq-22)
- Ramirez Vara, A. (2015). Modelo de Predicción de Demanda Convencional de Gas. Madrid.
- Rivera, F. (2020). Carbono incorporado en la construcción : estimación de emisiones asociadas a nuevas Viviendas de Interés Social y Prioritario en Bogotá, 2020-2030 . Universidad de Los Andes. Obtenido de <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/50972>
- SIN. (2017). FACTORES DE EMISION DEL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL COLOMBIA-SIN. Bogotá: UPME.
- Tecnoglass. (2018). ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION - PROCESSED GLASS.
- UPME. (2020). Plan energético nacional 2020-2050. Retrieved from <https://www1.upme.gov.co/Paginas/Plan-Energetico-Nacional-2050.aspx>

## Anexos

*Anexo 1. Matriz de relación entre acciones transformadoras y medidas de mitigación.*

Ver archivo Excel adjunto a este documento.

*Anexo 2. Identificación de acciones de mitigación de emisiones GEI para descarbonizar las edificaciones en Colombia.*

**i) Medidas de mitigación identificadas en diferentes fuentes de información nacionales e internacionales, que se analizaron en el presente estudio:**

1. Ahorro de emisiones en la producción de clinker - Combustibles alternativos (Cemento).
2. Ahorro de emisiones en cemento y aglutinantes - Reducción del factor clinker-cemento.
3. Captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> - Tecnología de post-combustión (Cemento).
4. Mejorar el acceso a viviendas de bajo costo (reducción informalidad).
5. Optimización en el diseño de las edificaciones.
6. Sistemas constructivos alternativos – Madera estructural.
7. Remodelación de edificaciones existentes.
8. Sustitución de vehículos por nuevas tecnologías (transporte carretero).
9. Sustitución de maquinaria amarilla por tecnologías de bajas emisiones.
10. Sustitución de combustibles (transporte marítimo).
11. Implementación Portafolio Resolución 549 Oficinas.
12. Implementación Portafolio Resolución 549 Sector Comercial.
13. Implementación Portafolio Resolución 549 Hoteles.
14. Implementación Portafolio Resolución 549 Educación.
15. Implementación Portafolio Resolución 549 Hospitales.
16. Implementación Portafolio Resolución 549 Sector residencial.
17. Sustitución de equipos de refrigeración en sector terciario.
18. Sustitución de equipos de iluminación en el sector residencial y terciario.
19. Sustitución de equipos de acondicionamiento de espacios en el sector terciario.
20. Sustitución de bombas de calor.
21. Sustitución de neveras en el sector residencial.
22. Sustitución de ventiladores en el sector residencial.
23. Sustitución de equipos de aire acondicionado en el sector residencial.
24. Sustitución de televisores en el sector residencial.
25. Cambio de estufas de gas natural por estufas de inducción sector residencial.
26. Generación eléctrica con paneles solares en el sector residencial.
27. Implementación de distritos térmicos.
28. Electricidad del sistema interconectado nacional de menor intensidad de carbono.

ii) Medidas de mitigación propuestas por los expertos del Proyecto AENCC en el taller del 18 de febrero de 2022:

1. Aprovechamiento de gas metano en rellenos sanitarios para generación de energía, uso de biodigestores y en general optimización de rellenos sanitarios al disminuir la disposición de RS en ellos.
2. Reincorporación de residuos de procesos constructivos e industriales en el ciclo de vida de la construcción. Por ejemplo, sustitución de agregados para concretos y el reemplazo parcial del cemento con cenizas.
3. Optimización en el diseño de las edificaciones y la remodelación de las edificaciones existentes desde el carbono operativo, adicional al carbono incorporado. Es muy relevante entender cuál es el potencial de mitigación del stock construido.
4. Implementación de infraestructura eléctrica para el impulso a la movilidad eléctrica.
5. Economía circular frente a reuso de materiales y demás medidas en la cadena de la construcción.
6. Evaluar medidas de mitigación para vivienda rurales.
7. Construcción con bambú y guadua.
8. Acciones de mitigación de emisiones GEI asociadas a los agregados.
9. Impacto en emisiones GEI de tener desarrollo urbano enfocado a transporte activo y público. Considerar el efecto de la morfología y las características urbanas de las áreas residenciales.

iii) Medidas de mitigación identificadas en diferentes fuentes de información nacionales e internacionales, que no se analizaron en el presente estudio:

1. Reducción de demanda de nuevos metros cuadrados a construir con edificaciones multifuncionales y edificaciones en las que se compartan múltiples áreas comunales (*co-living spaces* y *co-living housing complex*).
2. Aumento de captura de carbono en biomasa (Uniandes & CCCS, 2020): restauración ecológica de zonas verdes protegidas, reducción de áreas duras al interior de áreas verdes, plantación de árboles en zonas verdes públicas y privadas.
3. Sistemas de reuso de aguas grises (Uniandes & CCCS, 2020).
4. Sistemas urbanos de drenaje sostenible (Uniandes & CCCS, 2020).
5. Sistemas de aprovechamiento de aguas lluvia (Uniandes & CCCS, 2020).
6. Aislamiento del techo - Valor-U de 0.45 (Uniandes & CCCS, 2020).
7. Aislamiento térmico de losas de entrepiso - Valor-U de 0.45 (Uniandes & CCCS, 2020).
8. Sellamiento del 80% de las infiltraciones (Uniandes & CCCS, 2020).
9. Sustitución de ladrillos por bloques de tierra comprimida, o por bloques de tierra estabilizada con cemento (Uniandes & CCCS, 2020).
10. Reducción de pérdidas de electricidad en la transmisión (Uniandes & CCCS, 2020).
11. Optimización del tamaño de los conductores y disminución de caídas de tensión (CCCS, 2022).

12. Disminuir pérdidas en la operación de equipos eléctricos por reducción de cargas vampiro y otras ineficiencias (Uniandes & CCCS, 2020).
13. Medición inteligente (Uniandes & CCCS, 2020).
14. Cambio en patrones de comportamiento de los usuarios de las edificaciones sobre las temperaturas elegidas en los equipos de aire acondicionado, calefacción y la temperatura del agua caliente (EIA, 2021).
15. Análisis de materialidad de envolventes (cubiertas y fachadas) para mejorar la habitabilidad y el confort (Uniandes & CCCS, 2020).
16. Aislamiento térmico de los techos (Uniandes & CCCS, 2020).
17. Aumento de la proporción de vidrio en fachada exterior en sector residencial (Uniandes & CCCS, 2020).
18. Mejorar la proporción vidrio-fachada según el clima (CCCS, 2022).
19. Aislamiento térmico de paredes externas (Uniandes & CCCS, 2020).
20. Vidrio de alto rendimiento térmico (Uniandes & CCCS, 2020).
21. Aislamiento térmico de losas de entrepiso (Uniandes & CCCS, 2020).
22. Sellamiento de las infiltraciones (Uniandes & CCCS, 2020).
23. Incluir en actualizaciones de la Resolución 549 de 2015 requisitos sobre aislamiento térmico, proporción de vidrio en fachadas, aislamiento térmico de paredes externas, vidrio de alto rendimiento térmico, aislamiento térmico de losas de entrepiso y sellamiento de infiltraciones (CCCS, 2022).
24. Uso de pavimento asfáltico reciclado para infraestructura urbana (Uniandes & CCCS, 2020).
25. Consideración de efectos de interacción entre edificios en iluminación y sensación térmica dentro de las edificaciones (Uniandes & CCCS, 2020).
26. Cambio de planchas en el sector residencial con la mejor tecnología disponible (BEU, UPME).
27. Cambio de lavadoras en el sector residencial con la mejor tecnología disponible (BEU, UPME).
28. Cambio de secadoras en el sector residencial con la mejor tecnología disponible (CCCS, 2022).
29. Cambio de duchas eléctricas en el sector residencial con la mejor tecnología disponible (BEU, UPME).
30. Calentamiento de agua con colectores solares (CCCS, 2022).
31. Calentamiento de agua con calentadores eléctricos con la mejor tecnología disponible (CCCS, 2022).
32. Cambio de computadores de mesa y portátiles en el sector residencial con la mejor tecnología disponible (BEU, UPME).
33. Cambio de equipos de sonido en el sector residencial con la mejor tecnología disponible (BEU, UPME).
34. Cambio de hornos microondas en el sector residencial con la mejor tecnología disponible (BEU, UPME).
35. Cambio de reproductores de música y video en el sector residencial con la mejor tecnología disponible (BEU, UPME).



36. Arquitectura bioclimática: estrategias pasivas de ventilación natural en edificaciones.
37. El ciclo de vida de las nuevas edificaciones reincorpora residuos de construcción y demolición (RCD) aprovechables para alcanzar un 75% de residuos de construcción y demolición (RCD) aprovechables en peso total de los materiales usados (E2050, apuesta 28).
38. Formulación de la NAMA HÁBITAT: Implementación de acciones de mitigación en proyectos de mejoramiento integral de barrios (NDC, LE2 según BUR3).
39. Sistemas solares para calentamiento de agua.
40. Alumbrado en zonas públicas con tecnología solar.
41. Aprovechamiento energético del biogás generado en el tratamiento descentralizado de residuos sólidos municipales.
42. Sustitución de leña por gas para cocción en sector residencial.
43. Sustitución de maquinaria amarilla convencional por maquinaria a electricidad.
44. Sustitución de camiones de carga (transporte nacional) por camiones a hidrógeno.
45. Sustitución de una proporción del transporte de carga nacional por opciones multimodales (carretera-río-tren).
46. Sustitución de fósiles en transporte marítimo (transporte internacional) por hidrógeno.
47. Generación de electricidad con eólica en sistemas descentralizados (Cao et.al.).
48. Generación de electricidad con geotermia en sistemas descentralizados (Cao et.al.).
49. Generación de electricidad con bioenergía en sistemas descentralizados (Cao et.al.).
50. Distritos térmicos con opciones de generación de electricidad con eólica, geotermia y bioenergía (CCCS, 2022).
51. Generación de electricidad con paneles solares incorporados en ventanas.
52. Impresión 3D con concreto.
53. Uso de materiales avanzados y biomateriales para acabados en las edificaciones.
54. Captura y almacenamiento de carbono en la producción del acero (EIA, 2021).
55. Reducción del hierro con hidrógeno en la producción del acero (EIA, 2021).
56. Uso de hidrógeno para proveer el 10% de la energía térmica en la industria del cemento (EIA, 2021).
57. Sustitución de cemento y acero por nuevos materiales innovadores (EIA, 2021).
58. Sustitución de calderas a gas natural por hidrógeno para uso en edificaciones (EIA, 2021).

*Anexo 3. Fichas de las medidas de mitigación.*

Ver archivo Excel adjunto a este documento.

#### *Anexo 4. Interacciones entre las medidas de mitigación.*

### **Carbono Incorporado**

El portafolio de máxima mitigación considera la totalidad de las medidas de carbono incorporado. Durante la elaboración del portafolio se consideraron posibles traslapes entre medidas. Se resaltan las siguientes interacciones:

- Medidas 1,2 y 3 – I: Estas medidas corresponden a la mitigación de las emisiones asociadas al cemento y al concreto. Se consideraron traslapes entre la reducción del factor clinker y el uso de combustibles alternativos y en la captura y almacenamiento de carbono.
- Medida 4, 5 y 7 – I: Estas medidas reducen el consumo de material. Se consideran los traslapes entre cada una de estas medidas al igual que los traslapes asociados a la reducción de la cantidad de concreto (medidas 1,2 y 3 – I).
- Medida 6-I: Esta medida disminuye el número de edificaciones cubiertas por las medidas 4 y 5 - I. De igual manera, esta medida disminuye la cantidad de concreto (medidas 1,2 y 3 – I).
- Medida 8-I: Se consideraron las interacciones asociadas con las medidas que reducen la cantidad de material a transportar hacia y desde la obra (medida 4, 5, 6 y 7-I).
- Medida 1 - T: Se consideraron traslapes con las medidas de producción de concreto y de construcción en obra.

### **Carbono Operativo**

El portafolio de máxima mitigación considera la totalidad de las medidas de carbono operativo. En la elaboración del portafolio se consideraron posibles traslapes entre medidas. Se resaltan las siguientes interacciones entre medidas:

- Medida 7 – O incluye la sustitución de dispositivos de refrigeración en el sector terciario y medida 17-O incluye la implementación de distritos térmicos. Considerando esta interacción, la sustitución de dispositivos de refrigeración se realizó sobre el porcentaje del stock existente que no contaría con distritos térmicos en el futuro (96%-100%). La implementación de distritos térmicos se realizó en el stock restante.
- Medidas 1 a 7 incluyen la implementación de iluminación LED, considerando esto, la sustitución de bombillos solo se realizó en la parte del stock existente que todavía no cuenta con iluminación LED.
- Medida transversal 3 (Electricidad del sistema interconectado nacional de menor intensidad de carbono) interactúa con todas las medidas de carbono operativo.

### **Interacción de Medidas entre Carbono Incorporado y Operativo**

El portafolio definido considera medidas de mitigación asociadas tanto al carbono incorporado como al carbono operativo. En algunos casos, es posible que las medidas de mitigación asociadas a una de las etapas del ciclo de vida generen impactos ambientales en otras etapas. En particular, se encontraron tres tipos de medidas que podrían generar estas interacciones:

- Cambios en el diseño o del sistema constructivo de las edificaciones nuevas y reacondicionamiento de con miras a reducir el carbono incorporado pueden modificar el desempeño energético de las edificaciones (Medidas 4, 5, 6 y 7-I).
- Cambios en el comportamiento térmico de los materiales puede modificar el desempeño energético de las edificaciones (Medida 2-I).
- La implementación de medidas pasivas puede generar cambios con respecto a las cantidades de material utilizado y al carbono incorporado (Medida 1 a 6 – O).
- Dependiendo del alcance definido en el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), la sustitución de equipos puede generar cambios con respecto al carbono incorporado asociado al sistema de redes (Medidas 9-13).

Las interacciones previamente mencionadas no se han considerado ya que en algunos casos es necesario realizar modelaciones energéticas o contar con datos que tengan mayor grado de desagregación.

*Anexo 5. Priorización de las medidas de mitigación.*

Ver archivo Excel adjunto a este documento con la memoria de cálculo de la priorización.

*Anexo 6. Gestión integral de residuos sólidos desde las edificaciones.*

**Diseño de edificaciones en torno a la gestión integral de residuos sólidos municipales generados durante la operación**

La recolección diferenciada de residuos permite aumentar las tasas de aprovechamiento y la calidad de las materias primas obtenidas (Hoornweg & Bhada-Tata, 2012), razón por la que se busca promover los esquemas de almacenamiento temporal y recolección que permitan la separación de las diferentes fracciones a diversas escalas. De acuerdo con Seyring et al., 2015, el aprovechamiento de residuos puede realizarse aun separando en etapas posteriores (a través de sistemas de Tratamiento Mecánico Biológico).

Sin embargo, para la mayoría de las fracciones de los residuos (i.e. residuos orgánicos, papel, vidrio, plástico), la recolección diferenciada ha mostrado producir materias primas de mejor calidad, especialmente con sistemas de recolección en los que se separe residuos orgánicos aprovechables y residuos reciclables<sup>5</sup>.

En la tabla a continuación se presenta una compilación de buenas prácticas gestionables desde el diseño de las edificaciones que promueven la reducción en la generación de residuos (alternativa priorizada de acuerdo con la jerarquía de gestión de residuos<sup>6</sup>), la separación de diferentes fracciones que favorecen la recolección diferenciada, y el pretratamiento y aprovechamiento descentralizados. Es importante mencionar que existen diferencias en las alternativas más convenientes o factibles dependiendo el tipo de edificación (residenciales unifamiliares o multifamiliares, comerciales, institucionales).

*Tabla A 1. Compilación de buenas prácticas gestionables desde el diseño de edificaciones para la gestión integral de residuos sólidos.*

	Unidad de vivienda	Edificación	Grupo de edificaciones
<b>Reducción en la generación</b>	Diseño de almacenamiento de comida que minimice el desperdicio como estantería/cajones y neveras poco profundas (Mifflin et al., 2017).	Búsqueda de oportunidades para compartir espacio y equipos (i.e. lavadoras, espacios de trabajo, biblioteca, juguetes, gimnasio) (Mifflin et al., 2017).	
		Centro comunitarios de reciclaje, reprocesamiento y reúso de bienes como equipos electrónicos, ropa, zapatos y muebles (City of Copenhagen, 2019; Mifflin et al., 2017; NSW Environment Protection Authority, 2019).	
<b>Separación de las fracciones, almacenamiento</b>	Lineamientos sobre el espacio mínimo en la cocina destinado a contenedores para las	Puntos de depósito públicos* que pueden estar conectados a contenedores subterráneos o a sistemas neumáticos o de vacío. Los puntos de depósito para las diferentes fracciones de residuos deben estar agrupados y su ubicación debe permitir a los residentes acceder	

<sup>5</sup> De acuerdo con Seyring et al., 2015, la separación en la fuente de cada una de las **fracciones de residuos reciclables** (papel, plástico, metal y vidrio) permite reducir la contaminación de las materias primas y aumentar las tasas de reciclaje. Si esta opción no es factible, puede considerarse separar los residuos reciclables en dos fracciones: por un lado, papel y cartón (fibras); y, por el otro lado, plástico, vidrio y metales. En el caso de áreas urbanas densas o en las que se dificulte la recolección de múltiples fracciones de residuos, puede recolectarse los residuos reciclables mezclados y realizar posteriormente la separación.

<sup>6</sup> La jerarquía de la gestión de residuos clasifica como opción priorizada la reducción en la generación de residuos y el reúso, seguida por el reciclaje y el aprovechamiento bioquímico. Posteriormente se encuentra el aprovechamiento energético y, por último, las opciones con menor preferencia son el tratamiento y disposición final. (United States Environmental Protection Agency EPA, n.d.)

	Unidad de vivienda	Edificación	Grupo de edificaciones
<p><b>temporal y recolección</b></p>	<p>diferentes fracciones de residuos (residuos de alimento, residuos reciclables secos, residuos no aprovechables) dependiendo del número de habitaciones en cada unidad de vivienda (Eunomia Research &amp; Consulting, 2018).</p>	<p>fácilmente como parte de la ruta a las actividades diarias (Eunomia Research &amp; Consulting, 2018).</p>	
		<p>Sistemas neumáticos o de vacío para la recolección de residuos, en los que los residuos son transportados a través de una red de tuberías subterráneas hacia un centro de recolección centralizado que puede ubicarse a una distancia hasta a 2.5 km. Estos sistemas son recomendados en desarrollos densamente poblados, por ejemplo, en desarrollos urbanos con al menos 1.000 unidades de vivienda, en los que la construcción de la red de tuberías para el transporte de residuos no interfiera con la infraestructura subterránea existente (NSW Environment Protection Authority, 2019).</p>	
		<p>Espacio para almacenamiento temporal y preparación para reúso o reciclaje de residuos voluminosos (i.e. colchones, muebles (Eunomia Research &amp; Consulting, 2018; NSW Environment Protection Authority, 2019).</p>	<p>Contenedores subterráneos separados por fracción. Por encima del nivel del suelo la estructura visualmente se asemeja a contenedores de tamaño estándar con una abertura para depositar los residuos. Estas se conectan a contenedores subterráneos con gran capacidad de almacenamiento (generalmente 5.000 L) (Eunomia Research &amp; Consulting, 2018). Pueden ser útiles en sitios en los que las edificaciones o unidades de vivienda no cuentan con espacio suficiente para almacenamiento de residuos o en los que se dificulta el acceso de un camión recolector. Este sistema ocupa poca área superficial y permite disminuir el desplazamiento de camiones recolectores en áreas residenciales al centralizar la recolección. Sin embargo, se requiere energía para elevar los contenedores en el momento de la recolección y vehículos recolectores especialmente diseñados o</p>
	<p>Recipientes separados para cada fracción de residuos instalados dentro de la unidad de vivienda. Por ejemplo, cajones que contengan contenedores separados para residuos orgánicos aprovechables, residuos reciclables y residuos no aprovechables (Mifflin et al., 2017).</p>	<p>Para edificaciones en las que se utilice chutes (ductos verticales en los que la gravedad permite el transporte de residuos), puede instalarse uno o múltiples ductos (para una o varias de las fracciones separadas en la fuente). Con el chute individual, éste puede utilizarse al mismo tiempo en varios pisos y se emplearía para transportar únicamente los residuos no aprovechables, mientras que los residuos aprovechables (orgánicos e inorgánicos) deben ser transportados por las personas hasta el centro de acopio. Con un único chute, también pueden adaptarse sistemas que separen las diferentes fracciones de residuos al final del ducto y las depositen en contenedores diferenciados. Los costos son mayores para esta alternativa y no pueden usarse varias puertas del chute al mismo tiempo, sin embargo, representa una opción para incorporar el transporte separado de las fracciones de residuos en un edificio que cuente con un solo ducto sin necesidad de renovarlo (Mifflin et al., 2017).</p>	

	Unidad de vivienda	Edificación	Grupo de edificaciones
	Diseño que considere el flujo de materiales en todo el edificio, teniendo en cuenta cantidad de residuos generados, rutas para mover las diferentes fracciones de residuos hasta los centros de acopio, equipo necesario, tareas del personal, diseño del espacio de almacenamiento y el procedimiento para la recolección (Mifflin et al., 2017).		adaptados (NSW Environment Protection Authority, 2019).
<b>Pretratamiento y aprovechamiento</b>	Trituradores en los desagües de las cocinas que maceran y diluyen los residuos de alimentos para evacuarlos en el sistema de alcantarillado. Este sistema desvía la fracción de residuos de alimentos del esquema de gestión de residuos sólidos, por ejemplo, de la disposición en rellenos sanitarios. Sin embargo, su uso se ha desincentivado en algunas ciudades debido al elevado consumo de agua y energía, el aumento en los costos para los consumidores debido a la carga orgánica adicional en el sistema de alcantarillado, el incremento en la disposición de grasas y aceites en las tuberías, y el limitado aprovechamiento de recursos (NSW Environment Protection Authority, 2019).	Compactadores para todas las fracciones de residuos si se encuentran separadas o para residuos reciclables mezclados que no contengan vidrio. Se usan para reducir el espacio de almacenamiento requerido y el espacio ocupado en el camión recolector (Mifflin et al., 2017; NSW Environment Protection Authority, 2019).	
		Prensas para cartón, metal y plástico, y trituradoras para vidrio, papel y plástico (Mifflin et al., 2017).**	
		Para residuos orgánicos***: - Lombricultura de residuos de alimentos excluyendo restos animales y lácteos.** - Compostaje in situ de residuos de alimentos, de poda y jardín.** - Deshidratadores en los que, a través de calentamiento y agitación, los residuos de alimento se descomponen o deshidratan rápidamente y reducen significativamente su volumen. Los residuos deshidratados son recolectados para posterior reúso o tratamiento adicional. - Maceradores en los que se trituran los residuos de alimentos reduciendo su volumen y convirtiéndolos en un lodo concentrado. El lodo se almacena en tanques y es recolectado y transportado por operadores autorizados a instalaciones de tratamiento como digestores anaerobios o composteras comerciales (Mifflin et al., 2017; NSW Environment Protection Authority, 2019). - Sistemas de digestión anaerobia en desarrollos urbanos de gran escala debido a complejidad de la instalación, el costo y las economías de escala. Existen experiencias de tecnología de digestión anaerobia a pequeña escala en instalaciones comerciales, tales como panaderías, en las que los residuos de alimento generados proveen energía eléctrica y térmica útil para los procesos productivos de las instalaciones (Eunomia Research & Consulting, 2018).	

\*Los puntos de depósito públicos son útiles para la separación de residuos en áreas densamente habitadas o con edificaciones de varios pisos. En el caso de zonas residenciales con viviendas individuales, la recolección diferenciada de residuos puerta a puerta ha permitido obtener residuos reciclables de mejor calidad y con menos impurezas de acuerdo con el estudio de los esquemas de recolección diferenciada de 28 capitales europeas. (Seyring et al., 2015)

\*\*La venta de las materias primas obtenidas en procesos de pretratamiento y aprovechamiento de residuos pueden representar eventuales beneficios económicos.



\*\*\*La viabilidad de la aplicación de estas tecnologías depende del tamaño de los desarrollos urbanos y la cantidad de residuos generados, la disponibilidad de personal capacitado para operar los sistemas de tratamiento, la calidad de la separación en la fuente de los residuos de alimentos, disponibilidad de operadores para el procesamiento posterior de los residuos, mercado para la venta de los insumos obtenidos o presencia de espacios verdes en las urbanizaciones en los que pueda aprovecharse el fertilizante. (NSW Environment Protection Authority, 2019)

### **Recopilación de buenas prácticas gestionables desde el sector, no generalizado en el contexto colombiano**

Respecto al estado actual en el país de la relación entre el diseño de las edificaciones y la gestión integral de residuos sólidos, el Decreto 2981 de 2013 “Por El Cual Se Reglamenta La Prestación Del Servicio Público de Aseo”, establece, entre otros aspectos: las obligaciones de los usuarios para el almacenamiento y presentación de residuos sólidos y las características de los recipientes a utilizar; los requerimientos para las unidades de almacenamiento colectivo de residuos sólidos y la necesidad de disponer de espacio suficiente para realizar el almacenamiento de los materiales cuando se realice actividades de separación de residuos; y los lineamientos para el almacenamiento, la recolección y el transporte selectivo de residuos para aprovechamiento. Las prácticas mencionadas en la compilación de la tabla anterior pueden servir como ejemplo de alternativas gestionables desde el diseño de edificaciones para cumplir con los requisitos y lineamientos establecidos por la legislación sobre la gestión de residuos sólidos y prestación del servicio público de aseo en el país.

Algunas iniciativas aplicables a nivel nacional han considerado la gestión integral de residuos como criterio en el diseño de edificaciones. Por un lado, la *Guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones* (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2015), incluye buenas prácticas en el sector de la construcción relacionadas con la separación de residuos tales como: garantizar en las cocinas de unidades residenciales un espacio mínimo para el almacenamiento de dos contenedores en los que separe los residuos secos y mojados; la instalación de dos vertederos verticales en las edificaciones de apartamentos para la separación de residuos; provisión de lugares de selección y almacenamiento de materiales reciclables y recomendaciones sobre sus dimensiones en función del área de la edificación. Por otro lado, el Observatorio de Vivienda de la Universidad de los Andes, dentro de su metodología para evaluar la calidad de la vivienda urbana a escala intermedia, incluye el indicador “Uso adecuado del recurso: Residuos sólidos”. En este indicador, no sólo se evalúa positivamente la existencia de un lugar con dimensiones y equipamiento suficientes para permitir la clasificación y reciclaje de los residuos, sino que, además, “se recomienda que el proyecto permita, a futuro, que se adopte un plan de manejo de residuos, proporcionando áreas donde esta actividad pueda desempeñarse cómodamente (clasificación, disposición, manejo y reutilización)” (Observatorio de Vivienda Universidad de los Andes, n.d.). Por último, sistemas de certificación como LEED V4 otorgan créditos a las edificaciones que incluyan estaciones de reciclaje o reúso dedicados a la separación, recolección y almacenamiento de materiales para reciclaje. También a proyectos que incluyan al menos una estación de compostaje y que establezcan un plan de uso posterior a la recolección, o proyectos que se ubiquen en zonas cubiertas por servicios locales de compostaje (USGBC, 2018).